



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente Direttore:
Prof. S. Seno

Laurea Magistrale in Conservazione della Biodiversità, Didattica e
Comunicazione Scientifica

**Analisi spaziale e consumo di suolo: un approccio
integrato di telerilevamento e GIS a supporto del
reporting ambientale nazionale**

Relatore:
Prof. Francesco Zucca

Correlatori:
Dott. Paolo De Fioravante
Dott. Pasquale Dichicco
Dott.ssa Alessandra Ordanini

Tesi di Laurea
Magistrale in Conservazione della
Biodiversità, Didattica e Comunicazione Scientifica
di EDOARDO BELLO
matr. 543566
Anno Accademico 2025/2026

Abstract

La presente tesi nasce dalla collaborazione con ISPRA nell'ambito delle attività annuali di monitoraggio del territorio nazionale, con particolare riferimento alla redazione del Rapporto sul consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. L'obiettivo principale del lavoro è descrivere e analizzare il processo integrato di rilevamento e analisi del consumo di suolo in Italia, attraverso l'utilizzo combinato di tecniche di telerilevamento, strumenti GIS e metodi di fotointerpretazione manuale, fino all'elaborazione degli indicatori statistici territoriali. Il consumo di suolo rappresenta uno dei principali fenomeni di degrado ambientale a scala nazionale ed europea, comportando la perdita irreversibile di superfici agricole e naturali, la riduzione dei servizi ecosistemici, l'aumento del rischio idrogeologico e la frammentazione degli habitat. In questo contesto, il monitoraggio sistematico e continuo delle trasformazioni territoriali assume un ruolo strategico, sia per la produzione di informazioni aggiornate sia per il supporto alle politiche di governo del territorio. Dal punto di vista metodologico, il lavoro segue le linee guida ISPRA-SNPA e si articola in più fasi. A partire dall'acquisizione e gestione di immagini satellitari — in particolare le missioni Sentinel del programma Copernicus — e ortofoto aeree, l'analisi è condotta in ambiente QGIS attraverso un approccio integrato che combina elaborazioni automatiche e controllo umano. La fotointerpretazione manuale costituisce il cuore del processo: attraverso il confronto sistematico di immagini multitemporali e l'utilizzo di una griglia di supporto, vengono individuate, verificate e digitalizzate le trasformazioni territoriali avvenute nel periodo di riferimento. Ogni poligono viene classificato secondo il sistema gerarchico ISPRA, che distingue tra consumo di suolo permanente e reversibile, e associato alla destinazione d'uso prevalente dell'intervento osservato. L'attività di fotointerpretazione è stata svolta con riferimento alla provincia di Trapani, contribuendo al processo di aggiornamento della cartografia nazionale. I risultati ottenuti hanno poi consentito l'elaborazione degli indicatori del consumo di suolo — assoluto, percentuale, pro-capite e velocità di trasformazione — analizzati a scala provinciale e comunale e confrontati con i trend regionali e nazionali. Un ulteriore approfondimento riguarda il fenomeno delle isole di calore urbane, strettamente connesso all'espansione delle superfici impermeabili nelle aree urbanizzate, analizzato come effetto diretto dei processi di artificializzazione del territorio monitorati. Il lavoro contribuisce a documentare e sistematizzare una metodologia operativa di grande rilevanza per il reporting ambientale nazionale, evidenziando come l'integrazione

tra telerilevamento, GIS e fotointerpretazione rappresenti ancora oggi un approccio insostituibile per garantire la qualità e l'affidabilità dei dati sul consumo di suolo in Italia.

Indice

Abstract	1
Indice	3
CAPITOLO 1 — Il consumo di suolo: definizione, monitoraggio e strumenti di analisi	5
1.1 Il consumo di suolo	5
1.2 Il monitoraggio del consumo di suolo in Italia	6
1.3 Telerilevamento e strumenti GIS applicati al monitoraggio del territorio	8
1.4 Fotointerpretazione e procedura di analisi	10
1.5 Classificazione delle trasformazioni territoriali nel monitoraggio del consumo di suolo	11
1.6 Criticità, limiti e ruolo dell'interpretazione umana	14
CAPITOLO 2 — Monitoraggio del consumo di suolo per la provincia di Trapani	16
2.1 Descrizione dell'area di studio	16
2.2 Report dell'attività di fotointerpretazione	19
2.2.1 Configurazione dello spazio di lavoro	19
2.2.2 Workflow di individuazione e digitalizzazione dei cambiamenti	20
2.2.3 Gestione dei casi dubbi: due esempi rappresentativi	22
2.2.4 Controlli di qualità	23
2.2.5 Riflessioni sull'attività svolta	24
CAPITOLO 3 — Calcolo e analisi degli indicatori del consumo di suolo	25
3.1 Indicatori e variabili di analisi: introduzione	25
3.2 Metodologia GIS per il calcolo degli indicatori	29
3.2.1 Caricamento dei dati di input	29
3.2.2 Rasterizzazione dei layer vettoriali	30
3.2.3 Allineamento dei raster al sistema di riferimento nazionale	32
3.2.4 Creazione dei raster del suolo consumato aggiornati (SC_2024R e SC_2025R)	33
3.2.5 Cross classification con i confini amministrativi	35
3.2.6 Riclassificazione binaria del suolo consumato	36
3.2.7 Il raster di cambiamento e l'incrocio con i cinque indicatori	39
3.2.8 Da QGIS a Excel: esportazione dei dati e costruzione delle tabelle pivot	40
3.3 Risultati del calcolo degli indicatori nell'area di studio	45
3.3.1 Il quadro generale del consumo di suolo	45
3.3.2 Incremento lordo, rinaturalizzazioni e composizione del nuovo consumo	47
3.3.3 Il consumo di suolo nelle aree naturali protette (EUAP)	48
3.3.4 Distribuzione del consumo di suolo rispetto alla fascia costiera	48
3.3.5 Distribuzione altimetrica del consumo di suolo (DEM)	51
3.3.6 Distribuzione del consumo di suolo rispetto alla pendenza (slope)	53
3.3.7 Popolazione e consumo di suolo pro capite	54
3.4 Discussione dei risultati e confronto con i trend regionali/nazionali	54
3.4.1 Un trend di crescita che si riaccende dopo una fase di rallentamento	55
3.4.2 Il ruolo trainante del consumo di suolo reversibile	56
3.4.3 Le aree protette: un risultato in linea con gli obiettivi europei	56

3.4.4 Un territorio che continua a crescere "verso l'interno"	57
3.4.5 Il disaccoppiamento tra popolazione e consumo di suolo	57
3.4.6 Sintesi.....	57
CAPITOLO 4 — Le isole di calore urbane (Urban Heat Island): un approfondimento nel contesto del consumo di suolo.....	58
4.1 Definizione e meccanismi di formazione delle isole di calore urbane.....	58
4.2 Il legame tra consumo di suolo e isole di calore	59
4.3 Il monitoraggio delle isole di calore tramite telerilevamento	60
4.4 Strategie di mitigazione: infrastrutture verdi, blu e altre soluzioni basate sulla natura	61
4.5 Un'esperienza diretta sul campo: il Blended Intensive Programme di Iași	62
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	64
Riferimenti normativi	67

CAPITOLO 1 — Il consumo di suolo: definizione, monitoraggio e strumenti di analisi

1.1 Il consumo di suolo

In Italia il consumo di suolo consiste nella trasformazione di aree agricole e naturali in superfici artificiali, un processo legato principalmente all'espansione urbana e alla realizzazione di nuove infrastrutture (ISPRA, 2024). Questa trasformazione, che può essere permanente o temporanea, comporta la perdita di habitat naturali e di importanti servizi ecosistemici forniti dal suolo (ISPRA, 2024). Tra le principali conseguenze vi sono la riduzione della capacità di infiltrazione dell'acqua e il conseguente aumento del rischio di alluvioni (Tóth et al., 2022), la frammentazione degli habitat e la perdita di biodiversità (Camerini, 2018; EEA, 2024). Inoltre, la crescente diffusione di superfici impermeabili nelle aree urbanizzate contribuisce ad accentuare il fenomeno delle isole di calore urbane (Tóth et al., 2022), aspetto che sarà ripreso e approfondito nel Capitolo 4. Per questo motivo è fondamentale monitorare costantemente il fenomeno attraverso immagini satellitari e attività di fotointerpretazione, così da aggiornare e migliorare la conoscenza delle trasformazioni territoriali in atto (SNPA, 2024).

Il consumo di suolo è legato soprattutto alla realizzazione di nuovi insediamenti, infrastrutture e aree produttive, che nel tempo occupano porzioni sempre maggiori di territorio (ISPRA, 2022; SNPA, 2024). Le trasformazioni possono essere permanenti, come nel caso di strade asfaltate, edifici o piazzali cementati, oppure reversibili, ad esempio nelle aree di cantiere temporanee o in alcune tipologie di coperture rimovibili, come gli impianti fotovoltaici a terra (SNPA, 2024).

La progressiva riduzione delle superfici agricole e naturali comporta diverse conseguenze dal punto di vista ambientale. Tra queste vi è la perdita della capacità del suolo di assorbire l'acqua piovana, con un conseguente aumento del rischio idraulico e dei fenomeni di allagamento (Tóth et al., 2022). L'espansione delle aree artificiali contribuisce inoltre alla frammentazione degli habitat naturali e alla diminuzione della biodiversità, compromettendo in alcuni casi anche aree di particolare valore ecologico (Camerini, 2018; EEA, 2024). Un ulteriore effetto riguarda l'aumento delle temperature nelle aree urbanizzate: le superfici impermeabili tendono infatti ad accumulare calore e a rilasciare meno umidità rispetto ai suoli naturali, favorendo il fenomeno delle isole di calore urbane (Tóth et al., 2022).

Il fenomeno assume una rilevanza particolare se osservato alla luce dei dati nazionali più recenti. Secondo l'ultimo Rapporto SNPA, nel 2023 la superficie occupata da coperture artificiali in Italia ha superato i 21.500 km², pari a circa il 7,16% del territorio nazionale, con un ritmo di trasformazione che nel 2024 si è attestato attorno a circa 20 ettari al giorno, il valore più elevato registrato negli ultimi anni (ISPRA-SNPA, 2024). Il consumo riguarda in misura prevalente le aree agricole, interessate per oltre il 60% delle nuove trasformazioni, con una progressione particolarmente marcata nelle regioni del Nord Italia (ISPRA-SNPA, 2024). Questi dati hanno spinto le istituzioni europee e nazionali a fissare obiettivi di contenimento del fenomeno: l'Unione Europea, attraverso il Settimo e l'Ottavo Programma d'Azione Ambientale, ha indicato come traguardo l'azzeramento del consumo netto di suolo (no net land take) entro il 2050, obiettivo ripreso a livello nazionale dal Piano per la Transizione Ecologica (PTE) e sostenuto, sul piano finanziario, dal Fondo per il contrasto del consumo di suolo istituito dalla Legge di Bilancio 2023 (art. 1, commi 695-696, L. 197/2022).

Alla luce di questi impatti, il monitoraggio del consumo di suolo assume oggi un ruolo fondamentale. L'utilizzo di immagini satellitari, come quelle del programma Sentinel, insieme agli strumenti GIS e alle attività di fotointerpretazione, consente di individuare e verificare le trasformazioni territoriali nel tempo, contribuendo ad aggiornare in modo continuo le informazioni sulla copertura del suolo (SNPA, 2024).

1.2 Il monitoraggio del consumo di suolo in Italia

In Italia il monitoraggio del consumo di suolo è affidato al Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), istituito dalla Legge 28 giugno 2016, n. 132 ed entrato in vigore il 14 gennaio 2017. La legge ha riorganizzato il sistema dei controlli ambientali italiani, riunendo in una rete unica ISPRA e le Agenzie regionali e delle Province autonome per la protezione dell'ambiente (ARPA/APPA), che complessivamente costituiscono ventidue enti: non una semplice somma di soggetti autonomi, ma un vero e proprio Sistema a rete, con compiti tecnico-scientifici omogenei su tutto il territorio nazionale (SNPA, s.d.). Tra le funzioni attribuite dall'art. 3 della legge rientra esplicitamente il monitoraggio dello stato dell'ambiente e del consumo di suolo, da svolgersi attraverso reti di osservazione e strumenti modellistici (Legge 132/2016, art. 3, comma 1, lett. a). Il coordinamento tecnico di questa attività è affidato a una specifica Rete tematica del SNPA, composta da referenti

ISPRA e ARPA/APPA, che definisce le modalità operative del monitoraggio a livello nazionale, regionale e comunale (SNPA, 2024).

Fino al 2016 il monitoraggio si basava su una rete di rilevamento campionaria composta da circa 190.000 punti distribuiti sul territorio nazionale. A partire dal 2017, grazie alla crescente disponibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione, in particolare quelle del programma europeo Copernicus e delle missioni Sentinel, il monitoraggio è passato a un approccio integralmente cartografico, che consente di rappresentare il fenomeno con continuità su tutto il territorio nazionale anziché per soli punti campione; la vecchia rete campionaria viene oggi mantenuta unicamente come strumento di validazione dei risultati (SNPA, 2024).

Il sistema di classificazione adottato da ISPRA e SNPA distingue le trasformazioni rilevate in due macrocategorie: il consumo di suolo permanente, articolato in otto classi (edifici, strade pavimentate, ferrovie, aeroporti, porti, altre aree impermeabili, serre permanenti, discariche), e il consumo di suolo reversibile, articolato in sei classi (strade non pavimentate, cantieri, aree estrattive, cave in falda, impianti fotovoltaici a terra, altre coperture temporanee) (SNPA, 2024), una struttura che verrà ripresa e descritta nel dettaglio nel paragrafo 1.5, poiché rappresenta la base della classificazione utilizzata anche nel lavoro di fotointerpretazione svolto per la provincia di Trapani.

Per individuare le nuove trasformazioni del territorio vengono utilizzate immagini satellitari e ortofoto acquisite in periodi differenti. Il confronto tra immagini di anni diversi consente infatti di riconoscere le aree che hanno subito modifiche e che, in alcuni casi, sono passate da una copertura naturale o agricola a una superficie artificiale. Questo lavoro viene svolto con il supporto di strumenti GIS e dei dati messi a disposizione dal programma europeo Copernicus, in particolare dalle missioni Sentinel.

Sebbene una parte dell'analisi sia basata su procedure automatizzate, che producono maschere preliminari di possibili cambiamenti, il controllo da parte dell'operatore rimane fondamentale. Le aree individuate come possibili cambiamenti vengono infatti verificate attraverso attività di fotointerpretazione, che permettono di confermare le trasformazioni effettivamente avvenute e di correggere eventuali errori di classificazione.

I risultati di queste attività confluiscono ogni anno in due prodotti principali. Il primo è il Rapporto sul consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici, pubblicato

annualmente a cura della Rete tematica SNPA sulla base del lavoro di fotointerpretazione, classificazione e produzione cartografica svolto da ISPRA e dalle Agenzie regionali: il documento presenta indicatori tematici (incremento percentuale del suolo consumato, densità di consumo di suolo netto, velocità di trasformazione) a scala nazionale, regionale e comunale, oltre ad approfondimenti su specifiche dinamiche territoriali, come le aree a pericolosità idraulica, le aree protette e le fasce costiere (Munafò, 2022; ISPRA-SNPA, 2024). Il secondo è l'Atlante nazionale del consumo di suolo, giunto all'edizione 2023, che raccoglie 41 tavole tematiche a scala 1:250.000 con la rappresentazione cartografica del fenomeno sull'intero territorio nazionale (ISPRA, 2024). Entrambi i prodotti, insieme alle cartografie shapefile e ai microdati storici disaggregati a livello comunale, sono resi disponibili in formato aperto attraverso il portale geografico nazionale Consumosuolo.it e il SINAnet, il sistema informativo nazionale ambientale del SNPA, garantendo l'accessibilità dei dati alla comunità scientifica e istituzionale (ISPRA, 2024).

Per garantire che il monitoraggio sia svolto in modo uniforme su tutto il territorio nazionale, SNPA ha definito specifiche Linee guida per il monitoraggio del consumo di suolo, pubblicate per la prima volta e successivamente aggiornate, da ultimo nell'edizione 2024, dalla Rete tematica competente. Le Linee guida regolano le diverse fasi del processo, dall'elaborazione iniziale delle immagini satellitari fino alle verifiche finali tramite fotointerpretazione, definendo procedure operative comuni, criteri di classificazione e standard di qualità del dato cartografico (SNPA, 2024; ISPRA, 2024). Questo approccio consente di mantenere nel tempo una buona coerenza dei dati e di aggiornare con continuità la cartografia nazionale del consumo di suolo, requisito essenziale per poter confrontare le dinamiche territoriali di anni e aree diverse, come avviene, nel presente lavoro, per il confronto tra le annualità 2024 e 2025 nella provincia di Trapani.

1.3 Telerilevamento e strumenti GIS applicati al monitoraggio del territorio

Monitorare in modo continuo le trasformazioni del territorio sarebbe estremamente complesso se ci si affidasse esclusivamente a rilievi sul campo. Per questo motivo, negli ultimi anni il telerilevamento è diventato uno degli strumenti più utilizzati per studiare l'evoluzione della copertura del suolo e individuare i cambiamenti che avvengono nel tempo.

La disponibilità di immagini satellitari e ortofoto aggiornate permette infatti di osservare vaste aree territoriali in maniera rapida e sistematica. Confrontando immagini acquisite in

anni diversi è possibile riconoscere nuove urbanizzazioni, infrastrutture, aree produttive o altre trasformazioni che comportano una modifica dell'uso del suolo. Questo approccio è particolarmente utile nel monitoraggio del consumo di suolo, dove l'obiettivo è individuare con precisione le superfici che hanno subito processi di artificializzazione.

Tra le principali fonti utilizzate rientrano le ortofoto aeree e le immagini satellitari del programma Copernicus, in particolare quelle della missione Sentinel-2, un sensore multispettrale dotato di 13 bande a diversa risoluzione spaziale (4 bande a 10 m, 6 a 20 m, 3 a 60 m), caratteristiche che lo rendono particolarmente adatto al riconoscimento di variazioni nella copertura del suolo su vasta scala (ESA, 2026). Questi dati, disponibili con continuità e aggiornati periodicamente, consentono di seguire nel tempo l'evoluzione del territorio e rappresentano oggi una risorsa fondamentale per numerose applicazioni ambientali e territoriali (Gentile et al., 2023).

Per organizzare e analizzare tutte queste informazioni vengono utilizzati i GIS (Geographic Information Systems), software che permettono di gestire dati geografici provenienti da fonti differenti. In questo ambito QGIS rappresenta uno degli strumenti più diffusi, sia per la sua flessibilità sia per la natura open-source del software sia per la possibilità di integrare immagini satellitari, ortofoto e dati vettoriali all'interno dello stesso progetto.

L'utilizzo di questi strumenti non si limita però alla semplice visualizzazione delle immagini. Una volta raccolti e organizzati i dati, è possibile confrontare situazioni riferite a periodi diversi e individuare le aree che presentano possibili cambiamenti. In questa fase entrano in gioco le attività di fotointerpretazione, attraverso le quali l'operatore analizza le immagini e valuta se le differenze osservate corrispondano effettivamente a trasformazioni del territorio.

Nonostante negli ultimi anni siano stati sviluppati numerosi metodi automatici per il riconoscimento dei cambiamenti, il contributo dell'operatore rimane ancora essenziale. Alcune trasformazioni possono infatti risultare difficili da interpretare automaticamente e richiedono una verifica visiva per evitare errori di classificazione o attribuzioni non corrette. Per questo motivo il monitoraggio del consumo di suolo si basa spesso su un approccio integrato, in cui elaborazioni automatiche e controlli manuali vengono utilizzati in modo complementare (Gentile et al., 2023; SNPA, 2024).

L'integrazione tra telerilevamento, GIS e fotointerpretazione rappresenta quindi la base metodologica delle attività di monitoraggio territoriale. Proprio questi strumenti

costituiscono il punto di partenza anche per il lavoro descritto nei paragrafi successivi, dedicati alla procedura di fotointerpretazione utilizzata nell'ambito delle attività svolte in collaborazione con ISPRA.

1.4 Fotointerpretazione e procedura di analisi

La fotointerpretazione manuale rappresenta una fase fondamentale nell'aggiornamento della cartografia del consumo di suolo, poiché consente di individuare e verificare direttamente le trasformazioni avvenute sul territorio tra un anno e l'altro. L'attività si basa sull'analisi di ortofoto e immagini satellitari visualizzate all'interno di un ambiente GIS, dove il fotointerprete confronta la situazione osservata in anni differenti per individuare eventuali cambiamenti e aggiornare di conseguenza la cartografia.

Per rendere il controllo più sistematico, l'area di lavoro viene suddivisa in una griglia di supporto composta da celle territoriali, nelle Linee guida SNPA tipicamente di 2 km di lato, che permette di esaminare progressivamente l'intero territorio senza trascurare alcuna area e di organizzare in modo più efficiente le attività di controllo (SNPA, 2024).

All'interno di QGIS viene caricato il progetto predisposto da ISPRA, che comprende ortofoto, immagini satellitari, layer di supporto e maschere preliminari dei possibili cambiamenti. Attraverso il confronto tra immagini riferite a due anni consecutivi, il fotointerprete verifica la presenza di trasformazioni effettive e valuta se queste siano riconducibili a fenomeni di consumo di suolo. Quando il cambiamento viene confermato, si procede alla digitalizzazione manuale di poligoni e alla successiva compilazione degli attributi necessari per descrivere correttamente la trasformazione osservata.

Particolare attenzione viene posta alla classificazione delle diverse tipologie di cambiamento. Edifici, piazzali, infrastrutture e altre superfici artificiali vengono infatti rappresentati come elementi distinti e classificati secondo le regole previste dalla legenda utilizzata nel monitoraggio nazionale del consumo di suolo. Per ciascun poligono vengono registrate le informazioni relative all'uso del suolo precedente e a quello successivo alla trasformazione, così da ricostruire correttamente l'evoluzione dell'area nel tempo.

Non tutte le situazioni risultano immediatamente interpretabili. In presenza di casi dubbi o particolarmente complessi, il confronto tra le sole ortofoto può non essere sufficiente e si rende necessario consultare ulteriori fonti informative, come immagini storiche disponibili tramite Google Earth o altri dati satellitari, aspetto che, come si vedrà nel Capitolo 2, si è

rivelato determinante anche nell'ambito dell'attività di fotointerpretazione svolta per la provincia di Trapani. Questo passaggio permette di ridurre le incertezze interpretative e di migliorare l'affidabilità del dato finale.

La procedura richiede quindi un elevato livello di attenzione e una costante verifica delle informazioni disponibili. Sebbene il progetto includa strumenti e layer in grado di evidenziare automaticamente possibili aree di cambiamento, la conferma finale della trasformazione dipende dall'analisi del fotointerprete. Per questo motivo il controllo umano continua a rappresentare un elemento essenziale nelle attività di aggiornamento e validazione della cartografia del consumo di suolo.

1.5 Classificazione delle trasformazioni territoriali nel monitoraggio del consumo di suolo

Una volta individuata una trasformazione tramite la fotointerpretazione, il lavoro non si conclude con la sola digitalizzazione del poligono. Per poter aggiornare correttamente la cartografia del consumo di suolo è infatti necessario classificare il cambiamento osservato, descrivendo sia la situazione precedente sia quella successiva alla trasformazione. Questo passaggio permette di ricostruire in modo più preciso l'evoluzione del territorio e di comprendere quali tipologie di uso del suolo siano state coinvolte nel cambiamento (SNPA, 2024).

Nel monitoraggio realizzato da ISPRA, ogni poligono viene associato a specifiche classi e sottoclassi che consentono di distinguere le diverse forme di copertura e utilizzo del suolo. La classificazione segue una struttura gerarchica composta da macroclassi e categorie più dettagliate, utilizzate per descrivere le trasformazioni osservate e garantire una maggiore uniformità nell'interpretazione dei dati a scala nazionale (ISPRA, 2024).

Le trasformazioni rilevate possono riguardare situazioni molto diverse tra loro. In alcuni casi il cambiamento è legato alla costruzione di edifici residenziali, produttivi o commerciali; in altri interessa infrastrutture viarie, piazzali, aree logistiche o altre superfici artificiali. Esistono inoltre situazioni più complesse, come cantieri temporanei o aree soggette a trasformazioni progressive, che richiedono una valutazione più attenta durante la fase di classificazione.

La corretta attribuzione delle classi assume un ruolo particolarmente importante perché i dati raccolti vengono successivamente utilizzati per l'elaborazione degli indicatori sul consumo

di suolo e per la produzione della cartografia ufficiale pubblicata da ISPRA e SNPA. Per questo motivo la fase di classificazione rappresenta una componente essenziale dell'intero processo di monitoraggio e richiede particolare attenzione da parte del fotointerprete.

L'utilizzo di codici standardizzati permette inoltre di confrontare i dati raccolti in territori differenti e di mantenere una coerenza metodologica tra annualità successive. Questo aspetto è fondamentale per garantire la confrontabilità dei risultati nel tempo e per ricostruire in maniera affidabile le dinamiche che interessano il territorio nazionale (Munafò, 2022; SNPA, 2024).

Nel monitoraggio del consumo di suolo adottato da ISPRA, ogni poligono individuato durante la fase di fotointerpretazione viene classificato attraverso un sistema gerarchico di codici che descrive sia la condizione del suolo sia la tipologia di trasformazione osservata.

Una prima distinzione riguarda il passaggio tra suolo consumato e suolo non consumato.

Suolo consumato (classe 1)

Il suolo consumato comprende tutte le superfici che hanno subito una trasformazione antropica tale da alterarne in modo significativo le funzioni naturali.

All'interno di questa categoria si distinguono:

11 – Consumo di suolo permanente

- 111 – Edifici: strutture edilizie destinate a usi residenziali, produttivi, commerciali o di servizio.
- 112 – Strade pavimentate: infrastrutture viarie asfaltate o comunque impermeabilizzate.
- 113 – Sede ferroviaria: aree occupate da linee ferroviarie e relative pertinenze.
- 114 – Aeroporti: piste, piazzali e aree di movimentazione impermeabilizzate.
- 115 – Porti: banchine e superfici pavimentate destinate alle attività portuali.
- 116 – Altre aree impermeabili o pavimentate non edificate: piazzali, parcheggi e superfici artificiali prive di edifici.
- 117 – Serre permanenti pavimentate: serre caratterizzate da coperture e superfici stabilmente artificializzate.

- 118 – Discariche: aree destinate allo smaltimento dei rifiuti.

12 – Consumo di suolo reversibile

- 121 – Strade non pavimentate: piste e viabilità in terra battuta.
- 122 – Cantieri e altre aree in terra battuta: superfici temporaneamente alterate da attività di costruzione o movimentazione.
- 123 – Aree estrattive non rinaturalizzate: cave e siti di estrazione ancora attivi o non recuperati.
- 124 – Cave in falda: aree estrattive caratterizzate dalla presenza di acqua.
- 125 – Impianti fotovoltaici a terra: superfici occupate da pannelli fotovoltaici installati direttamente sul terreno.
- 126 – Altre coperture artificiali non connesse alle attività agricole la cui rimozione consente il ripristino delle condizioni originarie del suolo.

Suolo non consumato (classe 2)

Il suolo non consumato comprende superfici che, pur presentando talvolta elementi artificiali, mantengono in larga misura le proprie funzioni ecologiche e la permeabilità del terreno.

Le principali categorie considerate sono:

- 201 – Corpi idrici artificiali: bacini e specchi d'acqua artificiali, escluse le cave in falda.
- 202 – Rotonde e svincoli permeabili: infrastrutture caratterizzate dalla presenza prevalente di superfici vegetate o permeabili.
- 203 – Serre non pavimentate: serre prive di impermeabilizzazione permanente del suolo.
- 204 – Ponti e viadotti su suolo non artificiale: infrastrutture sopraelevate che non determinano consumo diretto della superficie sottostante.
- 205 – Impianti fotovoltaici a bassa densità: installazioni che consentono il mantenimento di parte delle funzioni del suolo.
- 206 – Artificializzazione o rimozione temporanea del suolo con ripristino completato entro l'anno corrente.

Oltre alla tipologia di trasformazione, ogni poligono viene associato alla destinazione d'uso prevalente dell'intervento osservato.

Le principali categorie utilizzate sono:

- 1 – Residenziale: edifici e aree destinate alla funzione abitativa.
- 2 – Non residenziale: attività economiche, produttive o di servizio.
 - 2.1 – Attività produttive: industrie manifatturiere e stabilimenti produttivi.
 - 2.2 – Attività commerciali: strutture dedicate alla vendita di beni e servizi.
 - 2.3 – Poli logistici: magazzini, centri di distribuzione e piattaforme logistiche.
 - 2.4 – Servizi: scuole, ospedali, luoghi di culto, caserme e strutture sportive.
 - 2.5 – Produzione di energia da fonti rinnovabili: impianti fotovoltaici, eolici o altre fonti rinnovabili.
 - 2.6 – Settore primario: attività agricole ed estrattive.
 - 2.7 – Utility: depuratori, elettrodotti, casse di espansione e discariche.
- 3 – Infrastrutture: strade, parcheggi, distributori di carburante, ferrovie, aeroporti e porti.
- 4 – Uso non definito: aree di transizione o cantieri per i quali non è ancora possibile determinare la destinazione finale.

1.6 Criticità, limiti e ruolo dell'interpretazione umana

Nonostante la crescente disponibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione e di strumenti GIS sempre più avanzati, il monitoraggio del consumo di suolo continua a presentare alcune criticità che rendono indispensabile il contributo dell'operatore umano. La presenza di dati sempre più dettagliati ha certamente migliorato la capacità di individuare le trasformazioni territoriali, ma non ha eliminato la necessità di una verifica diretta dei cambiamenti osservati (SNPA, 2024).

Una delle principali difficoltà riguarda l'interpretazione delle situazioni meno evidenti. Se la realizzazione di un nuovo edificio o di una nuova infrastruttura risulta generalmente facile da riconoscere, altre trasformazioni possono generare maggiori incertezze. Cantieri temporanei, superfici agricole soggette a lavorazioni stagionali, aree in fase di

trasformazione o porzioni di territorio caratterizzate da elevata eterogeneità possono infatti rendere più complessa l'attribuzione della corretta classe di uso del suolo (ISPRA, 2024).

Anche la qualità e le caratteristiche delle immagini utilizzate influenzano il processo interpretativo. Differenze stagionali, condizioni di illuminazione, presenza di ombre o limitazioni legate alla risoluzione spaziale possono talvolta rendere difficile distinguere un cambiamento reale da una semplice variazione temporanea. Per questo motivo la consultazione di fonti aggiuntive, come immagini storiche o serie temporali disponibili tramite Google Earth, rappresenta spesso un supporto importante nelle situazioni più complesse (Manakos et al., 2017).

La letteratura scientifica evidenzia inoltre come la componente soggettiva dell'interpretazione possa influenzare il risultato finale delle classificazioni territoriali. Studi recenti hanno mostrato che operatori diversi possono attribuire classificazioni differenti alla stessa area, soprattutto nei casi caratterizzati da elevata complessità o da informazioni incomplete. Questo fenomeno, noto come *interpreter variability*, rappresenta uno degli aspetti più discussi nell'ambito della validazione delle mappe di copertura del suolo (Tsutsumida & Kato, 2024).

Un ulteriore limite riguarda l'utilizzo di procedure automatiche di classificazione. Sebbene gli algoritmi di analisi delle immagini abbiano raggiunto livelli di accuratezza sempre più elevati, la loro affidabilità dipende fortemente dalla qualità dei dati utilizzati per l'addestramento e dalla disponibilità di informazioni di riferimento corrette. Errori nelle etichette o classificazioni non perfettamente coerenti possono infatti propagarsi nei risultati finali, influenzando la qualità delle elaborazioni successive (Yue et al., 2022).

Per questi motivi la fotointerpretazione continua a svolgere un ruolo centrale nei processi di monitoraggio del consumo di suolo. Gli strumenti automatici consentono di individuare rapidamente possibili aree di cambiamento e di ridurre i tempi di analisi, ma la verifica finale richiede ancora capacità di osservazione, esperienza e spirito critico da parte dell'operatore. In questo senso, il controllo umano non rappresenta un limite della metodologia, bensì un elemento essenziale per garantire la qualità e l'affidabilità del dato prodotto (SNPA, 2024; Uhl & Leyk, 2024).

CAPITOLO 2 — Monitoraggio del consumo di suolo per la provincia di Trapani

2.1 Descrizione dell'area di studio

L'area di studio del presente lavoro è costituita dalla provincia di Trapani, situata nell'estremità occidentale della Sicilia. Secondo i dati ISTAT più recenti (aggiornamento al 1° gennaio 2025), il territorio provinciale si estende su una superficie di 2.469,41 km², pari a 246.941 ettari, con una popolazione di 411.393 abitanti e una densità media di 166,60 abitanti per km² (ISTAT, 2025). Il territorio è amministrativamente suddiviso in 25 comuni, tra cui il capoluogo Trapani, che con i suoi 180,44 km² rappresenta il secondo comune più esteso della provincia dopo Marsala (Comune di Trapani, 2026).

Dal punto di vista morfologico, la provincia di Trapani presenta una notevole varietà di ambienti, che va dalle pianure costiere alle aree collinari dell'entroterra, fino ai rilievi dei cosiddetti Monti di Trapani, un sistema montuoso che si sviluppa nella parte nord-occidentale del territorio provinciale. Il rilievo più noto è il Monte Erice (751 m s.l.m.), su cui sorge l'omonimo borgo medievale, seguito dal Monte Cofano (659 m s.l.m.), massiccio calcareo che si affaccia direttamente sul mare nel territorio di Custonaci, e dal Monte Bonifato (825 m s.l.m.) presso Alcamo (Regione Siciliana, 2026; Comune di Erice, 2026). Questa componente altimetrica e di pendenza costituisce la base per il calcolo degli indicatori DEM (Modello Digitale di Elevazione) e slope (pendenza) descritti nel Capitolo 3, poiché consente di analizzare la distribuzione del consumo di suolo in relazione alle diverse fasce altimetriche e di acclività del territorio.

Un secondo elemento territoriale rilevante ai fini della presente analisi è rappresentato dallo sviluppo costiero della provincia. Trapani si affaccia infatti sia sul Mar Tirreno, a nord, sia sul Mar Mediterraneo, a sud-ovest, con un litorale che alterna tratti sabbiosi, aree lagunari e coste rocciose e frastagliate, come quella compresa nella Riserva Naturale dello Zingaro, che si sviluppa per circa 7 km tra i comuni di Castellammare del Golfo e San Vito Lo Capo (Regione Siciliana, 2026). La significativa estensione della fascia costiera provinciale giustifica l'inclusione, tra gli indicatori analizzati nel presente lavoro, di un indicatore specifico sul consumo di suolo nella fascia costiera, area particolarmente sensibile sia dal punto di vista ecologico sia da quello della pressione insediativa e turistica.

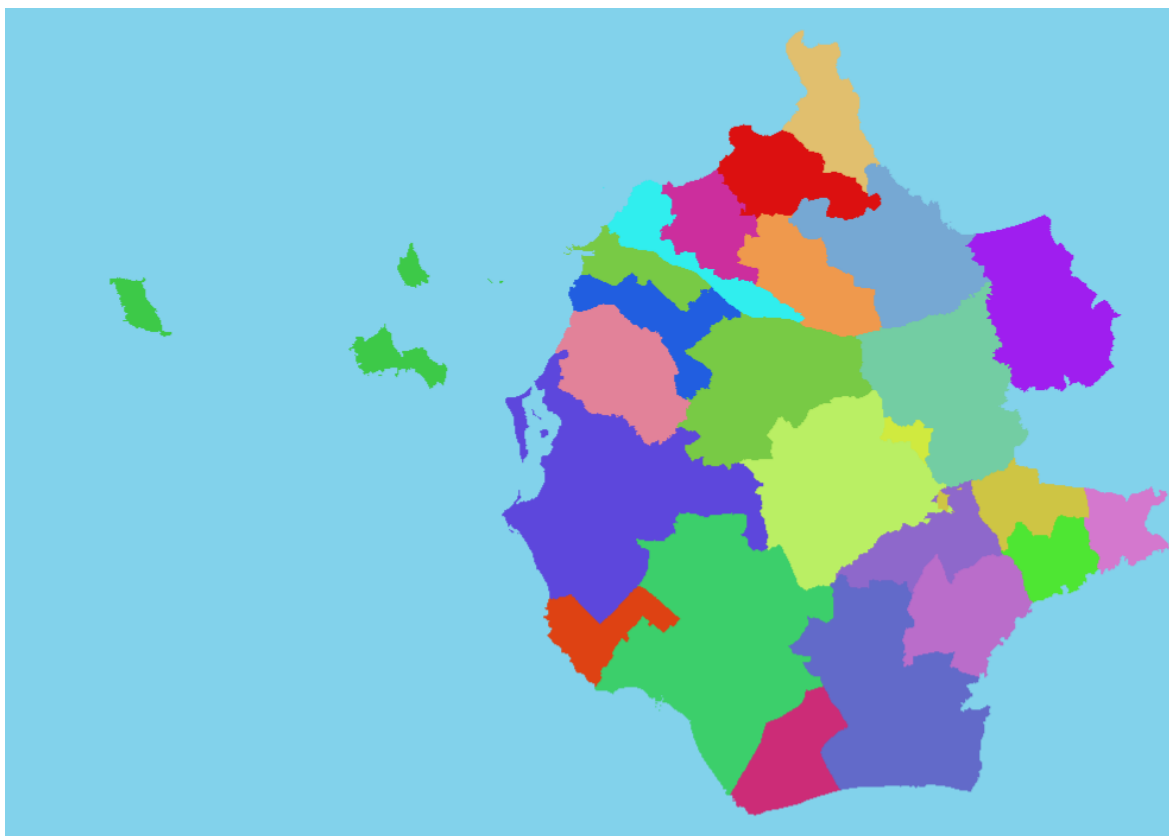


Figura 2.1 — Mappa di inquadramento della provincia di Trapani, con i confini dei 25 comuni.

Dal punto di vista naturalistico, la provincia di Trapani ospita un numero significativo di aree naturali protette, che rappresentano una delle concentrazioni più alte dell'intera Sicilia. Sono infatti presenti nove riserve naturali regionali, tra cui la Riserva Naturale Orientata dello Zingaro (istituita nel 1981, prima riserva naturale siciliana), la Riserva Naturale Orientata delle Saline di Trapani e Paceco (quasi 1.000 ettari, zona umida di importanza internazionale ai sensi della Convenzione di Ramsar, gestita dal WWF Italia), la Riserva Naturale di Monte Cofano, la Riserva Naturale del Bosco di Alcamo sul Monte Bonifato, la Riserva Naturale di Grotta di Santa Ninfa, la Riserva Naturale di Preola e Gorgi Tondi e la Riserva Naturale della Foce del Belice e Dune limitrofe (Regione Siciliana, 2026). A queste si aggiunge, al largo della costa trapanese, la Riserva Marina delle Isole Egadi, che con i suoi 52.400 ettari rappresenta l'area marina protetta più estesa del Mediterraneo (Regione Siciliana, 2026). Questa rete di aree protette, censite a livello nazionale nell'Elenco Ufficiale delle Aree Protette (EUAP), costituisce la base territoriale per l'indicatore EUAP trattato nel Capitolo 3, finalizzato a verificare in che misura le trasformazioni del suolo rilevate tra il 2024 e il 2025 abbiano interessato, direttamente o nelle immediate vicinanze, porzioni di territorio sottoposte a tutela ambientale.

Sul piano dell'uso del suolo, l'economia della provincia si fonda storicamente su un equilibrio tra attività agricole, pesca e turismo. Il territorio è caratterizzato da un'estesa presenza di vigneti e di uliveti. Ulteriori attività rilevanti dal punto di vista della trasformazione del territorio sono l'estrazione mineraria, in particolare nel comprensorio di Custonaci, noto per le cave di marmo Perlato di Sicilia, e la produzione salinicola nelle saline di Trapani, Paceco e Marsala. Questi elementi sono richiamati in questa sede perché, come si vedrà nel paragrafo successivo, alcune delle trasformazioni territoriali individuate durante l'attività di fotointerpretazione sono riconducibili proprio a queste attività economiche caratteristiche del territorio (ad esempio nuove aree estrattive o impianti connessi alla filiera agricola).

Un elemento di contesto utile a inquadrare i risultati presentati nel Capitolo 3 riguarda l'andamento recente del consumo di suolo a scala regionale e provinciale. Secondo il Rapporto sul consumo di suolo relativo al territorio siciliano, tra il 2023 e il 2024 la Sicilia ha registrato un'accelerazione del fenomeno, con una perdita di 773 ettari di suolo naturale e un incremento della copertura artificiale regionale, giunta al 6,56% del territorio, superiore alla media nazionale di crescita annua (ARPA Sicilia-SNPA, 2025). Nello stesso rapporto viene inoltre segnalato che, a livello provinciale, gli incrementi più rilevanti nel 2024 si sono registrati nei territori di Ragusa e Catania, mentre le province di Palermo, Enna, Siracusa, Agrigento e Trapani mostrano, al contrario, una riduzione del consumo di suolo rispetto all'anno precedente (ARPA Sicilia-SNPA, 2025). Questo dato regionale costituisce un utile termine di confronto rispetto ai risultati ottenuti dall'analisi di dettaglio condotta nel presente lavoro sul biennio 2024-2025, che verranno presentati e discussi nel Capitolo 3.

Dal punto di vista climatico, la provincia di Trapani è caratterizzata da un clima mediterraneo tipico della Sicilia occidentale, con inverni miti e piovosi ed estati calde e prevalentemente secche. Il territorio provinciale registra mediamente circa 92 giornate annue con temperature superiori ai 30°C, a fronte di circa 75 giorni di precipitazioni, concentrate soprattutto nel periodo autunnale e invernale, e oltre 350 giornate di soleggiamento l'anno (dati climatici medi provinciali). Questa marcata stagionalità, unita alla diffusione di colture a ciclo stagionale nelle aree agricole della provincia, rappresenta un fattore di cui si è dovuto tenere conto durante l'attività di fotointerpretazione descritta nel paragrafo 2.2, poiché può generare variazioni apparenti della copertura del suolo (ad esempio terreni arati o campi in riposo dall'aspetto simile a suolo nudo) che non corrispondono a un reale consumo di suolo permanente.

Infine, per quanto riguarda la componente demografica, utilizzata nel calcolo dell'indicatore popolazione nel Capitolo 3, si segnala che la distribuzione della popolazione all'interno della provincia non è omogenea: i comuni costieri, in particolare il capoluogo, Marsala, Mazara del Vallo, Castellammare del Golfo e Alcamo, concentrano la quota più rilevante della popolazione provinciale, mentre i comuni dell'entroterra collinare presentano densità sensibilmente inferiori (ISTAT, 2025). Questa distribuzione risulta significativa ai fini dell'analisi del consumo di suolo, poiché consente di indagare l'esistenza di una relazione tra pressione demografica e intensità delle trasformazioni territoriali rilevate.

2.2 Report dell'attività di fotointerpretazione

L'attività di fotointerpretazione svolta per la provincia di Trapani ha applicato la metodologia generale descritta nel Capitolo 1, seguendo nel dettaglio operativo le indicazioni del Manuale per il monitoraggio del consumo di suolo predisposto da ISPRA per le agenzie ARPA/APPA del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA-ISPRA, 2023). Tale manuale, sebbene aggiornato annualmente per adattarsi alle specifiche annualità della carta nazionale, definisce la procedura tecnica di riferimento adottata anche nel presente lavoro, condotto interamente in ambiente QGIS.

2.2.1 Configurazione dello spazio di lavoro

La prima fase del lavoro ha riguardato la configurazione dello spazio di lavoro in QGIS. È stato caricato il progetto contenente i layer relativi ai confini amministrativi comunali e provinciali della provincia di Trapani, la griglia regolare di 2x2 km fornita a supporto della visualizzazione sistematica del territorio, e i raster del suolo consumato relativi alle annualità 2024 e 2025 (SC_2024R e SC_2025R), insieme alle relative ortofoto e immagini satellitari di riferimento (SNPA-ISPRA, 2023).

Per agevolare il lavoro di fotointerpretazione è stato installato il plugin collegabile a Google Earth. Questa funzionalità si è rivelata particolarmente utile nella gestione dei casi dubbi, descritti più avanti in questo paragrafo, poiché ha permesso di consultare rapidamente le immagini più aggiornate disponibili, incluse in alcuni casi le viste a livello del suolo (SNPA-ISPRA, 2023).

Prima di procedere con la digitalizzazione, sono state impostate le opzioni di aggancio (snapping) e di editing topologico, attivando le funzioni "topological editing" e "snapping on intersection" e la relativa opzione di prevenzione delle intersezioni tra poligoni adiacenti.

Questa configurazione, sebbene richieda una fase preliminare di impostazione, è fondamentale per evitare sovrapposizioni ed errori topologici tra poligoni confinanti e per velocizzare sensibilmente il tracciamento nelle aree caratterizzate da più trasformazioni contigue (SNPA-ISPRA, 2023).

2.2.2 Workflow di individuazione e digitalizzazione dei cambiamenti

Una volta configurato lo spazio di lavoro, l'attività è stata condotta procedendo sistematicamente cella per cella all'interno della griglia di supporto, così da coprire senza omissioni l'intera estensione della provincia di Trapani (246.941 ettari, 25 comuni). Per ciascuna cella, il confronto diretto tra le immagini relative all'annualità 2024 e all'annualità 2025 ha permesso di individuare visivamente le porzioni di territorio che presentavano possibili variazioni nella copertura del suolo.

Una volta identificata un'area di cambiamento, si è proceduto al tracciamento del relativo poligono vettoriale, avviando l'editing del layer con l'apposito strumento di digitalizzazione poligonale e chiudendo la geometria con il click destro del mouse, così da aprire la maschera di compilazione degli attributi. Coerentemente con la procedura ISPRA, per ogni singola entità riconducibile a una classe diversa della legenda è stato tracciato un poligono distinto: ad esempio, in presenza di un edificio circondato da un piazzale pavimentato, è stato digitalizzato un primo poligono di classe 111 (edifici) per il fabbricato e un secondo poligono di classe 116 (altre aree impermeabili non edificate) per l'area pavimentata circostante (SNPA-ISPRA, 2023).

Per ciascun poligono, la compilazione della tabella attributi ha previsto l'inserimento del codice di classificazione al terzo livello (si veda il paragrafo 1.5) per l'annualità 2025, e la verifica della coerenza con il codice attribuito per il 2024, secondo la logica di confronto tra le due sole annualità oggetto della presente analisi. Nei casi in cui le informazioni disponibili lo consentissero, ai poligoni di nuovo consumo di suolo è stata inoltre associata la classe di uso prevalente (1 - residenziale, 2 - non residenziale con relative sottoclassi, 3 - infrastrutture), secondo lo schema descritto nel paragrafo 1.5 (SNPA-ISPRA, 2023). Eventuali osservazioni e note relative a casi dubbi o particolari sono state annotate in un campo dedicato, in modo da poter risalire successivamente alle motivazioni di ciascuna scelta interpretativa.

Coerentemente con gli standard tecnici indicati dalla metodologia ISPRA, la digitalizzazione dei poligoni è stata condotta a una scala di visualizzazione compresa indicativamente tra 1:2.000 e 1:4.000, aumentando il livello di zoom nelle fasi di editing più delicate, in particolare in corrispondenza dei confini tra classi contigue o di geometrie complesse. È stata inoltre applicata la soglia dimensionale minima raccomandata per la mappabilità delle trasformazioni, pari a circa 51 m² (corrispondente a poco più della metà di un pixel della griglia raster a risoluzione 10x10 metri), evitando così il tracciamento di poligoni di estensione inferiore, che non sarebbero comunque stati rappresentati correttamente in fase di rasterizzazione (SNPA-ISPRA, 2023).

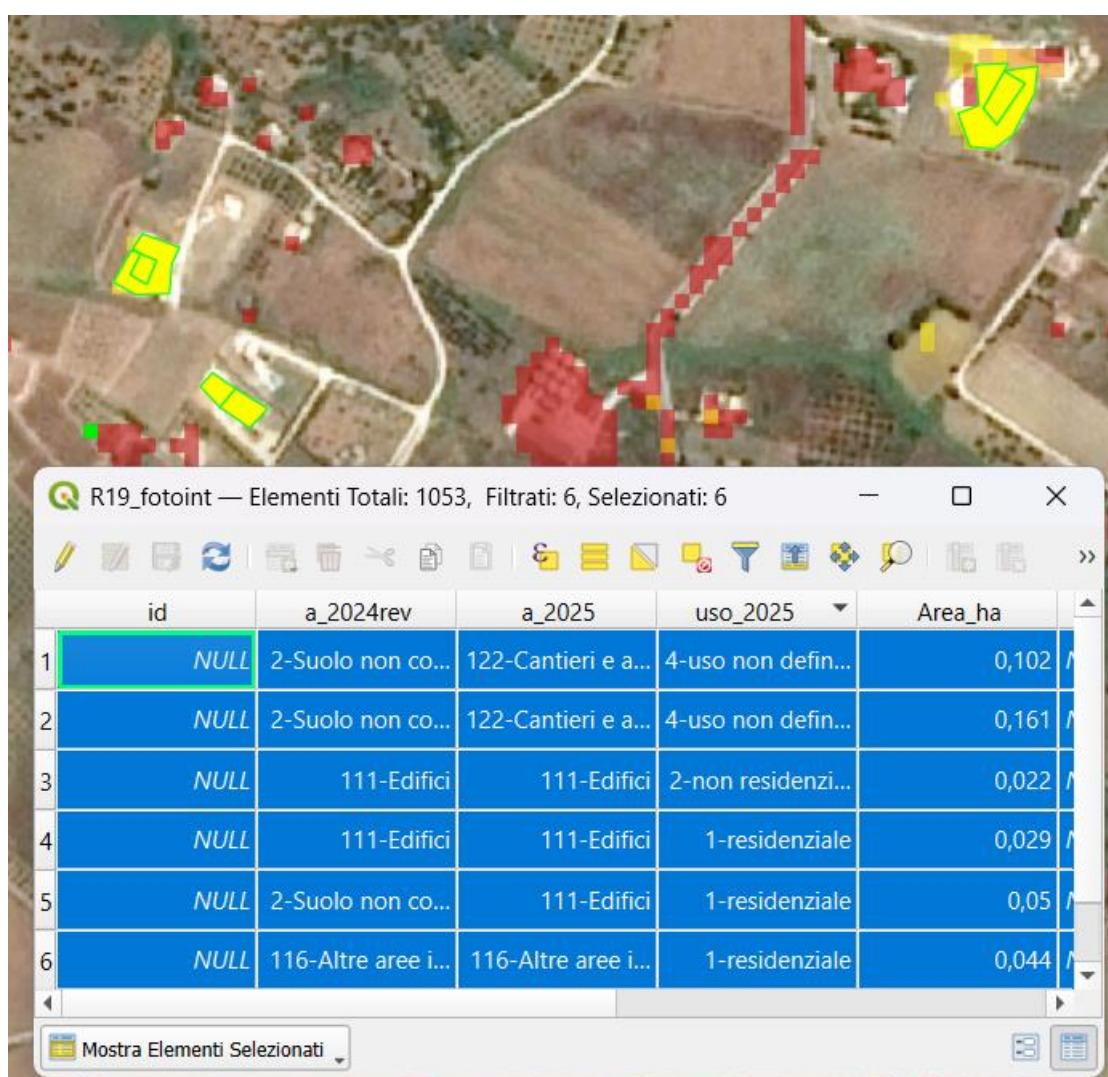


Figura 2.3 — Progetto QGIS aperto sul territorio della provincia di Trapani e, in dettaglio, alcuni poligoni digitalizzati con la relativa tabella attributi.

Complessivamente, l'attività di fotointerpretazione della provincia di Trapani si è svolta nell'arco di circa quattro settimane. Al termine del lavoro sono stati digitalizzati

complessivamente 884 poligoni di cambiamento sull'intero territorio provinciale, distribuiti in maniera non uniforme tra i 25 comuni in funzione della diversa intensità delle trasformazioni territoriali osservate tra le due annualità considerate.

Coerentemente con le caratteristiche del territorio descritte nel paragrafo 2.1, le trasformazioni più frequentemente riscontrate sono risultate riconducibili a poche macro-tipologie ricorrenti. Nelle aree costiere e periurbane, in particolare nei pressi del capoluogo e dei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Castellammare del Golfo, le trasformazioni più comuni sono risultate legate alla realizzazione di nuovi edifici residenziali e di infrastrutture viarie (classi 111 e 112). Nelle aree interne a vocazione agricola, alcune trasformazioni sono risultate connesse alla realizzazione di nuove serre, permanenti o non pavimentate (classi 117 e 203), coerentemente con la vocazione vitivinicola e olivicola del territorio descritta nel paragrafo precedente.

2.2.3 Gestione dei casi dubbi: due esempi rappresentativi

Coerentemente con quanto discusso in termini generali nel paragrafo 1.6, anche nel lavoro svolto sulla provincia di Trapani si sono presentati diversi casi di difficile interpretazione, per i quali il solo confronto tra le ortofoto delle due annualità non è risultato sufficiente a determinare con certezza la classe di cambiamento corretta. Si riportano di seguito due casi rappresentativi, risolti grazie al collegamento tra QGIS e due strumenti di verifica esterni: Google Earth e il portale Copernicus, consultato attraverso le immagini satellitari Sentinel-2.

Oltre a Google Earth, in alcuni casi è stato utilizzato anche un plugin di collegamento diretto al portale Copernicus, che permette di visualizzare le immagini satellitari della missione Sentinel-2 relative al punto esatto inquadrato in QGIS. Lo strumento consente di selezionare liberamente il mese e il giorno di riferimento desiderato, permettendo di scorrere le immagini disponibili nel tempo per verificare se una determinata trasformazione fosse già presente in una data precedente o se fosse effettivamente comparsa nel periodo considerato. Google Earth e Copernicus/Sentinel-2 hanno quindi rappresentato, nel presente lavoro, i due principali strumenti di verifica esterna a supporto della fotointerpretazione nei casi di maggiore incertezza.

Il primo caso ha riguardato una struttura di grandi dimensioni per la quale non era possibile stabilire con certezza, dalla sola immagine satellitare dall'alto, se si trattasse di una serra pavimentata (classe 117) o di un'altra tipologia di fabbricato non direttamente riconducibile

all'attività agricola. Attraverso il collegamento a Google Earth e la consultazione delle viste a livello del suolo (street view), è stato possibile osservare la struttura da una prospettiva laterale, confermando che si trattava effettivamente di una serra pavimentata e risolvendo così il dubbio interpretativo. Nello stesso contesto, la consultazione di Google Earth ha permesso, in altri casi analoghi, di identificare con maggiore precisione la destinazione d'uso di alcuni fabbricati non residenziali grazie alla presenza di indicazioni e cartellini identificativi delle attività economiche insediate, ad esempio aziende metalmeccaniche o poli logistici, informazione utile per l'attribuzione della relativa classe di uso del suolo descritta nel paragrafo 1.5 (classi 2.1 e 2.3).

Il secondo caso ha riguardato un'area estrattiva di grandi dimensioni, per la quale non era possibile stabilire con certezza se la trasformazione osservata corrispondesse a una cava già in fase di coltivazione nell'anno precedente oppure a un sito in procinto di essere scavato nell'anno corrente, essendo già visibili sul terreno i limiti e i confini dell'area di futura escavazione. Casi di questo tipo sono esplicitamente previsti dalla metodologia ISPRA, che raccomanda, in presenza di aree estrattive di grandi dimensioni e di incerta datazione, una compilazione prudentiale della tabella attributi, da rivedere ed eventualmente correggere nell'annualità successiva qualora le immagini disponibili non consentano una datazione univoca del cambiamento (SNPA-ISPRA, 2023).

2.2.4 Controlli di qualità

Al termine della digitalizzazione, coerentemente con le indicazioni del manuale ISPRA-ARPA/APPA, lo shapefile prodotto è stato sottoposto ad alcuni controlli prima di essere considerato definitivo. È stata verificata l'assenza di errori topologici nella geometria dei poligoni (auto-intersezioni, sovrapposizioni tra poligoni adiacenti) grazie alle opzioni di editing topologico attivate in fase di digitalizzazione, ed è stata effettuata una verifica della coerenza dei codici inseriti in tabella attributi, per escludere valori non conformi al sistema di classificazione descritto nel paragrafo 1.5 (SNPA-ISPRA, 2023).

Il lavoro di fotointerpretazione descritto in questo paragrafo ha costituito la base informativa per tutte le elaborazioni successive. Gli 884 poligoni digitalizzati e classificati per la provincia di Trapani rappresentano infatti l'input primario del workflow GIS descritto nel Capitolo 3, a partire dal quale sono stati generati i raster del suolo consumato per gli anni 2024 e 2025 e, di conseguenza, tutti gli indicatori oggetto della presente tesi.

2.2.5 Riflessioni sull'attività svolta

L'esperienza di fotointerpretazione condotta sulla provincia di Trapani conferma quanto discusso in termini generali nel paragrafo 1.6 circa il ruolo insostituibile dell'interpretazione umana, pur in presenza di strumenti software e di procedure standardizzate. Il ricorso a fonti informative integrative, in particolare Google Earth con le sue funzionalità di visualizzazione storica e di vista a livello del suolo, si è rivelato determinante non tanto per sostituire il giudizio del fotointerprete, quanto per fornirgli elementi aggiuntivi con cui esercitarlo in modo più consapevole. Questo aspetto è coerente con quanto osservato in letteratura circa la variabilità interpretativa tra diversi operatori (*interpreter variability*), che tende a ridursi quando l'analisi si basa su un numero maggiore di fonti indipendenti e complementari piuttosto che su una singola immagine di riferimento (Tsutsumida & Kato, 2024).

Allo stesso tempo, il lavoro svolto ha evidenziato alcuni limiti intrinseci alla metodologia, in parte già anticipati nel Capitolo 1. La necessità di ricorrere a fonti esterne per la risoluzione dei casi dubbi comporta un costo in termini di tempo che, per un lavoro esteso all'intero territorio provinciale, può incidere in modo non trascurabile sulla durata complessiva dell'attività. Inoltre, la dipendenza da immagini di terze parti, non sempre aggiornate con la stessa cadenza delle basemap ufficiali fornite da ISPRA, introduce un margine di incertezza residua che nessuna procedura, per quanto rigorosa, può eliminare del tutto (Yue et al., 2022; Uhl & Leyk, 2024). Nel complesso, tuttavia, l'approccio sistematico adottato, basato sulla griglia di supporto e su un controllo di qualità finale, ha permesso di produrre un dataset di 884 poligoni ritenuto sufficientemente affidabile per le elaborazioni quantitative presentate nel Capitolo 3.

CAPITOLO 3 — Calcolo e analisi degli indicatori del consumo di suolo

3.1 Indicatori e variabili di analisi: introduzione

Il presente capitolo descrive il cuore quantitativo del lavoro di tesi: a partire dai poligoni digitalizzati durante l'attività di fotointerpretazione descritta nel Capitolo 2, viene ricostruito il workflow GIS che ha permesso di calcolare, per la provincia di Trapani, una serie di indicatori relativi al consumo di suolo e alla sua distribuzione rispetto a cinque variabili territoriali: il Modello Digitale di Elevazione (DEM), la pendenza (slope), le aree naturali protette (EUAP), la fascia costiera e la popolazione. Prima di descrivere nel dettaglio le operazioni svolte in ambiente QGIS ed Excel (paragrafo 3.2), è utile introdurre brevemente ciascuna di queste variabili, richiamando anche il concetto di consumo di suolo già definito nel Capitolo 1, poiché rappresenta la base comune rispetto alla quale tutte le altre variabili sono state incrociate.

Il consumo di suolo. Come descritto nel Capitolo 1, il consumo di suolo rappresenta la trasformazione di superfici agricole o naturali in coperture artificiali, permanenti o reversibili, classificate da ISPRA secondo il sistema di codici a tre livelli illustrato nel paragrafo 1.5 (SNPA, 2024). Nel presente capitolo, il raster del suolo consumato relativo alle annualità 2024 e 2025 (e il relativo raster di cambiamento tra le due annualità) costituisce la variabile di riferimento rispetto alla quale vengono incrociate tutte le altre variabili elencate di seguito, secondo la logica della cross classification descritta nel paragrafo 3.2.



Figura 3.1 – Distribuzione del consumo di suolo nella provincia di Trapani (elaborazione su dati raster SC_2024R, ISPRA/SNPA).

Il DEM (Modello Digitale di Elevazione). Il DEM è una rappresentazione raster della quota altimetrica del territorio, in cui a ciascuna cella è associato il valore di elevazione sul livello del mare (Regione Siciliana, 2026; ESA, 2026). Nel presente lavoro il DEM è stato utilizzato, coerentemente con il sistema di riferimento RDN2008/Italy zone adottato per l'intero progetto (si veda il paragrafo 1.2), per analizzare la distribuzione altimetrica del consumo di suolo nella provincia di Trapani, un territorio che, come descritto nel paragrafo 2.1, alterna pianure costiere a rilievi che superano gli 800 metri di quota (Monte Bonifato). L'incrocio tra il DEM e i raster del suolo consumato consente di verificare se le nuove trasformazioni territoriali si concentrino prevalentemente nelle fasce altimetriche più basse, più prossime alla costa e storicamente più urbanizzate, oppure interessino in misura significativa anche le aree collinari dell'entroterra.

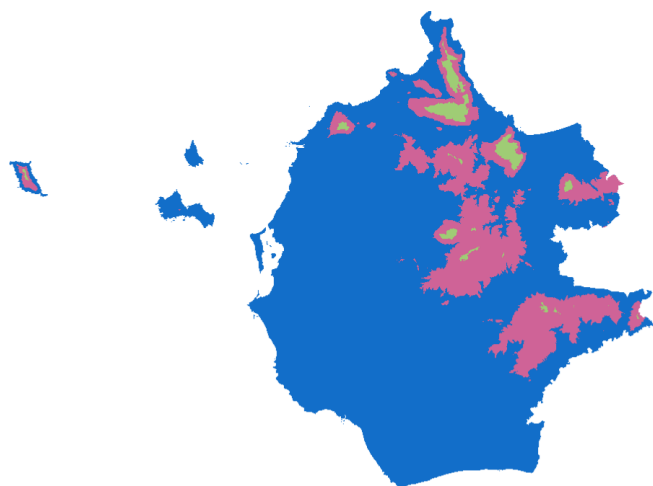


Figura 3.2 — Raster del Modello Digitale di Elevazione (DEM) della provincia di Trapani, utilizzato per l'analisi della distribuzione altimetrica del consumo di suolo.

Lo slope (pendenza). Lo slope è un raster derivato dal DEM che esprime, per ciascuna cella, l'inclinazione del terreno rispetto al piano orizzontale, generalmente espressa in gradi o in percentuale (ESA, 2026). Si tratta quindi di un indicatore strettamente collegato al DEM ma concettualmente distinto: mentre il DEM descrive la quota assoluta, lo slope descrive quanto il terreno sia ripido in un determinato punto, informazione rilevante per comprendere in quali condizioni morfologiche si concentrino le trasformazioni del suolo. Aree pianeggianti risultano generalmente più idonee all'edificazione e alle infrastrutture, mentre pendenze elevate tendono storicamente a scoraggiare l'urbanizzazione, salvo eccezioni legate a specifiche attività (es. cave in area montana, come il caso descritto nel paragrafo 2.2.3).

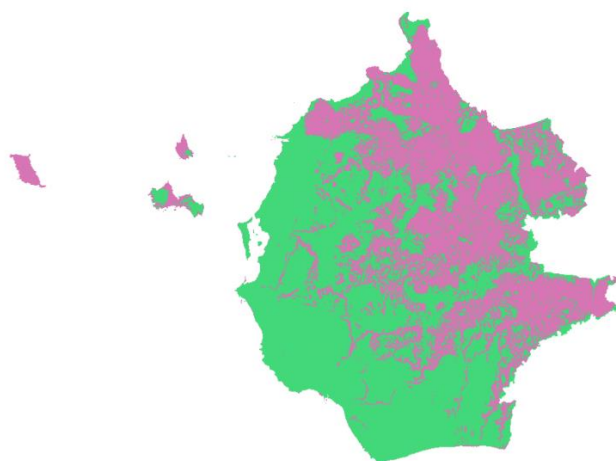


Figura 3.3 — Raster della pendenza (slope) della provincia di Trapani, derivato dal Modello Digitale di Elevazione.

L'EUAP (Elenco Ufficiale delle Aree Protette). L'EUAP è il censimento nazionale delle aree naturali protette istituito ai sensi della Legge 6 dicembre 1991, n. 394 (Legge quadro sulle aree protette), che raccoglie parchi nazionali e regionali, riserve naturali statali e regionali, aree marine protette e altre categorie di aree soggette a tutela ambientale (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2026). Come descritto nel paragrafo 2.1, la provincia di Trapani ospita nove riserve naturali regionali oltre alla Riserva Marina delle Isole Egadi, rendendo questo indicatore particolarmente significativo per il territorio in esame. L'incrocio tra il layer EUAP e i raster del suolo consumato permette di verificare in che misura le trasformazioni rilevate tra il 2024 e il 2025 abbiano interessato, direttamente o nelle immediate vicinanze, porzioni di territorio sottoposte a tutela ambientale, un aspetto di particolare rilievo dato l'obiettivo europeo di azzeramento del consumo netto di suolo richiamato nel paragrafo 1.1.

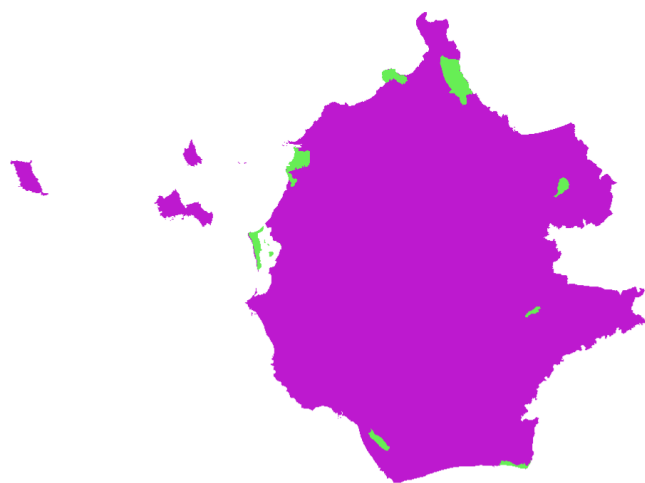


Figura 3.4 — Layer delle aree naturali protette (EUAP) della provincia di Trapani, utilizzato per l'analisi del consumo di suolo nelle riserve naturali.

La fascia costiera. La fascia costiera analizzata nel presente lavoro corrisponde alla porzione di territorio compresa nella fascia di rispetto di 300 metri dalla linea di battigia, individuata dall'articolo 142, comma 1, lettera a) del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42) come area di interesse paesaggistico tutelata per legge su tutto il territorio nazionale. Si tratta quindi di un indicatore normativamente definito, e non di una soglia arbitraria scelta ai fini della sola analisi. Data l'estensione dello sviluppo costiero della provincia di Trapani, descritta nel paragrafo 2.1, e la pressione insediativa e turistica che caratterizza le aree litoranee siciliane, l'incrocio tra questa fascia e i raster del suolo consumato consente di quantificare quanta parte del nuovo consumo di suolo rilevato interessi specificamente il territorio costiero sottoposto a tutela paesaggistica.

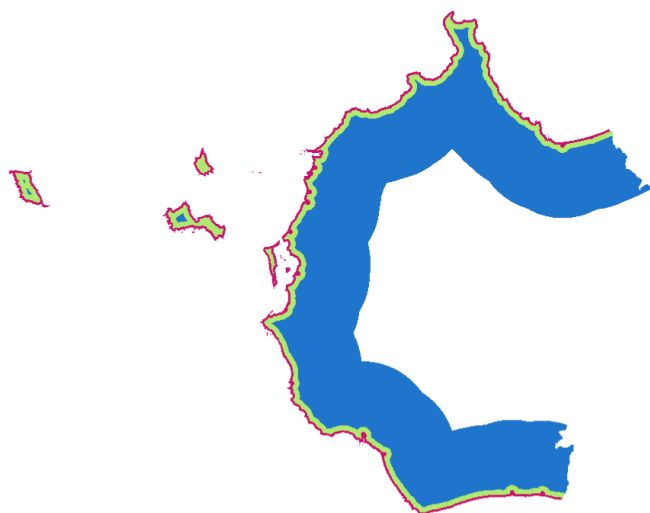


Figura 3.5 — Buffer della fascia costiera della provincia di Trapani, utilizzato per l'analisi del consumo di suolo in prossimità della linea di costa.

La popolazione. L'indicatore popolazione utilizza un raster di distribuzione demografica (nel presente lavoro derivato dai dati del Censimento permanente della popolazione ISTAT), in cui ciascuna cella riporta il numero di abitanti residenti in quella porzione di territorio, anziché una semplice classe categoriale come negli altri quattro indicatori (ISTAT, 2025). Questa caratteristica rende il trattamento dell'indicatore popolazione parzialmente diverso rispetto agli altri, poiché il suo incrocio con i raster del consumo di suolo richiede in alcuni casi un approccio di aggregazione dei valori piuttosto che una semplice tabella pivot basata su classi discrete, come verrà descritto nel dettaglio nel paragrafo 3.2. Concettualmente,

l'obiettivo è verificare se le aree a maggiore densità abitativa coincidano con quelle a maggiore intensità di trasformazione del suolo, o se invece, come osservato a livello nazionale nell'ultimo Rapporto ISPRA-SNPA (si veda il paragrafo 1.1), il consumo di suolo continui a crescere anche in presenza di una popolazione stabile o in calo.

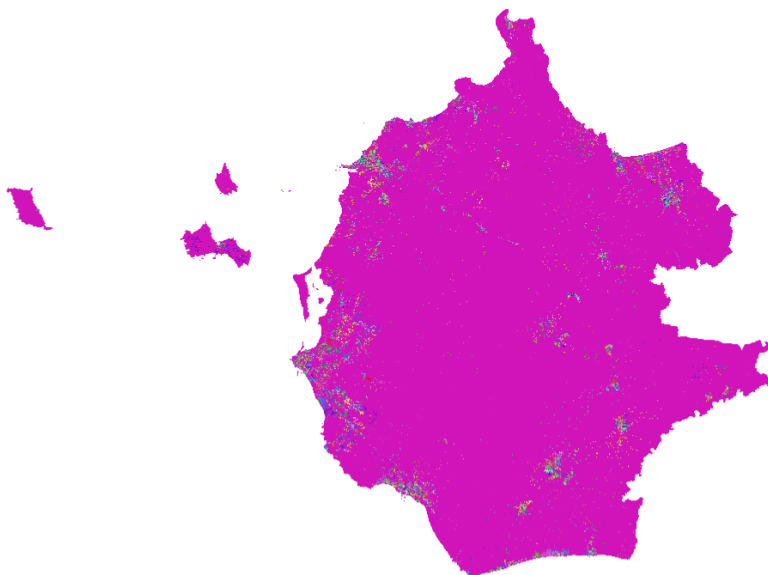


Figura 3.6 — Raster di distribuzione della popolazione della provincia di Trapani (dati del Censimento permanente ISTAT), utilizzato per il calcolo degli indicatori demografici.

Nei paragrafi successivi, ciascuna di queste cinque variabili viene incrociata sistematicamente con i raster del suolo consumato relativi al 2024, al 2025 e al cambiamento tra le due annualità, secondo il workflow GIS descritto nel paragrafo 3.2, per poi arrivare ai risultati quantitativi discussi nei paragrafi 3.3 e 3.4.

3.2 Metodologia GIS per il calcolo degli indicatori

Il presente paragrafo descrive in dettaglio, passo dopo passo, l'intero workflow GIS ed Excel utilizzato per calcolare gli indicatori introdotti nel paragrafo 3.1. Il lavoro è stato condotto interamente in QGIS per quanto riguarda l'elaborazione geospaziale, e in Excel per l'organizzazione tabellare e il calcolo finale delle superfici in ettari, secondo la sequenza illustrata nei sottoparagrafi seguenti.

3.2.1 Caricamento dei dati di input

Il workflow ha preso avvio dal caricamento in QGIS dei layer vettoriali di base: i confini amministrativi comunali e provinciali della provincia di Trapani, derivati dai limiti amministrativi ISTAT ("Com01012026_WGS84" e "ProvCM01012026_WGS84", nel

sistema di riferimento originario EPSG:32632, UTM 32N), e il layer "edoardo2", contenente i poligoni prodotti durante l'attività di fotointerpretazione descritta nel Capitolo 2. Quest'ultimo, coerentemente con lo standard adottato nel monitoraggio ISPRA (si veda il paragrafo 2.2.1), presenta due campi distinti, denominati a2024 e a2025, in cui è riportato il codice di classificazione del suolo rispettivamente per l'annualità 2024 e per l'annualità 2025, oltre a un campo per la classe di uso del suolo del nuovo consumo rilevato.



Figura 3.7 — Layer vettoriali di input caricati in QGIS: i poligoni di fotointerpretazione (edoardo2) e i confini amministrativi ISTAT di comuni e provincia.

3.2.2 Rasterizzazione dei layer vettoriali

I layer vettoriali sono stati successivamente convertiti in formato raster mediante lo strumento "Rasterizza (da vettore a raster)" di QGIS. Per il layer dei confini provinciali è stato utilizzato come campo valore il codice ISTAT di provincia (COD_PROV), mentre per i confini comunali è stato utilizzato l'analogo codice comunale (PRO_COM). Per il layer "edoardo2", la stessa operazione è stata condotta due volte separatamente, una prima volta utilizzando come campo valore a2024 e una seconda volta utilizzando a2025, producendo così due raster distinti (denominati rispettivamente anno_2024 e anno_2025) in cui ciascuna cella riporta il codice di classificazione del cambiamento fotointerpretato per quell'anno, con valore NoData nelle porzioni di territorio non interessate da alcuna trasformazione digitalizzata. In tutti i casi è stata utilizzata come unità di misura l'unità georeferenziata, con risoluzione di cella di 10x10 metri, coerente con la risoluzione nativa della Carta Nazionale del Suolo Consumato descritta nel paragrafo 1.2.

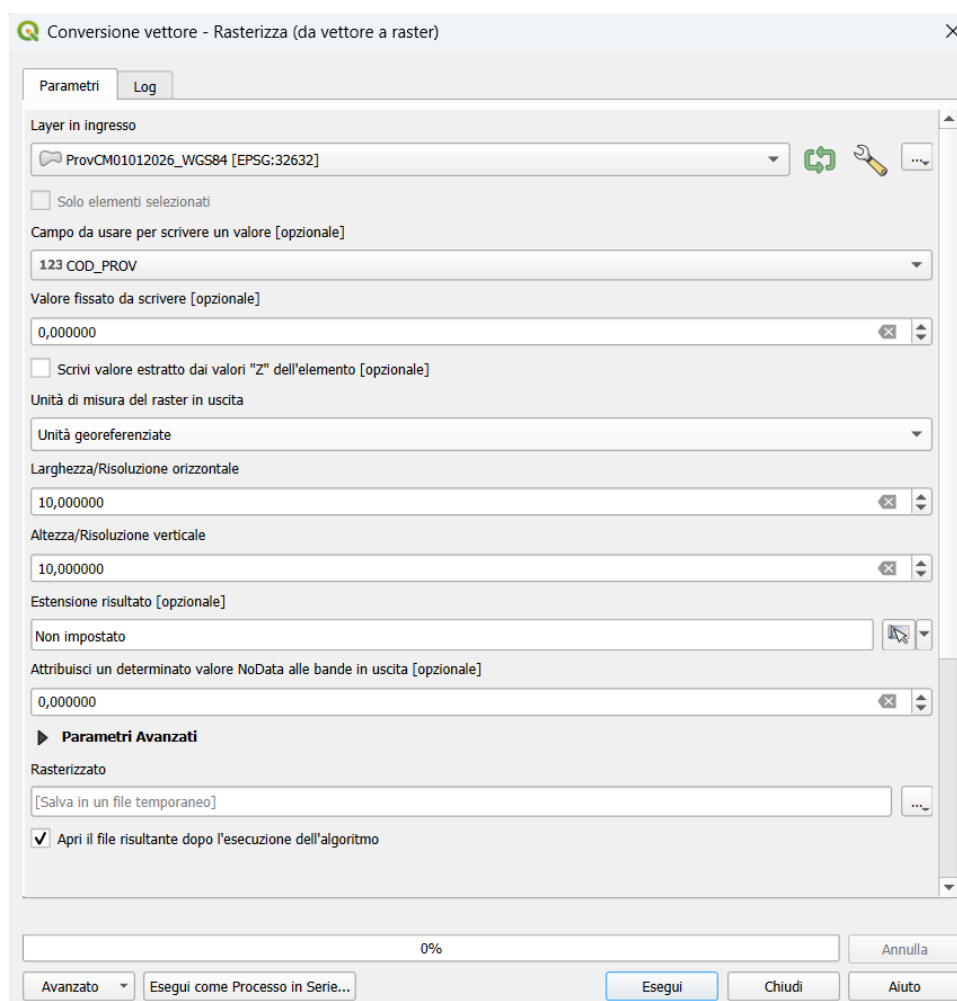


Figura 3.8 — Finestra dello strumento "Rasterizza (da vettore a raster)": layer in ingresso, campo valore (COD_PROV), risoluzione 10x10 metri.

Al termine di questa fase risultavano disponibili in QGIS quattro nuovi raster (prov_trapani, comuni_trapani, anno_2024, anno_2025), ancora espressi nel sistema di riferimento originario dei rispettivi layer vettoriali di partenza (EPSG:32632), affiancati al raster ufficiale fornito da ISPRA come base del progetto di fotointerpretazione (R19_SC2024_RDN_v7, nel sistema di riferimento RDN2008/Italy zone, EPSG:7794 — si veda il paragrafo 1.2).



Figura 3.9 — I quattro raster ottenuti dalla rasterizzazione (anno_2025, anno_2024, comuni_trapani, prov_trapani) insieme al raster ufficiale ISPRA di riferimento (R19_SC2024_RDN_v7).

3.2.3 Allineamento dei raster al sistema di riferimento nazionale

Poiché i raster appena ottenuti erano espressi in un sistema di riferimento (EPSG:32632) diverso da quello del raster ufficiale ISPRA (EPSG:7794, RDN2008/Italy zone), è stato necessario allinearli prima di poterli combinare tra loro. La mancata coerenza tra sistemi di riferimento cartografici rappresenta, come discusso più in generale nel Capitolo 1, una delle criticità più frequenti nei workflow GIS che integrano dati di provenienza eterogenea, poiché anche uno scostamento apparentemente minimo tra proiezioni può generare disallineamenti sistematici tra celle raster e risultati incoerenti nelle successive elaborazioni. Per questo motivo è stato utilizzato lo strumento "Allinea raster" di QGIS, che ricampiona uno o più raster in ingresso alla stessa dimensione di cella e alla stessa proiezione di un raster di riferimento scelto dall'utente.

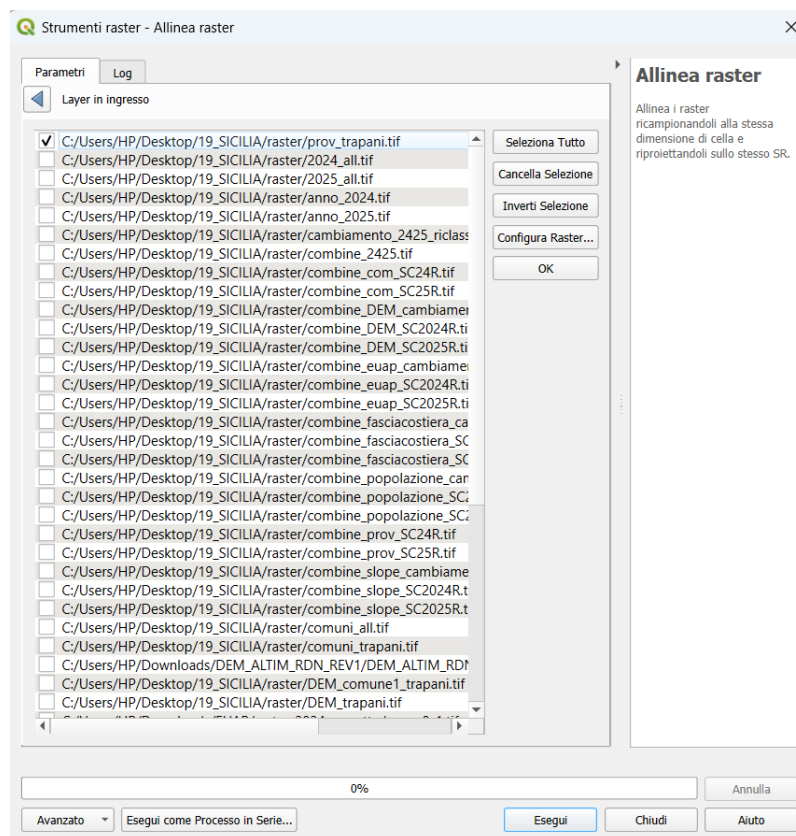


Figura 3.10 — Finestra "Allinea raster": selezione dei layer in ingresso da allineare (nell'esempio, prov_trapani.tif).

Come raster di riferimento è stato scelto R19_SC2024_RDN_v7, ossia il raster ufficiale fornito da ISPRA nel sistema RDN2008/Italy zone (EPSG:7794), lo stesso già utilizzato come base cartografica durante l'attività di fotointerpretazione descritta nel Capitolo 2. L'operazione è stata ripetuta singolarmente per ciascuno dei quattro raster prodotti nella fase

precedente, ottenendo così le rispettive versioni allineate, denominate 2024_all, 2025_all, comuni_all e provincia_all (dove il suffisso "_all" indica appunto "allineato").

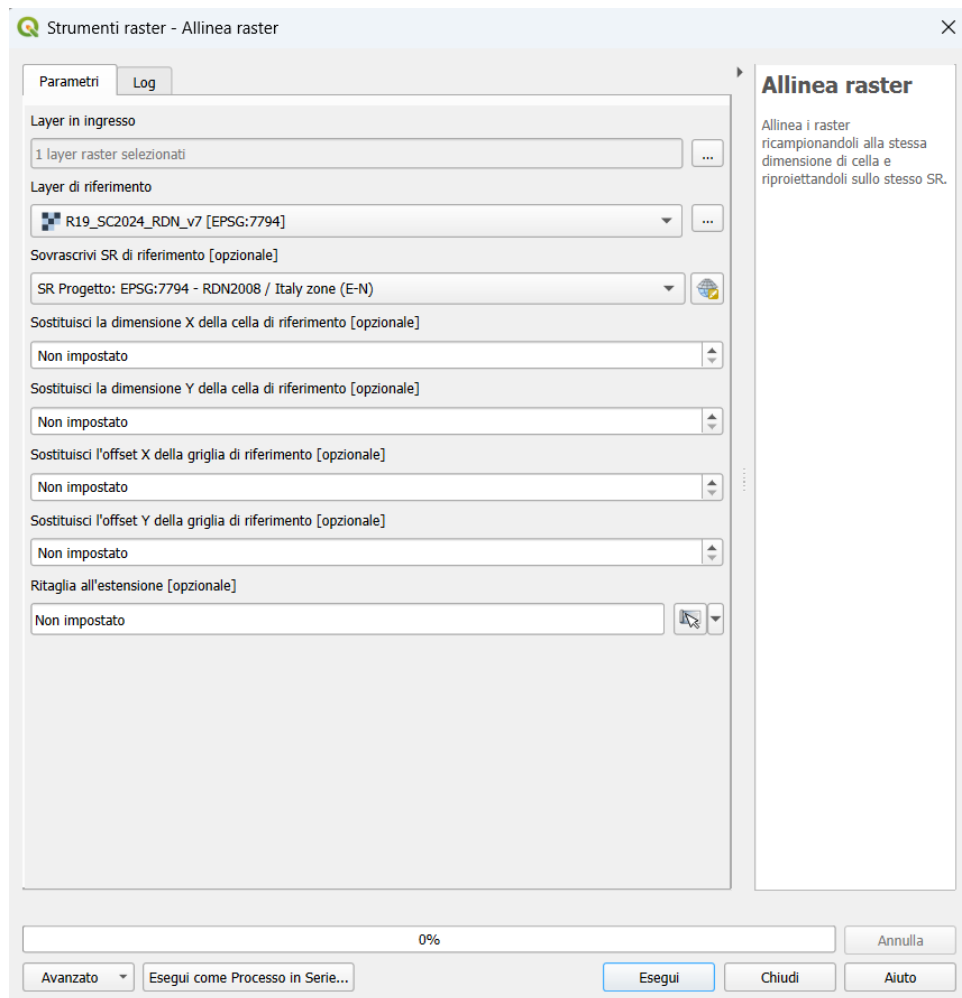


Figura 3.11 — Finestra "Allinea raster": impostazione del layer di riferimento (R19_SC2024_RDN_v7, EPSG:7794).

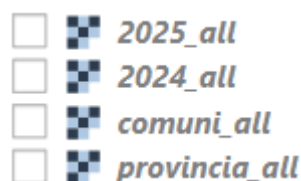


Figura 3.12 — I quattro raster allineati al sistema di riferimento nazionale: 2025_all, 2024_all, comuni_all, provincia_all.

3.2.4 Creazione dei raster del suolo consumato aggiornati (SC_2024R e SC_2025R)

Una volta allineati tutti i layer, è stato utilizzato il Calcolatore Raster di QGIS per produrre i due raster del suolo consumato aggiornati alle annualità 2024 e 2025, integrando la classificazione ufficiale ISPRA di base con i nuovi cambiamenti rilevati durante la

fotointerpretazione della provincia di Trapani. È stata costruita un'espressione condizionale che, cella per cella, verifica se il raster derivato dalla fotointerpretazione (2024_all, o 2025_all per l'anno successivo) riporta un valore valido in quella posizione: dove è disponibile un nuovo codice di classificazione proveniente dal lavoro di fotointerpretazione descritto nel Capitolo 2, questo aggiorna la classificazione della cella; altrove viene mantenuta la classificazione di base fornita dal raster ufficiale ISPRA (R19_SC2024_RDN_v7). L'operazione è stata condotta separatamente per le due annualità, producendo in uscita due nuovi raster, denominati SC_2024R e SC_2025R.

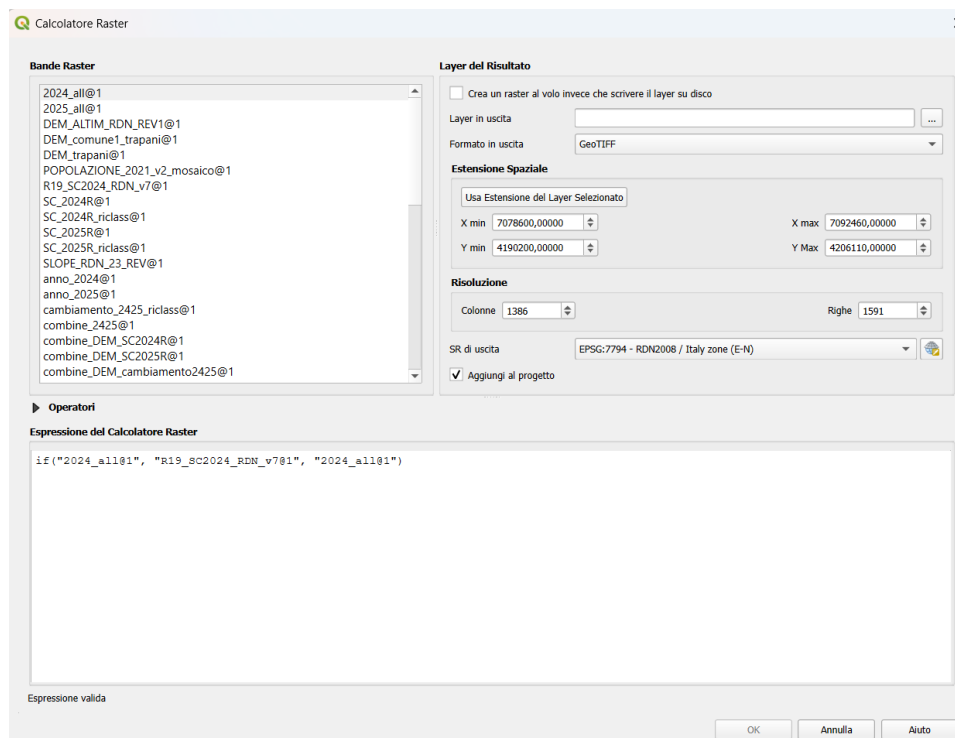


Figura 3.13 — Calcolatore Raster: costruzione dell'espressione condizionale utilizzata per generare il raster SC_2024R a partire da 2024_all e dal raster ufficiale ISPRA.

Per verificare la correttezza del risultato, è stata condotta una verifica puntuale con lo strumento "Identifica elementi" di QGIS su un pixel corrispondente a un'area in cui, durante la fotointerpretazione, era stato digitalizzato un nuovo cambiamento tra il 2024 e il 2025. Come mostrato nelle Figure 3.14 e 3.15, nel raster SC_2024R il pixel selezionato riporta il valore 2 (suolo non consumato), mentre nel raster SC_2025R lo stesso pixel riporta il valore 122 (cantieri e altre aree in terra battuta, classe di consumo di suolo reversibile), confermando che i due raster riflettono correttamente l'evoluzione della classificazione tra le due annualità, in coerenza con quanto digitalizzato nella fase di fotointerpretazione.

Informazioni Risultati	
	
Elemento	Valore
▼ SC_2024R	0
▼ SC_2024R	
Banda 1	2
▶ (Derivato)	

Figura 3.14 — Verifica puntuale sul raster SC_2024R: il pixel selezionato riporta il valore 2 (suolo non consumato).

Informazioni Risultati	
	
Elemento	Valore
▼ SC_2025R	0
▼ SC_2025R	
Banda 1	122
▶ (Derivato)	

Figura 3.15 — Verifica puntuale sullo stesso pixel sul raster SC_2025R: il valore riportato è 122 (cantieri e altre aree in terra battuta), a conferma del nuovo cambiamento rilevato.

3.2.5 Cross classification con i confini amministrativi

A partire dai raster SC_2024R e SC_2025R sono stati prodotti i primi incroci (combine) con i confini amministrativi, utilizzando la funzione "Cross classification" della sezione Postprocessing del Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Lo strumento richiede di selezionare, come classificazione di ingresso, il raster tematico da analizzare (ad esempio SC_2024R) e, come raster o vettore di riferimento, il layer rispetto al quale incrociarlo (ad esempio comuni_all).

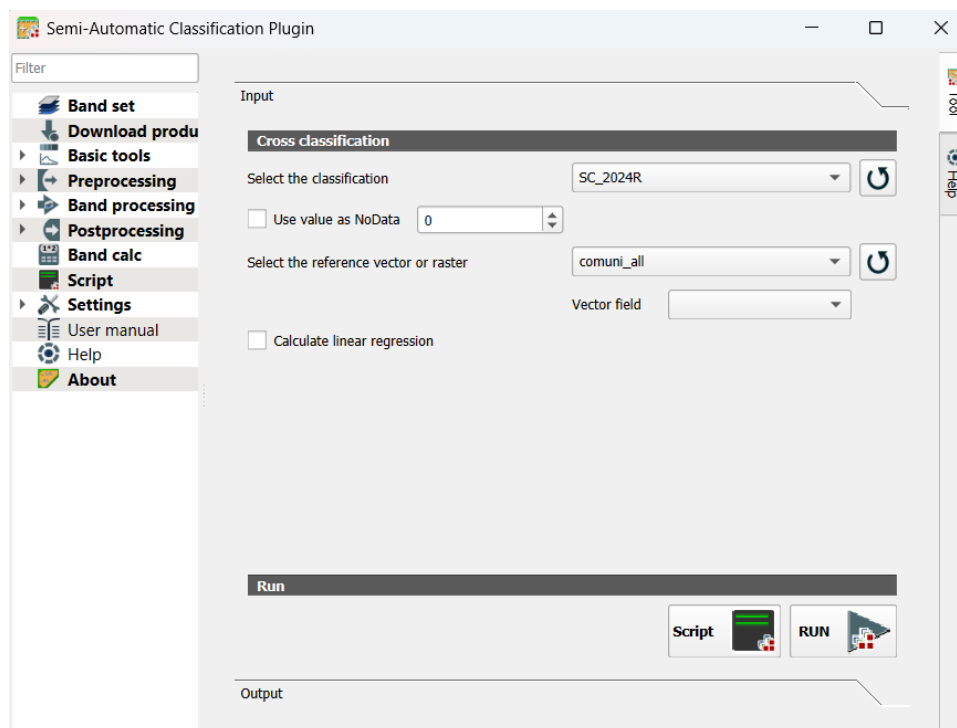


Figura 3.16 — Strumento Cross classification del plugin SCP: incrocio tra il raster SC_2024R e il layer dei confini comunali (comuni_all).

Questa procedura è stata ripetuta per tutte le combinazioni necessarie, producendo i raster combine_comuni_SC24R, combine_comuni_SC25R, combine_prov_SC24R e combine_prov_SC25R, ciascuno dei quali incrocia la classificazione del suolo consumato con l'unità amministrativa (comune o provincia) di appartenenza. Con lo stesso strumento è stato inoltre generato il raster combine_2425, ottenuto incrociando direttamente SC_2024R con SC_2025R: questo raster rappresenta la matrice completa di transizione tra tutte le classi di uso e copertura del suolo rilevate nelle due annualità, propedeutica alla successiva riclassificazione binaria descritta nel paragrafo seguente.

3.2.6 Riclassificazione binaria del suolo consumato

Per poter incrociare in modo sintetico i raster del suolo consumato con i cinque indicatori territoriali (DEM, slope, EUAP, fascia costiera, popolazione), è stato necessario ridurre il numero di classi tematiche, riportando ciascun raster a una semplice distinzione binaria tra suolo consumato (valore 1) e suolo non consumato (valore 2). A tale scopo è stato utilizzato lo strumento "Riclassifica in base a tabella" di QGIS, costruendo una tabella di riclassificazione in cui a tutti i codici di consumo di suolo permanente e reversibile (da 111 a 126) viene assegnato il valore 1, mentre a tutti i codici di suolo non consumato (da 201 a 206) viene assegnato il valore 2. Nella medesima tabella sono stati inclusi anche i codici aggregati di primo e secondo livello (1, 11, 12, 2), presenti in alcune porzioni di territorio

laddove non è disponibile un dettaglio informativo sufficiente per la classificazione al terzo livello (si veda il paragrafo 1.5): anche in questi casi, 1, 11 e 12 sono stati ricondotti al valore 1 (consumato) e 2 al valore 2 (non consumato), in modo da non perdere alcuna porzione di territorio nella successiva analisi.

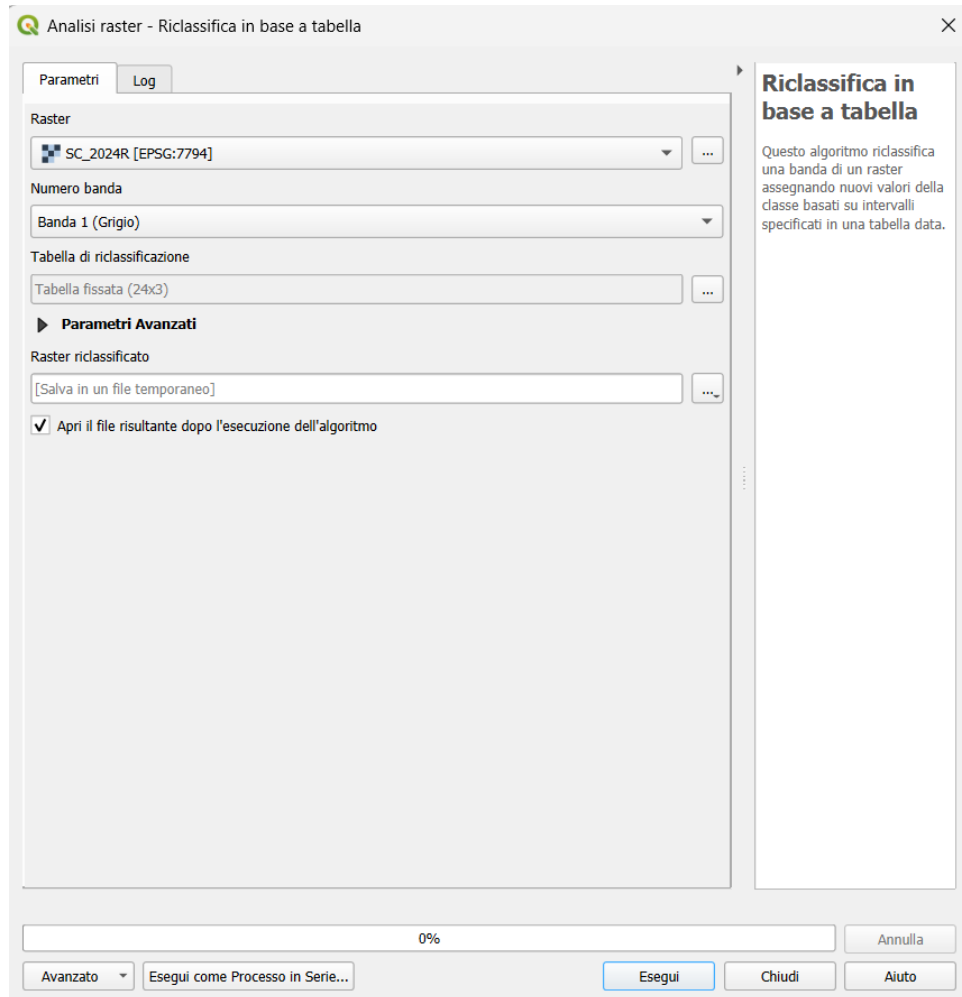


Figura 3.17 — Finestra "Riclassifica in base a tabella": selezione del raster da riclassificare (SC_2024R).

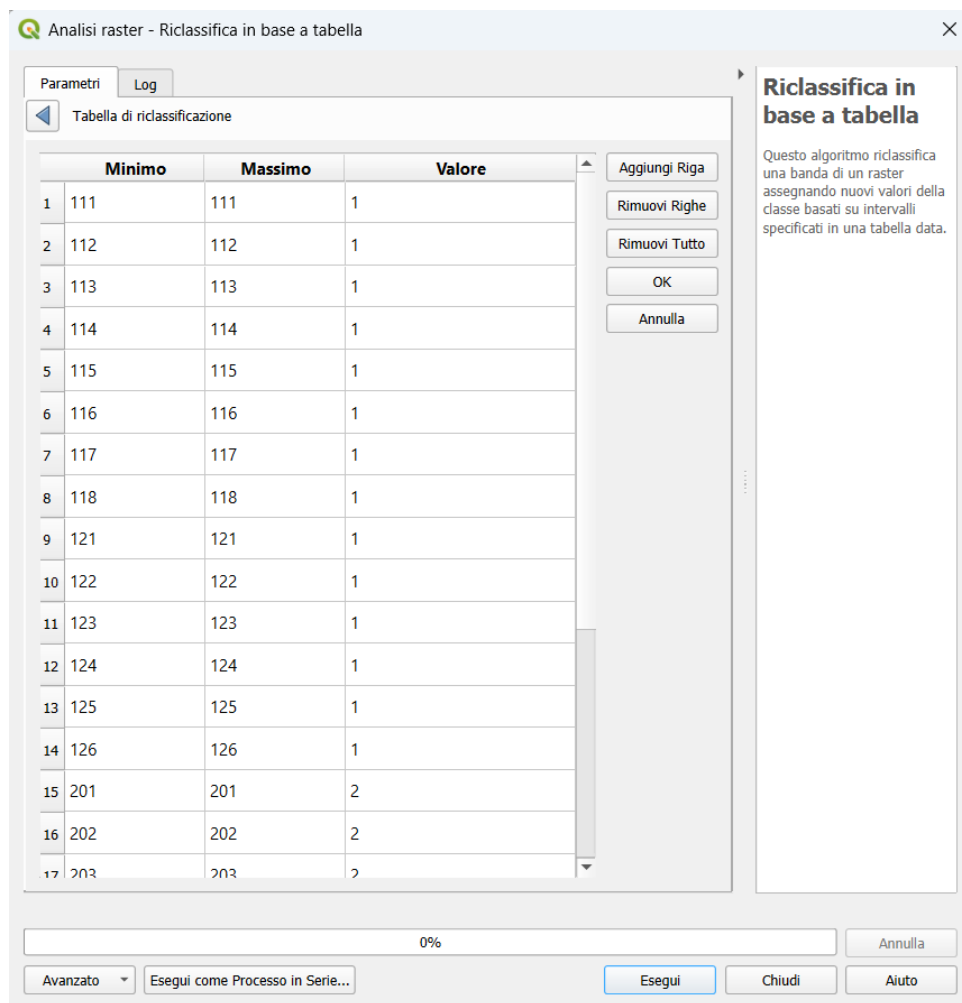


Figura 3.18 — Tabella di riclassificazione: i codici di consumo di suolo permanente e reversibile (111-118) vengono ricondotti al valore 1 e quelli di suolo non consumato al valore 2 (201-202).

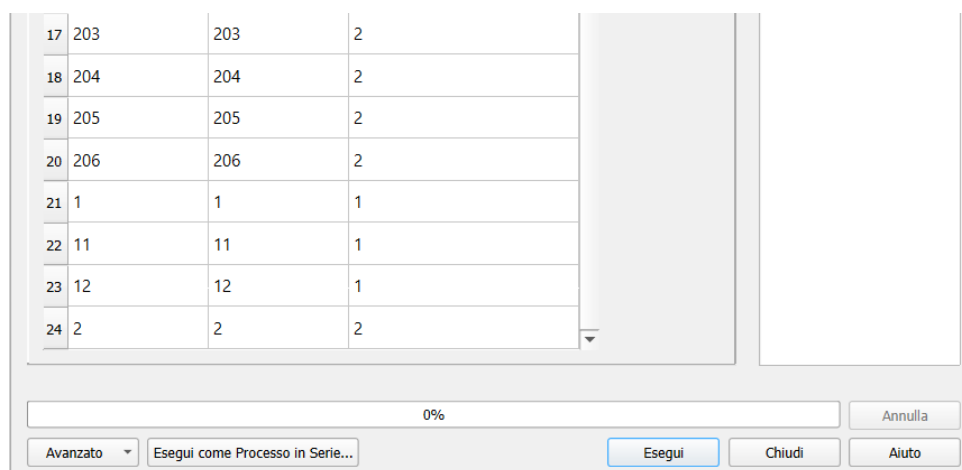


Figura 3.19 — Continuazione della tabella di riclassificazione: i codici di suolo non consumato (203-206) e i codici aggregati (1, 11, 12, 2) vengono ricondotti rispettivamente ai valori 1 e 2.

L'operazione è stata condotta separatamente su SC_2024R e su SC_2025R, producendo i due raster riclassificati SC_2024R_riclass e SC_2025R_riclass, entrambi con soli tre valori possibili: 0 (NoData), 1 (consumato) e 2 (non consumato).

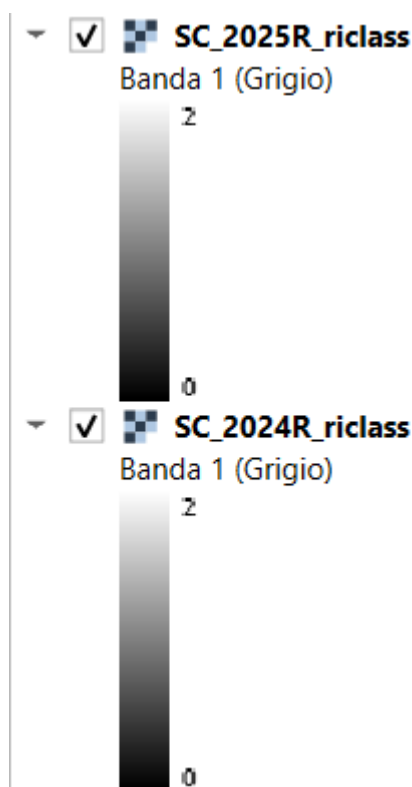


Figura 3.20 — I due raster riclassificati (SC_2025R_riclass e SC_2024R_riclass) nel pannello dei layer di QGIS, con rampa di colori a 3 valori (0-2).

3.2.7 Il raster di cambiamento e l'incrocio con i cinque indicatori

A partire dai due raster riclassificati è stato generato, sempre tramite la funzione Cross classification del plugin SCP, il raster cambiamento_2425_riclass, ottenuto incrociando SC_2024R_riclass con SC_2025R_riclass. Il risultato di questo incrocio produce quattro possibili combinazioni per ciascuna cella del territorio: suolo rimasto consumato in entrambe le annualità (1-1), suolo rinaturalizzato, cioè passato da consumato a non consumato (1-2), nuovo consumo di suolo, cioè passato da non consumato a consumato (2-1), e suolo rimasto non consumato in entrambe le annualità (2-2). Quest'ultimo raster costituisce la base per individuare in modo puntuale dove, all'interno della provincia di Trapani, si sia effettivamente verificato un nuovo consumo di suolo tra il 2024 e il 2025.

Per ciascuno dei cinque indicatori territoriali introdotti nel paragrafo 3.1 (DEM, slope, EUAP, fascia costiera, popolazione), forniti su scala nazionale, è stata dapprima effettuata un'operazione di ritaglio (clip) sull'estensione della provincia di Trapani. Il raster così ritagliato è stato quindi incrociato, sempre mediante la funzione Cross classification del plugin SCP, con ciascuno dei tre raster relativi al suolo consumato: SC_2024R_riclass, SC_2025R_riclass e cambiamento_2425_riclass. Per ogni indicatore sono stati quindi prodotti tre combine distinti, per un totale complessivo di quindici combinazioni (5 indicatori

x 3 raster di riferimento), ciascuna delle quali costituisce la base informativa per il calcolo degli indicatori quantitativi presentati nel paragrafo 3.3.

3.2.8 Da QGIS a Excel: esportazione dei dati e costruzione delle tabelle pivot

Ciascuna operazione di cross classification eseguita con il plugin SCP produce in output, oltre al raster combinato, anche una tabella in formato CSV contenente, per ciascuna combinazione di classi rilevata, il numero di pixel (PixelSum) e la relativa area in metri quadrati. Questi file CSV sono stati importati in Excel per l'elaborazione tabellare finale, utilizzando la funzione "Recupera dati" del menu Dati, selezionando l'origine "Da testo/CSV".

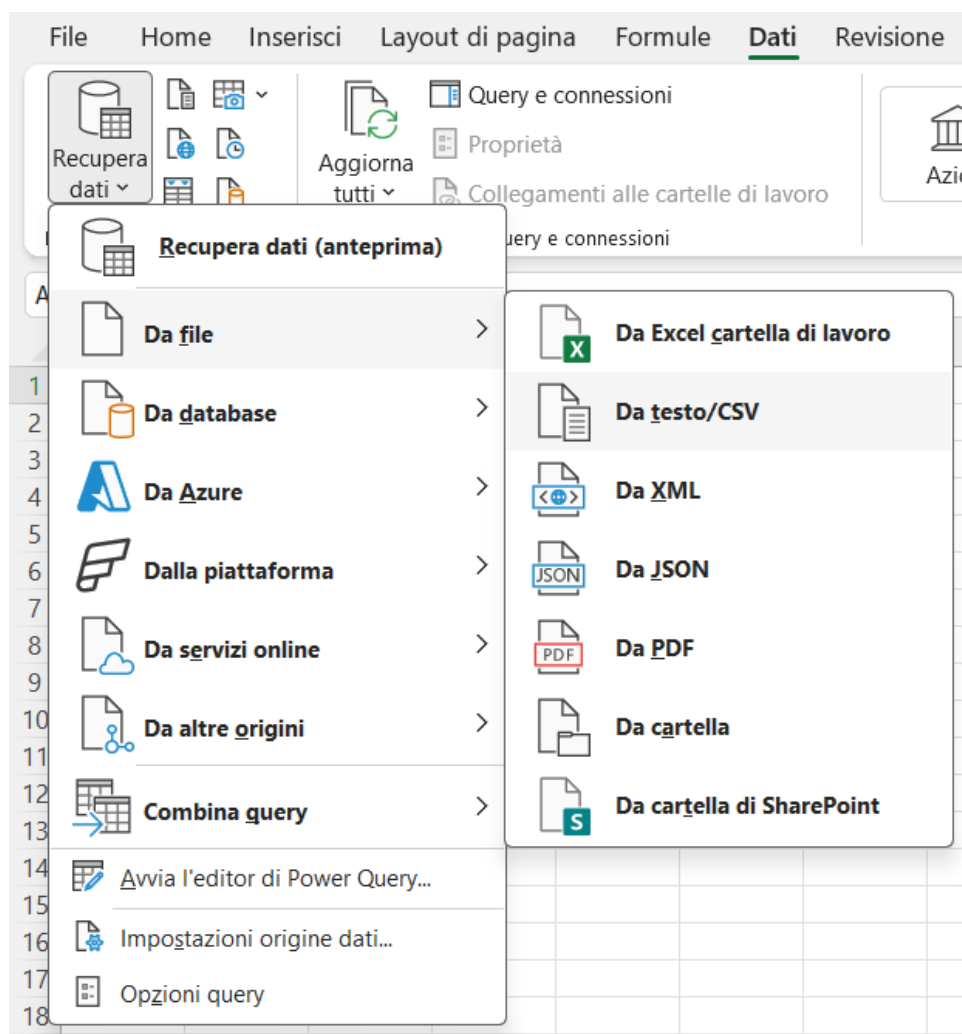


Figura 3.21 — Menu "Recupera dati" di Excel, con selezione dell'origine "Da testo/CSV".

combine_prov_SC24R.csv

Origine file: 1252: Europa occidentale (Windows) Delimitatore: Virgola Rilevamento del tipo di dati: In base all'intero set di dati

RasterValue	Reference	Classification	PixelSum	Area [metre^2]
21	1	81	716156	71615600
22	2	81	22075547	2207554700
23	11	81	52	5200
24	12	81	253	25300
25	111	81	526381	52638100
26	112	81	474078	47407800
27	113	81	12602	1260200
28	114	81	674	67400
29	115	81	7825	782500
30	116	81	8266	826600
31	118	81	1011	101100
32	121	81	29492	2949200
33	122	81	28561	2856100
34	123	81	77535	7753500
35	125	81	28214	2821400
36	126	81	132	13200
37	201	81	8093	809300
38	203	81	69068	6906800
39	204	81	3008	300800
40	205	81	14174	1417400
null	null	null	null	null

Carica Trasforma dati Annulla

Figura 3.22 — Anteprima di importazione del file combine_prov_SC24R.csv, con le colonne RasterValue, Reference, Classification, PixelSum e Area.

Una volta caricata la tabella, è stata aggiunta una colonna denominata Ettari, calcolata dividendo per 10.000 il valore dell'area in metri quadrati (colonna Area [metre^2]), così da esprimere tutte le superfici nell'unità di misura più consona ad analisi di questo tipo. Le colonne sono state inoltre rinominate in modo da rendere più leggibile la tabella: ad esempio, per il combine tra il suolo consumato e la provincia, la colonna relativa al codice di classificazione del suolo consumato è stata rinominata SC24R (o SC25R), mentre quella relativa al riferimento amministrativo è stata rinominata Provincia (o Comuni, nel caso dei combine a scala comunale).

	A	B	C	D	E	F
1	RasterValue	SC24R	Provincia	PixelSum	Area [metre^2]	Ettari
2	21	1	81	716156	71615600	7161,56
3	22	2	81	22075547	2207554700	220755,5
4	23	11	81	52	5200	0,52
5	24	12	81	253	25300	2,53
6	25	111	81	526381	52638100	5263,81
7	26	112	81	474078	47407800	4740,78
8	27	113	81	12602	1260200	126,02
9	28	114	81	674	67400	6,74
10	29	115	81	7825	782500	78,25
11	30	116	81	8266	826600	82,66
12	31	118	81	1011	101100	10,11
13	32	121	81	29492	2949200	294,92
14	33	122	81	28561	2856100	285,61
15	34	123	81	77535	7753500	775,35
16	35	125	81	28214	2821400	282,14
17	36	126	81	132	13200	1,32
18	37	201	81	8093	809300	80,93
19	38	203	81	69068	6906800	690,68
20	39	204	81	3008	300800	30,08
21	40	205	81	14174	1417400	141,74

Figura 3.23 — Tabella Excel dopo l'importazione, con la colonna Ettari calcolata a partire dall'area in metri quadrati (esempio a scala provinciale).

A partire da questa tabella è stata quindi creata una tabella pivot, selezionando l'intero intervallo di dati e utilizzando il comando "Tabella pivot" del menu Inserisci.

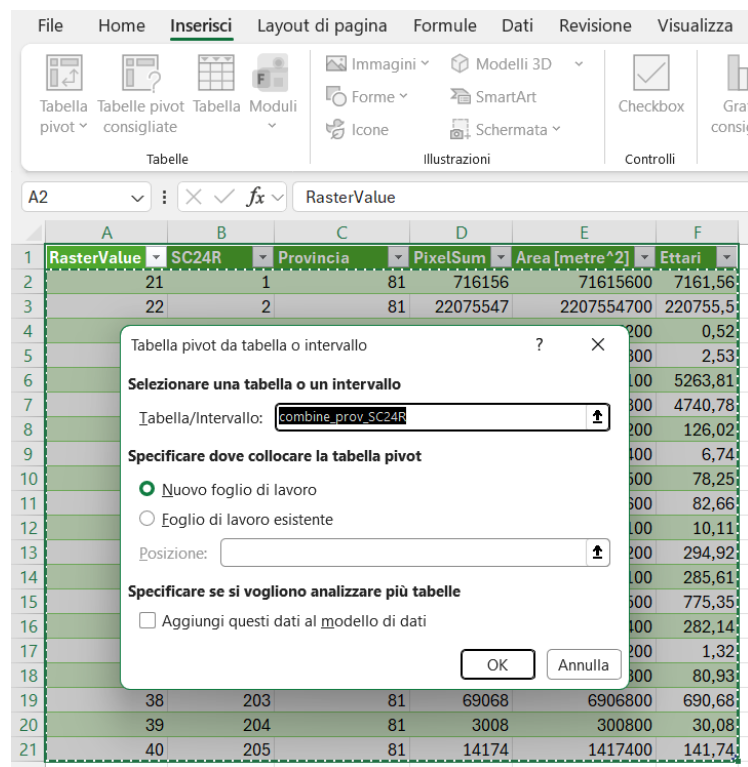


Figura 3.24 — Finestra di creazione della tabella pivot a partire dall'intervallo di dati importato.

Campi tabella pivot

Selezionare i campi da aggiungere al rapporto:

Cerca

☐ RasterValue
☒ **SC24R**
☒ **Provincia**
☐ PixelSum
☐ Area [metre^2]
☒ **Ettari**
Altre tabelle...

Trascinare i campi nelle aree sottostanti:

Filtri

Colonne

SC24R

Righe

Provincia

Valori

Somma di Ettari

☐ Rinvia aggiornamento layout

Aggiorna

2																						
3	Somma di Ettari	Etichette di colonna																				
4	Etichette di riga	1	2	11	12	111	112	113	114	115	116	118	121	122	123	125	126	201	203	204	205	Totale complessivo
5	81	7161,56	220755,47	0,52	2,53	5263,81	4740,78	126,02	6,74	78,25	82,66	10,11	294,92	285,61	775,35	282,14	1,32	80,93	690,68	30,08	141,74	240811
6	Totale complessivo	7161,56	220755,47	0,52	2,53	5263,81	4740,78	126,02	6,74	78,25	82,66	10,11	294,92	285,61	775,35	282,14	1,32	80,93	690,68	30,08	141,74	240811
7																						

La medesima procedura è stata applicata sistematicamente a tutti i combine prodotti in QGIS, incluso il livello comunale, per il quale la tabella pivot presenta nelle righe i singoli

comuni della provincia (identificati dal rispettivo codice ISTAT) anziché il solo dato provinciale aggregato, permettendo così di leggere la distribuzione del consumo di suolo per ciascuno dei 25 comuni.

	A	B	C	D	E	F
1	RasterValue	SC_2024R	Comuni	PixelSum	Area [metre^2]	Ettari
2	23	1	81001	53956	5395600	539,56
3	25	1	81002	10226	1022600	102,26
4	27	1	81003	19329	1932900	193,29
5	29	1	81004	20213	2021300	202,13
6	31	1	81005	32739	3273900	327,39
7	32	2	81001	1089477	108947700	10894,77
8	33	1	81006	58549	5854900	585,49
9	34	2	81002	696534	69653400	6965,34
10	36	1	81007	20378	2037800	203,78
11	37	2	81003	1478007	147800700	14780,07
12	39	1	81008	30262	3026200	302,62
13	40	2	81004	587147	58714700	5871,47
14	42	1	81009	13619	1361900	136,19
15	43	2	81005	1171577	117157700	11715,77
16	45	1	81010	9618	961800	96,18
17	46	2	81006	1904732	190473200	19047,32
18	47	1	81011	153671	15367100	1536,71
19	48	2	81007	631753	63175300	6317,53
20	49	1	81012	56429	5642900	564,29
21	50	2	81008	402049	40204900	4020,49
22	51	1	81013	16642	1664200	166,42
23	52	2	81009	351155	35115500	3511,55
24	53	1	81014	11610	1161000	116,1
25	54	2	81010	438106	43810600	4381,06
26	55	1	81015	18592	1859200	185,92
27	56	2	81011	2024824	202482400	20248,24

Figura 3.27 — Tabella Excel con colonna Ettari a scala comunale, prima della creazione della tabella pivot.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
2	Somma di Ettari	Etichette di colonna																				
3	Etichette di riga	1	2	11	12	111	112	113	114	115	116	118	121	122	123	125	126	201	203	204	205	Totale complessivo
4	81001	539,56	10894,77	0,1	433,28	306,58	9,1				3,94		2,82	27,93	0,66	0,78		0,46	2,6	0,17		12222,72
5	81002	102,26	6965,34	0	62,04	100,93	2,14				0,44		1,21	3,72		7,45				0,57		7246,14
6	81003	193,29	14780,07	0	115,67	234,02	23,68				3,65	0,2	12,01	13,31	20,85	1,46	0,1		2,05	9,93		15410,31
7	81004	202,13	5871,47	0,1	231,45	181,04	5,29			0,3	0,99		5,71	9,41	11,49	0,97	0		30,42			6550,79
8	81005	327,39	11715,77	0,2	194,56	248,78	3,83			3,57	5,8		33,17	24,55	103,3	6,5		0,98	0,16	2,31		12670,86
9	81006	585,49	19047,32	0,1	488,98	430,14	10,39			0,15	8,1	5,02	15,77	18,39	9,31	42,89		0,43	5,34			20667,65
10	81007	203,78	6317,53	0,1	87,73	90,58					1,16		5,68	6,67	243,3							6956,57
11	81008	302,62	4020,49	0,1	198,04	171,41	1,02			0,28	1,24	0,26	1,95	9,05					1,41			4710,45
12	81009	136,19	3511,55	0,1	62,57	81,45				1,67	0,24		9,8	2,64	2,56							3808,78
13	81010	96,18	4381,06		49,89	101,5	2,27				0,32		1,5	0,29						0,93		4633,94
14	81011	1536,71	20248,24	0,2	1130,4	484,35	14,94	0	8,34	17			17,07	66,63	208,8	53,66	1	76,6	369,1			24233,06
15	81012	564,29	25214,86	0,3	587,17	544,79	12,24		16,8	10	3,62		99,25	22,05	28,39	11,76	0,1		94,35		133,5	27344,39
16	81013	166,42	5345,05		119,75	134,93	2,45				0,58		1,38	2,37						0,39		5773,32
17	81014	116,1	7093,46		74,59	152,64				1,17	0,18		10,79	0,54	1,3				0,73			7451,5
18	81015	185,92	7630,33	0,4	146,2	185,5					1,42		6,42	17,24	0,18	54,68			3,6			8231,93
19	81016	6,57	501,78		10,35	14,38					0,26		0,14	0,63								534,11
20	81017	53,71	3940,99		30,6	80,34					1,18		5,11	0,38		4,39	0,1		0,44			4117,21
21	81018	228,75	17483,36		168,57	235,47	1,44				4,88	0,27	10,7	12,73	3,55	3,76	0,1		0,69	0,16		18154,41
22	81019	113,53	5915,53	0,1	69,38	132,68	6,18				1,96		5,17	1,6		16,16			3,02	1,35		6266,66
23	81020	126,48	5604,37		94,73	87,23				2,05	6,87		4,11	8,11	23,52	0,01						5957,48
24	81021	541,23	16528		398,97	319,35	23,35			42,6	2,4		8,35	15,6	69,05	11,37		0,27	0,14	9,05	5,08	17974,81
25	81022	305,52	4591,02		178,71	130,44				0,2	2,07		6,73	5,46	49,07	1,64			0,54			5271,4
26	81023	25,88	827,82		25,33	26,7					0,06		0,06	0,2								906,05
27	81024	189,49	3870,07		140,11	86,87	1,72			1,14	1,41		28,14	6,15		0,05			179,8			4505,86
28	81025	312,07	8455,22	0,1	164,76	178,68	5,98	6,7			6,48		1,88	9,96		62,21		2,68	2,22	0,59	1,46	9211,02
29	Totale complessivo	7161,56	220755,5	0,5	2,5	5263,8	4740,8	126	6,7	78,3	82,7	10,1	294,9	285,6	775,4	282,1	1,3	80,9	690,7	30,1	141,7	240811,22

Figura 3.28 — Tabella pivot a scala comunale: superficie in ettari per ciascuna classe di consumo di suolo, per ciascuno dei 25 comuni della provincia di Trapani, con totali di riga e di colonna.

È importante sottolineare che la procedura appena descritta, ossia importazione del CSV, calcolo della colonna “Ettari” e costruzione della tabella pivot, non è stata applicata soltanto ai quattro combine amministrativi e al combine_2425 illustrati come esempio in questo paragrafo, ma è stata replicata sistematicamente per l'intero insieme dei combine prodotti in QGIS. In totale sono stati quindi elaborati in Excel venti combine: i cinque combine di base (combine_comuni_SC24R, combine_comuni_SC25R, combine_prov_SC24R, combine_prov_SC25R e combine_2425) e i quindici combine ottenuti incrociando ciascuno dei cinque indicatori territoriali, DEM, slope, EUAP, fascia costiera e popolazione, con i tre raster di riferimento SC_2024R_riclass, SC_2025R_riclass e cambiamento_2425_riclass (si veda il paragrafo 3.2.7).

Per ciascuno di questi venti combine è stata quindi costruita la relativa tabella pivot, con la sola eccezione dell'indicatore popolazione, per il quale, come anticipato nel paragrafo 3.1, il raster di riferimento riporta valori continui di abitanti anziché classi discrete: in questo caso l'aggregazione dei dati ha richiesto un'operazione di collegamento (join) tra le tabelle anziché una semplice tabella pivot su classi categoriali, aspetto che verrà descritto nel dettaglio contestualmente alla presentazione dei risultati relativi a questo indicatore nel paragrafo 3.3. L'insieme delle tabelle pivot ottenute per tutti i venti combine costituisce la base dati completa a partire dalla quale sono stati calcolati tutti gli indicatori e i risultati presentati nei paragrafi successivi.

3.3 Risultati del calcolo degli indicatori nell'area di studio

Il presente paragrafo presenta i risultati ottenuti applicando il workflow descritto nel paragrafo 3.2 al territorio della provincia di Trapani, con riferimento alle annualità 2024 e 2025 e al relativo cambiamento intercorso tra i due anni. I risultati sono organizzati per gruppi tematici omogenei, dando risalto ai dati che risultano più significativi ai fini della comprensione delle dinamiche di trasformazione del territorio provinciale, per poi essere discussi criticamente nel paragrafo 3.4.

3.3.1 Il quadro generale del consumo di suolo

Al 2024, la superficie di suolo consumato nella provincia di Trapani ammontava a 19.112,32 ettari, pari al 7,94% dell'intera superficie amministrativa provinciale (240.811,2 ettari). Nel 2025 tale superficie è salita a 19.227,70 ettari, corrispondenti al 7,98% del territorio, con un incremento netto di 115,38 ettari in un solo anno, equivalente a una densità di nuovo consumo di suolo di circa 4,79 m² per ogni ettaro di superficie provinciale. Si tratta di un

dato che, seppur relativo a un intervallo temporale ridotto, conferma la persistenza del fenomeno anche in un territorio, come quello trapanese, non caratterizzato dalle dinamiche di espansione più intense a livello regionale (si veda il paragrafo 2.1 e il confronto con i dati ARPA Sicilia).

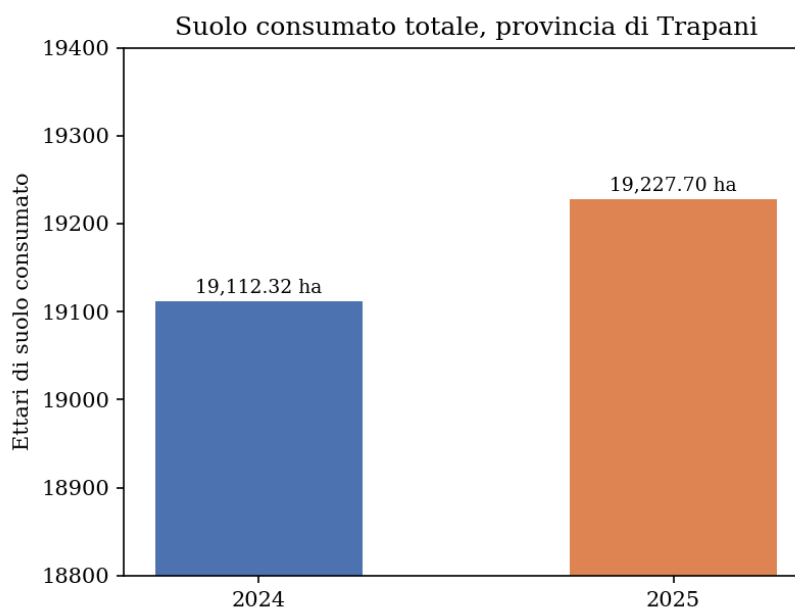


Figura 3.29 — Superficie totale di suolo consumato nella provincia di Trapani, 2024 e 2025.

Un quadro più dettagliato emerge osservando la distribuzione del fenomeno a scala comunale (Figura 3.30): nel 2025 i comuni di Erice (14,7%) e Marsala (14,6%) presentano l'incidenza più elevata di suolo consumato rispetto alla propria superficie territoriale, seguiti da Valderice (10,8%), mentre Salemi (3,7%) risulta il comune meno interessato dal fenomeno in termini relativi.

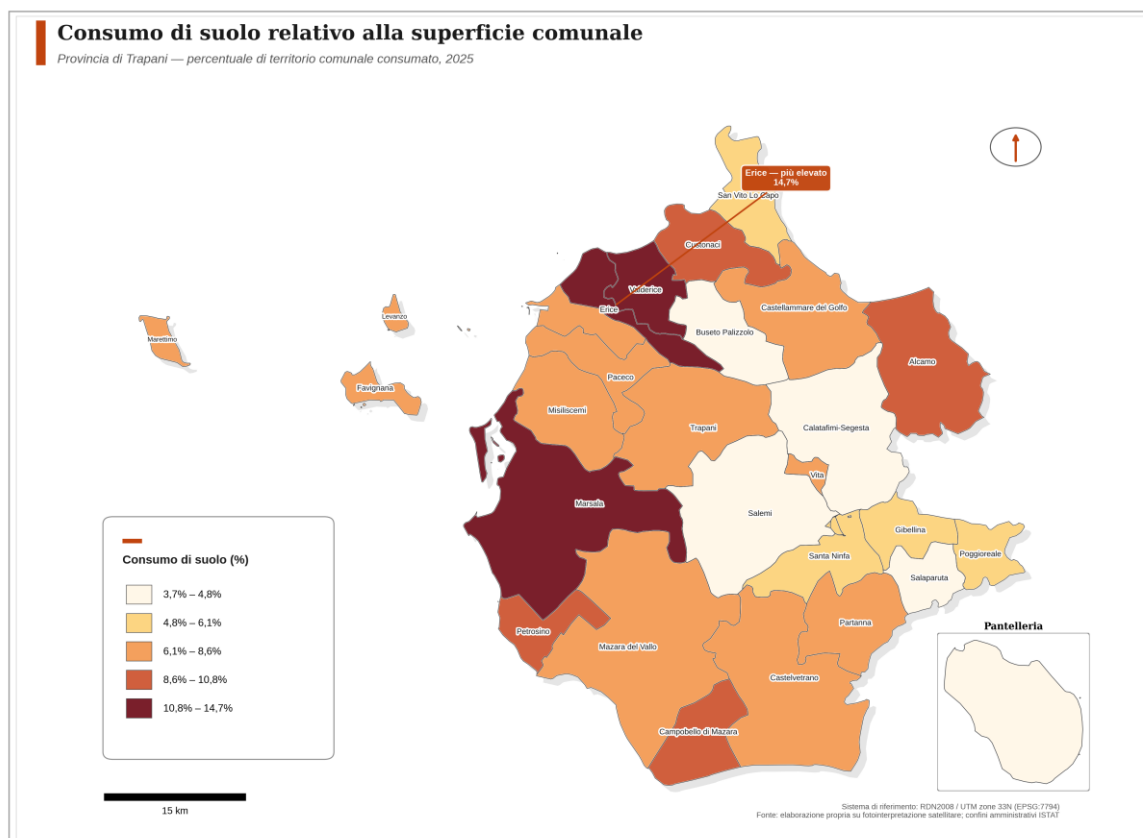


Figura 3.30 — Percentuale di suolo consumato rispetto alla superficie comunale, per comune, 2025.

3.3.2 Incremento lordo, rinaturalizzazioni e composizione del nuovo consumo

Un dato particolarmente rilevante emerge scomponendo l'incremento netto di 115,38 ettari nelle sue componenti. L'incremento lordo di suolo consumato, cioè la superficie complessivamente trasformata da non consumata a consumata nel periodo, è risultato pari a 120,09 ettari. Nello stesso periodo, tuttavia, sono stati rilevati 4,71 ettari di rinaturalizzazioni, ossia porzioni di territorio precedentemente classificate come consumate e ripristinate a condizioni naturali o seminaturali ($120,09 - 4,71 = 115,38$ ettari, coerentemente con l'incremento netto riportato al paragrafo precedente). Questo bilancio, per quanto con un saldo ampiamente positivo, mostra che il territorio provinciale non è del tutto privo di dinamiche di recupero, per quanto marginali rispetto al fenomeno complessivo.

Ancora più significativa risulta la composizione dell'incremento netto per tipologia di consumo di suolo. Su 115,38 ettari di nuovo consumo netto, solamente 12,87 ettari (11,2%) sono riconducibili a consumo di suolo permanente (edifici, infrastrutture, altre coperture stabili), mentre ben 102,51 ettari (88,8%) sono classificati come consumo di suolo reversibile (cantieri, aree estrattive, impianti fotovoltaici a terra e altre coperture temporanee). Questo dato è coerente con quanto osservato nel corso dell'attività di

fotointerpretazione descritta nel Capitolo 2, dove buona parte delle trasformazioni rilevate era riconducibile proprio a cantieri, serre e aree estrattive (si vedano i casi descritti nel paragrafo 2.2.3), e suggerisce che la crescita del consumo di suolo nella provincia di Trapani nel biennio considerato sia trainata soprattutto da attività di cantiere e da usi del suolo non stabilizzati, piuttosto che da nuova edificazione permanente.

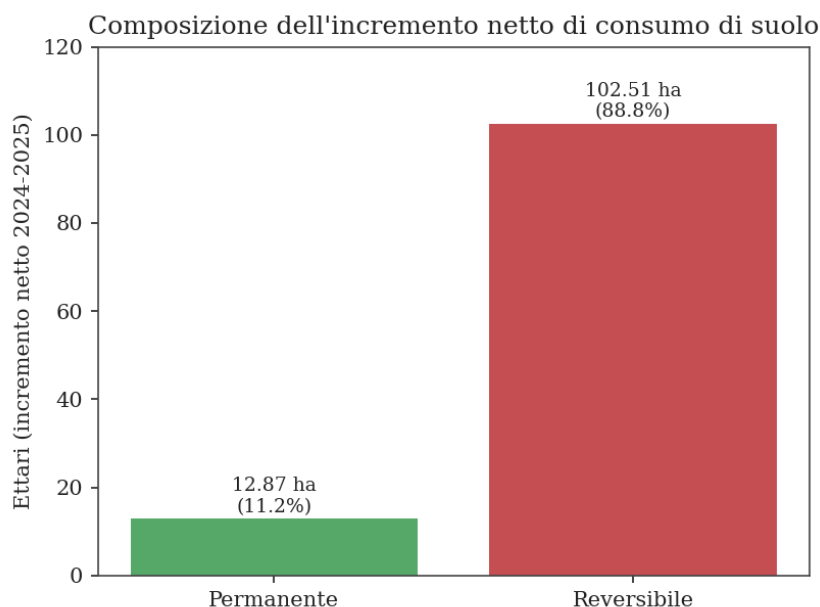


Figura 3.31 — Composizione dell'incremento netto di consumo di suolo (2024-2025) per tipologia: permanente vs reversibile.

3.3.3 Il consumo di suolo nelle aree naturali protette (EUAP)

Il consumo di suolo all'interno delle aree naturali protette censite nell'Elenco Ufficiale delle Aree Protette (EUAP), descritte nel paragrafo 2.1, risulta pari a 248,68 ettari sia nel 2024 sia nel 2025, con una variazione nulla tra le due annualità. Questo risultato indica che, nel periodo considerato, non si sono verificate nuove trasformazioni del suolo all'interno delle riserve naturali e delle aree marine protette della provincia di Trapani, un dato positivo se letto alla luce dell'obiettivo europeo di azzeramento del consumo netto di suolo richiamato nel paragrafo 1.1, e in particolare nelle aree a maggiore valore ecologico.

3.3.4 Distribuzione del consumo di suolo rispetto alla fascia costiera

L'incrocio tra i raster del suolo consumato e le quattro fasce di distanza dalla linea di costa (0-300 m, 300-1000 m, 1000-10.000 m, oltre 10.000 m) restituisce un quadro articolato. In termini assoluti, la maggior parte del nuovo consumo di suolo tra il 2024 e il 2025 si è concentrata nelle fasce più interne: 61,64 ettari (53,4% del totale) oltre i 10 km dalla costa e 49,56 ettari (42,9%) nella fascia intermedia tra 1 e 10 km, mentre soltanto 3,22 ettari (2,8%)

sono stati rilevati nella fascia 300-1000 m e appena 0,96 ettari (0,8%) nella fascia più prossima alla costa (0-300 m), quest'ultima coincidente con la fascia di tutela paesaggistica definita dall'articolo 142 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (si veda il paragrafo 3.1).

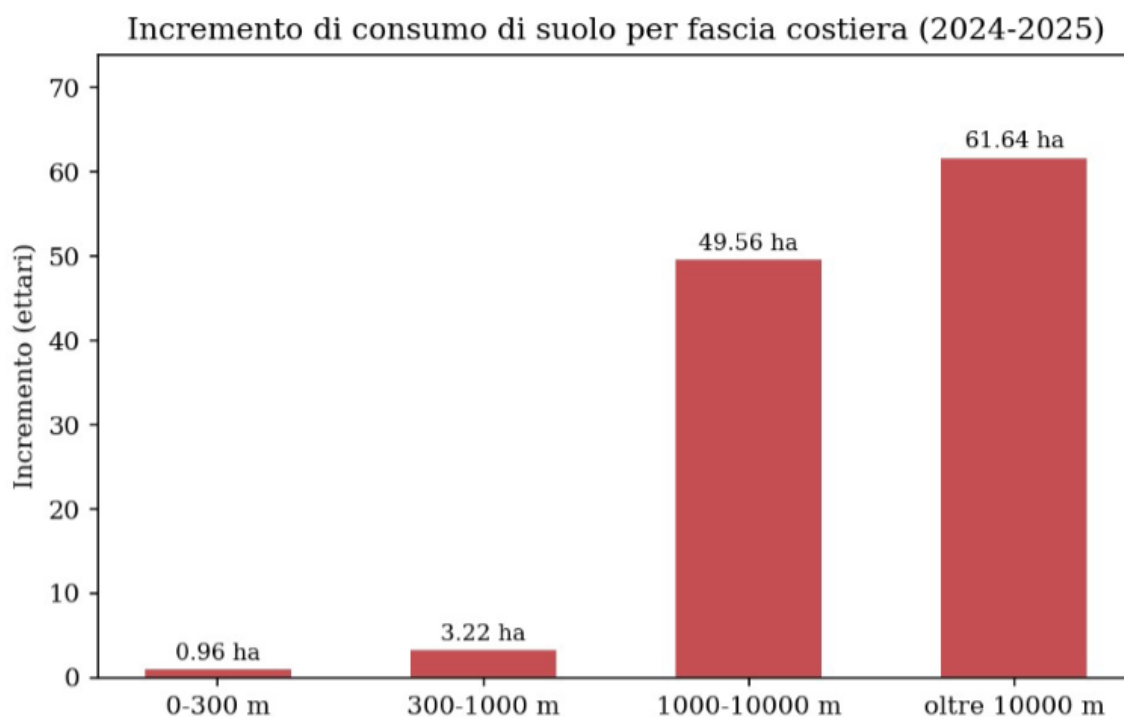


Figura 3.32 — Incremento di suolo consumato per fascia di distanza dalla linea di costa, 2024-2025.

Se si osserva invece la percentuale di suolo già consumato rispetto alla superficie di ciascuna fascia (Figura 3.33), il quadro si inverte rispetto alla distribuzione del solo incremento: la fascia costiera 0-300 m risulta la più intensamente consumata in assoluto, con il 21,69% del territorio già artificializzato nel 2025, seguita dalla fascia 300-1000 m (18,88%), mentre le fasce più interne presentano percentuali di consumo nettamente inferiori (9,02% nella fascia 1000-10.000 m e appena il 4,10% oltre i 10 km).

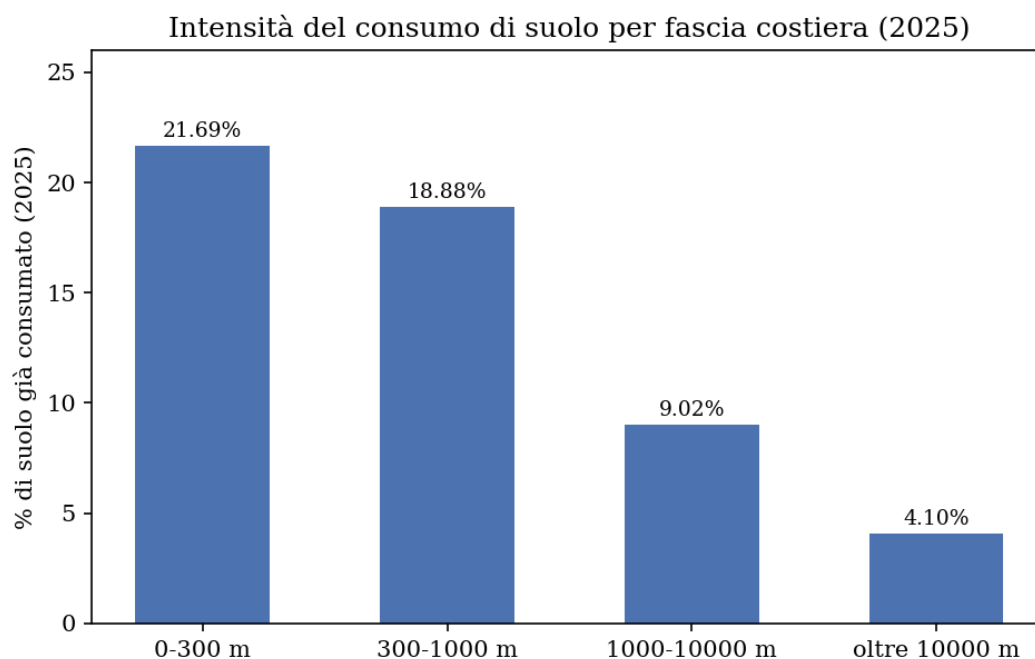


Figura 3.33 — Percentuale di suolo già consumato per fascia di distanza dalla costa (2025): il gradiente di intensità si inverte rispetto alla distribuzione del nuovo incremento.

In altre parole, la fascia costiera risulta storicamente la più pressata dall'urbanizzazione, ma le nuove trasformazioni rilevate nel biennio 2024-2025 si concentrano prevalentemente nell'entroterra, un pattern che può essere letto come un effetto di saturazione: la fascia costiera, già in gran parte trasformata, presenta minori margini di ulteriore espansione rispetto alle aree più interne.

A livello comunale (Figura 3.34), la pressione edilizia sulla fascia costiera 0-300 m appare fortemente polarizzata: Trapani presenta il valore più elevato, con il 65% della fascia già consumato, seguito da Erice e Valderice, mentre i comuni privi di affaccio sulla costa risultano esclusi dal calcolo di questo indicatore.

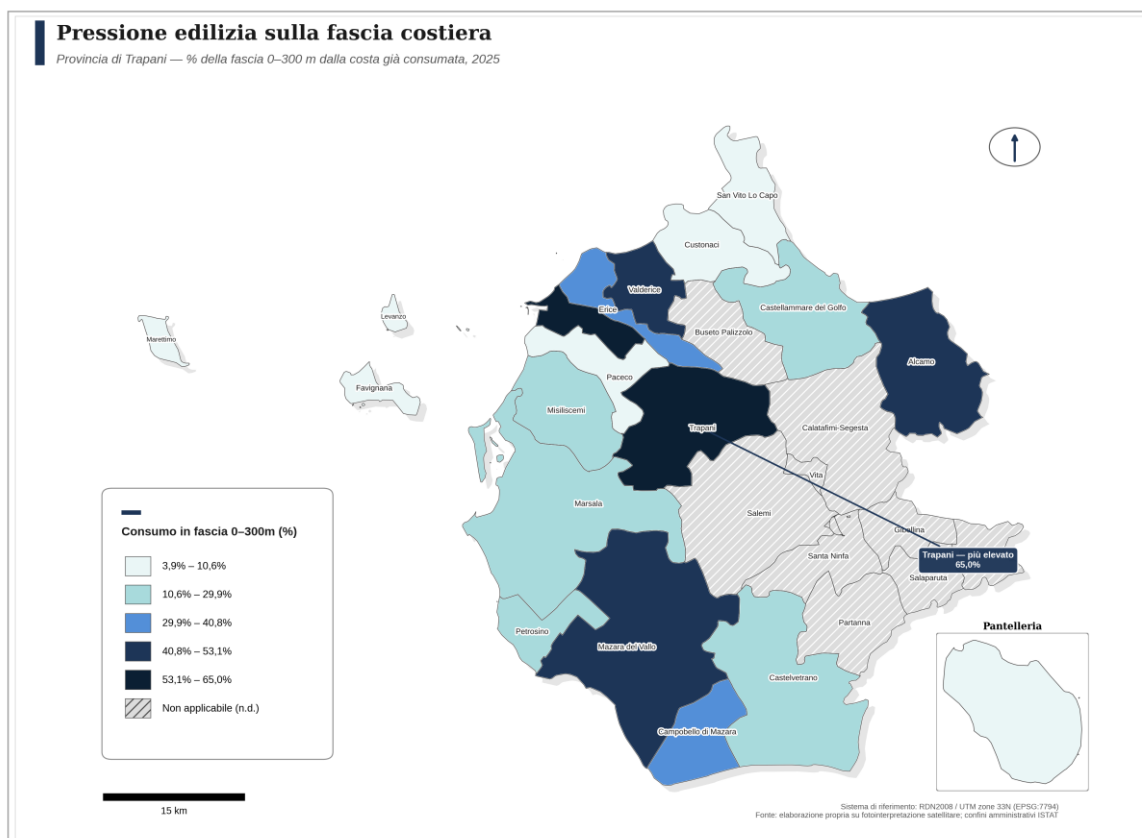


Figura 3.34 — Percentuale della fascia costiera 0-300 m già consumata, per comune, 2025.

3.3.5 Distribuzione altimetrica del consumo di suolo (DEM)

L'analisi rispetto alle fasce altimetriche mostra una concentrazione ancora più marcata: il 94,7% del nuovo consumo di suolo netto (109,23 ettari su 115,38) si è verificato nella fascia 0-300 m di quota, il 5,2% (6,04 ettari) nella fascia 300-600 m, e appena lo 0,1% (0,11 ettari) oltre i 600 m di quota, quota che comprende i rilievi più elevati della provincia descritti nel paragrafo 2.1 (Monte Erice, Monte Cofano, Monte Bonifato). Questo risultato conferma quanto atteso sulla base della morfologia del territorio provinciale: le trasformazioni si concentrano quasi esclusivamente nelle aree pianeggianti e nelle prime colline, mentre i rilievi maggiori restano sostanzialmente esclusi dalle nuove dinamiche di trasformazione, coerentemente con la loro minore accessibilità e con la presenza, in alcuni casi, di vincoli di tutela ambientale (si pensi alla Riserva di Monte Cofano).

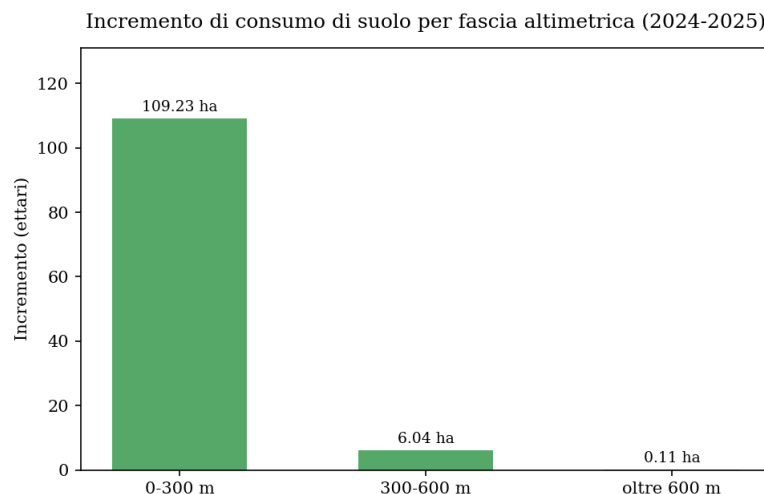


Figura 3.35 — Incremento di suolo consumato per fascia altimetrica, 2024-2025.

Anche in questo caso la lettura comunale (Figura 3.36) conferma il quadro generale: Erice registra la quota più elevata di consumo a bassa quota (16,2%), mentre Vita, comune dell'entroterra, presenta il valore più contenuto (1,4%).

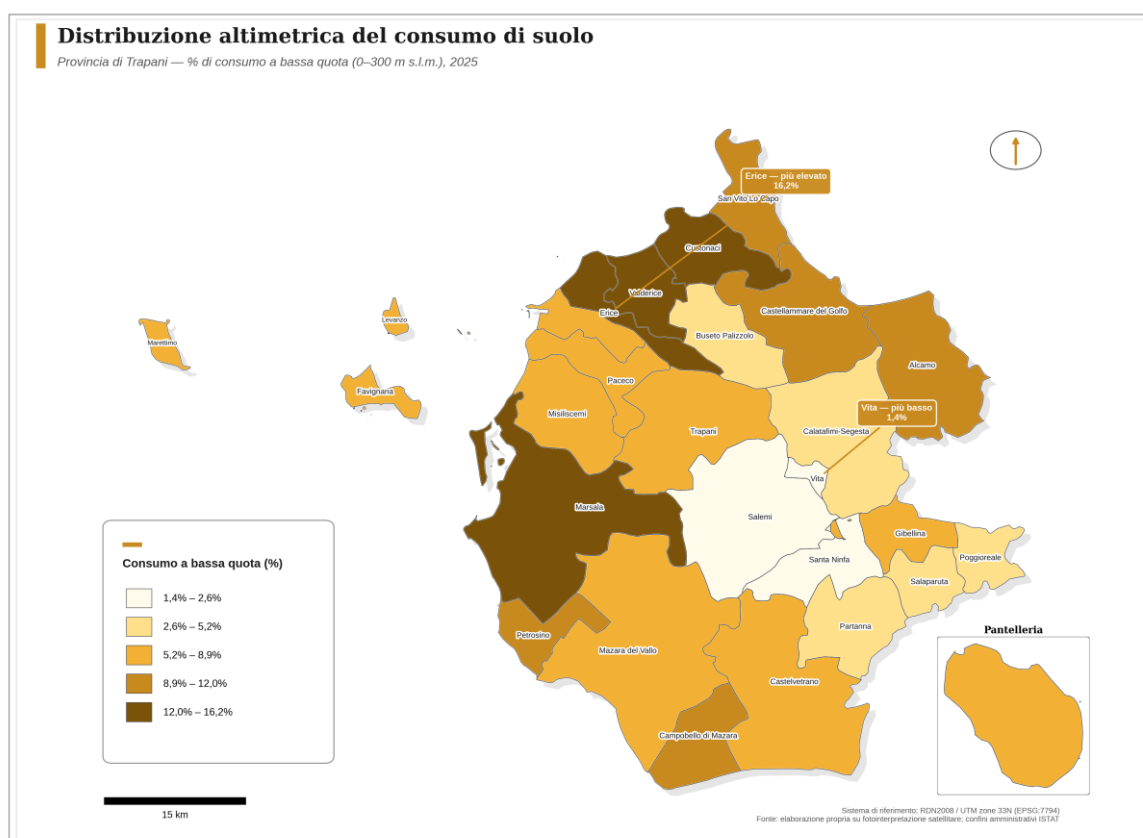


Figura 3.36 — Percentuale di consumo di suolo nella fascia altimetrica 0-300 m, per comune, 2025.

3.3.6 Distribuzione del consumo di suolo rispetto alla pendenza (slope)

Un quadro simile, ma meno estremo, emerge dall'analisi della pendenza: il 78,7% del nuovo consumo netto (90,77 ettari) ha interessato aree con pendenza compresa tra 0 e 10%, mentre il restante 21,3% (24,61 ettari) ha interessato aree con pendenza superiore al 10%. Sebbene la quota prevalente delle nuove trasformazioni riguardi, come atteso, le aree pianeggianti, la quota non trascurabile di nuovo consumo su pendenze superiori al 10% merita attenzione: essa è in parte riconducibile a fenomeni quali le attività estrattive (si veda il caso della cava descritto nel paragrafo 2.2.3), che per loro natura possono interessare anche versanti acclivi, diversamente da quanto avviene per l'edilizia residenziale ordinaria.

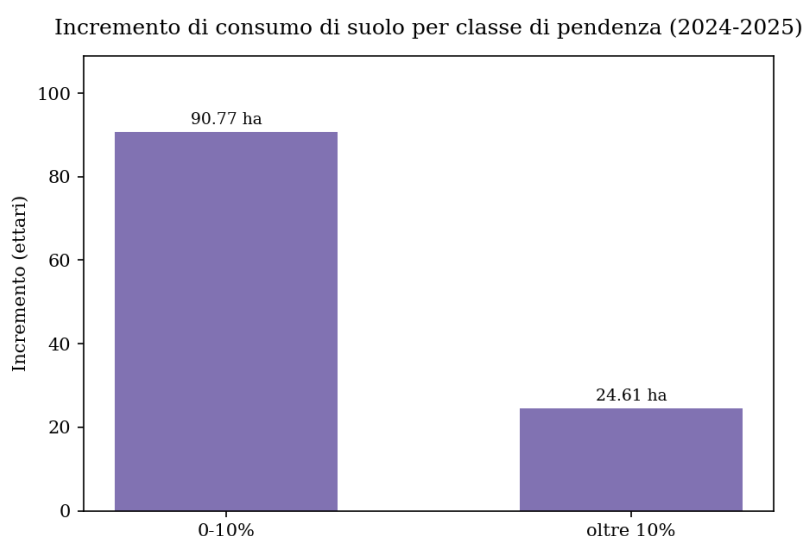


Figura 3.37 — Incremento di suolo consumato per classe di pendenza, 2024-2025.

La disaggregazione comunale (Figura 3.38) evidenzia come il valore più elevato si registri a Petrosino (13,6%), un dato che si discosta nettamente dal resto della provincia e che meriterebbe un approfondimento specifico, non trattandosi di un comune caratterizzato da un'orografia particolarmente accidentata.

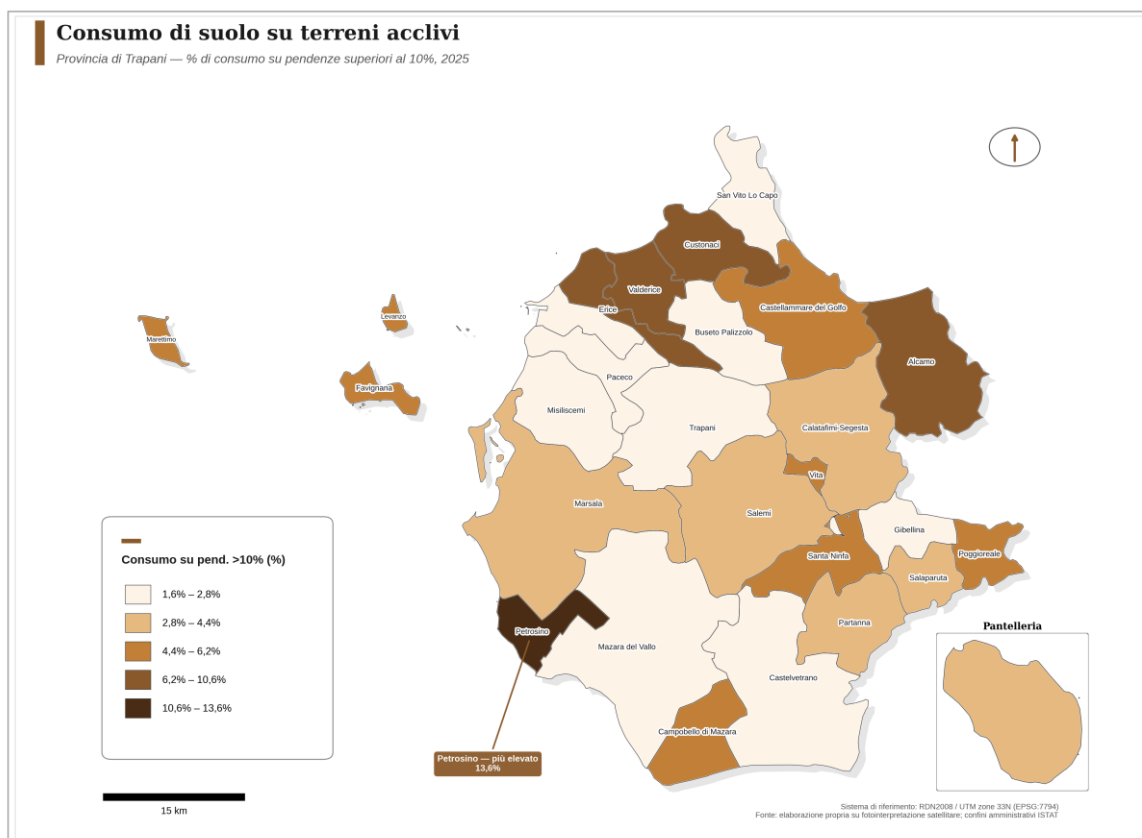


Figura 3.38 — Percentuale di consumo di suolo su pendenze superiori al 10%, per comune, 2025.

3.3.7 Popolazione e consumo di suolo pro capite

L'indicatore di densità abitativa (abitanti per ettaro rispetto alla superficie totale) mostra un valore sostanzialmente stabile, ma in leggera flessione, passando da 1,7148 a 1,7084 abitanti/ettaro tra il 2024 e il 2025 (-0,37% circa). Nello stesso periodo, tuttavia, il suolo consumato pro-capite è aumentato da 462,83 a 467,38 m² per abitante (+4,55 m²/ab, +0,98%), mentre il nuovo consumo di suolo del periodo, rapportato alla popolazione, corrisponde a un incremento di 2,80 m² per abitante. In altre parole, a fronte di una popolazione provinciale sostanzialmente stabile (e leggermente calante), il consumo di suolo pro capite continua a crescere: un pattern di disaccoppiamento tra dinamica demografica e consumo di suolo che riprende, a scala provinciale, quanto osservato a livello nazionale nell'ultimo Rapporto ISPRA-SNPA (si veda il paragrafo 1.1), e che verrà ripreso e discusso nel paragrafo 3.4.

3.4 Discussione dei risultati e confronto con i trend regionali/nazionali

I risultati presentati nel paragrafo 3.3 permettono di collocare la dinamica del consumo di suolo nella provincia di Trapani all'interno del quadro più ampio già delineato nei Capitoli

1 e 2, evidenziando sia elementi di continuità con i trend regionali e nazionali sia alcune specificità locali degne di approfondimento.

3.4.1 Un trend di crescita che si riaccende dopo una fase di rallentamento

Come riportato nel paragrafo 2.1, il Rapporto sul consumo di suolo relativo al territorio siciliano segnalava che, nel confronto tra il 2023 e il 2024, la provincia di Trapani rientrava tra i territori con una riduzione del consumo di suolo rispetto all'anno precedente, in controtendenza rispetto a province come Ragusa e Catania (ARPA Sicilia-SNPA, 2025). I risultati ottenuti nel presente lavoro, relativi al successivo biennio 2024-2025, mostrano invece un incremento netto di 115,38 ettari, pari a un aumento della quota di suolo consumato dal 7,94% al 7,98% del territorio provinciale. Questo apparente contrasto non è necessariamente in contraddizione con il dato regionale: le due analisi si riferiscono a intervalli temporali differenti (2023-2024 contro 2024-2025), ed è plausibile che la riduzione osservata nel primo periodo rappresenti una fluttuazione annuale piuttosto che un'inversione strutturale del fenomeno, come confermato dalla ripresa della crescita rilevata nell'analisi di dettaglio condotta in questa sede. Questo tipo di oscillazione anno su anno è del resto coerente con quanto osservato a livello nazionale, dove il ritmo di trasformazione, pur mantenendo un trend di crescita di fondo, presenta variazioni significative da un anno all'altro (si veda il paragrafo 1.1).

La distribuzione comunale della variazione 2024-2025 (Figura 3.39) mostra come l'incremento si concentri soprattutto a Mazara del Vallo (+1,82%) e Castelvetro (+1,55%), mentre Vita (-0,18%) e Salaparuta (-0,07%) risultano gli unici due comuni in leggera flessione.

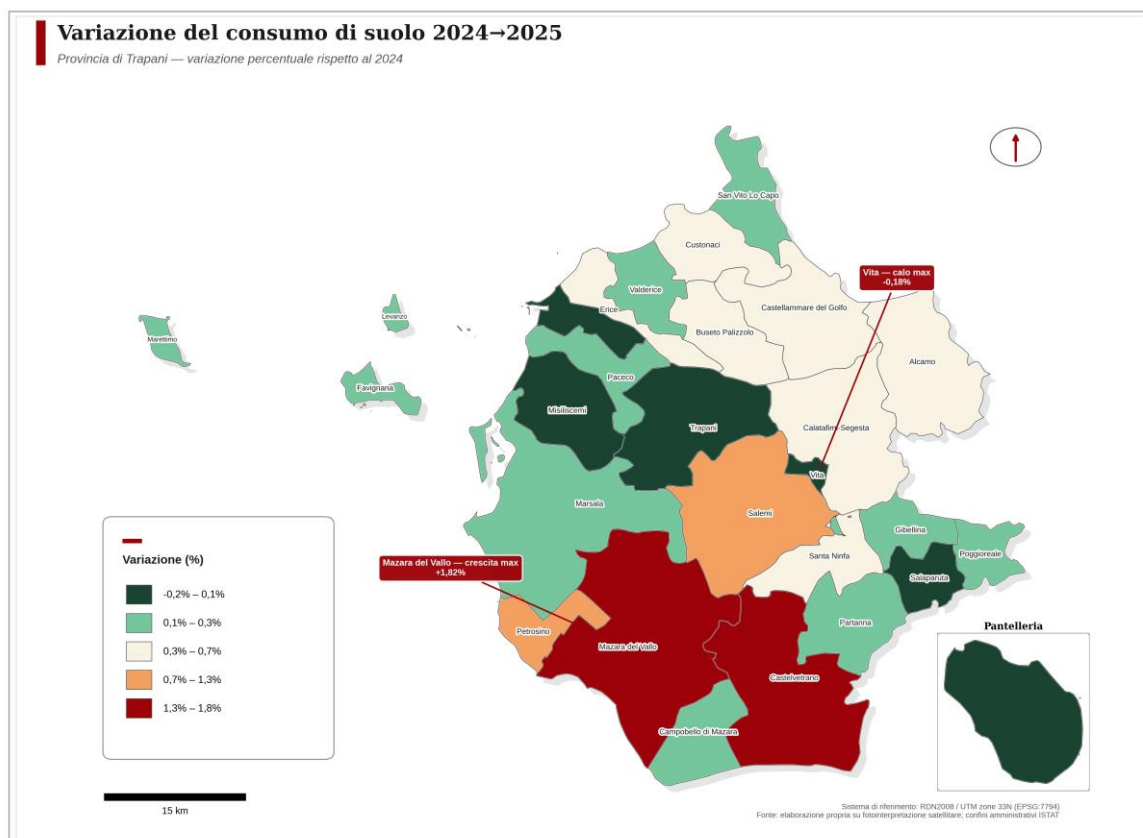


Figura 3.39 — Variazione percentuale del consumo di suolo per comune, 2024-2025.

3.4.2 Il ruolo trainante del consumo di suolo reversibile

Il dato più significativo emerso dall'analisi di dettaglio è probabilmente la scomposizione dell'incremento netto tra consumo permanente (11,2%) e consumo reversibile (88,8%), descritta nel paragrafo 3.3.2. Questo risultato ridimensiona, almeno per il biennio considerato, l'immagine di un consumo di suolo trainato principalmente dalla nuova edificazione: la maggior parte della crescita rilevata nella provincia di Trapani è infatti riconducibile a cantieri, aree estrattive e coperture temporanee, categorie che, per loro stessa natura, potrebbero in parte rientrare in futuro tra le rinaturalizzazioni se non consolidate in usi permanenti. Si tratta di un dato che invita a un monitoraggio nel tempo: solo il confronto con le annualità successive potrà chiarire se il consumo di suolo reversibile registrato nel 2025 si stabilizzi come consumo permanente o venga in parte riassorbito, come già avvenuto per i 4,71 ettari di rinaturalizzazione osservati nello stesso periodo (paragrafo 3.3.2).

3.4.3 Le aree protette: un risultato in linea con gli obiettivi europei

Il dato di invarianza del consumo di suolo all'interno delle aree EUAP (paragrafo 3.3.3) rappresenta, nel piccolo, un risultato coerente con l'obiettivo europeo di azzeramento del consumo netto di suolo (no net land take) al 2050, richiamato nel paragrafo 1.1, quantomeno

per quanto riguarda le porzioni di territorio a maggiore valore ecologico. Va tuttavia rilevato che l'assenza di nuovo consumo all'interno delle riserve naturali non esclude un possibile effetto di pressione indiretta nelle aree immediatamente circostanti, un aspetto che non rientra tra gli indicatori calcolati nel presente lavoro ma che potrebbe costituire spunto per approfondimenti futuri.

3.4.4 Un territorio che continua a crescere "verso l'interno"

I risultati relativi alla distribuzione altimetrica, di pendenza e costiera, letti congiuntamente, restituiscono l'immagine di un territorio la cui crescita recente si concentra nelle aree pianeggianti e nell'entroterra prossimo alla costa, più che nella fascia costiera in senso stretto, già ampiamente consumata in termini relativi (paragrafi 3.3.4 e 3.3.5). Questo pattern è coerente con la vocazione agricola e produttiva dell'entroterra trapanese descritta nel paragrafo 2.1 (vigneti, uliveti, cave e produzione di energia eolica), e con la natura in gran parte reversibile del nuovo consumo di suolo discussa nel paragrafo 3.4.2: cantieri, serre e aree estrattive tendono infatti a concentrarsi nelle aree agricole interne piuttosto che lungo la costa, dove la disponibilità di suolo libero è ormai limitata.

3.4.5 Il disaccoppiamento tra popolazione e consumo di suolo

Il risultato probabilmente più rilevante dal punto di vista delle politiche territoriali è quello relativo al rapporto tra dinamica demografica e consumo di suolo, discusso nel paragrafo 3.3.7: a fronte di una popolazione provinciale stabile o in leggero calo, il consumo di suolo pro capite continua ad aumentare. Questo fenomeno, definito in letteratura come disaccoppiamento (decoupling) tra crescita demografica e consumo di suolo, non è una specificità della provincia di Trapani, ma riflette una tendenza osservata a livello nazionale, dove il consumo di suolo prosegue anche in presenza di una popolazione complessivamente stazionaria o in diminuzione (si veda il paragrafo 1.1). Il caso di Trapani conferma quindi, anche a scala provinciale, che la crescita del consumo di suolo non può essere spiegata unicamente con la crescita della popolazione residente, ma richiede di considerare altri fattori, quali le seconde case, il turismo stagionale, le attività produttive e agricole e, come emerso nel presente lavoro, le trasformazioni di natura reversibile legate a cantieri e attività estrattive.

3.4.6 Sintesi

Nel complesso, i risultati presentati in questo capitolo restituiscono l'immagine di una provincia in cui il consumo di suolo, pur non collocandosi tra le dinamiche più intense a

scala regionale, continua a crescere in modo costante, trainato in misura prevalente da trasformazioni reversibili concentrate nell'entroterra, con un impatto nullo, nel biennio considerato, sulle aree naturali protette e con un pattern di crescita ormai scollegato dall'andamento demografico. Questi elementi, letti congiuntamente ai dati regionali e nazionali richiamati nei Capitoli 1 e 2, offrono un quadro coerente e circostanziato delle dinamiche di trasformazione del territorio della provincia di Trapani nel periodo 2024-2025, e costituiscono la base empirica su cui si fondano le conclusioni generali della presente tesi.

CAPITOLO 4 — Le isole di calore urbane (Urban Heat Island): un approfondimento nel contesto del consumo di suolo

Il presente capitolo si propone come un breve approfondimento tematico, distinto dal filone principale della tesi ma ad esso strettamente collegato. Come anticipato nel paragrafo 1.1, l'impermeabilizzazione del suolo e la sostituzione delle coperture naturali con superfici artificiali rappresentano uno dei principali fattori alla base del fenomeno delle isole di calore urbane (Tóth et al., 2022). Il presente capitolo approfondisce questo legame, richiamando inoltre un'esperienza diretta di studio e ricerca svolta da chi scrive nell'ambito di un programma Erasmus+ dedicato specificamente a questo tema, che ha permesso di applicare, su scala urbana e con strumenti in parte complementari a quelli utilizzati nel resto della tesi, alcuni dei concetti di telerilevamento e analisi GIS già descritti nei capitoli precedenti.

4.1 Definizione e meccanismi di formazione delle isole di calore urbane

Con il termine isola di calore urbana (Urban Heat Island, UHI) si indica il fenomeno per cui le aree urbane registrano temperature sensibilmente più elevate rispetto alle zone rurali circostanti, sia durante il giorno sia, in modo spesso ancora più marcato, durante la notte (EPA, 2025; MIT Climate Portal, 2024). Il fenomeno è stato osservato e descritto sistematicamente a partire dagli studi pionieristici di Oke, che negli anni Ottanta ha formalizzato il cosiddetto effetto canyon urbano (*urban canyon effect*): la geometria delle città, caratterizzata da edifici alti e ravvicinati, riduce il fattore di vista del cielo (*sky view factor*) di ciascuna superficie, intrappolando la radiazione solare tra le pareti degli edifici e ostacolando la dispersione notturna del calore accumulato durante il giorno (Oke, 1987).

Le cause principali del fenomeno sono riconducibili a quattro fattori concorrenti. Il primo è rappresentato dalle proprietà termiche dei materiali da costruzione: asfalto e cemento presentano un albedo (capacità di riflettere la radiazione solare) nettamente inferiore rispetto

alle superfici vegetate o naturali, e assorbono quindi una quota maggiore di energia solare, che viene poi rilasciata sotto forma di calore sensibile (UCAR Center for Science Education, 2024). Il secondo fattore è la già citata geometria urbana, che riduce la ventilazione naturale e intrappola il calore tra gli edifici. Il terzo è il calore antropico, generato da traffico veicolare, impianti di climatizzazione e attività industriali, particolarmente concentrato nelle aree a maggiore densità insediativa (EPA, 2025). Il quarto fattore, spesso meno considerato ma di rilievo, è la riduzione della copertura vegetale: la sostituzione di suolo naturale e vegetazione con superfici impermeabili elimina la capacità di raffrescamento evapotraspirativo delle piante, che in condizioni naturali sottrae calore all'ambiente circostante trasformandolo in calore latente (Tóth et al., 2022).

È importante distinguere, ai fini della trattazione che segue, tra l'isola di calore atmosferica (o *canopy UHI*), misurata come differenza di temperatura dell'aria tra area urbana e area rurale a livello del suolo o nello strato limite urbano, e l'isola di calore superficiale (Surface Urban Heat Island, SUHI), misurata invece attraverso la temperatura radiante delle superfici (Land Surface Temperature, LST) rilevata da sensori satellitari nella banda dell'infrarosso termico. Quest'ultima accezione, di natura eminentemente telerilevata, è quella su cui si concentra la maggior parte delle applicazioni GIS e di telerilevamento discusse nel paragrafo 4.3, ed è anche quella su cui si è concentrata l'esperienza di studio richiamata nel paragrafo 4.5.

4.2 Il legame tra consumo di suolo e isole di calore

Il collegamento tra consumo di suolo e formazione delle isole di calore urbane, già introdotto nel paragrafo 1.1, merita in questa sede un approfondimento specifico. La letteratura scientifica ha documentato come l'impermeabilizzazione del suolo comprometta contemporaneamente più funzioni ecosistemiche, tra cui la capacità di regolazione termica dei suoli naturali: Tóth et al. (2022) evidenziano come la progressiva sigillatura del suolo nelle aree urbane funzionali europee riduca la capacità di stoccaggio di carbonio e di acqua, con ricadute dirette sulla capacità del territorio di mitigare naturalmente le temperature estive.

Un contributo particolarmente rilevante in questo ambito è offerto dallo studio di Marando et al. (2022), che ha quantificato l'effetto di mitigazione delle infrastrutture verdi sull'isola di calore in un ampio campione di aree urbane funzionali europee, dimostrando come un incremento della copertura arborea sia associato a una riduzione misurabile della

temperatura superficiale nelle aree urbane più dense. Lo studio conferma, su scala continentale, la relazione inversa tra superficie impermeabilizzata e capacità di raffrescamento naturale del territorio, un principio che si può ritenere applicabile, con le dovute proporzioni, anche al contesto della provincia di Trapani analizzato nei capitoli precedenti.

A questo proposito, è utile richiamare uno dei risultati principali discussi nel paragrafo 3.4.2: circa l'88,8% dell'incremento netto di consumo di suolo rilevato nella provincia di Trapani tra il 2024 e il 2025 è risultato riconducibile a consumo di suolo reversibile (cantieri, aree estrattive, coperture temporanee), piuttosto che a nuova edificazione permanente. Sebbene il presente lavoro non abbia calcolato direttamente un indicatore di temperatura superficiale per l'area di studio, questo dato invita a una riflessione: anche le trasformazioni reversibili, per quanto temporanee, comportano nell'immediato una perdita della copertura vegetale e della capacità di raffrescamento evapotraspirativo del suolo, contribuendo potenzialmente, su scala locale e nel periodo della loro durata, a un innalzamento della temperatura superficiale analogo a quello prodotto dal consumo di suolo permanente. Si tratta di un aspetto che il presente lavoro non ha approfondito quantitativamente, ma che potrebbe costituire un naturale sviluppo futuro della ricerca, integrando i dati sul consumo di suolo già raccolti con un'analisi della temperatura superficiale (LST) della provincia di Trapani, secondo le metodologie descritte nel paragrafo seguente.

4.3 Il monitoraggio delle isole di calore tramite telerilevamento

Coerentemente con l'approccio metodologico adottato nell'intera tesi, anche il monitoraggio delle isole di calore urbane si avvale in larga misura di tecniche di telerilevamento satellitare, in particolare per la componente di isola di calore superficiale (SUHI) introdotta nel paragrafo 4.1. La temperatura superficiale (Land Surface Temperature, LST) viene stimata a partire dai dati acquisiti dai sensori nella banda dell'infrarosso termico (Thermal Infrared, TIR) montati su satelliti quali Landsat 8 e 9, dotati dello strumento TIRS (Thermal Infrared Sensor) con due bande termiche dedicate, o Sentinel-3, dotato del radiometro SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer), che garantisce una frequenza di osservazione giornaliera (MDPI Atmosphere, 2025).

Dal punto di vista tecnico, la stima della LST a partire dai dati TIR richiede l'applicazione di specifici algoritmi di inversione, tra cui il metodo *mono-finestra* (*mono-window algorithm*), il metodo *split-window*, che sfrutta la differenza tra due bande termiche adiacenti

per correggere gli effetti atmosferici, e il metodo a canale singolo (*single-channel method*), utilizzabile con sensori dotati di una sola banda termica. Un confronto sistematico tra questi tre approcci, condotto sui dati Landsat 8 nell'area urbana di Changchun (Cina), ha evidenziato come il metodo *split-window* risulti generalmente il meno sensibile agli errori nei parametri di input, pur essendo tutti e tre gli approcci in grado di fornire stime accurate della temperatura superficiale (Wang, Lu & Yao, 2019).

Questi stessi principi metodologici, applicati alla scala urbana anziché a quella provinciale, hanno costituito uno dei moduli centrali del percorso di formazione Erasmus+ richiamato nel paragrafo 4.5, nell'ambito del quale è stata condotta un'attività pratica di analisi della temperatura superficiale e dell'isola di calore superficiale, comprensiva di tecniche di pan-sharpening termico per migliorare la risoluzione spaziale dei dati satellitari (EC2U Alliance, 2026). Accanto all'approccio satellitare, la modellazione dell'isola di calore può essere condotta anche a scala di dettaglio ancora maggiore, tramite software di simulazione del microclima urbano quali ENVI-met, in grado di modellare l'interazione tra edifici, vegetazione e flussi d'aria a livello di singolo isolato o quartiere: uno strumento complementare, per scala di applicazione, rispetto ai raster a risoluzione provinciale utilizzati nel Capitolo 3 della presente tesi.

4.4 Strategie di mitigazione: infrastrutture verdi, blu e altre soluzioni basate sulla natura

Le strategie di mitigazione delle isole di calore urbane più diffuse in letteratura rientrano nella categoria delle soluzioni basate sulla natura (Nature-Based Solutions, NBS), definite come soluzioni ispirate e supportate dalla natura per rispondere a sfide sociali, economicamente sostenibili e in grado di generare benefici ambientali, sociali ed economici simultanei (Raymond et al., 2017, cit. in NRC Canada, 2023). Tra queste, l'infrastruttura verde urbana (parchi, alberature stradali, tetti e pareti verdi) agisce attraverso quattro meccanismi principali: ombreggiamento, evapotraspirazione, modifica dell'albedo superficiale e interazione multisensoriale con il microclima locale (Gunawardena et al., 2017, cit. in ScienceDirect, 2024).

Accanto all'infrastruttura verde, un ruolo crescente è attribuito all'infrastruttura blu, ossia agli specchi e ai corsi d'acqua urbani, in grado di produrre un effetto di raffrescamento locale attraverso l'evaporazione. La combinazione delle due componenti, nota in letteratura come infrastruttura verde-blu (Blue-Green Infrastructure, BGI), è considerata una delle strategie

di mitigazione più efficaci nei climi temperati, sebbene la sua applicazione debba essere adattata alle specificità climatiche locali (PMC, 2020). Ulteriori strategie complementari includono l'impiego di materiali riflettenti o a elevato albedo per le pavimentazioni e le coperture degli edifici (*cool materials*), e l'adozione di pavimentazioni permeabili in grado di favorire l'infiltrazione dell'acqua piovana, riducendo al contempo l'accumulo di calore superficiale.

Anche questo tema ha costituito oggetto specifico del percorso Erasmus+ richiamato nel paragrafo seguente, nell'ambito del quale è stata presentata la rete WaterMitCities, dedicata alla progettazione di spazi pubblici basati sull'acqua come strumento di mitigazione climatica, ed è stato affrontato il tema della simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici in relazione alle condizioni climatiche locali, quale ulteriore leva complementare alle soluzioni basate sulla natura in senso stretto (EC2U Alliance, 2026).

4.5 Un'esperienza diretta sul campo: il Blended Intensive Programme di Iași

Il legame tra il presente capitolo e il percorso di studi di chi scrive non è puramente teorico. Nell'aprile 2026, chi scrive ha partecipato a un Blended Intensive Programme (BIP) Erasmus+ dal titolo "Urban Heat Island: From Problem to Solutions", organizzato dall'alleanza universitaria europea EC2U e ospitato dalla Facoltà di Geografia e Geologia dell'Università Alexandru Ioan Cuza di Iași, in Romania, con il supporto scientifico del progetto di ricerca locale MOBCLIM (EC2U Alliance, 2026).

Il programma, articolato in un totale di 75 ore, si è sviluppato in tre fasi complementari: una fase online preparatoria di cinque moduli tematici, una settimana intensiva in presenza a Iași, e una fase online successiva dedicata a un project work di gruppo. I cinque moduli propedeutici hanno coperto altrettanti aspetti del fenomeno: la modellazione del microclima urbano tramite il software ENVI-met, l'impatto e le strategie di adattamento all'isola di calore urbana, le prestazioni energetiche degli edifici in relazione alle condizioni climatiche, l'analisi della temperatura superficiale e dell'isola di calore superficiale, e le soluzioni verdi e blu (EC2U Alliance, 2026).

La settimana in presenza a Iași ha permesso di applicare concretamente questi concetti attraverso attività pratiche svolte utilizzando la città stessa come caso di studio reale: l'identificazione delle aree critiche di isola di calore urbana a partire da dati di temperatura superficiale, con applicazione di tecniche di pan-sharpening termico per affinarne la

risoluzione spaziale; simulazioni di microclima urbano tramite ENVI-met, con relativa analisi e interpretazione dei risultati; scenari di prestazione energetica degli edifici in funzione di proiezioni climatiche future; e infine un'attività di rilievo sul campo, condotta attraverso un percorso pedonale di circa 5 km nella città di Iași, durante il quale sono stati raccolti dati microclimatici tramite transetti mobili e immagini termiche (EC2U Alliance, 2026). Il percorso si è concluso con una sessione di ideazione collettiva, nella quale i partecipanti hanno elaborato proposte di soluzioni basate sulla natura, tra cui infrastrutture verdi e blu, corridoi di ventilazione urbana e soluzioni di comfort termico indoor, da sviluppare poi nella fase successiva del programma sotto forma di project work di gruppo.

Al di là dei singoli contenuti tecnici, questa esperienza ha rappresentato per chi scrive un'occasione per osservare da vicino come gli stessi principi metodologici alla base del presente lavoro di tesi, ossia il telerilevamento satellitare e l'analisi GIS del territorio, possano essere applicati a una scala geografica e a un contesto climatico profondamente diversi (il clima continentale della Moldavia rumena, in luogo di quello mediterraneo della Sicilia occidentale) e a un fenomeno complementare, ma concettualmente affine, al consumo di suolo: se quest'ultimo misura la trasformazione fisica del territorio, l'isola di calore ne rappresenta, in un certo senso, una delle conseguenze climatiche più dirette e percepibili a livello locale. In questo senso, il presente capitolo si propone non tanto come un capitolo di risultati nel senso stretto adottato nel Capitolo 3, quanto come un ponte concettuale tra la metodologia sviluppata nella presente tesi e un fenomeno strettamente connesso, che potrebbe costituire la base di futuri approfondimenti di ricerca applicati specificamente al territorio della provincia di Trapani.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

ARPA Lombardia, 2023. Progetto “Savager” – Earth Observation. URL: arpalombardia.it/temi-ambientali/earth-observation/progetti/savager (consultato 2023).

ARPA Sicilia – SNPA, 2025. Consumo di suolo, i dati del territorio siciliano – Anno 2025. URL: snpambiente.it/notizie/temi/soilo/consumo-di-suolo-i-dati-del-territorio-siciliano-anno-2025 (consultato 2026).

Camerini, G., 2018. Consumo di suolo, urbanizzazione e perdita di biodiversità. *Biologia Ambientale*, 32(1), 1-15. DOI: 10.30463/ao181.001.

Comune di Erice, 2026. Sito istituzionale del Comune di Erice (dati su Monte Erice e il centro storico). URL: comune.erice.tp.it.

Comune di Trapani, 2026. Sito istituzionale del Comune di Trapani (dati su superficie comunale, produzioni vitivinicole e olivicole DOC/DOP). URL: comune.trapani.it.

EC2U Alliance, 2026. Blended Intensive Programme “Urban Heat Island: From Problem to Solutions” – Participant Handbook. Facoltà di Geografia e Geologia, Università Alexandru Ioan Cuza di Iași, aprile 2026, realizzato con il supporto del progetto di ricerca MOBCLIM.

EEA (European Environment Agency), 2024. Land use. URL: eea.europa.eu/en/topics/in-depth/land-use (consultato 2026).

EPA (United States Environmental Protection Agency), 2025. Heat Island Effect. URL: epa.gov/heatislands (consultato 2026).

ESA (European Space Agency), 2026. Sentinel-2 Instrument. URL: esa.int/Sentinel-2 (consultato 2026).

- Gentile, R. et al., 2023.** A free and open-source GIS for the documentation of urban transformations: the Expo 2015 case study. *ISPRS Archives*, XLVIII-4/W7, 67-74. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W7-67-2023.
- ISPRA, 2024a.** Atlante nazionale del consumo di suolo – Edizione 2023 (41 tavole tematiche a scala 1:250.000). URL: isprambiente.gov.it/consumo-suolo/atlante-2023.
- ISPRA, 2024b.** Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici – Edizione 2024. URL: isprambiente.gov.it.
- ISPRA, 2024c.** I dati sul consumo di suolo. URL: isprambiente.gov.it/consumo-suolo/dati.
- ISPRA, 2024d.** Il consumo di suolo. URL: isprambiente.gov.it/il-consumo-di-suolo.
- ISPRA, 2024e.** Pubblicate le Linee Guida per il monitoraggio del consumo di suolo. Notizia ISPRA, 5 maggio 2024. URL: isprambiente.gov.it/notizie/2024/05/pubblicate-linee-guida-monitoraggio-consumo-suolo.
- ISPRA-SNPA, 2022.** Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici – Rapporto SNPA 32/2022. URL: snpambiente.it/Rapporto_consumo_di_suolo_2022.pdf.
- ISPRA-SNPA, 2023.** Manuale per il monitoraggio del consumo di suolo per le agenzie ARPA/APPA, versione 3.1.
- ISPRA-SNPA, 2024.** Rapporto sul consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici – Edizione 2024/2025. URL: snpambiente.it/monitoraggio-del-territorio-e-del-consumo-di-suolo.
- ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica), 2025.** Popolazione residente e superficie territoriale, provincia di Trapani (dati al 1° gennaio 2025).
- Manakos, I. et al., 2017.** Use of Google Earth and visual interpretation in land cover validation studies.
- Marando, F., Heris, M.P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., Maes, J., 2022.** Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103564.
- MDPI Atmosphere, 2025.** Studi sul monitoraggio satellitare della temperatura superficiale tramite il radiometro Sentinel-3 SLSTR. URL: mdpi.com/journal/atmosphere.

- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2026.** Elenco Ufficiale delle Aree Protette (EUAP).
- MIT Climate Portal, 2024.** Urban Heat Islands. Massachusetts Institute of Technology. URL: climate.mit.edu/explainers/urban-heat-islands.
- Munafò, M. (a cura di), 2022.** Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici – Edizione 2022. Report SNPA 32/22.
- NRC Canada (National Research Council Canada), 2023.** Nature-Based Solutions: definizioni e applicazioni (cita Raymond, C.M. et al., 2017, sulla definizione di Nature-Based Solutions).
- Oke, T.R., 1987.** Boundary Layer Climates, 2nd ed. Methuen, London and New York.
- PMC (PubMed Central), 2020.** Blue-Green Infrastructure e mitigazione dell'isola di calore nei climi temperati.
- QGIS, 2026.** QGIS 4.0.2 “Norrköping”. URL: qgis.org (consultato 2026).
- Regione Siciliana, 2026.** Assessorato del Territorio e dell'Ambiente – Aree naturali protette e geografia della Sicilia.
- ScienceDirect, 2024.** Rassegna su infrastrutture verdi urbane e mitigazione dell'isola di calore (cita Gunawardena, K.R. et al., 2017, sui meccanismi di raffrescamento dell'infrastruttura verde).
- SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), 2024a.** Linee guida per il monitoraggio del consumo di suolo e dell'impermeabilizzazione del territorio – Edizione 2024.
- SNPA, 2024b.** Monitoraggio del territorio e del consumo di suolo. URL: snpambiente.it/monitoraggio-del-territorio-e-del-consumo-di-suolo (consultato 2024).
- SNPA, s.d.** La legge istitutiva. URL: snpambiente.it/chi-siamo/la-legge-istitutiva.
- Studio Cocchiarella, 2024.** Cartografia e GIS – Fotointerpretazione.
- Tóth, G. et al., 2022.** Impact of Soil Sealing on Soil Carbon Sequestration, Water Storage Potentials and Biomass Productivity in Functional Urban Areas of the EU and the UK. Land, 11(6), 840. DOI: 10.3390/land11060840.

Tsutsumida, N., & Kato, T., 2024. Inter-Interpreter Variability in Land Cover Mapping and Validation.

UCAR Center for Science Education, 2024. Urban Heat Islands. University Corporation for Atmospheric Research. URL: scied.ucar.edu/learning-zone/climate-change-impacts/urban-heat-islands.

Uhl, J.H., & Leyk, S., 2024. Accuracy and Validation Issues in Built-Up Area Mapping.

Valente, D. (ASI), Cotana, F. (RSE), 2024. Satelliti in orbita per la produzione di energia da fonti rinnovabili. Intervista su Rinnovabili.it, maggio 2024.

Wang, L., Lu, Y., Yao, Y., 2019. Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images. *Sensors*, 19(22), 5049. DOI: 10.3390/s19225049.

Wikipedia, 2026. Voce “Provincia di Trapani” e voci correlate alle riserve naturali provinciali (fonte secondaria, a integrazione delle fonti istituzionali).

Yue, J. et al., 2022. Challenges of Manual Annotation and Label Uncertainty in Remote Sensing.

Riferimenti normativi

Legge 6 dicembre 1991, n. 394. Legge quadro sulle aree protette (G.U. n. 292 del 13-12-1991).

Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42. Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137 (G.U. n. 45 del 24-2-2004).

Legge 28 giugno 2016, n. 132. Istituzione del Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente e disciplina dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (G.U. n. 166 del 18-7-2016).