

UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI AGRARIA



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE

IN

SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

Tesi di Laurea sperimentale

**“Scenari di mitigazione delle fenomeno delle Urban Heat Island
nell’area vesuviana”**

**“Strategies to tackle the Urban Heat Island phenomenon around the
Vesuvian area”**

Relatore

Ch.ma Prof.ssa

Stefania Pindozi

Correlatore

Elena Cervelli

Candidato:

Salvatore De Vincentis

Matr. N09000447

Anno Accademico 2021/2022

1. Introduzione	6
1.1. Fenomeno delle Isole Urbane di Calore (UHI).....	8
1.2. Introduzione al contesto territoriale	12
1.3. Scopo della tesi.....	13
2. Materiali e metodi	15
2.1. Materiali utilizzati e fonti.....	16
2.2. Area di studio	20
2.3. <i>Suite InVEST</i> e descrizione dell' <i>Urban Cooling Model</i>	27
2.4. Dati inseriti nel modello	38
2.4.1. Urban Atlas	43
2.4.2. Evapotraspirazione potenziale stimata	51
2.4.3. <i>Tree Cover Density</i>	64
2.4.4. Albedo	67
2.4.5. <i>UHI Effect</i>	71
2.4.6. <i>Building Footprint</i>	74
3. Risultati e discussione	76
3.1. Risultati intermedi	76
3.1.1. Raggruppamento tematico.....	77
3.1.2. Temperature	81
3.1.3. Evapotraspirazione potenziale di riferimento.....	84
3.1.4. <i>Tree Cover Density</i>	85
3.1.5. Albedo	87
3.1.6. Consumo energetico unitario.....	89
3.2. <i>Heat Mitigation Index (HMI)</i>	91
3.3. Risultati <i>Urban Cooling Model</i>	99
4. Conclusioni	102
5. Bibliografia	104
6. Sitografia	106

Abstract

Urban heat islands (UHI) represent a topic of great relevance and interest due to their close connection with urbanization process and the increase in global temperature. This phenomenon occurs when the temperature of the urban area is significantly higher than the surrounding rural areas. This is due to the lack of green areas, paved surfaces, and human activities. The increase of local temperature can negatively affect human health and increase energy costs for cooling buildings. This study focused on evaluating the cooling effect provided by tree species as an ecosystem service for the mitigation of urban heat islands in the highly urbanized area around the National Park of Vesuvius. The main objective of the project it's to compare two scenarios. The first scenario represents an increase of tree cover density all over the entire area of the municipalities around Vesuvius, while the second scenario involved the same interventions only in urban parks with a surface at least of 2 hectares. The methodology entails the use of two software: namely GIS and InVEST. The GIS software was used for data preparation, while InVEST's "Urban Cooling Model" was used to evaluate the cooling capacity (CC) and estimate the energy savings provided by tree species. The results of the study showed that increasing tree cover density across the entire area provide a reduction of the UHI effect with an estimated reduction of 0.3°C compared to localized intervention in urban parks that did not provide significant results. The study contributes to the basic knowledge for an immediate calculation of UHI effect, useful in case of the absence of on-site measurements and allows for comparison of different hypothesized scenarios. Additionally, the results obtained could be applied in similar urban contexts to promote the mitigation of heat islands through sustainable interventions.

Abstract

Le isole di calore urbane rappresentano un tema di grande rilevanza e interesse per la sua stretta connessione con l'urbanizzazione e l'aumento della temperatura globale. Questo fenomeno si verifica quando la temperatura dell'area urbana è significativamente più alta rispetto a quella delle zone rurali circostanti. Ciò è dovuto alla mancanza di aree verdi, alle superfici asfaltate e alle attività umane. L'aumento della temperatura locale può influire negativamente sulla salute umana e aumentare i costi energetici per il raffreddamento degli edifici. Questo studio si è concentrato sulla valutazione dell'effetto refrigerante fornito dalle specie arboree come servizio ecosistemico per la mitigazione delle isole di calore urbane nell'area fortemente urbanizzata intorno al Parco Nazionale del Vesuvio. L'obiettivo principale del progetto era quello di confrontare due scenari. Il primo scenario prevedeva l'aumento della copertura arborea su tutta l'area dei comuni intorno al Vesuvio, mentre il secondo scenario prevedeva gli stessi interventi ma solo nei parchi urbani con superficie di almeno 2 ettari. La metodologia utilizzata per lo studio si basava sull'utilizzo di due software: GIS ed InVEST. Il software GIS è stato utilizzato per la preparazione dei dati, mentre il modello di raffreddamento urbano (Urban Cooling Model) di InVEST è stato utilizzato per valutare l'effetto refrigerante e stimare il risparmio energetico fornito dalle specie arboree. I risultati dello studio hanno dimostrato che l'aumento della copertura arborea su tutta l'area ha un impatto nella mitigazione delle isole di calore con una riduzione stimata di 0.3°C rispetto all'intervento localizzato nei parchi urbani che non ha portato risultati significativi. L'elaborato contribuisce al patrimonio di conoscenze dell'ambito disciplinare fornendo un metodo di approccio allo studio delle isole di calore urbane in assenza di misurazioni in loco e permette di riproporsi comparando diversi scenari ipotizzati. Inoltre, i risultati ottenuti potrebbero essere applicati in contesti urbani simili per promuovere la mitigazione delle isole di calore attraverso interventi sostenibili.

1. Introduzione

La forte co-dipendenza tra la civiltà umana (in quanto società) ed il pianeta terra (in quanto ecosistema) è un tema centrale del dibattito sul cambiamento climatico perfettamente sintetizzato nel saggio "*The World without Us*" (Weisman, 2008) e ripresa dallo storico Dipesh Chakrabarty nelle sue quattro tesi all'interno di "*The Climate of History*" con l'affermazione: "*Immaginiamo che il peggio sia accaduto. L'estinzione degli umani è un fatto compiuto. Immaginiamo un mondo dal quale noi tutti siamo improvvisamente scomparsi. Avremo lasciato qualche flebile ma durevole marchio nell'universo? È possibile che, invece di emettere un enorme sospiro di sollievo biologico, il mondo senza di noi senta la nostra mancanza?*" (Chakrabarty, 2009).

Spesso istituzioni ed organizzazioni, nell'adottare strategie per affrontare il cambiamento climatico, si pongono in modo irrazionale o inadeguato: dalla negazione, all'indifferenza, dall'attivismo ideologico all'eccessivo tecnicismo. Mai come adesso è diventato necessario comprendere correttamente le relazioni tra uomo ed ecosistema e, sebbene il progresso tecnologico consenta l'acquisizione di informazioni sempre maggiori, la loro interpretazione oggettiva non è affatto scontata.

L'approccio al problema necessita sempre più di un rigore scientifico ed una visione olistica per essere analizzato, affrontato e mitigato. L'importanza del prevedere le tendenze dei cambiamenti climatici ha assunto un ruolo centrale nella gestione del territorio per preservare e rendere virtuose le dinamiche attività antropica ed ambiente, in modo che il naturale processo di modellazione del paesaggio non risulti un

totale fallimento della civiltà ormai trappola delle sue stesse azioni e scelte compiute nel passato.

L'inarrestabile urbanizzazione in corso ormai dal secondo dopoguerra ha modificato radicalmente il territorio ed il clima, spingendo sempre di più le comunità a lasciare le aree rurali e si stima che oltre il 75% della popolazione mondiale si stabilirà in aree urbane entro il 2050 secondo il report stilato dalle United Nations "World Urbanization Prospects The 2011 Revision" del 2012. (https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/WUP2011_Report.pdf).

Ciò prospetta paesaggi urbanizzati sempre più estesi e concentrati nel prossimo futuro. Il solo continente europeo raggiunge oggi un tasso dell'80% della popolazione presente in zone urbanizzate e non ci sono segnali che la tendenza vada calando (Haase et al, 2014). L'impressionante trasformazione di uso del suolo ha a sua volta incrementato le attività umane e quindi della pressione antropica sul territorio tanto da aver compromesso, talora irrimediabilmente, la resilienza, sia degli ecosistemi che delle comunità. Per limitare i danni causati nel passato, è importante che le nazioni agiscano rapidamente nell'adozione di pratiche che mitighino l'effetto di questi cambiamenti, soprattutto nei centri urbani e rurali.

Il Protocollo di Kyoto stipulato nel 1997 è stato l'accordo internazionale che per primo ha dimostrato l'interesse nell'intraprendere azioni volte alla riduzione dei cambiamenti climatici attraverso la riduzione delle emissioni di gas serra per i paesi industrializzati. Questo protocollo ha rappresentato un importante passo avanti nella lotta contro il cambiamento climatico, ma ha anche generato molte critiche per la mancanza di adesione di alcuni paesi e

per la scarsa efficacia delle misure previste. L'Accordo di Parigi del 2015 è stato un ulteriore passo avanti nella lotta contro il cambiamento climatico, che ha coinvolto tutti i paesi del mondo e che ha stabilito obiettivi più ambiziosi rispetto al Protocollo di Kyoto. L'Accordo di Parigi, ratificato da 183 stati membri dell'UNFCCC (Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici), ha stabilito l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5 gradi Celsius rispetto ai livelli preindustriali e ha previsto la sottomissione di piani di riduzione delle emissioni di gas serra da parte di tutti i paesi. Questo accordo rappresenta un importante passo avanti nella lotta contro il cambiamento climatico, e ha sancito l'inizio di un reale impegno collettivo mirato nel mitigare gli effetti dell'attività umana sull'ambiente. La strada da percorrere per il raggiungimento di tale obiettivo è lastricata di insidie dovute alle differenti azioni che devono essere intraprese delle singole comunità che giacciono su differenti territori e il solo prefiggersi un obiettivo non è sufficiente per la risoluzione del problema.

1.1. Fenomeno delle Isole Urbane di Calore (UHI)

All'interno del dibattito sul cambiamento climatico, il fenomeno delle “Isole Urbane di Calore” (*Urban Heat Island*, UHI) è una delle manifestazioni più rilevanti dell’impatto dell’uomo sull’ecosistema, conseguenza del processo di urbanizzazione dei territori. Le UHI si definiscono come un fenomeno dove si osservano temperature più alte (raramente più basse) nelle aree urbane rispetto alle aree periurbane e rurali circostanti (Mohajerani et al., 2017).

Una delle principali cause delle UHI è determinato da un complesso di agglomerati di materiali e superfici artificiali, che alterano le proprietà termiche e il movimento dell'aria (Phelan et al., 2015). Ad esempio, cemento, asfalto, plastica, metalli e altri materiali impermeabili denominati come *technomass* (Boumans et al., 2014) limitano il flusso d'aria, il tasso di evapotraspirazione, l'assorbimento del calore latente e irradiano e/o riflettono l'energia termica. Nel dettaglio, un territorio occupato da edifici contribuisce alla UHI per via dell'alta capacità termica degli edifici stessi e dalle superfici artificiali di tetti e mura, esposti alla radiazione solare diretta. Si specifica “edifici”, poiché il manto stradale, contribuisce solo in parte al fenomeno delle UHI, con un'influenza che varia in base alla tipologia di rivestimento, con temperature medie che mostrano notevoli differenze tra superfici naturali ed artificiali se campionate in prossimità delle stesse, ma diminuiscono significativamente se ci si allontana da esse arrivando ad essere nulle superato il metro e mezzo (Phelan et al., 2015). Queste caratteristiche, nel loro insieme, possono concentrare l'energia termica che determina un incremento della temperatura negli ambienti urbani locali. La capacità termica delle superfici, inoltre, crea differenti situazioni tra il giorno e la notte, della stagione e delle dinamiche legate all'ecologia locale, come la superficie fogliare delle piante e i conseguenti effetti dell'evapotraspirazione (Zhang et al., 2012). Dove le superfici artificiali tendono a trattenere maggiormente il calore anche dopo il tramonto, il manto erboso e le zone verdi in generale, tendono ad abbassare repentinamente le temperature.

L'UHI può causare disagio alle persone che vivono nelle aree urbane prive di aree verdi e ha un conseguenziale impatto sia sul consumo di energia per il raffreddamento sia sul riscaldamento. Le ripercussioni

delle UHI possono essere suddivise tra quelle maggiormente gravanti sulle persone in ambiente urbano e quelle sui microclimi, non escludendosi a vicenda. Il deterioramento del benessere fisico della popolazione di una città (Fujibe, 2011), il danno al sistema termoregolatore indotto dallo stress da calore sotto forma di sincope da calore, lo stress cardiovascolare, colpi di calore e malattie cardiorespiratorie (Rydin et al., 2012) sono le principali ripercussioni con effetti avversi sulla popolazione che deve poi ricorrere a soluzioni per migliorare le condizioni di comfort *indoor* all'interno dei singoli edifici provocando poi alcuni effetti secondari sul microclima. Uno studio in Germania (Hübler et al., 2008) ha dimostrato che i costi di ospedalizzazione legati al caldo sono aumentati di sei volte nell'estate del 2003, escludendo il costo del trattamento in ambulanza, e che il calore ha anche ridotto le prestazioni lavorative, determinando una stima perdita di produzione compresa tra lo 0,1% e lo 0,5% del PIL (Zardo et al., 2020).

Per quanto concerne la variazione del microclima, l'elevata temperatura dell'aria ha un effetto negativo su quest'ultimo (Erell et al., 2011), si hanno casi formazione di ozono a livello del suolo (Kleerekoper et al., 2012), di cambiamento dei modelli di vento, di variazioni dell'umidità, tempeste, inondazioni e cambiamenti negli ecosistemi locali (Sailor and Fan, 2002) ed infine, l'esacerbazione del riscaldamento globale dovuto all'aumento del consumo di energia per il condizionamento dell'aria e che aumenta a sua volta le emissioni di calore rilasciate nell'ambiente locale (Kolokotroni et al., 2012).

Per diminuire l'impatto del fenomeno diverse metodologie sono state sviluppate come l'inclusione di materiali porosi o ritentivi d'acqua nella progettazione dell'ambiente costruito (Hathway et al., 2012), la

presenza di corpi idrici urbani come fiumi e laghi all'interno di una città (Kleerekoper et al., 2012), lo sfruttamento del vento naturale (Smith & Levermore, 2008), l'impiego di materiali ad alto albedo nella progettazione degli edifici e ombreggiamento delle aree urbane da parte di alberi o strutture artificiali (Takebayashi and Moriyama, 2012), spazi verdi a scala urbana come i parchi e campi aperti (Rydin et al., 2012). Ciascuna di queste metodologie ha effetti relativi al clima con ulteriori risvolti che nella maggior parte dei casi hanno una deriva risonante su altri effetti che coinvolgono direttamente gli abitanti della città (O'Malley et al., 2015). La sovrapposizione di strutture verdi e blu, citate prima, all'interno degli ambienti artificiali può attenuare le UHI, aumentando sia il comfort termico nelle città (Boumans et al., 2014) sia attraverso il miglioramento della regolazione climatica locale. La consapevolezza del servizio ecosistemico fornito dalla presenza di alberi è ben documentata in letteratura (Haines-Young et al., 2017) e può essere ulteriormente interessante valutare diversi approcci di pianificazione urbana per determinare l'intensità delle UHI che possiamo aspettarci dati determinati modelli di paesaggio urbano. Difatti, soluzioni basate sullo sfruttamento dei servizi ecosistemici fornite dalle *Green Urban Infrastructures* (GUI) rappresentano un ulteriore approccio alle sopra citate soluzioni basate sull'impiego di materiali alternativi per la costruzione della città ed inoltre risultano delle soluzioni attuabile in contesti di urbanizzazione spinta dove difficilmente si possono modificare intere aree ormai già edificate (Zardo et al., 2017).

Esistono diversi approcci per modellare ed analizzare le UHI come, ad esempio, la misurazione diretta delle temperature intorno alla città (Lopes et al., 2013) o utilizzare dei software specializzato come

RayMan (Alcoforado, 2010)(Matzarakis et al., 2016). Numerose ricerche riguardano anche l'utilizzo di indicatori che possono essere basati sulla copertura del suolo (Kardinal Jusuf et al., 2007), presenza di verde (Boumans et al., 2014), o la *physiological equivalent temperature* (PET) (Matzarakis et al., 2016). Effettuare una mappatura dell'uso e copertura del suolo può essere identificato come un preliminare approccio all'identificazione delle aree soggette a UHI (Elliot et al., 2020) e ricorrere ad approcci integrati che valutino anche il peso delle altre variabili, come l'evapotraspirazione delle GUI o le grandezze riguardanti il vento, permette di valutare in maniera adeguata gli scenari cittadini delle UHI.

Lo “Urban Cooling Model” di InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), modella le UHI utilizzando diversi parametri facilmente accessibili, assegnati a una mappa di copertura del suolo, per produrre un indice di mitigazione del calore (*Heat Mitigation Index* - HMI) destinato a stimare la capacità di raffreddamento della vegetazione in un contesto spaziale con valori compresi tra 0 ed 1. In media, ad una variazione dell'HMI di 0,1 è stata associata a una variazione di 0,76 °C delle superfici urbane soggette ad isole di calore (Zawadzka et al., 2021). Per questo studio si è deciso di adoperare questo ultimo approccio poiché adatto per la valutazione di interventi di mitigazione del calore attraverso l'incorporazione di vegetazione nei piani urbani.

1.2. Introduzione al contesto territoriale

Nell'ambito della tematica affrontata, si è scelto di studiare il fenomeno delle UHI in un'area di grande interesse storico-geografico,

caratterizzata da un livello di urbanizzazione tale da renderla particolarmente suscettibile al problema. Si tratta dell'area alle falde del Vesuvio, un vulcano attivo, che si presenta come un rilievo dalla forma regolare che si staglia nettamente su un territorio pressoché pianeggiante, nell'immediato retroterra del golfo di Napoli. La mole del massiccio – che con un diametro alla base di circa 10 km ed un'altitudine di 1281 m slm, risulta visibile praticamente da qualsiasi posizione – lo rende l'elemento paesaggistico di riferimento, nonché simbolo iconico dell'area metropolitana di Napoli. Negli ultimi decenni, l'area ha conosciuto una significativa crescita demografica, e di conseguenza, ha subito una forte urbanizzazione. In passato la zona era dominata da un paesaggio rurale, più o meno popolato nelle diverse fasi storiche in relazione all'attività vulcanica ma comunque in costante crescita dalla seconda metà del XVII secolo. Ad oggi l'area presenta un complesso molto vario di usi del suolo, che appaiono altamente polarizzati: un'ampia zona centrale, rappresentata dalle ripide pendici del Vesuvio, occupata per lo più da vegetazione spontanea, cinta da un grande anello urbano, caratterizzato da un'alta densità dell'edificato, sporadicamente interrotto da aree agricole, per lo più di modeste dimensioni, costituite da complessi di appezzamenti piuttosto frammentati.

1.3. Scopo della tesi

Il cambiamento climatico è ormai in atto, nasce così l'urgenza nel dover fronteggiare questa sfida, trovando soluzioni atte ad arginare e mitigare un rovinoso declino climatico, dettata anche da una sempre maggiore sensibilità al tema. Uno dei tanti ostacoli è evitare di

ricorrere ad approcci dalle strette vedute cercando di perdere di vista l'obiettivo primario: seguire sia linea demarcata dai decisori politici nelle Conference of the Parties (COP), sia seguire a grandi linee i suggerimenti nel reinvestimento di un terzo del territorio urbanizzato in aree verdi (Odum, 1971).

Questa tesi di laurea si prefigge l'obiettivo di stimare l'ordine di grandezza del fenomeno denominato "UHI" in una zona fortemente urbanizzata, analizzandone le dinamiche ed ipotizzando due scenari alternativi volti a mitigarne la portata. In uno scenario, definito di "intervento generalizzato", si valutano gli effetti di un ipotetico aumento omogeneo della copertura arborea all'interno delle aree urbanizzate. Nell'altro, definito "intervento mirato", si valutano gli effetti di un aumento della copertura vegetale all'interno dei soli grandi parchi urbani (GUI).

2. Materiali e metodi

Le analisi condotte si sono avvalse dell'ausilio di differenti componenti software ed input. Nei seguenti paragrafi verranno trattati nel dettaglio sia i procedimenti che le informazioni inserite al fine dell'analisi. Lo scopo delle elaborazioni è di ottenere una stima preliminare dei tre scenari. Tutte le elaborazioni si riferiscono al periodo temporale del bimestre di luglio-agosto, scelta conseguente al fatto che tali mesi sono statisticamente i più caldi dell'anno, dunque, quelli in cui il fenomeno UHI risulta più intenso. L'anno di riferimento è il 2018, a cui risale la più recente edizione cartografica di copertura del suolo per l'area di studio.

Di seguito si illustrano nel dettaglio i tre scenari elaborati:

- **Baseline:** Stato di fatto in relazione al fenomeno UHI nell' area vesuviana, base delle analisi e riferimento per la valutazione delle alternative.
- **Generalizzato:** Scenario in cui si è ipotizzato un intervento generalizzato volto ad incrementare del 25% la copertura arborea su tutta la superficie edificata
- **Mirato:** Scenario in cui si ipotizza un aumento del 25% della copertura arborea nelle aree dei parchi urbani aventi superficie maggiore di 2 ettari, soglia minima di efficacia in termini di mitigazione del fenomeno.

2.1. Materiali utilizzati e fonti

Per poter condurre le analisi riguardanti le UHI è stato necessario l'utilizzo di un sistema informativo geografico (GIS) per la preparazione ed elaborazione preliminare dei dati da utilizzare poi nella suite di modelli per la valutazione di servizi ecosistemici e dei trade-off "InVEST". Un GIS è un sistema informativo che permette di gestire, analizzare e rappresentare dati geografici, integrando informazioni di natura cartografica, statistica, topologica, temporale e, potenzialmente, di qualsiasi altro tipo. Il GIS si basa su un database geografico, costituito da un insieme di dati geografici e attributi, che possono essere manipolati tramite un'interfaccia grafica ed un software di elaborazione specifico. Il GIS consente di eseguire analisi spaziali avanzate, come la creazione di mappe tematiche, la valutazione di accessibilità, la modellazione di fenomeni geografici, l'identificazione di relazioni spaziali e la simulazione di scenari futuri. Queste analisi possono essere effettuate a diverse scale geografiche e possono essere utilizzate per la pianificazione territoriale, la gestione delle risorse naturali, la valutazione del rischio ambientale, la prevenzione e la gestione delle emergenze, l'urbanistica e molte altre applicazioni. Questo lo rende un potente strumento per la ricerca sperimentale e applicata, in grado di fornire informazioni e conoscenze utili per la comprensione dei fenomeni geografici complessi e per la soluzione dei problemi legati alla gestione del territorio e dell'ambiente. Congruamente, il software GIS ci permette di individuare e comprendere gli aspetti delle dinamiche di un territorio potendo includere altre variabili del caso. I tipi di informazione elaborate da un software GIS sono molteplici, ma riconducibili a due grandi categorie:

- **vettoriali**: dati che rappresentano oggetti (punti, linee o poligoni), identificati attraverso una serie di coordinate spaziali, a cui possono essere associate una serie potenzialmente illimitata di informazioni (quantitative e qualitative) dette attributi, archiviati in forma tabellare. Il formato più comune associato a questo tipo di informazione è lo *shapefile*.

- **raster**: dati che rappresentano superfici proiettate su un piano in formato di griglia, la cui unità fondamentale è rappresentata dalla cella, detta pixel, tipicamente di forma quadrata e di dimensioni variabili in base alla risoluzione, associata ad una informazione numerica che può rappresentare valori o codici. Il formato più comune associato a questo tipo di dato è il *GeoTIFF*.

Attraverso un set di strumenti di *geoprocessing* e calcolo geostatistico, i dati geografici possono essere elaborati al fine di ottenere nuove informazioni utili all'analisi territoriale. Per la conduzione di questo studio si è adoperato “*ArcMap Build28388*”. della *suite* di programmi “*ArcGIS Desktop 10.8.2 Build 28388, Esri®*”.

InVEST, invece, è un software composto da una suite di altri software open source per la valutazione dei servizi ecosistemici, ovvero un insieme di strumenti e modelli che consentono di quantificare e valutare i benefici che gli ecosistemi forniscono all'uomo. InVEST è stato sviluppato dal Natural Capital Project, un consorzio di organizzazioni internazionali di ricerca, ed è distribuito gratuitamente. Il programma utilizza modelli di simulazione per valutare la quantità e la qualità dei servizi ecosistemici, che possono essere prodotti da diversi tipi di macro-habitat e paesaggi. Tra i servizi ecosistemici che InVEST può valutare sono compresi *l'annual water yield, la carbon storage, coastal vulnerability, crop pollination, crop production, forest carbon edge*

effect, habitat quality, nutrient delivery ratio, seasonal water yield, sediment delivery ratio, urban flood risk mitigation, visitation index e indici correlati al valore estetico e culturali dei luoghi. Inoltre, InVEST consente di analizzare come i cambiamenti di utilizzo del suolo, il cambiamento climatico o altre minacce possano influire sulla produzione dei servizi ecosistemici. Il software consente di integrare dati geografici elaborati da software GIS, come mappe di utilizzo del suolo (Land Use/Land Cover - LULC), di copertura vegetale, di idrologia e di topografia, per calcolare indicatori legati ai servizi ecosistemici insieme a tabelle di attributi per produrre mappe tematiche di valutazione. Data la varietà dei modelli all'interno della suite di InVEST, il *software* è utilizzato in svariate applicazioni, tra cui la pianificazione territoriale, la gestione delle risorse naturali, la valutazione del rischio ambientale, la mitigazione del cambiamento climatico e la valutazione dell'impatto ambientale. Il *software* è stato validato scientificamente (Nelson et al., 2009) in diversi contesti e ha dimostrato di essere uno strumento utile per la valutazione dei servizi ecosistemici. Per lo studio sono state necessarie le informazioni che caratterizzassero sia l'uso del suolo dell'area vesuviana, sia la sua morfologia, il clima e la copertura arborea. Nella *Tabella 1* è elencato un riepilogo dei dati di *input* che sono stati necessari da elaborare su GIS prima della compilazione del modello e le loro fonti.

Tabella 1 : Dati di inputi e fonti

Dati	Fonte
Copertura del suolo	Urban Atlas 2018 – Progetto Copernicus (https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas)
Digital Elevation Model (DEM) della provincia di Napoli	Geoportale Nazionale, Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (http://wms.pcn.minambiente.it/wcs/dtm_20m) (riscalato a 10m)
Copertura arborea	Tree Cover Density – 2018 - High Resolution Layers – Progetto Copernicus

	(https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/tree-cover-density/status-maps/tree-cover-density-2018)
Intensità dell'effetto UHI	UHI effect daytime-nighttime 2018 - Global Surface UHI Explorer – (https://yceo.yale.edu/research/global-surface-uhi-explorer)
Albedo	Immagini satellitari ad alta risoluzione Landsat 8-9 collezione 2 livello 1 (https://earthexplorer.usgs.gov/)
Radiazione	Radiazione luglio – agosto 2018 - Database WorldClim 2.1 (https://www.worldclim.org/)
Temperature	Temperature luglio – agosto 2018 - Database WorldClim 2.1 (https://www.worldclim.org/)

2.2. Area di studio

La provincia di Napoli è situata nella regione Campania, ha un'area di 1.171 km², consta di 92 comuni ed ha una popolazione di circa 3,1 milioni di abitanti (fonte: Istat, 2022). Essa confina a nord con la provincia di Caserta, a est con quella di Avellino, a sud con il Mar Tirreno e a ovest con il golfo di Napoli. Dal punto di vista orografico, la provincia è caratterizzata per la presenza di diversi rilievi montuosi, tra cui i monti del Partenio e il Vesuvio. Il turismo rappresenta uno dei settori chiave dell'economia della provincia di Napoli, grazie alla presenza di importanti siti storici e culturali come il centro storico di Napoli, Pompei, Ercolano. Nel 2019, la provincia di Napoli ha registrato 8,3 milioni di presenze turistiche, generando un fatturato complessivo di 2,6 miliardi di euro (fonte: Istat, 2022). L'area di studio si colloca all'interno della provincia di Napoli e consiste nell'areale nei dintorni del Parco Nazionale del Vesuvio (*Figura 1*).

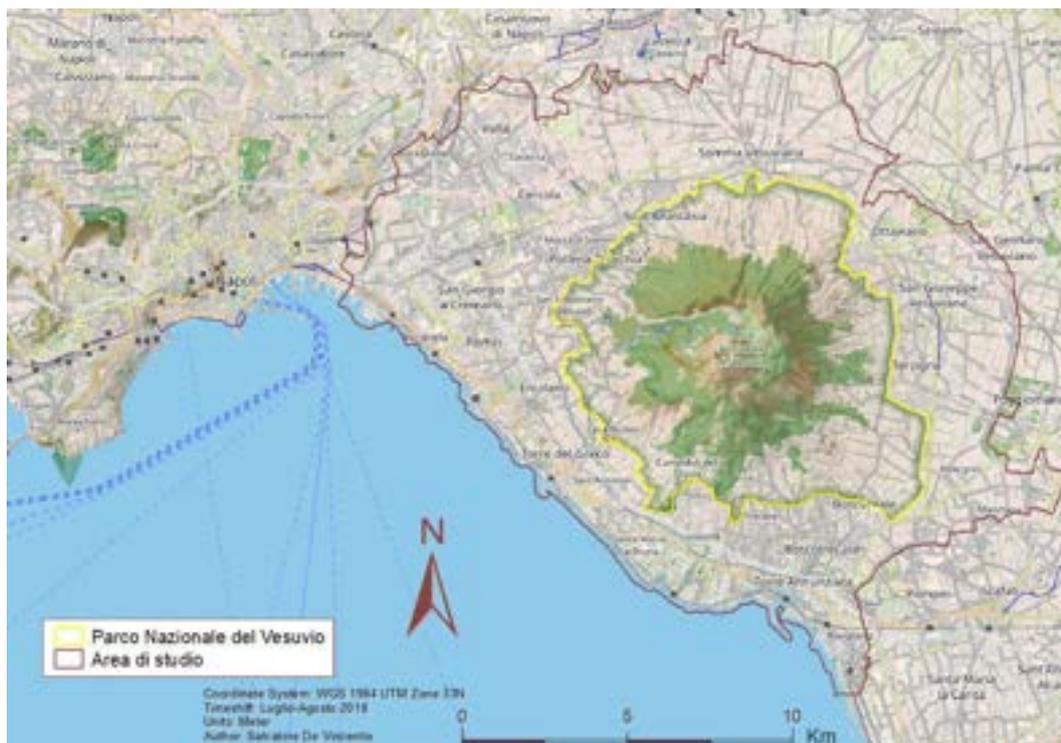


Figura 1 - Carta tecnica indicativa dell'areale, fonte: CyclOSM (OpenStreet Map)

Ai fini dello studio è stata necessaria la preparazione di un'area ben definita dai limiti amministrativi e quindi una cernita. L'area vesuviana appartenente alla ex provincia di Napoli, oggi Città Metropolitana di Napoli, era già inquadrata nel Piano territoriale di coordinamento provinciale, includendo 22 comuni suddivisi in 2 raggruppamenti, un'area interna che comprende Boscoreale, Boscotrecase, Cercola, Massa di Somma, Ottaviano, Poggiomarino, Pollena Trocchia, Pompei, San Giorgio a Cremano, San Giuseppe Vesuviano, San Sebastiano al Vesuvio, Sant'Anastasia, Somma Vesuviana, Striano, Terzigno, Trecase, Volla ed un'area costiera formata da Castellammare di Stabia, Ercolano, Portici, Torre Annunziata, Torre del Greco. Alcuni di questi, sebbene inclusi nel raggruppamento, si discostano alquanto dall'idea di zone "vesuviana" come, per esempio, il comune di Castellammare di Stabia molto più vicino alle realtà territoriali della penisola sorrentina.

Avvenuta l'opportuna preparazione preliminare degli strati necessari per le elaborazioni in GIS, utilizzando i materiali descritti nel paragrafo 2.1, si è proceduto alla definizione dello shapefile che definisse l'area di studio.

Si è provveduto per prima cosa ad una caratterizzazione dell'area di studio. L'area di studio "Vesuviana" presa in esame per questo studio si discosta dalla definizione data dall'ex "Piano territoriale di coordinamento provinciale", si è preferito concentrarsi sui comuni a diretto contatto con il Parco Nazionale del Vesuvio che formassero un unico conglomerato urbano. La cernita ha portato ad un'area comprendente 1 municipalità di Napoli e 18 comuni, ovvero i quartieri della periferia Est di Napoli (San Giovanni, Barra e Ponticelli) e comuni di San Giorgio a Cremano, Portici, Ercolano, Torre del Greco, Torre Annunziata, Somma Vesuviana, Terzigno, Ottaviano, Sant'Anastasia, San Giuseppe Vesuviano, Boscoreale, Pollena Trocchia, Boscotrecase, Volla, Trecase, Cercola, Massa di Somma e San Sebastiano. La superficie dell'area di studio si estende per un totale di quasi 23000 ettari di cui la metà ad uso urbano (Urban Atlas, 2018).

I comuni presi in esame intorno al Parco Nazionale del Vesuvio, sono caratterizzati da una morfologia molto varia e complessa, dovuta all'attività vulcanica e tettonica che ha interessato l'area nel corso dei millenni. L'areale presenta un'altitudine compresa tra il livello del mare e i 1275 m.s.l.m (Geoportale Regione Campania, 2022) Il Parco Nazionale del Vesuvio, presente come zona naturale al centro dell'area di studio, si estende su una superficie di circa 8.000 ettari, e comprende l'intero complesso vulcanico del Vesuvio costituito da un cono vulcanico e dal Monte Somma in prossimità di esso. Attorno al cono

vulcanico si estende una vasta area pianeggiante, chiamata "piana campana", che rappresenta il cuore dell'area metropolitana di Napoli.

L'areale intorno al Parco Nazionale del Vesuvio è caratterizzato anche da numerose formazioni geologiche, come le colate laviche e depositi piroclastici che hanno portato alla caratterizzazione collinare del paesaggio. Questi depositi sono composti da materiale vulcanico di varia grandezza, come lapilli, ceneri e pomici, che hanno dato origine all'area d'intorno con i loro depositi (Sepe et al., 2021). La presenza dell'area metropolitana di Napoli, con i suoi centri storici, i monumenti e le infrastrutture, rappresenta un importante fattore di interesse culturale e turistico che si sovrappone all'area caratterizzata da forti pendenze dovute alla prossimità del cratere.

I dati ottenuti dal Database WorldClim 2.1 (www.worldclim.org) ci permettono di darne anche una caratterizzazione climatica, la temperatura media annuale nella provincia di Napoli è di circa 17,4°C, con una media massima estiva di circa 30°C e una media minima invernale di circa 8°C. In particolar modo, prendendo in considerazione la sola area di studio, è possibile riscontrare nella *Tabella 2* i valori massimi, minimi e medi raggiunti dalle temperature medie secondo WorldClim 2.1.

Le temperature medie dimostrano come i mesi estivi siano i più caldi anche se la distribuzione delle temperature si dimostra alquanto eterogenea sul territorio per via delle sue caratteristiche morfologiche ed orografiche sopra elencate, in particolar modo con la forte pendenza dell'area che ha inevitabilmente influenzato lo sviluppo delle strade ed abitazioni.

Tabella 2 - Temperature medie raggiunte

Mese	Media max	Media min	Media T°
Gennaio	9.1	3	7.1
Febbraio	9.5	3.2	8.3
Marzo	11.3	4.8	10.2
Aprile	13.8	7.4	12.6
Maggio	18.1	12.4	17
Giugno	22	16.4	20.8
Luglio	24.7	19.5	23.5
Agosto	24.9	19.7	23.7
Settembre	21.6	16.1	20.4
Ottobre	17.4	11.7	16.3
Novembre	13.1	7.1	11.9
Dicembre	10.2	4	8.9

Per quanto riguarda le precipitazioni, la provincia di Napoli ha una media annuale di circa 950 millimetri di pioggia, con un picco durante i mesi autunnali e invernali e una riduzione durante l'estate. Il clima dell'area di studio è influenzato dalla posizione geografica della regione, che si affaccia sul Mar Tirreno e che è circondata da montagne. Questi fattori contribuiscono a creare un clima mite e ventilato durante tutto l'anno, ma anche ad aumentare la possibilità di fenomeni meteorologici estremi come tempeste, piogge intense o mareggiate. Secondo un rapporto dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale del 2017 (<https://public.wmo.int>), le temperature medie globali sono aumentate del 1,1°C rispetto ai livelli preindustriali. Secondo il Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici ([https://www.cmcc.it/it/report-napoli - 2022](https://www.cmcc.it/it/report-napoli-2022)) la zona della provincia di Napoli presenta un *trend* in aumento per quanto riguarda le anomalie di temperature per il periodo 1989-2020 (Figura 2), ossia la differenza tra valori annuali e la media del periodo, in riferimento ai valori di

temperature medie (espresse in °C) e alla precipitazione annuali (espresse in percentuali).

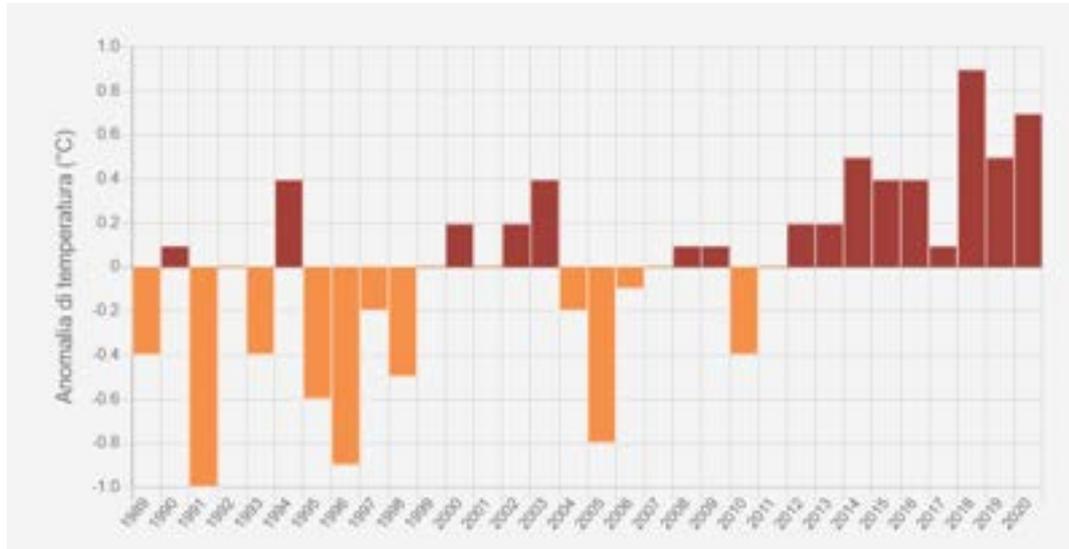


Figura 2 - Andamento dell'anomalia annuale di temperatura media calcolata rispetto alla temperatura annuale media sul periodo 1989-2020 – Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici

Alcuni dei comuni all'interno dell'area di studio sono rinomate per un recente passato caratterizzato da una forte urbanizzazione che ha portato ad una conseguente antropizzazione così spinta da far risultare addirittura, alcuni dei comuni sopra citati, tra i più densamente popolati in Italia come, ad esempio, Portici con 11353 abitanti per km² o San Giorgio a Cremano con 10409 abitanti per km². (Dati ISTAT, 2022). L'interesse per l'analisi su quest'area di studio nasce proprio dalle sue caratteristiche peculiari, in quanto territorio che affaccia sul mare, con un'alta densità abitativa, adiacente ad un vulcano attivo, con la presenza di una macroarea naturale al centro facente parte del parco Nazionale del Vesuvio e dalla continuità del substrato di edificato (Urban Atlas, 2018).

Il motivo della selezione è di chiarire le dinamiche dell'agglomerato urbano densamente popolato adiacente ad un parco nazionale e con un fronte costiero.

2.3. *Suite InVEST e descrizione dell'Urban Cooling Model*

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) è un software gratuito con licenza BSD open source, sviluppato dal Natural Capital Project. Vengono rilasciate versioni aggiornate circa ogni tre mesi, che possono includere miglioramenti scientifici, di prestazioni e di funzionalità, correzioni di bug e/o nuovi modelli. In passato, i modelli di InVEST erano integrati in ArcGIS, ma ora esistono come applicazioni indipendenti avviabili direttamente dai sistemi operativi Windows o Mac senza dipendenze da altri software. La numerazione delle versioni riflette i cambiamenti significativi del software, le nuove funzionalità o le correzioni di bug minori. La versione utilizzata per l'elaborazione è "InVEST 3.12.0" (The Natural Capital Project, 2022). InVEST fornisce informazioni per gestire le risorse naturali valutando i *trade-off* tra utilizzo e preservazione delle risorse stesse. Può essere utilizzato per valutare gli impatti di diversi scenari di gestione del territorio e di diverse condizioni di clima ed uso del suolo. Per l'analisi del fenomeno delle UHI è necessario l'utilizzo dell'*Urban Cooling Model* della *suite* InVEST. Il modello stima la capacità di mitigazione del calore da parte della vegetazione computando sia dati climatici sia dati sulla copertura ed uso del suolo (Land Use / Land Cover da ora abbreviata in LULC). I dati di input del modello sono:

- **Land Use/Land Cover:** File in formato raster contenente dati spaziali *pixel*, ognuno dei quali ha un valore numerico. InVEST accetta tutti i formati raster supportati da *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL), inclusi *GeoTiff* (.tiff) e molti altri. Per l'elenco completo delle estensioni supportate si rimanda al portale del GDAL

(<https://gdal.org/drivers/raster/index.html>). Ogni classe deve essere identificata da uno specifico ID, rappresentato dalla sigla *lucode*, per ciascun pixel in modo da identificare univocamente una LULC. Il modello utilizzerà la risoluzione di questo *layer* per ricampionare tutti gli altri *output*. La risoluzione dovrebbe essere sufficientemente piccola da catturare l'effetto degli spazi verdi nel paesaggio (10 x 10 metri), sebbene le categorie LULC possano comprendere un mix di coperture vegetate e non vegetate (ad esempio "residenziale", che può avere una *canopy cover* 30%). Per lo studio è stato adoperato l'Urban Atlas 2018 previa trasformazione del formato da vettoriale a raster attraverso ArcGis.

- **Evapotraspiration:** File raster formato .tiff indicante il valore dell'evapotraspirazione di riferimento dell'area presa in esame espressa in mm. Possono essere riferiti a dati giornalieri, mensili o di un periodo specifico. In questo studio sono riferiti ai valori medi del mese di luglio ed agosto. Le formule di stima sono riportate nel successivo paragrafo 2.4.2.

- **Area Of Interest (AOI):** Shapefile (vettoriale, *polygon/multipolygon*, obbligatorio), contenente il *polygon* delle aree su cui aggregare e sintetizzare i risultati finali. Le AOI possono contenere i confini della città, dei quartieri o di aree metropolitane. Per lo studio ci si è soffermati sui comuni e municipalità elencati nel paragrafo 2.2.

- **Biophysical Table:** File .csv (Comma-separated values) contenente per ciascun numero identificativo del *lucode* (e quindi

classe del suolo) una serie di informazioni accessorie necessarie all'applicazione del modello. Ogni dato inserito deve essere un numero intero univoco e compilando nelle colonne del .csv nel seguente ordine

- **lucode** (numero intero, obbligatorio): codice LULC del file raster inserito per la **Land Use/Land Cover**.

- **kc** (numero, adimensionale, richiesto): *Crop coefficient* per classe LULC, coefficiente necessario alla stima dell'evapotraspirazione effettiva.

- **green_area** codice binario che assume valore 1 per indicare che il LULC è considerato un'area verde, 0 per indicare che il LULC non è considerato un'area verde.

- **shade** (rapporto, condizionatamente richiesto): rappresenta il rapporto tra l'area della *tree canopy* e l'area della classe LULC con chioma di alberi di altezza minima di 2 metri. Richiesto per analisi di tipo "*factors*" per il calcolo della *Cooling Capacity (CC)*.

- **albedo** (rapporto, condizionatamente richiesto): la proporzione di radiazione solare riflessa direttamente dalla classe LULC. Richiesto per analisi di tipo "*factors*" per il calcolo della *Cooling Capacity (CC)*.

- **building_intensity** (rapporto, condizionatamente richiesto): il rapporto tra la superficie complessiva dell'edificio e la sua pianta, con tutti i valori in questa colonna normalizzati tra 0 e 1. Richiesto per analisi di tipo "*intensity*" per il calcolo della *Cooling Capacity (CC)*.

- **Reference Air Temperature**: Temperatura dell'aria espressa in gradi centigradi Celsius di una zona di riferimento rurale dove non è osservato il fenomeno dello UHI. Può essere riferita sia la temperatura notturna o diurna, per una data specifica o una media su più giorni. I risultati *output* saranno forniti per lo stesso periodo di interesse.

È indicato all'interno delle equazioni con $T_{air,ref}$

- **UHI Effect:** L'entità dell'effetto isola di calore urbano, ovvero la differenza tra la temperatura di riferimento rurale e la temperatura massima osservata in città espressa in gradi centigradi *Celsius*.

È indicato all'interno delle equazioni con UHI_{max} .

- **Air Blending Distance:** Distanza su cui calcolare la temperatura media dell'aria per tenere conto della miscelazione dell'aria espressa in metri. Intervallo di valori consigliato dalla guida di InVEST del Natural Project

(<https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org>) per la simulazione iniziale: da 500 metri a 600 metri

- **Maximum Cooling Distance:** Distanza su cui le aree verdi superiori a 2 ettari hanno un effetto di raffreddamento.

- **Cooling Capacity Calculation Method:** Indica il metodo per il calcolo della *Cooling Capacity (CC)*. Si differenzia in due diverse tipologie di analisi:

- **factors:** utilizza i dati pesati di *shade*, *albedo* ed *Et* come predittori delle temperature, impiegato per le temperature diurne. In questo approccio, l'analisi si basa sulla considerazione di vari fattori che influenzano la capacità di raffreddamento di un'area urbana. Questi fattori possono includere la vegetazione, la presenza di aree d'acqua, l'ombreggiatura, la densità edilizia, l'orientamento degli edifici, la riflettività delle superfici e altri

parametri urbanistici. Ogni fattore viene valutato e ponderato in base alla sua importanza per la capacità di raffreddamento complessiva dell'area. Successivamente, viene calcolato un punteggio complessivo per valutare la Cooling Capacity dell'area urbana.

- ***intensity***: utilizza la *building intensity* come predittore delle temperature, impiegato per le temperature notturne. Questo approccio si concentra sull'intensità del raffreddamento anziché sui fattori specifici che lo influenzano. Viene utilizzato per misurare la quantità di raffreddamento generato da diverse fonti o infrastrutture di raffreddamento nell'area urbana. Queste fonti di raffreddamento possono includere parchi, tetti verdi, impianti di condizionamento dell'aria, fontane, sistemi di nebulizzazione e altre infrastrutture simili. L'analisi si basa sul calcolo dell'intensità del raffreddamento prodotto da ciascuna fonte e sulla loro distribuzione all'interno dell'area urbana. Viene quindi ottenuta una misura dell'intensità totale del raffreddamento nell'area.

Il modello permette già con solo questi dati di ottenere i valori di CC e di HMI e quindi di effettuare una *run* del modello. In questo studio si è voluto indagare anche sul risparmio energetico potenziale per dare una maggiore retrospettiva sul “peso” dei due scenari. Per il funzionamento del modulo riguardante l'*energy savings* devono essere fornite anche l'input *buildings* e l'*energy consumption table*. I dati che devono essere forniti per il funzionamento del modulo sono:

- **Buildings** (vettore, poligono/multipoligono, condizionalmente richiesto): una mappa delle infrastrutture presenti sul territorio. Il file vettoriale dovrà contenere un *field* definito come *type* (integer, richiesto): con codice indicante la tipologia edilizia dell'infrastruttura. Questi codici devono corrispondere a quelli della tabella dei consumi energetici. Per semplicità di analisi in questo studio si sono assunti dei valori medi per l'*energy consumption table* e quindi il file *buildings* contiene un solo *type* di edificio.

- **Energy Consumption Table:** File .csv (condizionalmente richiesto): contenente una tabella dei dati sul consumo energetico per ogni tipo di edificio. Ogni dato inserito deve essere compilato nelle colonne del .csv nel seguente ordine

type: codici per tipologia di edificio che corrispondono a quelli nel vettore *buildings*.

consumption (numero, unità: kWh/(m² °C), richiesto): consumo energetico area di superficie di infrastruttura per tipo di edificio.

Il fine del modello è di ottenere i seguenti risultati:

- *hm_[Suffix].tif*: HMI calcolato in formato raster
- *uhi_results_[Suffix].shp*: una copia del vettore di input "AOI" con i seguenti campi aggiuntivi:
 - *avg_cc* - Valore CC medio
 - *avg_tmp_v* - Valore medio della temperatura (°C).
 - *avg_tmp_an* - Anomalia della temperatura media (°C).
 - *avd_eng_cn* - Consumo energetico evitato (kWh o \$ se nella tabella del consumo energetico è stata fornita la colonna di input del costo energetico opzionale).

Per ottenere questi output il modello procede prima nello stimare l'indice *Cooling Capacity* (CC) attraverso i valori di *shade*, dell'evapotraspirazione e dell'albedo della zona e solo successivamente calcola l'HMI. (Zardo et al. 2017). Nello specifico l'HMI equivale al valore della *Cooling Capacity* (CC) se una determinata zona non è influenzata da grandi spazi naturali nelle immediate vicinanze (Zardo et al., 2017), altrimenti, corrisponde alla risultante del calcolo della CC influenzata da una media pesata sulla distanza dei valori della CC degli spazi verdi con superficie maggior di due ettari adiacenti al singolo pixel preso in esame.

Il modello calcola innanzitutto l'indice della (CC) per ciascun pixel in base all'ombra locale, all'evapotraspirazione e all'albedo. Questo approccio si basa sugli indici proposti da Zardo et al. 2017 e Kunapo et al. 2018, a cui viene aggiunto l'albedo, fattore importante per l'abbattimento del calore. Il fattore di ombreggiamento ("*shade*") rappresenta la proporzione della chioma degli alberi più alti di 2 metri associati a ciascuna categoria del LULC. Il suo valore è compreso tra 0 e 1. L'indice di evapotraspirazione (ETI) rappresenta un valore normalizzato di evapotraspirazione potenziale, cioè l'evapotraspirazione dalla vegetazione (o evaporazione dal suolo, per le aree prive di vegetazione). Viene calcolato per ogni pixel moltiplicando l'evapotraspirazione di riferimento (Et_0 , fornito dall'utente) e il coefficiente di colturale (K_c , associato al tipo LULC del pixel) e dividendolo per il valore massimo di Et_0 , ovvero Et_{max} :

$$ETI = \frac{K_c \cdot ET_0}{ET_{max}} \quad (1)$$

Si noti che questa equazione presuppone che le aree verdi siano sufficientemente irrigate (sebbene i valori K_c possano essere ridotti per rappresentare l'evapotraspirazione limitata dall'acqua).

Il fattore albedo è un valore compreso tra 0 e 1 che rappresenta la proporzione di radiazione solare riflessa dal tipo LULC (Phelan et al. 2015).

Il modello combina i tre fattori dell'indice CC:

$$CC_i = 0.6 \cdot shade + 0.2 \cdot albedo + 0.2 \cdot ETI \quad (2)$$

I coefficienti di ponderazione raccomandati, ovvero 0.6; 0.2 e 0.2, si basano su dati empirici e riflettono il maggiore impatto dell'ombreggiamento rispetto all'evapotraspirazione. Nelle aree più grandi di due ettari i pesi sono stati modificati a 0,6 e 0,4, rispettivamente per evapotraspirazione e ombreggiamento. Nel modello utilizzato, viene proposto di disaggregare gli effetti dell'ombra e dell'albedo nell'equazione e di attribuire all'albedo lo stesso peso dell'ETI (Phelan et al. 2015). Inoltre, si possono inserire manualmente valori alternativi dall'utente all'interno dell'interfaccia software per testare la sensibilità degli output del modello a questo parametro previa la conoscenza di dati locali.

Facoltativamente, il modello può considerare un altro fattore, la *building intensity* per una data LULC, che esprime la dimensione verticale degli edifici. La *building intensity* è un importante predittore della temperatura notturna poiché il calore immagazzinato dagli edifici durante il giorno viene rilasciato durante la notte. Per prevedere le temperature notturne, si dovrebbero fornire il fattore di *building*

intensity per ciascuna classe di uso del suolo nella *biophysical table* e modificare l'equazione precedente in:

$$CC_i = 1 - \text{building.intensity} \quad (3)$$

Ai fini di questo studio non è stato necessario ricorrere alla *building intensity*.

Per tenere conto dell'effetto di raffreddamento delle grandi GUI (>2 ha) sulle aree circostanti (Zardo et al. 2017), il modello calcola l'indice HM urbano: HM è uguale a CC se il pixel non è influenzato da ampi spazi verdi adiacenti, altrimenti impostato su una media ponderata sulla distanza dei valori CC dagli spazi verdi ampi e dal pixel di interesse.

Per fare ciò, il modello calcola prima l'area degli spazi verdi entro una data distanza d_{cool} intorno a ciascun pixel (definita come GA_i , Equazione 4), e la CC fornita da ciascuna GUI con superficie maggiore di 2 ettari, definiti nel modello come *park* (CC_{park})

$$GA_i = cell_{area} \cdot \sum_{j \in d_{radius}} i g_j \quad (4)$$

$$CC_{park_i} = \sum_{j \in d_{radius}} i g_j \cdot CC_j \cdot e^{\left(\frac{-d(i,j)}{d_{cool}}\right)} \quad (5)$$

La $cell_{area}$ è l'area di una cella (pixel) espressa in ettari, g_j è 1 se il pixel j corrisponde ad uno spazio verde o 0 se non lo è, $d(i,j)$ è la distanza tra il pixel i ed il pixel j , d_{cool} è la distanza entro la quale uno spazio verde ha un effetto di raffreddamento, e CC_{park_i} è la media ponderata per la distanza dei valori di CC attribuibili agli spazi verdi. Si noti che le classi

LULC che si qualificano come "spazi verdi" devono essere determinati dall'utente con il parametro "green_area" nella *biophysical table*. Successivamente, l'indice HM viene calcolato come:

$$HM_i = \begin{cases} CC_i & \text{if } CC_i \geq CC_{park_i} \text{ or } G < 2ha \\ CC_{park_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

Per stimare la riduzione del calore in tutta la città, il modello utilizza l'indice UHI (su scala urbana) definito come UHI_{max} . I valori UHI possono essere ottenuti da letteratura o da studi globali come il *Global Surface UHI Explorer* sviluppato dall'Università di Yale che fornisce stime dell'UHI annuale, stagionale, diurno e notturno (<https://yceo.users.earthengine.app/visualizza/uhimap>). Per lo svolgimento di questo studio si è ricorso ai dati provveduti dall'Università di Yale. Si noti che UHI_{max} è definito per un periodo ed un'ora specifica (temperature notturne o diurne). La selezione del periodo e dell'ora influenza la quantificazione e la valutazione del servizio. La temperatura senza ricircolo dell'aria definita come $T_{air\ nomix}$ viene calcolato per ogni pixel come:

$$T_{air\ nomix,i} = T_{air,ref} + (1 - HM_i) \cdot UHI_{max} \quad (7)$$

Dove $T_{air,ref}$ è la temperatura di riferimento delle zone rurali e UHI_{max} è l'entità massima dell'effetto UHI per la città, o più precisamente, la differenza tra $T_{air,ref}$ e la temperatura massima osservata in città.

A causa del ricircolo dell'aria, queste temperature sono medie spaziali. La temperatura effettiva dell'aria (con ricircolo) T_{air} , viene derivata da

$T_{air\ nomix}$ utilizzando una funzione gaussiana con raggio del kernel r , definito dall'utente al momento della compilazione del modello.

Per ogni area di interesse (layer vettoriale GIS da inserire), si calcola la temperatura media e l'anomalia di temperatura (definita come $T_{air,i} - T_{air,ref}$).

Per la computazione del risparmio energetico il modello utilizza una relazione tra consumo energetico e temperatura (Santamouris et al. 2015) per calcolare il risparmio energetico ($energy.sav$) e i costi associati per un edificio b indicata con l'espressione:

$$Energy.sav(b) = consumption.increase(b) \cdot (T_{air,MAX} - T_{air,i}) \quad (8)$$

In cui abbiamo:

- $consumption.increase(b)$, espresso in kWh/°C/m², è la stima dell'incremento del consumo energetico per ogni grado di temperatura per metro quadro dell'impronta dell'edificio, per categoria di edificio b . Nel nostro caso abbiamo apportato una semplificazione facendo una stima media dei consumi di tutti gli edifici.

- $T_{air,MAX}$ è la temperatura massima sul paesaggio ($T_{air,ref} + UHI_{max}$)

- $(T_{air,MAX} - T_{air,i})$ (espressa in °C) è la differenza media di temperatura dell'aria per edificio b , con $T_{air,i}$ definito nei passaggi precedenti.

Per il calcolo del risparmio energetico totale, vengono sommati i valori a livello di pixel sul layer area di interesse.

2.4. Dati inseriti nel modello

L'Urban Cooling Model è stato impostato per questo studio affinché si ottenesse sia un file *raster*, rappresentate l'HMI, sia i file vettoriali con annesse *attribute table* (dati elaborati e tabulati) per ogni singolo scenario impostato. Ogni dato o impostazione è da inserire direttamente nell'interfaccia del software. Da notare, tutti gli *input* spaziali hanno bisogno dello stesso sistema di proiezione cartografica (con unità di misura lineari dei metri) e non di sistemi di coordinate geografiche (con unità di misura in gradi).

Nel seguito si descrive come è stato compilato il *software* per condurre lo studio, per poi demandare a una più approfondita trattazione sull'uso del suolo, sull'evapotraspirazione, sulla copertura arborea e sul fenomeno locale delle UHI nei capitoli successivi.

In primis il modulo di InVEST necessita di designare un *workspace* (Figura 3), ovvero indicare una directory di lavoro nella quale esportare sia i risultati che i file di log. È possibile aggiungere dei suffissi ai file di output compilando la voce "*File Suffix*" per differenziare le differenti *run* del modello. In questo caso di studio si è optato per *baseline*, *generalizzato* e *mirato* per identificare gli output dei 3 scenari ipotizzati.



Figura 3 – Interfaccia Workspace dell'Urban Cooling Model - InVEST

In secondo luogo, in base all'intenzione di procedere con un'analisi *factors* o *intensity* si procede con la raccolta ed inserimento dei dati. I

due metodi si differenziano per il metodo di stima della CC come mostrato nelle equazioni 2 e 3.

L'analisi *factors* è necessaria per le temperature diurne ed usa dei valori ponderati di *shade effect*, albedo ed evapotraspirazione, l'analisi *intensity* invece è utile alla stima delle temperature notturne e si basa su dati di riferimento degli edifici. La scelta di questo studio è ricaduta sull'analisi *factors* innanzitutto per ottenere i picchi di temperatura che si verificano normalmente di giorno ed in secondo luogo perché ci permette agire con le informazioni strettamente inerenti all'ambito della vegetazione, in particolare lo *shade effect*, proporzionale alla copertura arborea.

Dopo la scelta del metodo di stima della CC c'è bisogno di inserire la mappa di uso/copertura del suolo alla voce *Land Use/Land Cover*; il formato richiesto è un file raster in cui i valori dei pixel riportano il valore della classe LULC corrispondenti a quelli riportati nella *Biophysical Table*. Per questo studio si è optato per l'utilizzo dello Urban Atlas 2018 opportunamente convertito da file vettoriale a raster attraverso il *tool* di ArcGis "*polygons to raster*" selezionando una risoluzione del pixel di 10 metri per 10 metri. La trattazione approfondita dello strato è rimandata nel successivo paragrafo 2.4.1.

La *Biophysical Table* è composta da un file .csv opportunamente compilato per lo scenario *baseline* (*Tabella 3*) scenario di intervento generalizzato (*Tabella 4*) e scenario di intervento mirato (*Tabella 5*).

Tabella 3: Biophysical table dello scenario baseline

lucode	Description	Shade	Kc	Albedo	Green_area	building_intensity
1	High Density Urban	0.06	0.20	0.14	0	0.95
2	Low Density Urban	0.13	0.50	0.13	0	0.5
3	Green Urban Area	0.29	0.90	0.12	1	0.1
4	Others Urban Area	0.06	0.20	0.15	0	0.5
5	Rural	0.30	1.00	0.11	1	0
6	Forest	0.50	1.00	0.10	1	0
7	Water	1.00	0.70	0.08	1	0

Tabella 4 : Biophysical table dello scenario generalizzato

lucode	Description	Shade	Kc	Albedo	Green_area	building_intensity
1	High Density Urban	0.31	0.20	0.14	0	0.95
2	Low Density Urban	0.38	0.50	0.13	0	0.5
3	Green Urban Area	0.54	0.90	0.12	1	0.1
4	Others Urban Area	0.31	0.20	0.15	0	0.5
5	Rural	0.30	1.00	0.11	1	0
6	Forest	0.50	1.00	0.10	1	0
7	Water	1.00	0.70	0.08	1	0

Tabella 5 : Biophysical table dello scenario mirato

lucode	Description	Shade	Kc	Albedo	Green_area	building_intensity
1	High Density Urban	0.06	0.20	0.14	0	0.95
2	Low Density Urban	0.13	0.50	0.13	0	0.5
3	Green Urban Area	0.54	0.90	0.12	1	0.1
4	Others Urban Area	0.06	0.20	0.15	0	0.5
5	Rural	0.30	1.00	0.11	1	0
6	Forest	0.50	1.00	0.10	1	0
7	Water	1.00	0.70	0.08	1	0

I valori necessari per la compilazione del csv vengono identificati dal loro *alias* all'interno del *software* e qui di seguito vengono trattati.

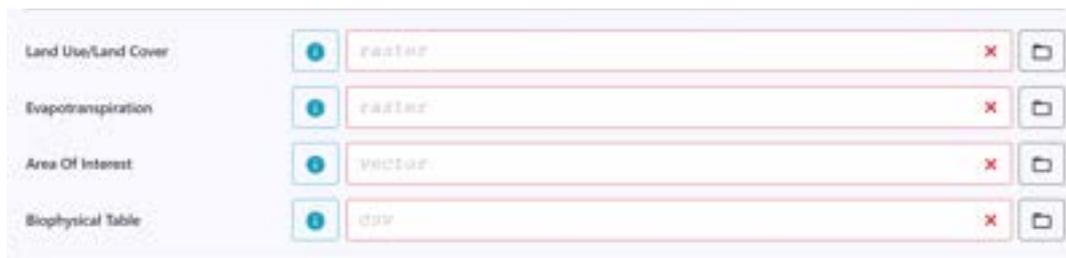
- *lucode*: Codice numerico che identifica univocamente la classe di appartenenza di un determinato territorio alla sua LULC. Nel nostro caso si è fatto riferimento all'*Urban Atlas* del progetto Copernicus (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>);

- *description*: Nome esteso o definizione delle classi del LULC;
- *kc*: Coefficiente di evapotraspirazione per ogni singola classe del LULC;

- *green_area*: Valore *true/false* (ovvero un valore binario che sta ad indicare se un valore appartiene o meno alla definizione data) per indicare aree verdi (aree naturali). La cifra da inserire è 1 per le aree verdi, 0 in caso contrario;
- *shade*: Indica lo *shade effect* ovvero l'area coperta dalla chioma di alberi alti almeno 2 metri. È richiesta per l'analisi *factors*;
- *albedo*: Indica la proporzione di radiazione solare riflessa direttamente dalle superfici delle aree definite nella LULC. È richiesta per l'analisi *factors*;
- *building_intensity*: Percentuale dell'area dell'edificato rispetto all'area totale di zona classificata dal LULC. È necessaria solo per l'analisi della *Cooling Capacity* di tipo *intensity*, analisi che valuta le caratteristiche degli edifici e quindi è stata omessa dalla *biophysical table* di questa studio;

Ogni parte dell'*attribute table* verrà trattata singolarmente nei capitoli appositi. Il software, dopo l'inserimento del file raster per la LULC e la *biophysical table*, necessita di un file raster raffigurante la mappa dei valori dell'evapotraspirazione della zona presa in esame ed un file vettoriale definito da un poligono che indichi l'*Area of Interest* (da ora AOI). Questi file di *input* completano il primo blocco (*Figura 4*) dell'impostazione del modello, ovvero di file di uso del suolo, dell'evapotraspirazione, di albedo, copertura vegetale e della definizione della AOI. Gli input da inserire in questa parte del

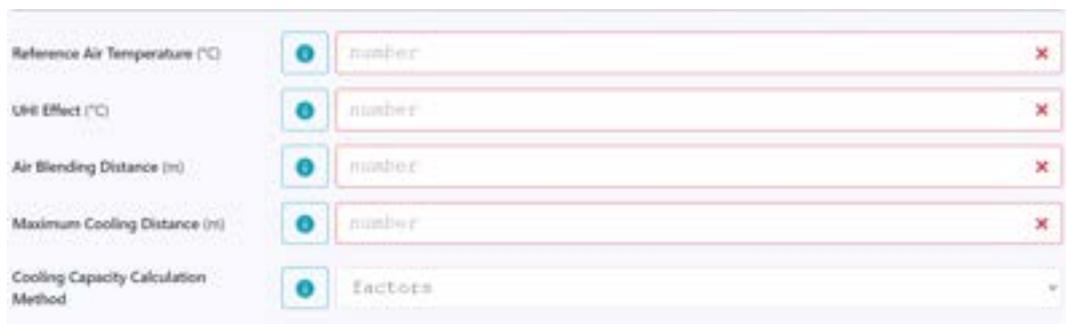
programma hanno avuto bisogno di elaborazioni preliminari su ArcGIS (visto la loro natura di file raster, vettoriali e csv) per il loro utilizzo del modello InVEST, verranno trattati approfonditamente nei paragrafi seguenti a loro dedicati.



The screenshot shows a configuration panel with four rows of input fields. Each row has a blue circular icon with a question mark on the left, a text input field in the center, a red 'X' icon on the right, and a folder icon on the far right. The rows are: 'Land Use/Land Cover' with 'raster', 'Evapotranspiration' with 'raster', 'Area Of Interest' with 'vector', and 'Biophysical Table' with 'csv'.

Figura 4 – Interfaccia Urban Cooling – Dati di input (1)

Il secondo blocco delle configurazioni (Figura 5) invece richiede la *reference air temperature*, lo *UHI effect*, l'*air blending distance*, la *maximum cooling distance* e la scelta del metodo di calcolo della CC. Tutti gli input qui inseriti anche se hanno necessitato delle elaborazioni preliminari su ArcGIS per la loro stima, all'atto dell'inserimento necessitano solo la digitazione dei risultati ottenuti dall'elaborazione su GIS. Come già detta per questa analisi si è optato per il metodo di stima *factors*.



The screenshot shows a configuration panel with five rows of input fields. Each row has a blue circular icon with a question mark on the left, a text input field in the center, a red 'X' icon on the right, and a dropdown arrow on the far right. The rows are: 'Reference Air Temperature (°C)' with 'number', 'UHI Effect (°C)' with 'number', 'Air Blending Distance (m)' with 'number', 'Maximum Cooling Distance (m)' with 'number', and 'Cooling Capacity Calculation Method' with 'Factors'.

Figura 5 – Interfaccia Urban Cooling – Dati di input (2)

La *reference air temperature* indica la temperatura media osservata durante il giorno in una zona rurale o naturale dove non è presente il

fenomeno di UHI. Lo UHI *effect* misura la differenza che intercorre tra la temperatura di riferimento di una zona rurale e la temperatura massima osservata in città. L'*air blending distance* è la distanza espressa in metri su cui calcolare la temperatura media dell'aria per tenere conto della miscelazione dell'aria; è un intervallo di valori consigliato dalla Guida di InVEST (2022) tra i 500 m ed i 600 m.

La *maximum cooling distance* è la distanza, espressa in metri, per la quale le aree di estensione superiore a 2 ettari riescono ad avere un effetto rinfrescante; in mancanza di informazioni specifiche, il valore raccomandato dalla guida InVEST è di 450 metri.

Infine, si è impostato anche il modulo opzionale riguardante la valutazione sul risparmio energetico degli edifici. Questa scelta è stata presa in ragione dell'enorme impatto che gli edifici hanno sull'area di studio in termini di estensione delle superfici. Per ottenere tale elaborazione è stato necessario sia disporre di uno *shapefile* formato da un multi-poligono di tutto l'edificato dell'area di studio da inserire alla voce *buildings*, sia un file csv relativo ai consumi energetici degli edifici.

Per semplicità di analisi, tutti i valori dei primi due moduli sono riferiti ai valori medi o della singola classe del LULC (ove richiesti) o ai valori medi dell'intera area di studio. In seguito, verranno approfondite le logiche, le metodologie e le fonti dei parametri inseriti.

2.4.1. Urban Atlas

Così come è necessario catalogare e modellizzare, semplificando, i fenomeni naturali al fine dell'analisi, così il territorio necessita di una classificazione delle aree per permetterci di interpretare il fenomeno

delle UHI. Il progetto Copernicus dal 2006, e con i suoi aggiornamenti del 2012 e 2018, censisce in maniera funzionale le aree urbane, cercando di interpretare in maniera quanto più precisa l'identità delle finalità dell'uso del suolo nelle aree urbane. Lo scopo è di fornire una mappatura che supporti analisi, come quella presa in considerazione nel presente studio, dando delle definizioni di aree coerenti tra loro per i diversi anni in cui venga redatta. Il servizio Urban Atlas offre una mappa dell'uso del suolo ad alta risoluzione delle aree urbane. Inizialmente includendo oltre 300 Città europee con più di 100.000 abitanti per l'anno di riferimento 2006, per gli anni di riferimento del 2012 e 2018, arriva su quasi 800 città con più di 50.000 abitanti, includendo paesi UE, EFTA, zona dei Balcani occidentali, Regno Unito e Turchia. Ogni parte dell'*Urban Atlas* viene generata sulle grandi città e sui suoi dintorni, secondo le *Functional Urban Areas* (FUA) definita dall'attuazione dell'approccio sviluppato dalla "DG REGIO - DG for Regional and Urban Policy" della Commissione europea.

L'*Urban Atlas* è composto da una suite di prodotti quali la LULC, compilata seguendo la logica delle sopra citata *Functional Urban Areas* (FUA), e da altri dati correlati riguardanti stime della popolazione, altezza degli edifici e censimento arboreo delle strade. Le FUA sono costituite da una città densamente abitata o da una zona pendolare meno densamente popolata il cui mercato del lavoro è altamente integrato con la città (fonte: EuroStat, 2022). Per ogni diverso anno di analisi (2006, 2012 e 2018 al momento della stesura dell'elaborato) variano sia i prodotti che alcuni fondamentali riferimenti, come i codici delle classi LULC e l'identificazione previsionale di alcune di esse. Nella presente analisi è stato strettamente necessario l'uso dei dati del LULC del 2018.

Lo *Urban Atlas 2018* comprende 27 classi urbane con unità minima di misura (MMU) di 0.25 ettari e 10 classi rurali da unità minima di misura di 1 ettaro. Ogni classe viene indicata con un codice composto da 5 cifre, la rispettiva nomenclatura ed eventuali informazioni aggiuntive; nel caso di territori urbani la *soil sealing* (abbreviata come S.L.) indica la percentuale di terreno impermeabilizzato rispetto alla superficie totale dell'area presa in considerazione.

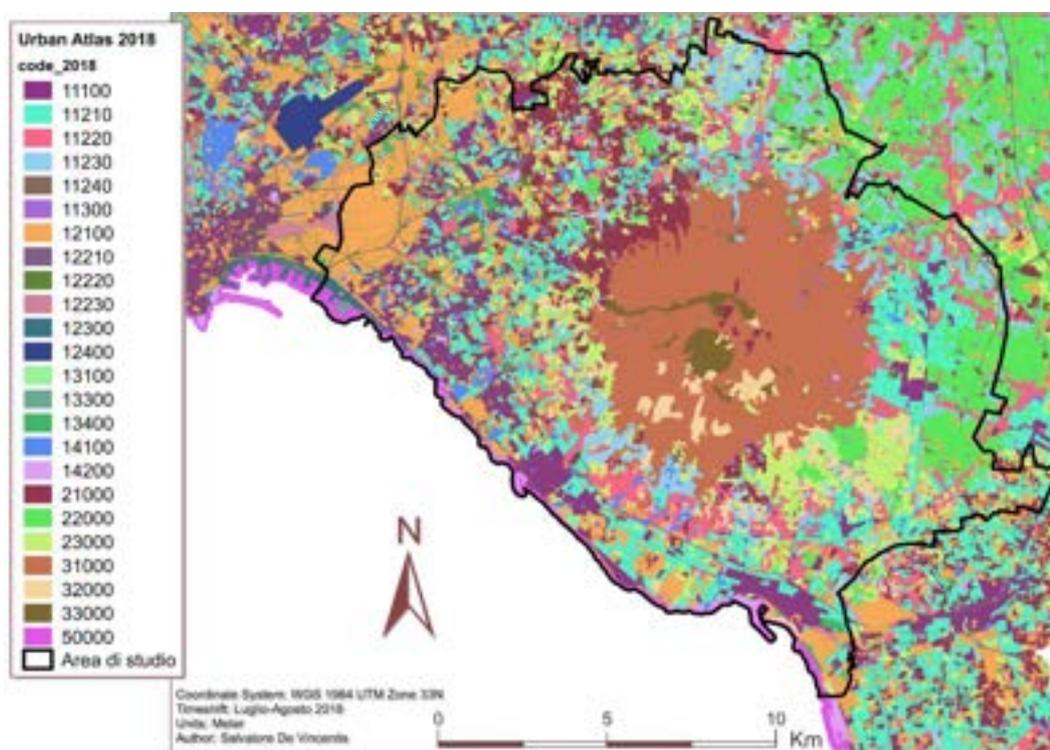


Figura 6 – Urban Atlas 2018 dell'area vesuviana

Delle 27 classi LULC solamente 23 vengono riscontrate all'interno dell'area di studio (*Figura 6*), per l'indicazione del codice e descrizione della classe si veda (*Tabella 6*). Data l'area totale presa in esame, si è optato per un'aggregazione tematica delle classi al fine di avere quante meno classi LULC che rappresentassero efficacemente le condizioni d'uso del suolo e densità dell'edificato.

Lo Urban Cooling, come descritto nel paragrafo 2.3, necessita per le elaborazioni di un *layer* in formato *raster* che rappresenti la LULC del territorio identificando delle classi rappresentative di albedo, presenza di aree verdi, intensità abitativa e copertura vegetale. Le 23 classi identificate dallo Urban Atlas 2018 risultano ridondanti per il fine dell'analisi e quindi si è optato per un raggruppamento tematico e, inoltre, il formato file presente sul portale Copernicus è fornito sottoforma di file *vettoriale*. Per l'ottenimento di un file .tiff si è provveduto al caricamento del *layer* vettoriale dello Urban Atlas 2018 (v013) della provincia di Napoli dal portale Copernicus (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>) un nuovo file progetto di ArcGIS. Il file dopo le opportune conversioni del sistema di riferimento è stato ritagliato con il *tool clip* di ArcGIS per il perimetro dell'area di studio comprendente Boscoreale, Boscotrecase, Cercola, Ercolano, Massa di Somma, Ottaviano, Pollena, Portici, San Giorgio a Cremano, San Giuseppe Vesuviano, San Sebastiano al Vesuvio, Sant'Anastasia, Somma Vesuviana, Terzigno Torre Annunziata, Torre del Greco, Trecase, Volla e la sesta Municipalità di Napoli (Ponticelli, Barra, San Giovanni). Il poligono di ritaglio contenente dei limiti amministrativi dei comuni è stato ottenuto combinando dei *layer* da Geoportale Regione Campania (<https://sit2.regione.campania.it/content/dati-database>) e dal sito del comune di Napoli (<https://www.comune.napoli.it/>). Dopo aver ottenuto il ritaglio dello Urban Atlas per la sola zona dell'area di studio è stato effettuato il raggruppamento utilizzando il *tool dissolve* del *layer* ritagliato rispetto il *field* "code2018" rappresentativo della LULC.

Le 23 classi sono state quindi accorpate in altre 7 macro-classi, 4 che rappresentassero il tessuto urbano e 3 le aree naturali. La finalità è di

ottenere quante meno classi possibili in modo da poter compilare una *biophysical table* sia sintetica che rappresentativa del territorio. La cernita attraverso il *tool* di GIS “*dissolve*” ha prodotto così i seguenti raggruppamenti tematici illustrati in (Tabella 6).

Tabella 6 – Raggruppamento tematico dello Urban Atlas 2018 per l’area Vesuviana

code2018	Descrizione	S.L. = soil sealing	lucode
	High Urban Density		1
11100	Continuous urban fabric (S.L. : > 80%)		
11210	Discontinuous dense urban fabric (S.L. : 50% - 80%)		
	Low Urban Density		2
11220	Discontinuous medium density urban fabric (S.L. : 30% - 50%)		
11230	Discontinuous low density urban fabric (S.L. : 10% - 30%)		
11240	Discontinuous very low density urban fabric (S.L. : < 10%)		
11300	Isolated structures		
	Green Urban Areas		3
14100	Green urban areas		
	Others Urban Areas		4
12100	Industrial, commercial, public, military and private units		
12210	Fast transit roads and associated land		
12220	Other roads and associated land		
12230	Railways and associated land		
12300	Port areas		
13100	Mineral extraction and dump sites		
13300	Construction sites		
13400	Land without current use		
14200	Sports and leisure facilities		
	Rural areas		5
21000	Arable land (annual crops)		
22000	Permanent crops (vineyards, fruit trees, olive groves)		
23000	Pastures		
24000	Complex and mixed cultivation patterns		
	Natural Areas		6
31000	Forests		
32000	Herbaceous vegetation associations (natural grassland, moors...)		
33000	Open spaces with little or no vegetation (beaches, bare rocks...)		
	Water surfaces		7
50000	Water		

La tabella rappresenta all’interno nelle intestazioni i nomi delle neo-macro classi generate per l’elaborato denominate dall’alias *lucode* (*Land use code*), di fianco la cifra del codice di riferimento inserito all’interno della *biophysical table* con il colore di riferimento all’interno delle rappresentazioni ed elaborazioni. Al di sotto delle

intestazioni di ogni classe *lucode* invece sono riportate le classi dell'Urban Atlas così come descritte all'interno della Mapping Guide v6.3 del progetto *Copernicus* (https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/urban_atlas_2012_2018_mapping_guide_v6.3)

Di seguito viene riportata una breve descrizione identificativa del raggruppamento:

- **High Urban Density** Definisce aree ad alta densità urbana identificate dai codici 11100 e 11210. Il S.L. si riferisce alla copertura del suolo da parte delle strutture urbane, e questi codici si riferiscono alle aree di copertura del suolo urbano continuo o discontinuo densamente concentrate. Contestualizzate col discorso delle UHI, è la classe maggiormente suscettibile al fenomeno.

- **Low Urban Density** Sono aree di bassa densità urbana identificate dai codici 11220, 11230, 11240 e 11300. Questi codici si riferiscono alle aree urbane con copertura del suolo discontinua e densità media, bassa o molto bassa, nonché a strutture isolate. Anche questa classe tende ad essere suscettibile alle UHI.

- **Green Urban Areas** Comprende aree verdi urbane identificate dal codice 14100. Include parchi pubblici, ville comunali, ampie aree verdi di condomini o proprietà private. Data la natura di aree verdi interne al substrato urbano, a queste zone si deve imputare maggiormente l'azione di mitigazione delle UHI, in particolar modo per aree di almeno 2 ettari di estensione. Nello scenario ipotizzato di *intervento mirato* ci si riferisce esclusivamente a quest'area per l'aumento dello *shade effect*.

- **Others Urban Areas** Sono incluse tutte le aree urbanizzate non aventi destinazione abitativa rappresentanti principalmente servizi.

Appartengono le aree con codici che si riferiscono a unità industriali, commerciali, pubbliche, militari e private (12100), strade di transito rapido e aree associate (12210), altre strade e aree associate (12220), ferrovie e aree associate (12230), porti (12300), siti di estrazione mineraria e discariche (13100), siti di costruzione (13300), terreni senza uso attuale (13400) e strutture sportive e ricreative (14200).

- **Rural areas** Questi sono codici che si riferiscono alle aree coltivate (21000, 22000 e 24000) e alle zone di pascolo (23000). Comprendono cioè le aree naturali con intervento diretto dell'uomo, sono aree che, unitamente alle aree boschive, hanno il maggior potenziale di mitigare le UHI.

- **Natural Areas** Areale con codici che si riferiscono alle aree boschive (31000), alle consociazioni di specie erbacee (32000) o zone imperturbate con poca o assente vegetazione come scogliere, rocce e macchia mediterranea (33000). Sono aree ad alto potenziale di mitigazione dell'UHI.

- **Water surfaces** Classe che racchiude i pochi specchi d'acqua (50000) e il fronte marino della nostra area di studio.

Ottenuto il file *vettoriale* del raggruppamento tematico si è proceduto alla finalizzazione del processo trasformando lo *shapefile* in formato *raster .tiff*.

Per la realizzazione si è ricorso al *tool* di ArcGIS *polygon to raster* fornendo lo *shapefile dissolved* come *input* e “code2018” come *field* di riferimento per la creazione dei pixel. La grandezza della *cellsize* è stata impostata su 10 metri per 10 metri. Si è ottenuto così il file raster del nuovo raggruppamento tematico in formato *raster*. Il raster ottenuto è stato usato per lo *Urban Cooling Model* alla voce *Land*

Use/Land Cover. La discussione del raster ottenuto è demandata al paragrafo 3.1 sui risultati intermedi.

2.4.2. Evapotraspirazione potenziale stimata

L'Evapotraspirazione (ET) è un processo fondamentale che partecipa alla mitigazione delle UHI. L'acqua presente in atmosfera con le precipitazioni raggiunge le superfici artificiali ed il suolo vegetato e attraverso il processo combinato di evaporazione e traspirazione ritorna all'atmosfera. Il processo di ET consta della complessa interazione di due fenomeni distinti: ovvero l'evaporazione da specchio liquido e la traspirazione dalle piante; Nello specifico, l'evaporazione consiste in un processo fisico che comporta la trasformazione di acqua liquida in vapore acqueo mentre la traspirazione è un processo fisico che causa un flusso di acqua liquida dal suolo (zona radicale della vegetazione) fino a tornare in atmosfera attraverso gli stomi. In questo caso è un gradiente di energia che si crea durante l'evaporazione dell'acqua al suo interno che causa il movimento dell'acqua dalle radici agli stomi. L'unità di misura è il millimetro *mm* intesa come l'altezza della massa d'acqua evaporata e traspirata, equivalente ad 1 litro su metro quadro l/m^2 e quindi con opportune operazioni di conversione in metri cubo per ettaro m^3/ha . La grandezza in millimetri rende il dato comparabile con quello delle piogge, anche esso riferito in *mm*, e viene utilizzato sia come indice dei consumi idrici delle colture, sia come indice sulla vocazione o meno di territorio ad una determinata coltura, sia come variabile per la comparazione della capacità evaporante di ambienti fisicamente differenti tra loro come ambienti urbani costituiti da diversi materiali. Questo processo è influenzato da molti fattori, tra cui il clima, la natura del terreno, vegetazione e dagli interventi umani.

Da un punto di vista climatico, l'ET è influenzata da temperature, vento, umidità e pressione atmosferica. Sia traspirazione che evaporazione

sono processi che assorbono calore dall'ambiente quindi, l'ET è più intensa in condizioni di temperature elevate dell'aria. Il potere evaporante dell'atmosfera è invece inversamente proporzionale all'aumento dell'umidità relativa, portando l'attività della ET ad essere maggiore in caso di aria secca. Il vento favorisce l'ET creando turbolenze che rimescolano gli strati d'aria prossimi al suolo e alla vegetazione, tenendo conto che tutto ciò dipende anche dalla natura delle masse d'aria trasportate dal vento: venti caldi ed asciutti intensificano l'ET mentre venti freddi ed umidi diminuiscono l'attività dell'ET. La pressione atmosferica incide sulla presenza o meno del vento poiché genera quest'ultimi quando c'è la presenza di differenze di pressione atmosferica. In genere possiamo dire che l'evapotraspirazione è più intensa durante il giorno durante i mesi più caldi e con giornate asciutte e ventose e diminuisce durante la notte nei mesi freddi con giornate umide in assenza di vento.

Anche le caratteristiche intrinseche del suolo come la granulometria e l'umidità influenzano l'ET portando terreni a tessitura grossolana ad un'attività più intensa del fenomeno mentre è più contenuta in quelli a tessitura fine o di medio impasto. Tra i fattori che influenzano l'ET ci sono anche delle componenti biotiche relazionate alla morfologia, anatomia, fisiologia e fenologia delle specie vegetali coinvolte nel processo. All'aumentare dell'apparato radicale va messa in relazione una maggiore capacità di assorbire l'acqua, così come l'aumentare della superficie degli organi erbacei aumenta la superficie di scambio tra pianta ed atmosfera intensificando a sua volta l'ET. La grandezza che indica l'indice di area fogliare (*Leaf Area Index* – LAI) è strettamente correlata all'ET, potenzialmente l'ET è più intensa in piante con un LAI elevato. Oltretutto, una maggiore superficie fogliare indica un maggior

numero stomi, stomi che sono la principale via di rilascio dell'acqua in atmosfera da parte della pianta. Questo discorso vale in generale per piante che non presentano particolari adattamenti come le *Xerofite*. I fattori biologici concorrono al fenomeno di traspirazione in maniera complessa variando da specie a specie così come tra varietà differenti della stessa specie. È da considerare generalmente maggiore in piante dall'intensa attività vegetativa, in buono stato di salute e con un elevato LAI.

La misurazione della complessità di entrambi i fenomeni può avvenire per misurazione diretta o stima indiretta attraverso dei modelli previsionali che tengono conto di diversi fattori citati sopra.

La misurazione diretta prevede l'utilizzo di lisimetri a pesata, sono dei dispositivi usati per studiare la dinamica dell'acqua o di altre sostanze nel terreno. È stato concepito per la misura diretta dell'evapotraspirazione. L'unità base consiste dello strumento prevede un cilindro in metallo (o in plastica o altro materiale) di 1-2 metri d'altezza, contenente un campione rappresentativo di terreno e incassato nel terreno in un locale sotterraneo che permette l'accesso per l'ispezione dei dispositivi di rilevamento e per le operazioni di servizio. Il sistema permette la misura degli apporti idrici e delle perdite per percolazione profonda e ruscellamento. La registrazione del peso del cilindro permette di rilevare le variazioni di peso e, per differenza, la quantità d'acqua persa per evapotraspirazione. Il terreno del cilindro e quello circostante sono coltivati in genere con una coltura di riferimento come la *Festuca arundinacea*, con lo scopo di rilevare l'evapotraspirazione potenziale. Questi impianti sono complessi e costosi, in genere costituiti da più dispositivi modulari per consentire rilevamenti comparati e quindi soluzioni poco attuabili in generale. Il

loro impiego è destinato a centri di ricerca per tarare i metodi di stima dell'evapotraspirazione.

Data la difficoltà strumentale nella misura diretta dell'evapotraspirazione e a seguito della discontinuità dei fattori biotici ed abiotici per la stima indiretta, è stata ipotizzata una condizione standard in grado di rimuovere le cause di variabilità dovute ai fattori riguardanti la vegetazione e a quelli pedologici. Si è giunti così al concetto di evapotraspirazione potenziale di riferimento Et_0 .

Con Et_0 si intende la quantità d'acqua (espressa in mm) evapotraspirata, in un determinato intervallo di tempo, da una superficie interamente coperta da una coltura di riferimento, la *Festuca arundinacea*, con caratteristiche standardizzate: fitta, uniforme, in piena attività vegetativa, posta in condizioni di rifornimento idrico del terreno ottimali e con il prato è regolarmente sfalciato in modo da mantenere il cotico erboso ad un'altezza di 10–15 cm. La coltura deve essere allevata in condizioni tali che la qualità dell'acqua, le caratteristiche del terreno, la disponibilità di elementi nutritivi, attacchi di patogeni e insetti non ne limitino la crescita. Le condizioni standardizzate imposte devono far sì che l'unica variabilità sia dipendente dai fattori climatici. In questo modo la Et_0 diviene misura del potere evaporante dell'atmosfera: essa può essere immaginata come la domanda di evapotraspirazione dell'ambiente imposta, in un dato momento o periodo, dalle condizioni meteorologiche, ad un prato di *Festuca a.* allevato nelle condizioni precedentemente descritte. L' Et_0 diviene così un riferimento per la stima ed i consumi idrici di altre colture, in qualunque condizione ambientale e a qualunque stadio vegetativo esse si trovino, previa rettifica attraverso l'uso degli opportuni coefficienti colturali K_c che verranno descritti in seguito.

Sono state elaborate formule estimative di diverso tipo con differenti *input* riguardanti il clima richiesti per il calcolo Et_0 . Si tratta di metodi tarati per contesti limitati e per rilevamenti ambientali adatti ad analisi temporali di medio e lungo periodo. La *Food and Agriculture Organization* - FAO ha proposto adattamenti di questi metodi con l'applicazione di coefficienti correttivi che tengono conto di specifiche variabili climatiche. Il metodo suggerito dal quaderno *FAO 56* si rifà al metodo Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

La formula di Penman-Monteith tiene conto della radiazione solare, della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa dell'aria, della velocità del vento e della pressione atmosferica. È un metodo difficile e oneroso, spesso utilizzato nei centri di ricerca.

Il metodo permette l'evaporazione potenzial di riferimento in condizioni standard attraverso l'equazione 9

$$Et_0 = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma (900/T_k) U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (9)$$

Ove:

Et_0	Evapotraspirazione di riferimento (mm/d)
Δ	Pendenza della curva che esprime la tensione di vapore saturo in funzione della temperature ($kPa/^\circ C$)
Rn	Radiazione netta ($MJ m^{-2} d^{-1}$)
T_k	Temperatura assoluta media a 2 metri dal suolo ($^\circ K$)
U_2	Velocità del vento a 2 metri dal suolo (m/s)
G	Flusso di calore dal suolo ($MJ m^{-2} d^{-1}$)
$e_a - e_d$	Deficit di pressione di vapore dell'aria (kPa)
γ	Costante psicometrica ($kPa/^\circ C$)

L'equazione di Penman-Monteith si è considerata la più accurata equazione per stimare l' E_{t_0} giornaliero e mensile in tutti i climi e c'è molta letteratura che conferma la superiorità di questa equazione (Ventura et al. 1999; Pereira e Pruitt 2004; Lopez-Urrea et al. 2006; Gavilan et al. 2007). L'equazione di Penman-Monteith presenta due vantaggi rispetto a molte altre equazioni. Innanzitutto, può essere utilizzato a livello globale senza alcuna calibrazione locale a causa della sua base fisica. In secondo luogo, è un'equazione ben documentata che è stata testata utilizzando una grande varietà di lisimetri. Il principale difetto dell'equazione FAO-56 PM è che richiede numerosi dati meteorologici che non sono sempre disponibili per molte località.

Come è possibile da dedurre dall'*Equazione 9*, la formula prevede molte variabili di difficile misurazione ed elaborazione realizzabili per questo studio. La mancanza di questi dati ha portato questo studio alla scelta di una differente formula di stima dell'evapotraspirazione, la formula di Turc.

L'equazione di Turc è un modello matematico utilizzato per stimare l'evapotraspirazione di una coltura o di una superficie vegetata. L'equazione è stata sviluppata da J.D. Turc nel 1961 ed è stata ampiamente utilizzata nella ricerca agronomica e ambientale.

L'equazione di Turc si basa sull'idea che l'evapotraspirazione dipenda principalmente dal rapporto tra la radiazione solare incidente e la temperatura dell'aria. In particolare, l'equazione tiene conto di tre principali fattori che influenzano l'evapotraspirazione che sono la radiazione solare incidente sulla superficie vegetata, la temperatura dell'aria vicino alla superficie vegetata e la resistenza dell'aria alla

diffusione del vapore acqueo dalla superficie vegetata. L'equazione di Turc è classificata globalmente al secondo posto nel clima umido (Jensen et al. 1990) e ci sono altri studi che confermano la sua validità (Trajkovic et al 2007).

$$Et_0 = 0.013 * (23.88 * R_s + 50) * T * (T + 15)^{-1} \quad (10)$$

Et_0 Evapotraspirazione di riferimento (mm/d)

T Temperatura media dell'aria ($^{\circ}C$)

R_s Radiazione solare ($MJ m^{-2}d^{-1}$)

Nella sua versione semplificata (equazione 10) permette il calcolo dell' Et_0 media mensile basandosi sulla relazione esistente fra quest'ultima e temperature media e radiazione solare. Entrambi i dati sono facilmente reperibili e adoperabili su piattaforme di GIS per il fine del calcolo. Entrambi i dati, come descritto nella *Tabella 1* del paragrafo 2.1, sono stati estrapolati dal *database* Worldclim 2.1. Per lo studio sono state adoperate le opportune conversioni dell'unità di misura delle variabili climatiche relative a temperature medie, espresse in $^{\circ}C$, e radiazione globale media espressa in $MJ m^{-2} d^{-1}$. L'equazione è stata compilata nel *tool* di GIS denominato *mapalgebra* che permette di utilizzare degli operatori utilizzando come input dei *layer* come elementi dell'equazione. È stato necessario per questo studio caricare i file *raster* delle temperature e della radiazione dove ogni *pixel* contiene informazioni riguardanti le due grandezze.

Data la necessità di analisi ai fini della compilazione del modello è stato necessario indagare anche sui dati di temperatura e radiazione in ingresso per la stima dell' Et .

Come prima descritto, entrambe le grandezze sono state estrapolate da *database* WorldClim 2.1. Il portale dà accesso ad una lunga serie storica dei principali parametri climatici, aggregati su scala globale ad una risoluzione massima di 30" (corrispondenti a circa 780m). I dati, elaborati in formato *raster* (TIFF), sono derivati dall'interpolazione di misurazioni puntuali da una fitta rete di stazioni meteorologiche (in numero compreso tra le 9000 e le 60000, in base all'anno di riferimento), disponibili su base mensile per un intervallo temporale che va dal 1970 al 2000. L'interpolazione si basa su una funzione di *thin-plate spline* (TPS) e considera numerose covariate, tra cui profilo altimetrico, distanza dalla costa e differenti parametri fisici derivati da immagini satellitari.

Essendo la risoluzione di questi dati inferiore alla risoluzione degli altri strati (10m) è stato opportuno adoperare una azione di *rescale* attraverso l'apposito *tool* di ArcGIS impostando l'operazione a 10m di risoluzione.

I mesi di riferimento presi in esame sono stati luglio ed agosto poiché sono rinomati per essere i mesi più caldi della zona presa in esame e quindi i mesi dove il fenomeno UHI si manifesta con una gravità maggiore.

Le temperature, unità di misura che indica lo stato termico della materia, sono una diretta manifestazione della radiazione. Data la variabilità delle temperature durante la giornata è stata adoperata la media giornaliera per questo studio ed in particolar modo per il calcolo dell'evapotraspirazione.

Per radiazione solare si intende l'energia elettromagnetica emessa dal Sole che si propaga nello spazio e raggiunge la Terra. Essa è la principale fonte di energia che guida tutti i processi biologici e fisici sulla Terra, compresa l'evapotraspirazione delle piante. La radiazione solare è costituita da onde elettromagnetiche che si propagano attraverso lo spazio. Le onde elettromagnetiche si caratterizzano per la loro frequenza e la loro lunghezza d'onda. La lunghezza d'onda rappresenta la distanza tra due creste successive o tra due valli successive dell'onda elettromagnetica. Nella radiazione solare, la lunghezza d'onda varia da circa 100 nanometri a oltre 1 millimetro. La radiazione solare è quindi costituita da un vasto spettro di lunghezze d'onda, che vanno dalle onde gamma, ai raggi X, alla luce visibile, fino alle onde radio. La frequenza è invece il numero di oscillazioni che si verificano in un secondo. Nella radiazione solare, la frequenza varia da circa 10^{15} Hz per le onde gamma, a meno di 10^3 Hz per le onde radio. La luce visibile, che rappresenta solo una piccola porzione dello spettro solare, ha una frequenza compresa tra circa $4,3 \times 10^{14}$ Hz per la luce violetta e circa $7,5 \times 10^{14}$ Hz per la luce rossa. Inoltre, le lunghezze d'onda della radiazione solare sono spesso misurate in nanometri (nm), dove 1 nm corrisponde a una miliardesima di metro. La frequenza viene espressa in Hertz (Hz), dove 1 Hz rappresenta un'oscillazione al secondo. La tabella presenta il range di lunghezza d'onda e di frequenza per le radiazioni visibili nell'ambito dello spettro elettromagnetico. Le radiazioni sono ordinate in ordine decrescente di lunghezza d'onda, partendo dalle radiazioni infrarosse fino alle radiazioni ultraviolette. Si può notare come all'aumentare della lunghezza d'onda, la frequenza diminuisce. Le radiazioni visibili includono il rosso, l'arancione, il giallo, il verde, il blu e il viola. Ogni colore è caratterizzato da un range

specifico di lunghezza d'onda e frequenza. Le radiazioni ultraviolette hanno lunghezze d'onda inferiori a 400 nm, mentre le radiazioni infrarosse hanno lunghezze d'onda superiori a 700 nm. Le informazioni presentate nella *Tabella 7* sono utili per comprendere come l'energia elettromagnetica si manifesti nel nostro ambiente e come possa influenzare gli organismi viventi.

Tabella 7 - Spettro elettromagnetico della radiazione del visibile, infrarosso ed ultravioletto

	Lunghezza d'onda (nm)	Frequenza (Tera Hz)
Infrarosso	>700	<430
Rosso	~ 700-630	~430-480
Arancione	~630-590	~480-510
Giallo	~590-560	~510-540
Verde	~560-490 nm	~540-610
Blu	~490-450 nm	~610-670
Viola	~450-400 nm	~670-750
Ultravioletto	<400	>750

La radiazione UV ha una lunghezza d'onda più corta e una maggiore energia rispetto alla radiazione IR. La radiazione UV è in gran parte assorbita dalla stratosfera e dalla troposfera della Terra, mentre la radiazione IR viene assorbita principalmente dalla superficie terrestre e dall'atmosfera. La quantità di radiazione solare che raggiunge la Terra dipende da molti fattori, tra cui la posizione geografica, l'ora del giorno, la stagione, la copertura nuvolosa e la presenza di particelle nell'atmosfera. La quantità di radiazione solare che raggiunge una superficie terrestre è espressa in termini di irradianza solare, ovvero la potenza della radiazione solare per unità di superficie. Per misurare la

radiazione solare si utilizzano diverse unità di misura. Una delle unità più comuni è il watt per metro quadrato (W/m^2), che rappresenta la potenza della radiazione solare che arriva su una superficie di un metro quadrato. Un'altra unità comune è il *Langley*, che rappresenta l'energia solare che arriva su una superficie di un centimetro quadrato in un minuto. Nel caso di questo studio si è adoperato il $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$

Approfonditi gli aspetti inerenti all'evapotraspirazione potenziale di riferimento è stato necessario indagare anche sull'evapotraspirazione totale potenziale E_t delle superfici prese in esame. L'*Equazione 11* rappresenta la formula semplificata di stima.

$$E_t = K_c \times E_{t_0} \quad (11)$$

All'interno del modello InVEST non è necessaria la stima diretta dell' E_t totale, poiché è il modello stesso a computarla ai fini dell'analisi come mostrato nel paragrafo 2.3. Ciò che invece è necessario è la stima del coefficiente di copertura (colturale nel caso delle superfici verdi) definito come K_c . Il K_c è un parametro necessario nelle formule di stima dell'evapotraspirazione per tener conto dell'effetto della copertura vegetale (o altri tipi di copertura in assenza di vegetazione) sulla quantità di acqua evaporata dalla superficie del terreno. Quando considerato come coefficiente colturale il K_c tiene conto della quantità di acqua che una determinata coltura richiede per crescere e mantenere una copertura vegetale. Il K_c può variare in base alla tipologia di coltura, alla fase di crescita della pianta e alle condizioni ambientali, come la temperatura, l'umidità relativa e l'intensità della radiazione solare. Ad

esempio, durante una fase intensa di crescita, una coltura potrebbe richiedere un K_c più elevato rispetto a una fase di vegetativa.

Il coefficiente fornisce un fattore di correzione alle formule di stima dell'evapotraspirazione, consentendo di calcolare in modo più accurato l'ammontare di acqua necessario per fornire alle piante i nutrienti e le risorse di cui hanno bisogno per crescere. Tuttavia, è importante notare che il K_c è solo uno dei molti fattori che influenzano l'evapotraspirazione e che le formule di stima dell'evapotraspirazione possono differire a seconda del contesto e delle condizioni ambientali specifiche.

La sola determinazione del coefficiente K_c per ogni singola classe va quindi effettuata per permettere di impostare il modello e vanno presi in considerazione i valori del coefficiente per ogni classe del *lucode*. Il dato va inserito nella *biophysical table* come riportato nelle *Tabella 3,4 e 5*.

I valori del K_c per le colture sono disponibili nei manuali di irrigazione e orticoltura. La FAO fornisce nel *Paper 56* (<http://www.fao.org/>, FAO, 2022) il materiale necessario alla stima di questo coefficiente sia per coperture vegetali che per condizioni di superfici artificiali. Le tabelle FAO elencano i coefficienti per stadio di crescita delle colture definiti per fase iniziale $K_c\ ini$, fase intermedia $K_c\ mid$ e fase finale $K_c\ end$, che devono essere convertiti in una media annuale o mensile a seconda del modello e metodo di stima. Ciò richiede la conoscenza della fenologia della vegetazione nell'area di studio e delle fasi di crescita delle colture (quando le colture annuali vengono piantate e raccolte). La K_c media annua può essere stimata in funzione delle caratteristiche della vegetazione e dell'evapotraspirazione media mensile di riferimento utilizzando l'*Equazione 12*:

$$K_c = \frac{\sum_{m=1}^{12} (K_{cm} \times ET_{om})}{\sum_{m=1}^{12} ET_{om}} \quad (12)$$

dove K_{cm} è un coefficiente medio di coltura del mese m (1 corrisponde a gennaio, 12 a dicembre) ed ET_{om} è la corrispondente evapotraspirazione di riferimento del mese. Questi valori possono anche essere calcolati utilizzando dei fogli di calcolo forniti dalla piattaforma del *Natural Project* di Stanford (<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/>, Natural Project, 2022).

Data la natura dell'estensione dell'area di studio e dell'eterogeneità delle superfici all'interno di ogni singolo raggruppamento tematico del *lucode* è stata necessaria un'approssimazione congrua alla *LULC*. La guida di InVEST (<http://releases.naturalcapitalproject.org/>, Natural Project, 2022) suggerisce dei coefficienti per le differenti *LULC* e sono stati utilizzati proprio questi per lo studio che vengono così sotto riportati:

- Per superfici comprendenti acque con profondità inferiore ai 2 metri può essere approssimato da $K_c=1$;
- Per superfici comprendenti acque con profondità maggiore ai 5 metri può essere approssimato da K_c compreso tra 0.7 e 1.1;
- Per superfici perennemente umide il K_c è compreso tra 1 e 1.2;
- K_c per il suolo nudo varia da 0,3 a 0,7 a seconda del clima (in particolare la frequenza delle precipitazioni). Può essere approssimato a $K_c = 0.5$ (Allen et al., 1998). Ulteriori

- informazioni per la determinazione di K_c per il suolo nudo possono essere trovate anche in altri studi (Allen et al., 2005);
- Per le aree edificate può essere stimato seguendo l'Equazione 13;

$$K_c = f * 0.1 + (1 - f) * 0.6 \quad (13)$$

dove f è la frazione di copertura impermeabile dell'area. Si assume che l'evapotraspirazione da aree permeabili in ambienti edificati sia circa il 60% dell'evapotraspirazione di riferimento cioè una media tra prato e suolo nudo. Inoltre, si presume che l'evaporazione di una superficie impermeabile sia pari al 10% della Et_0 . Per lo studio si è optato per un'approssimazione per eccesso che fornisca due cifre significative dopo la virgola dato il periodo di tempo preso in esame e la necessità di inserimento di un K_c rappresentativo per classe. Per ogni *lucode* sono stati stimati dei K_c inseriti nella *biophysical table* visionabili al paragrafo 2.4. *Tabella 3,4,5.*

2.4.3. *Tree Cover Density*

Per definire lo *shade effect*, ovvero l'effetto di ombra prodotto dalla chioma degli alberi più alti di 2 metri, è stato necessario adoperare un altro dato proveniente dal progetto *Copernicus* ovvero la "*Tree Cover Density*" (TCD). Lo *shade effect* si riferisce all'effetto che le ombre degli alberi e delle altre piante possono avere sulla temperatura dell'ambiente circostante. In particolare, le ombre possono ridurre l'irraggiamento solare diretto sul suolo e sugli edifici, riducendo così la temperatura dell'aria e delle superfici. Viene definito come percentuale

di superficie della proiezione della chioma degli alberi su superficie totale. L'effetto ombreggiante può contribuire ad alleviare il fenomeno dell'isola di calore urbana. Il dato va stimato per poter essere inserito all'interno della *biophysical table*.

Il *Copernicus High Resolution Layer (HRL) Forest* definisce la densità della copertura arborea come la "proiezione verticale delle chiome degli alberi rispetto la superficie terrestre orizzontale" e fornisce informazioni sulla copertura della corona per pixel. Queste informazioni sono derivate da dati satellitari multispettrali *High Resolution (HR)* utilizzando *Very High Resolution (VHR)* ad alta risoluzione e/o ortofotografie aeree come dati di riferimento. La densità della copertura arborea è valutata dalle sorgenti VHR mediante interpretazione visiva seguendo un approccio a griglia di punti e successivamente trasferendo i dati HR attraverso una funzione lineare. La *Tree Cover Density* rappresenta uno dei livelli di stato primari del portfolio del *HRL Forest Copernicus* e presenta le seguenti specifiche principali:

- Risoluzione spaziale di 20 m
- Intervallo di densità della copertura arborea da 0 a 100%
- Nessuna unità minima di mappatura (MMU); basato sui pixel
- Larghezza minima di mappatura (MMW) di 20 m
- Copertura monotemporale

Gli elementi che vengono inclusi nell'analisi per la creazione della *Tree Cover Density* sono:

- Latifoglie sempreverdi/decidue, sclerofille e conifere di qualsiasi uso
- Foreste (cresciute e in fase di sviluppo)

- Frutteti, uliveti, frutteti e altre piantagioni di alberi, aree agro-forestali
- Boschi di transizione, foreste in rigenerazione
- Gruppi di alberi all'interno di aree urbane (vicoli, parchi alberati e giardini)
- Caratteristiche di gestione/uso delle foreste all'interno delle foreste (sentieri, tagliafuoco, diradamenti, vivai forestali, ecc.)
- Caratteristiche dei danni alle foreste all'interno delle foreste (aree parzialmente bruciate, danni causati da temporali, danni da insetti, etc.)

Gli elementi che vengono esclusi sono invece:

- Spazi aperti all'interno delle foreste (strade, aree completamente bruciate, altre aree forestali gravemente danneggiate, etc.)
- Aree ricoperte da arbusti nani e brughiere
- Vigneti
- Pino mugo/ontano verde nelle zone alpine
- Macchia mediterranea
- Zone arbustive

Come possibile evincere la Tree Cover Density risulta essere un dato adatto per la rappresentazione dello *shade effect*. L'inserimento del dato avviene durante la fase di compilazione della *biophysical table*. È richiesto di inserire il numero compreso tra 1 e 0, dove 1 rappresenta la massima copertura possibile (100%) e 0 nessuna copertura arborea per ogni singola classe formulata come *lucode*. Per ottenere questo numero è stato quindi necessario caricare lo strato della TCD del 2018 sul software GIS, operare a ritagliare la TCD con il tool “*extract by mask*” ed ottenere così singoli strati di TCD per ogni singola classe del *lucode*.

L'input inserito è stato la media matematica della TCD (espressa come numero percentuale) ottenuta attraverso la funzione *classify* opportunamente convertito dividendolo per 100. I dati tal quali così ottenuti sono stati inseriti per la compilazione della *biophysical table* dello scenario definito *Baseline*. Per la compilazione dello scenario *Generalizzato* si è optato per un aumento del 25% della copertura della chioma arborea e quindi ad un aumento del valore di 0.25 per ogni classe. Nello scenario definito *Mirato* l'aumento di 0.25 è stato considerato solo per la classe 3 del *lucode*, la classe “*Green Urban Areas*”. I dati inseriti per lo studio sono visionabili al paragrafo 2.4. *Tabella 3,4,5.*

2.4.4. Albedo

L'albedo è una grandezza fisica che indica la capacità di una superficie di riflettere la radiazione solare incidente. È espresso come un rapporto tra la radiazione solare riflessa e la radiazione solare incidente e può assumere valori compresi tra 0 ed 1. Una superficie con un'albedo di 0 assorbe tutta la radiazione solare incidente, mentre una superficie con un'albedo di 1 riflette tutta la radiazione solare incidente. Gli edifici, le strade e le altre superfici artificiali che coprono le città hanno spesso un'albedo più basso rispetto alle zone rurali circostanti, il che significa che assorbono più radiazione solare. Questa radiazione viene poi convertita in calore, che si accumula nelle zone urbane e aumenta la loro temperatura. Le UHI sono fortemente influenzate dall'albedo, per mitigarne gli effetti è possibile adottare strategie atte a cambiare il valore basate sull'albedo. Ad esempio, le superfici stradali e i tetti degli edifici possono essere rivestiti con materiali più chiari e riflettenti, come

la vernice bianca, per aumentare l'albedo e ridurre l'assorbimento di radiazione solare anche se è da tenere conto che le superfici urbane tendono ad essere meno ventilate rispetto alle zone rurali, il che significa che il calore accumulato non viene dissipato. Per di più, l'utilizzo di alberi e altre forme di copertura vegetale può anch'esso aiutare a ridurre l'effetto dell'UHI, poiché le piante hanno un'albedo più elevato rispetto alle superfici urbane e contribuiscono a creare ombra e a raffreddare l'ambiente circostante attraverso il processo di evapotraspirazione. Gli scenari ipotizzati negli interventi *generalizzato* e *mirato* valutano questo tipo di intervento, sfruttando quindi sia i benefici dati da *Et0* e dallo *Shade Effect* della chioma sia dall'albedo.

Per il calcolo dei valori di albedo associati a ciascuna LULC è stata necessaria prioritariamente l'analisi delle immagini satellitari ortorettificate ad alta risoluzione (30m) provenienti dalla missione *Landsat 8 e 9* (collezione 2 livello 1), accessibili tramite il portale *Earth Explorer* dello *USGS - United States Geological Survey* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Nelle immagini esportate dal portale, ciascun pixel è associato ad un valore adimensionale, definito *digital number* (DN), che necessita di opportune trasformazioni per esprimere la grandezza fisica di interesse.

La determinazione dell'albedo attraverso immagini satellitari presuppone, in primo luogo, la correzione dei valori telerilevati in ragione delle alterazioni che la radiazione emessa dalla superficie terrestre subisce a causa dei gas presenti nell'atmosfera. Per questo è necessario innanzitutto trasformare i DN in *top of atmosphere* (TOA)

reflectance, un parametro che esprime la riflettanza ultra-atmosferica.

Il processo si basa sull'*Equazione 14*:

$$\rho\lambda = \frac{(M\rho \cdot Q_{cal} + A\rho)}{\sin(\theta SE)} \quad (14)$$

Ove:

- $\rho\lambda$ rappresenta il valore di TOA reflectance
- $M\rho$ il coefficiente moltiplicativo
- Q_{cal} il DN
- $A\rho$ il coefficiente additivo
- θSE l'altezza solare

Ciascuno dei fattori in equazione, ad eccezione dell'altezza solare, è specifico per ciascuna banda (*Tabella 8*) dello spettro luminoso.

Tabella 8 – Valori delle bande del Landsat 8 “Operational Land Imager” e “Thermal Infrared Sensor”

Banda	Lunghezza d'onda (μm)	Risoluzione (m)
1 - Aerosol	0.43-0.45	30
2 - Blu	0.45-0.51	30
3 - Verde	0.53-0.59	30
4 - Rosso	0.64-0.67	30
5 - NIR	0.85-0.88	30
6 - SWIR 1	1.57-1.65	30
7 - SWIR 2	2.11-2.29	30
8 - Pancromatica	0.59-0.68	15
9 - Cirri	1.36-1.38	30
10 - TIRS 1	10.60-11.19	100
11 - TIRS 2	11.50-12.51	100

Le sigle riportate in *Tabella 7* indicano:

- NIR *Near Infra Red*
- SWIR *Short Wave Infra Red*

- TIRS *Thermal Infra Red Sensor*

Una volta ottenuti i valori di *TOA reflectance* per ciascuna banda utile, sulla base della metodologia proposta da (Smith, 2010) si procede con il calcolo dei valori di albedo, secondo la seguente equazione:

$$aTOA = \frac{(0.356 \rho_1 + 0.130 \rho_3 + 0.373 \rho_4 + 0.085 \rho_5 + 0.072 \rho_7 - 0.018)}{1.016} \quad (15)$$

dove *aTOA* rappresenta l'albedo derivata, mentre ρ_n il valore di TOA reflectance della banda *n*.

Le elaborazioni, effettuate tramite strumenti di map algebra in ArcGIS, sono state aggregate su base bimestrale (luglio-agosto) in riferimento ad una serie quinquennale (*Tabella 9*) di immagini satellitari con copertura nuvolosa inferiore al 5%.

Tabella 9 Serie quinquennale del campionamento

Date	
Luglio	Agosto
29-7-13	8-8-14
21-7-16	4-8-15
14-7-19	28-8-18
23-7-20	17-8-20
14-7-22	15-8-22

Infine, si è proceduto con l'attribuzione dei valori dell'albedo medio per ogni classe del *lucode*, calcolati come valore medio assunto dal relativo parametro all'interno di ciascuna classe attraverso la funzione *reclassify* in maniera del tutto analoga alla stima dello *shade effect*. Differentemente da come trattato nel paragrafo finale della TCD, non sono state adoperate delle modifiche al numero inserito per i tre diversi scenari. Nonostante un aumento di TCD ipotizzati per gli scenari

Generalizzato e *Mirato* porti un conseguente modifica del valore di albedo non è possibile la stima diretta di questa variazione.

I dati inseriti per lo studio sono visionabili al paragrafo 2.4. *Tabella 3,4,5.*

2.4.5. UHI Effect

Come già accennato, l'Urban Heat Island (UHI) è un fenomeno che si verifica nelle aree urbane in cui la temperatura è più alta rispetto alle aree circostanti rurali. Questo effetto si verifica principalmente a causa dell'aumento dell'attività umana e dell'uso di materiali edificati, oltre alla mancanza di vegetazione, che impediscono il raffreddamento naturale della superficie terrestre. Nel modello di Urban Cooling di InVEST, lo *UHI effect* viene utilizzato per rappresentare il riscaldamento urbano causato da attività antropiche nelle zone urbanizzate. L'effetto viene rappresentato attraverso un aumento espresso in gradi centigradi della temperatura superficiale, che influisce sulla capacità della superficie di raffreddarsi in modo naturale. Questo dato è utilizzato come parametro di input per il modello, al fine di simulare gli effetti del riscaldamento urbano sulla disponibilità di aria fresca e sulle funzioni di mitigazione climatica nell'area urbana.

È possibile ottenere diverse stime dello *UHI effect* in base a vari parametri, come l'intensità e la distribuzione dell'attività antropica, la presenza di vegetazione e il cambiamento climatico. In questo modo, il modello consente di valutare i benefici ambientali della mitigazione dello UHI effect tramite strategie di design urbano e interventi a livello di area. Lo *UHI effect* si riferisce alla tendenza delle città ad avere

temperature più elevate rispetto alle zone rurali circostanti a causa dell'accumulo di calore da parte delle superfici urbane, come l'asfalto e i tetti. Il modello InVEST utilizza dati satellitari per analizzare la temperatura della superficie del suolo e fornire informazioni sulle aree in cui lo *UHI effect*. L'algoritmo di stima dello stesso è implementato sulla piattaforma *Google Earth Engine* e utilizza immagini satellitari per calcolare l'intensità della UHI superficiale per oltre 9500 aggregati urbani coprendo un arco temporali di 15 anni (<https://yceo.users.earthengine.app/view/uhimap>, Global Surface UHI Explorer, 2022). I dati vengono convalidati rispetto a precedenti studi su più città e quindi utilizzati per stimare la variabilità sia diurna, sia mensile che a lungo termine dell'UHI superficiale in diverse zone climatiche. Le città nella zona climatica arida mostrano in particolare pattern diurni e stagionali unici, con maggiore intensità della UHI superficiale notturna e due picchi durante l'anno. La variabilità diurna nella UHI superficiale è maggiore per la zona climatica equatoriale (0,88 °C) e minore per la zona climatica arida (0,53 °C) (<https://yceo.yale.edu/research/global-surface-uhi-explorer>, Center for Earth Observation, 2022). La variazione inter-stagionale è maggiore nella zona climatica coperte da neve e minore nella zona climatica equatoriale. Investigando anche il cambiamento a lungo termine dell'intensità della UHI nel corso di 15 anni, troviamo un aumento dell'intensità della UHI diurna al ritmo di 0,03 °C per decennio (Center for Earth Observation, 2022). L'applicazione per la visualizzazione e download dei dati è costruita sulla piattaforma *Google Earth Engine* e consente agli utenti di interrogare i dati dello *UHI effect* delle aree urbane utilizzando un'interfaccia semplice come mostrato in *Figura 7*.

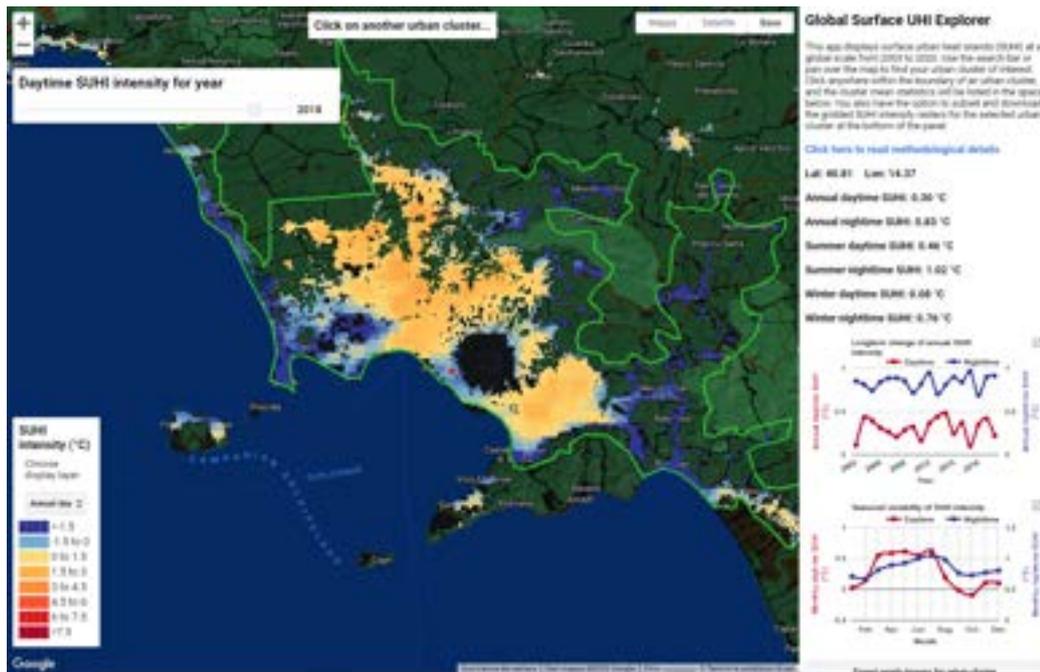


Figura 7 – Schermata dello UHI Explorer per l'anno di riferimento 2018 dell'area della provincia di Napoli

La piattaforma permette di generare grafici che mostrano il *trend* stagionale (Figura 8) e a lungo termine (Figura 9) per singoli aggregati urbani e quindi scaricare i dati dal portale web.

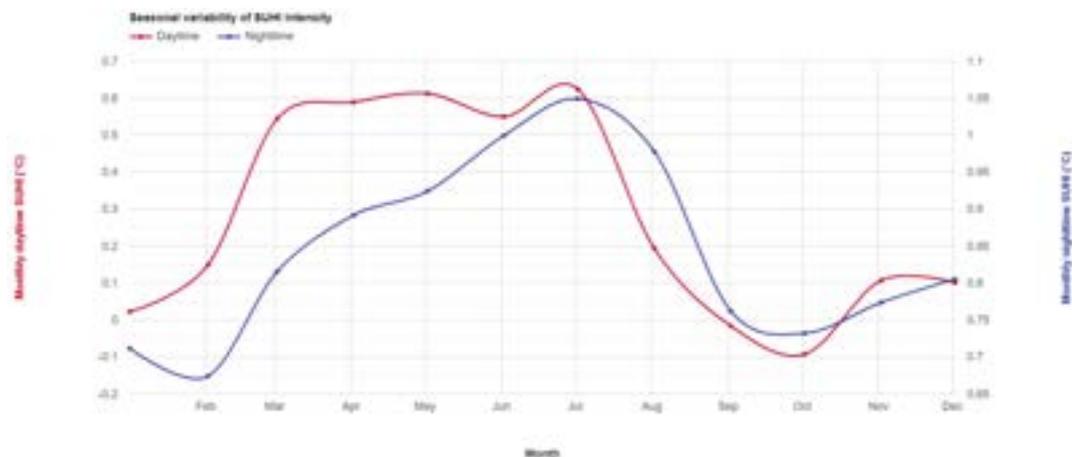


Figura 8 – Variabilità mensile dell'intensità della Surface Urban Heat Island (SUHI) per l'anno 2018

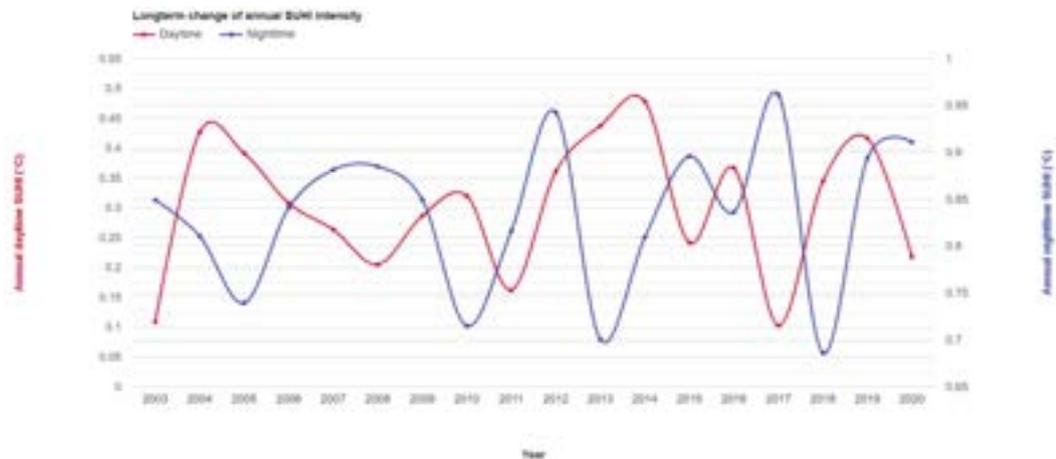


Figura 9 – Variabilità dal 2003 al 2020 dell'intensità Surface Urban Heat Island (SUHI)

I dati utilizzati per il modello sono stati prelevati dal portale, caricati sulla piattaforma GIS per la loro lettura e visione ed inseriti infine nel modello InVEST alla voce UHI effect (Figura 5).

2.4.6. *Building Footprint*

Lo studio del fenomeno delle *UHI* permette l'ottenimento di differenti *output* come spiegato nei capitoli 2.3 e 2.4. L'*output* principale del modello, l'Heat Mitigation Index che verrà spiegato nella sede apposita, dona una misura della grandezza visiva del fenomeno stesso ma spendibile per delle considerazioni comparative tra i 3 scenari descritti. In prospettiva di voler approfondire la grandezza dell'azione di mitigazione delle temperature a carico della vegetazione in un'area fortemente urbanizzata si è optato per la compilazione del modulo non obbligatorio di stime di energia risparmiata per il raffreddamento delle aree urbanizzate. Secondo la guida InVEST, il dato da conoscere per calcolare il risparmio energetico è il consumo energetico unitario per il raffreddamento espresso in $\text{kWh m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, in altri termini, l'energia necessaria a raffreddare di 1°C (o Kelvin, che in termini unitari hanno

lo stesso valore) la superficie di 1 m². Il dato per essere computato necessita sia di uno *shapefile* definito come *building footprint*, sia del consumo energetico unitario per tipologia di edificio all'interno di un file .CSV denominato *consumption table*. Lo *shapefile* dovrà essere strutturato come uno strato GIS *multipolygon* rappresentate la proiezione della pianta degli edifici presenti nell'area di studio. Come suggerisce la guida InVEST lo strato della *building footprint* può essere ottenuto sul portale di "OpenStreet Map" e opportunamente tagliato con il tool "clip" di GIS per avere uno strato contenente i soli edifici dell'area di studio. Il modello InVEST permette la computazione dei consumi energetici per diverse tipologie di edificio, per fare ciò c'è bisogno di assegnare un codice numerico all'*attribute table* della *building footprint* che corrisponda al corrispettivo codice numerico per tipologia di edificio all'interno della *consumption table*.

Data la mancanza di dati dei consumi per differenti tipologie di edificio, si è assunto un'unica tipologia di edificio identificata col codice numerico "0" in modo da fare una stima del consumo medio.

Infine, per la stima dei consumi energetici unitari per superficie di edificio sono stati usati i dati forniti dall'*Ente Nazionale Energia Alternativa* (<https://www.enea.it/>, portale ENEA, 2022) mentre per la condizione immobiliare ci si è riferiti ai dati ISTAT con solo riferimento agli edifici a destinazione residenziale. L'ultimo dato utile per la stima dei consumi è stato l'incremento di consumo energetico per l'abbassamento delle temperature (Santamouris et al., 2015).

3. Risultati e discussione

Le analisi condotte per la compilazione *dell'Urban Cooling Model* di InVEST hanno riportato gli *output* per i 3 scenari definiti *baseline*, *intervento generalizzato* ed *intervento mirato*. I risultati sono stati strutturati in due tipologie, i primi definiti come “risultati intermedi”, necessari per la compilazione del modello stesso, e risultati finali ottenuti come *output* del modello. Questi ultimi a loro volta sono da suddividere in due tipologie: l'Heat Mitigation Index (HMI) sotto forma di file *raster* .TIFF e le statistiche correlate all'area di studio contenuto nello *shapefile* “*uhi_results*”. Ogni singolo scenario preso in considerazione ha entrambi gli *output* sopracitati, permettendoci sia un raffronto diretto tra la condizione *Baseline* del bimestre luglio-agosto del 2018 e le condizioni dell'intervento *Generalizzato* e *Mirato*.

3.1. Risultati intermedi

Sono stati ottenuti dei risultati definiti “intermedi” come analisi preliminare e preventiva per la compilazione della *biophysical table*.

I dati che verranno mostrati e discussi in questa parte dello studio sono dei risultati delle elaborazioni preliminari riguardo l'*Urban Atlas*, l'evapotraspirazione, la *Tree Cover Density*, l'albedo e la stima del consumo energetico unitario. Per quanto riguarda l'*Urban Atlas*, l'ottenimento di un *lucode* ci permette di evidenziare le 3 principali macro classi d'uso del suolo “artificiale, rurale e naturale” attraverso un *raster* .tiff ; per “artificiale” si intende una superficie occupata prevalentemente da artefatti dell'attività umana (abitazioni, strade,

piazze, stabilimenti, fabbriche *etc. etc.*), “rurale” territori occupati prevalentemente da segni dell’attività umana comprendente vegetazione e “naturale” una zona prevalentemente assente di qualsivoglia attività umana.

Per quanto riguarda la stima dell’evapotraspirazione si sono ottenute 3 immagini *raster* di cui una riguardante le temperature medie dei mesi di luglio ed agosto, una comprendente la radiazione media del bimestre ed un’un’ultima che rispecchia l’attività evapotraspirativa potenziale di riferimento del territorio per i mesi sopra citati.

Per quanto riguarda la copertura vegetale abbiamo delle aree evidenziate in relazione all’effetto ombreggiante sulla base dell’analisi della *Tree Cover Density* su cui è stato calibrato lo *shade effect* per le varie classi d’uso del suolo create per il *lucode*.

In ultimo, una tabella riportante il valore di albedo medio per classe *lucode* e dei valori riportanti il numero di edifici e la loro destinazioni. La natura di questi stessi dati li rendono oggetto di discussione dedicata ed è per questo che verranno trattati nella sede di appositi capitoli seguendo l’ordine delle metodologie seguite per lo studio.

3.1.1. Raggruppamento tematico

Se per quanto riguarda le definizioni delle singole classi si rimanda alla *Tabella 6* del paragrafo riguardante *l’Urban Atlas* all’interno di materiali e metodi, per la rappresentazione grafica è si rimanda alla *Figura 10*.

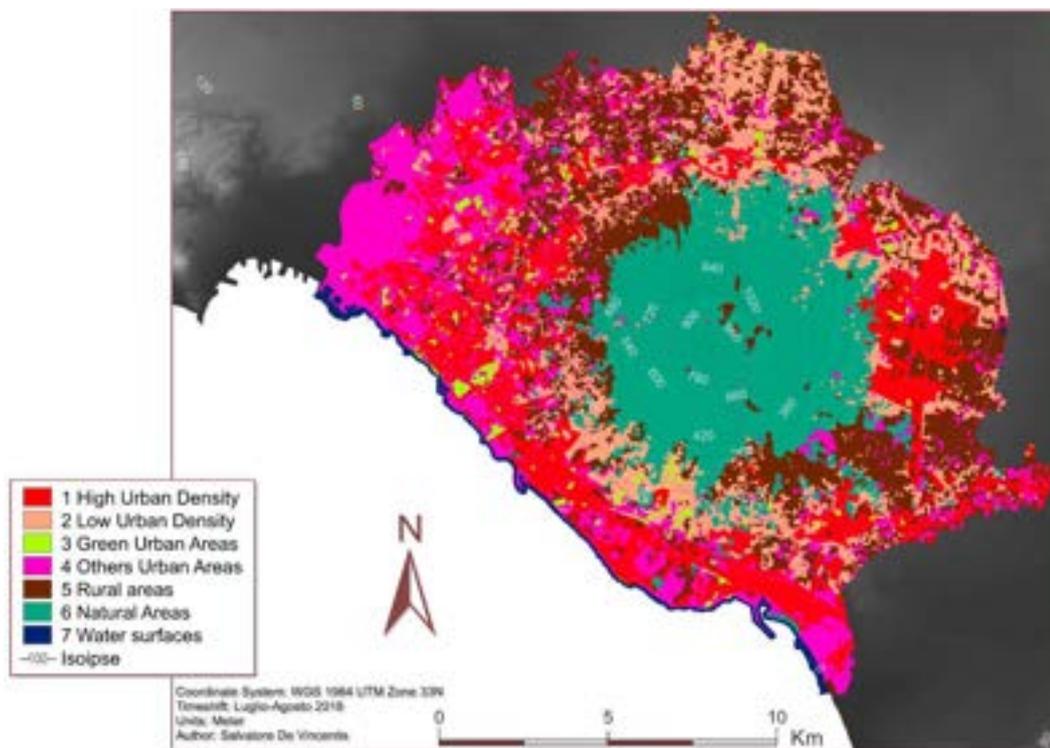


Figura 10 – Raggruppamento tematico “lucode”

Come è possibile notare nell’area di studio alcune classi sono visibilmente frammentate, mentre le aree naturali coprono una superficie piuttosto omogenea e compatta; anche le superfici urbanizzate, se prese nel loro complesso, presentano una certa omogeneità e compattezza, soprattutto nell’area della 6^a Municipalità di Napoli, la zona Nord-Ovest dell’area di studio. Come già espresso nell’inquadramento territoriale, si evince la presenza di due agglomerati, l’areale del Vesuvio come area naturale cinto da un anello urbano pressoché continuo. La superficie totale di ogni classe *lucode* è riportata nella *Tabella 10* ove sono indicate anche la tipologia di superficie (artificiale, rurale e naturale).

Tabella 10 – Dati aggregati classi lucode

Superficie	lucode	Definizione	Area ha
<i>Artificiale</i>	1	High Urban Density	434,2
	2	Low Urban Density	365,2
	3	Green Urban Areas	39,1
	4	Other Urban Areas	468,3
<i>Rurale</i>	5	Rural Areas	544,1
<i>Naturale</i>	6	Natural Areas	569,3
	7	Water surfaces	34,8

In *Figura 11* sono mostrate le percentuali delle 3 tipologie di LULC. Circa il 60% della superficie totale dell'area di studio è di tipo artificiale e solo il 14% dell'area urbana totale è destinata ad aree verdi urbane (*Green Urban Areas*). È bene tenere conto che le superfici ricadenti nella classe 7 del *lucode* sono dei *buffer* intorno le aree costiere di raggio di 100 metri comprendenti la superficie del mare, compresi già nell'*Urban Atlas* e riportate per permettere al modello di valutare l'effetto rinfrescante dovuto dal fronte costiero; al fine dell'interpretazione dei dati non viene considerata la superficie del mare nel calcolo delle percentuali della superficie totale dell'area di studio.

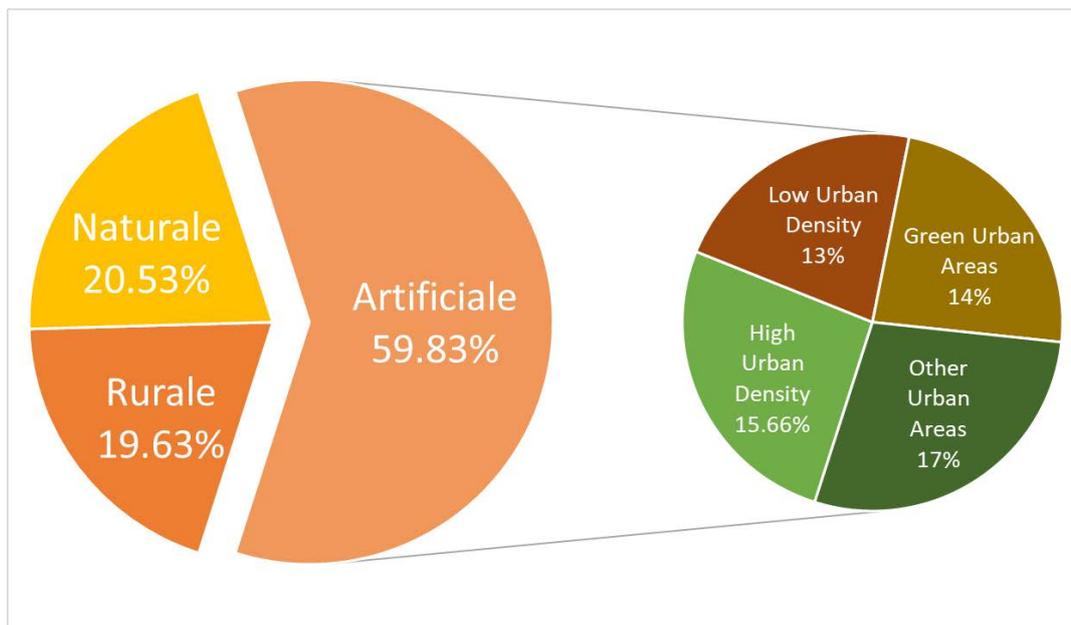


Figura 11 – Percentuali del raggruppamento tematico rispetto la superficie totale

In generale, l'area di studio presenta una certa omogeneità e continuità tra gli agglomerati di superficie artificiale, rurale e naturale con poca frammentazione. Gli unici comuni che hanno presentato una maggiore discontinuità tra superfici artificiali e rurali sono stati per lo più quelli non ricadenti nella zona costiera ed in particolar modo i comuni di Pollena Trocchia, Sant'Anastasia, Somma Vesuviana (*Figura 12*).

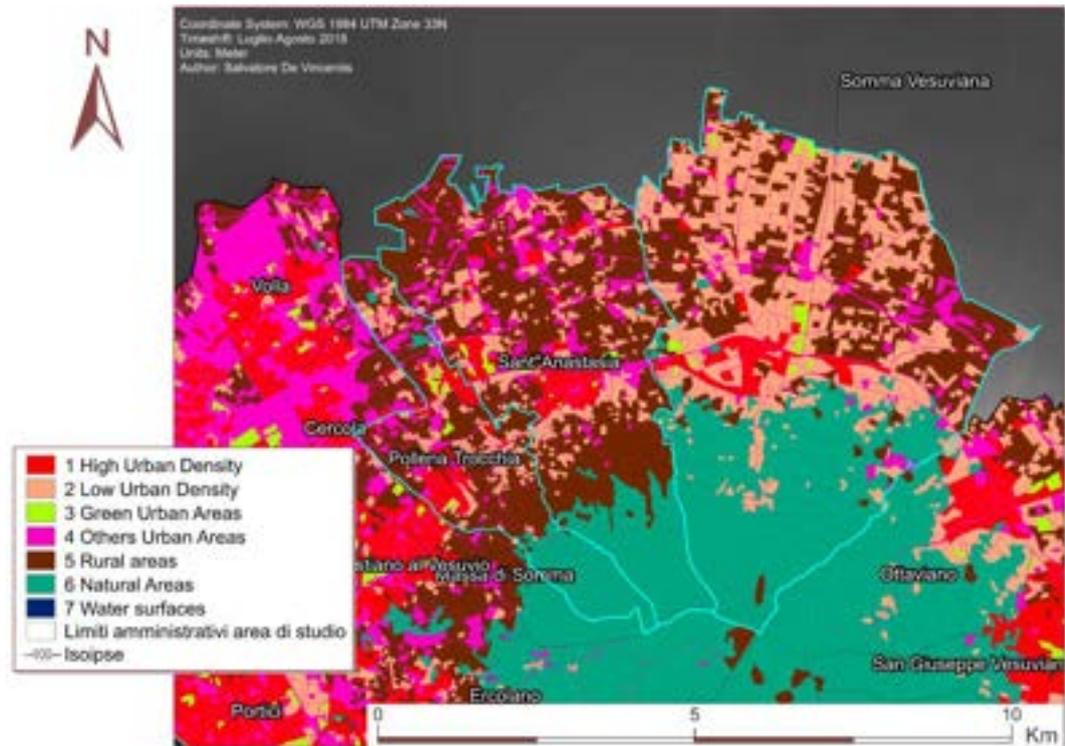


Figura 12- Dettaglio del lucode - Pollena Trocchia, Sant'Anastasia, Somma Vesuviana

3.1.2. Temperature

L'analisi che ha portato alla stima dei valori di evapotraspirazione potenziale di riferimento si è basata su un'indagine che ha prodotto una rappresentazione grafica delle temperature medie del bimestre preso in considerazione per lo studio. Sono riportati in *Figura 13* i valori delle temperature medie del bimestre luglio ed agosto.

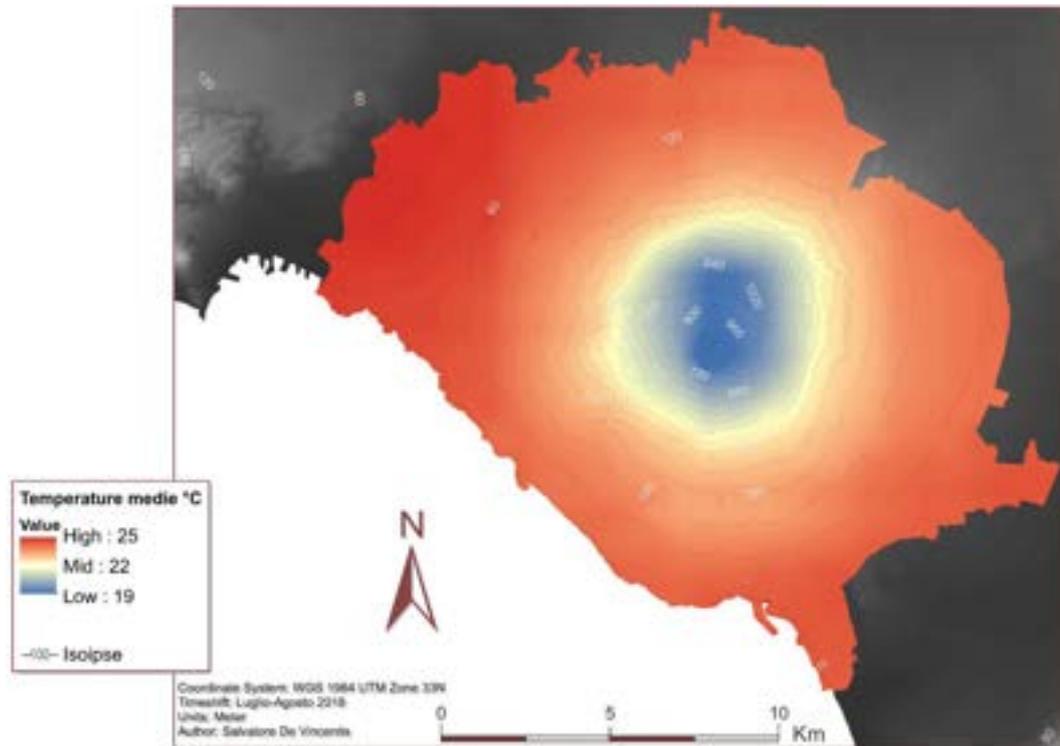


Figura 13 – Temperature medie dell'area di studio (media dei mesi Luglio-Agosto)

La rappresentazione rispecchia le media tra i valori di luglio ed agosto e rappresenta dei valori effettivamente misurati e non stimati. I valori ricadono tra 19°C e 25°C. I picchi più alti rispecchiano la maggior presenza di agglomerato urbano continuo, quindi di superficie artificiale, ricadente nella zona Nord-Ovest dell'area di studio, la stessa che presentava continuità della classe *Other Urban Areas* all'interno della 6^a municipalità di Napoli, ovvero, San Giovanni, Barra e Ponticelli (Figura 14)

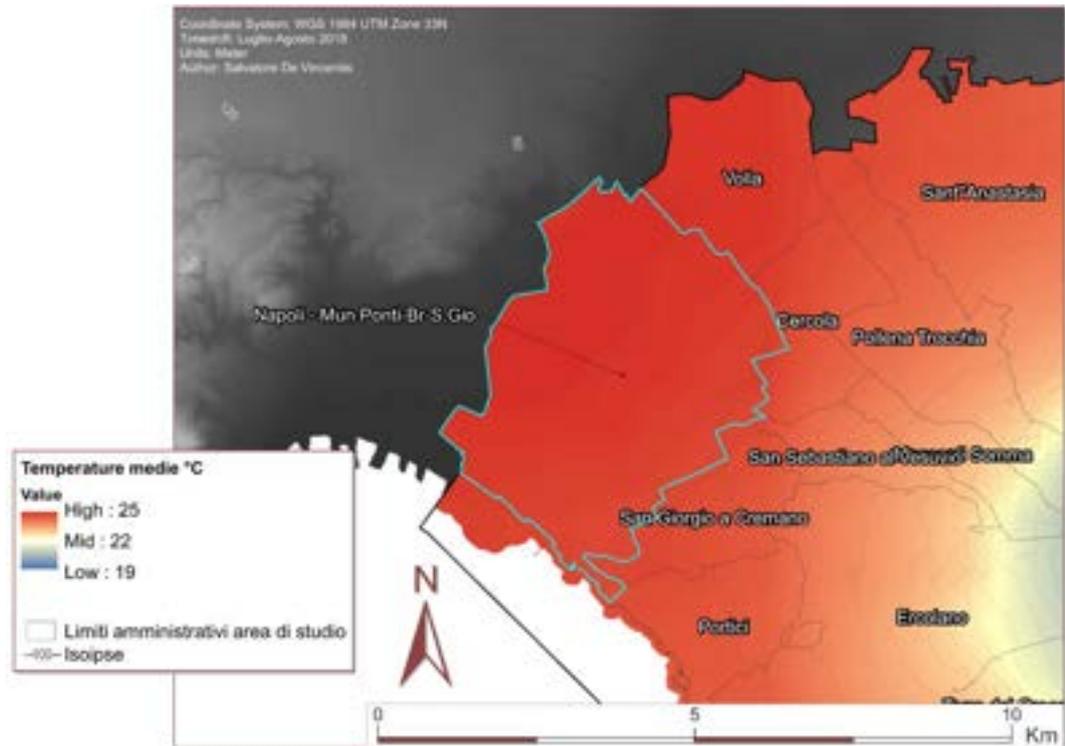


Figura 14 - Dettaglio delle temperature della 6ª municipalità di Napoli

Al contrario le temperature più basse ricalcano l'altimetria e distanza dal mare con le temperature medie più basse di 19°C presenti in prossimità del cratere del Vesuvio, l'area con elevazione maggiore (*Figura 15*).

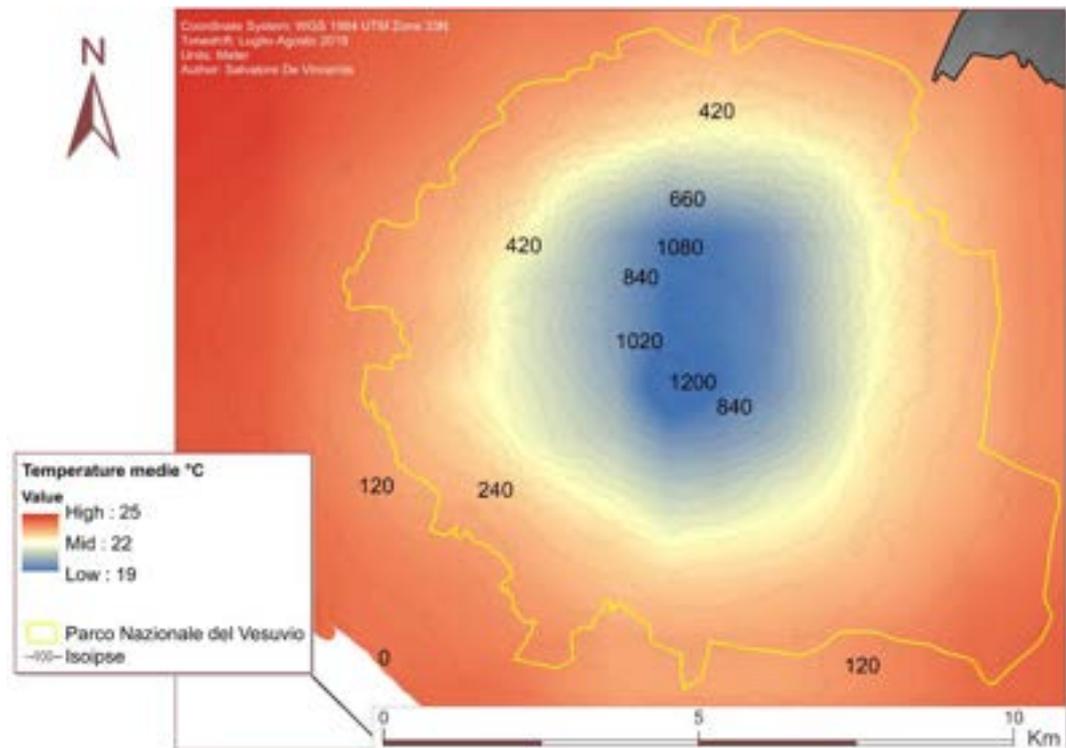


Figura 15 - Dettaglio temperature cono del Vesuvio

3.1.3. Evapotraspirazione potenziale di riferimento

Il valore di evapotraspirazione è visualizzato nella *Figura 16*, rappresenta l'evapotraspirazione potenziale di riferimento stimata, quindi dei valori stimati utilizzando la formula mostrata nei metodi al paragrafo 2.4.2. I valori, espressi in mm, rappresentano una stima basata sui soli parametri climatici e non l'effettiva copertura del suolo essendo riferita alle condizioni standard descritte nel paragrafo 2.4.2.

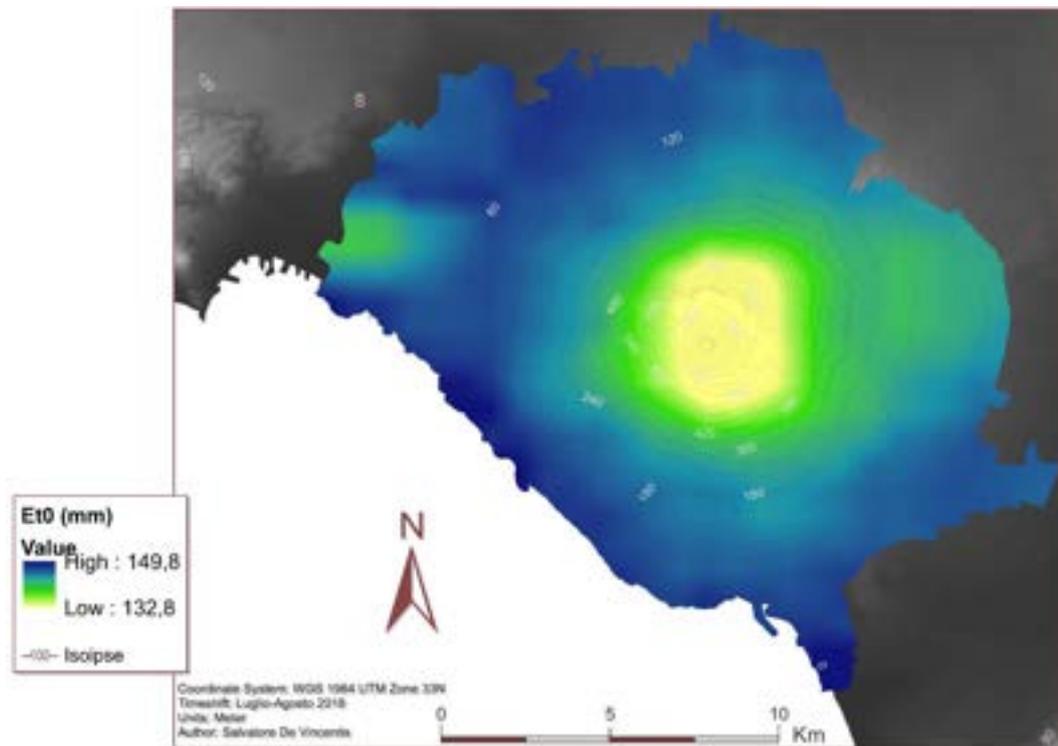


Figura 16 – Valori dell'evapotraspirazione potenziale di riferimento (media Luglio-Agosto)

Come per le temperature, i valori riportati compresi tra 132,8 mm e 149,8 mm sono dei valori medi dei mesi di luglio ed agosto e ricalcano la distribuzione dei valori delle temperature. Ciò è dato dal fatto che la radiazione a causa delle ridotte dimensioni dell'area è da considerarsi pressoché costante essendo influenzata principalmente dalla latitudine. Il dato è da considerarsi approssimativo poiché la formula sopra citata considera i soli dati di temperature e radiazione.

3.1.4. *Tree Cover Density*

La *Tree Cover Density* è stata necessaria alla stima dello *shade effect* per la compilazione del modello. Da questa indagine possiamo trarre due informazioni per lo studio:

- La distribuzione della copertura arborea visualizzata nella *Figura 17*
- La percentuale media di *Tree Cover Density* per classe

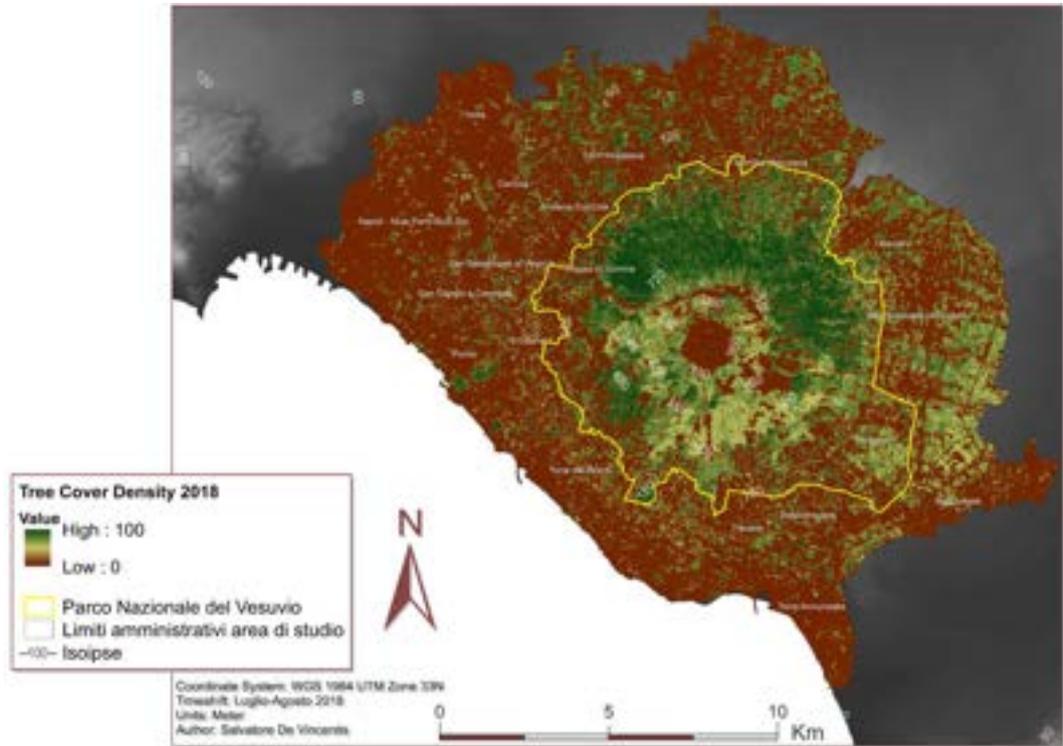


Figura 17 - Tree Cover Density

I valori con la tonalità marrone indicano una totale assenza di copertura arborea mentre il gradiente di verde indica la percentuale di proiezione di chioma arborea sulla superficie.

La *Tabella 11* riporta i valori medi di *Tree Cover Density* per singola classe del *lucode*. I valori ottenuti in questa indagine sono quelli riportati all'interno della *biophysical table*.

Tabella 11 – Dati aggregati Tree Cover Density

lucode	Definizione	TCD media
1	High Urban Density	6.26%
2	Low Urban Density	3.8%
3	Green Urban Areas	29.7%
4	Other Urban Areas	6%
5	Rural Areas	30%
6	Natural Areas	48%
7	Water surfaces	3%

Dai dati forniti si può notare che le aree naturali e rurali hanno un valore di TCD più elevato rispetto alle aree urbane, a eccezione delle aree verdi all'interno delle zone urbane, che presentano un valore medio pari a quello delle zone rurali. Questi dati offrono spunti di riflessione sulle modalità di gestione del territorio e sulla possibilità di migliorare il rapporto tra l'urbanizzazione e la presenza di alberi e aree verdi in vista anche degli interventi ipotizzati dagli scenari di intervento generalizzato e mirato.

3.1.5. Albedo

La *Tabella 12* riporta i dati del valore medio per classe di albedo registrate nel luglio e agosto del 2018. L'albedo è una grandezza fisica che indica la frazione di radiazione solare che viene riflessa da una superficie. Si può notare come i valori medi risultino più bassi ad agosto rispetto a quelli di luglio. Benché non vi sia una macroscopica variabilità tra le diverse classi, è possibile notare come l'albedo presenti

valori più alti per zone urbanizzate ed inferiori per quelle naturali. Di conseguenza, se il modello si basasse solo sul parametro dell'albedo, con ogni probabilità restituirebbe una situazione inversa a quella attesa, per cui le superfici artificiali risulterebbero più fresche di quelle coperte da vegetazione o acqua, in quanto maggiormente riflettenti. Tuttavia, mentre le superfici artificiali tendono ad accumulare l'energia della luce aumentando costantemente la loro temperatura, le superfici naturali assorbono parte della radiazione solare sotto forma di calore latente, risultando molto meno inclini agli sbalzi termici e determinando il raffreddamento delle aree circostanti. Da qui la necessità del modello di distinguere la natura delle diverse superfici, specificandola nella *biophysical table* con il valore binario di 0 o 1 ad indicare la presenza di una *green area*. Data la necessità di un valore univoco per singola classe è stata fatta una media dei mesi di luglio ed agosto aggiungendo una cifra decimale significativa per la compilazione del modello.

Tabella 12 - Valori albedo medio delle classi lucode

lucode	2018		
	Luglio	Agosto	Media Lug-Ago
1	0.16	0.14	0.150
2	0.14	0.13	0.135
3	0.13	0.12	0.125
4	0.16	0.15	0.155
5	0.12	0.11	0.115
6	0.10	0.10	0.100
7	0.07	0.08	0.075

3.1.6. Consumo energetico unitario

Seguendo le metodologie descritte al paragrafo 2.4.6 per la creazione del *layer* rappresentate la *building footprint*, è stato possibile indagare riguardo la stima del consumo energetico unitario. Secondo le stime ENEA (<https://www.enea.it/>, portale ENEA, 2022) l'energia necessaria per il raffreddamento di un immobile di 20 m² per quattro mesi, considerando una media di funzionamento di 6 ore al giorno ammonta a 560 kWh; dunque, si avrà per la condizione del bimestre luglio – agosto un consumo bimestrale dato dalla metà dei 560 kWh quadrimestrali pari a 280kWh.

Il consumo bimestrale per unità di superficie invece sarà dato dal rapporto tra i 280 kWh del consumo bimestrale e le superficie di 20 m² pari ad un consumo bimestrale per unità di superficie di 14 kWh/m².

L'incremento di consumo energetico per abbassare la temperatura di 1°C è stimato con un aumento incrementale dello 0.54% (Santamouris et al., 2015). Questo valore è riferito alla media per le nazioni dell'area temperata, scelto perché non c'è un dato specifico per l'Italia. Questa scelta può generare oggetto di discussione in vista del fatto che il valore preso per l'area temperata è un valore stimato su un territorio molto esteso ed eterogeneo comprendete le nazioni di Austria, Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Irlanda, Lussemburgo, Paesi Bassi, Nuova Zelanda, Svizzera, Grecia, Ungheria, Italia, Giappone, Corea, Portogallo, Sud Africa, Spagna, Turchia, Regno Unito, Stati Uniti per il periodo di tempo dal 1978 e il 2000 (Santamorius et al., 2015).

Abbiamo così una definizione di consumo energetico unitario per metro quadro di superficie per l'abbassamento di 1° C stimata come **14 kWh m⁻² · 0.0054 = 0.0756 kWh m⁻² °C⁻¹**. Considerando che il dato di

building footprint si riferisce alla sola proiezione in pianta degli edifici, la stessa guida InVEST invita a ricalibrare il valore grezzo dei consumi in ragione della media dei piani di ciascun edificio. Consultando il database ISTAT è possibile consultare i dati relativi al solo numero degli edifici residenziali, a loro volta censiti per numero di piani (da 1 a 4, eventuali eccedenze sono ricomprese nel 4), per ciascun comune rappresentati in *Tabella 13*.

Tabella 13 – Numero di piani ed edifici dei comuni dell’area di studio (ISTAT, 2022)

Comune	1 piano	2 piani	3 piani	4+ piani	tot edifici
Boscoreale	1545	2167	502	246	4460
Boscotrecase	1083	1059	252	48	2442
Cercola	462	634	311	143	1550
Ercolano	1155	2697	1028	433	5313
Massa di Somma	209	350	141	38	738
Napoli	4807	12197	7272	16479	40755
Ottaviano	660	2331	1345	353	4689
Pollena Trocchia	190	704	432	179	1505
Portici	499	782	427	754	2462
San Giorgio a Cremano	199	506	310	486	1501
San Giuseppe Vesuviano	846	2872	1239	403	5360
San Sebastiano al Vesuvio	253	507	240	61	1061
Sant’Anastasia	1068	1657	538	276	3539
Somma Vesuviana	1402	3394	1022	334	6152
Terzigno	888	1518	664	191	3261
Torre Annunziata	736	1374	773	514	3397
Torre del Greco	2093	3445	1410	1108	8056
Trecase	339	656	357	141	1493
Volla	163	863	557	374	1957
tot edifici	18597	39713	18820	22561	99691
tot piani	18597	79426	56460	90244	244727

Il valore totale dei piani è scaturito da numero edifici moltiplicato per numero piani. In mancanza del dato specifico per gli edifici con più di 4 piani, è stato necessario ad approssimare a 4 gli edifici con più piani.

Il numero di piani medio per edificio risulta così $244727 : 99691 = 2.4548$. Il consumo energetico unitario per edificio può essere così rivisto $0.0756 \text{ kWh m}^{-2} \text{ °C}^{-1} \cdot 2.4548 = 0.1855 \text{ kWh m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$. Il dato potrebbe andare rivisto considerando anche il tasso di occupazione delle abitazioni poiché rilevato da ISTAT. Tuttavia, considerando che è stato sottostimato il numero dei piani per impossibilità di considerare quelli eccedenti il quarto il dato è stato utilizzato tal quale.

Per finire, dall'analisi della stima del consumo energetico unitario abbiamo ottenuto il numero dei piani per edificio. I valori riportati in *Tabella 14*. Dal confronto con i dati ISTAT (2022) possiamo notare che il numero degli edifici residenziali censiti dall'istituto è di **99691** e quelli risultanti dalla building footprint (come totale dei poligoni per i 19 comuni dell'area di studio), sono risultati **150473**, questo significa che circa 2/3 degli edifici hanno destinazione residenziale, mentre 1/3 ha altri usi. Tuttavia, per mancanza di dati relativi a questi ultimi, assumiamo che questi abbiano gli stessi consumi dei residenziali.

3.2. Heat Mitigation Index (HMI)

L'indice di *Heat Mitigation* (HMI) è uno degli *output* principali dell'*Urban Cooling Model*. Il dato si presenta come file .TIFF dove per ogni pixel è indicato il valore HMI. L'indice valuta la capacità di un'area di regolare la temperatura. Le aree che hanno un elevato indice di mitigazione del calore saranno più resistenti alle variazioni di temperatura derivanti dall'isola di calore urbana. L'HMI è correlato alla *Cooling Capacity* (CC) che è definita come la capacità di un sistema di riuscire a mitigare le alte temperature durante l'estate (Zardo et Al. 2017) come già spiegato nel paragrafo 2.3 dei materiali e metodi.

Il risultato dell'analisi HMI è espresso, così come la CC, come indice adimensionale, compreso tra 0 ed 1, ove i valori vicino lo 0 rappresentano la scarsa attitudine di una zona a mitigare l'aumento di temperatura delle UHI, mentre i valori vicini all'1 indicano una buona capacità della zona nell'azione di mitigazione del fenomeno UHI. L'attitudine varia in base alla macroarea presa in considerazione, nell'area Mediterranea si attesta una diminuzione di 6°C per un valore pari allo *score* di 1 (Zardo et Al. 2017).

L'indice esplicitato come file raster possiede dei *pixel* con le medesime dimensioni dei pixel del file d'input; nel nostro caso la medesima risoluzione del raggruppamento tematico della LULC (in questo caso 10m x 10m). Al valore di ogni singolo *pixel* è stato assegnato un singolo valore di gradiente di colore del blu, in modo che ad un valore corrisponda la colorazione corrispondente del gradiente. A valori tendenti al blu corrisponde un valore di HMI più elevato, mentre le zone tendenti al bianco corrisponde un valore di HMI più basso, le condizioni intermedie tra i due valori sono dai differenti gradienti.

Per una immediata chiave di lettura, i valori, così come le bande del gradiente di colori, sono stati raggruppati secondo il metodo ottimizzazione di Jenks (Jenks, 1967), un metodo di clustering dei dati progettato per determinare la migliore disposizione dei valori in classi diverse già incluso nella funzione "*classify*" del *software* GIS utilizzato.

Data la adimensionalità del dato preso del valore HMI si è optato per un confronto diretto tra gli output *raster* dei differenti scenari per la loro visione e discussione.

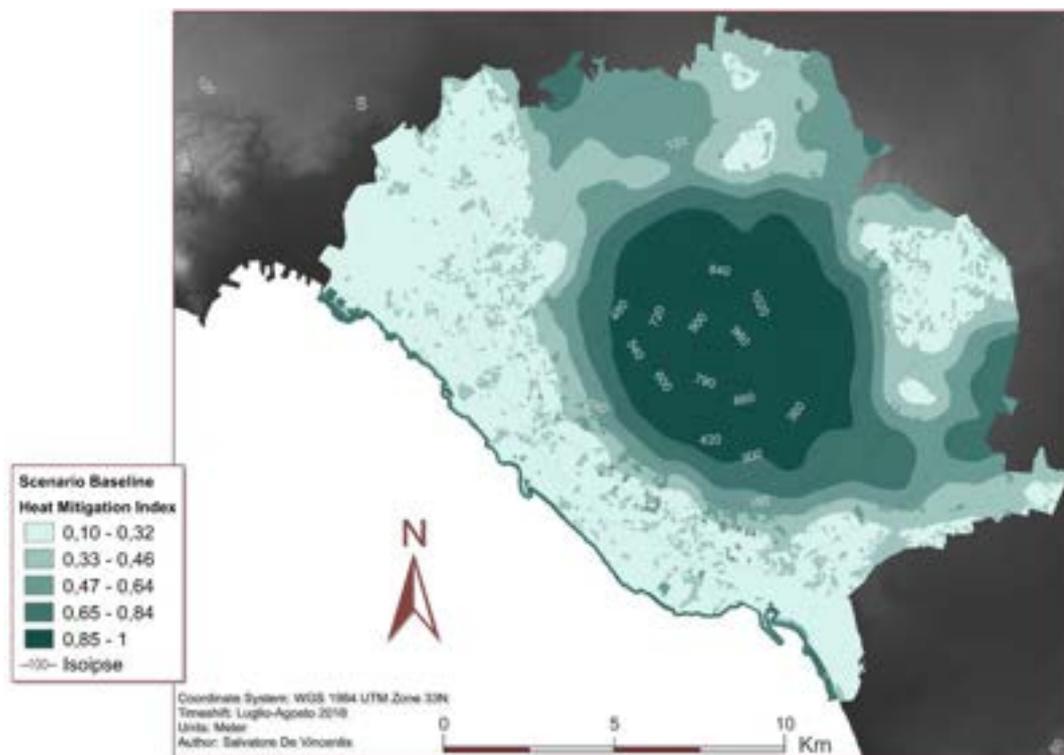


Figura 18 – Heat Mitigation Index – scenario “Baseline”

In *Figura 18* viene mostrato il risultato grafico dell’analisi dell’Urban Cooling Model riguardante la condizione dello scenario *baseline* nella zona del territorio dell’area studio. Possiamo notare una scarsa capacità di raffreddamento di tutto il substrato urbano, proprio in concomitanza delle zone di maggior continuità delle superfici artificiali, ed un’ottima capacità di raffreddamento dell’area naturale comprendente il Parco Nazionale nella parte centrale dell’area di studio, coincidente con la maggior continuità di zone rurali e naturali. Le aree rurali e naturali hanno una naturale tendenza alla mitigazione del calore e il beneficio tratto da tali aree è percepibile nelle zone immediatamente adiacenti ad esse (si vedano le aree della banda dei valori 0,47-0,64). Le sole aree ricadenti nei comuni di Pollena Trocchia, Sant’Anastasia, Somma Vesuviana (le stesse con la presenza di aree rurali frammentate nel tessuto urbano) e Terzigno riportano dei valori intermedi di HMI.

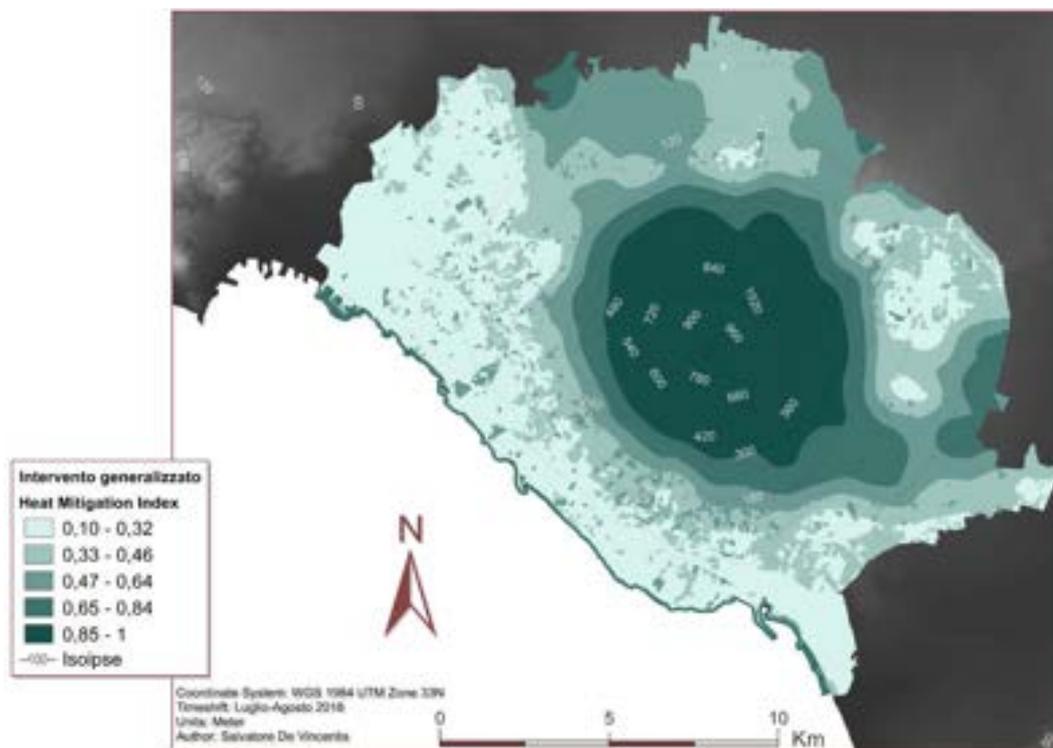


Figura 19 – Heat Mitigation Index – scenario di “intervento generalizzato”

In *Figura 19* è riportato il risultato dell’analisi nello scenario di un intervento generalizzato. L’aumento dell’ombreggiamento del 25% (quindi a fronte di un aumento medio del 25% di *Tree Cover Density*) avrebbe contribuito significativamente all’aumento delle aree comprese nelle bande dei valori tra lo 0,33 e lo 0,64 nei territori urbani precedentemente associati ad una scarsa capacità di raffreddamento della banda dello 0,10-0,32.

Secondo la stima dello studio un tale risultato sarebbe ottenibile se venissero attuate da tutte le entità locali delle virtuose pratiche di gestione del verde urbano evitando le capitozzature o la scelta di essenze arboree dal basso indice fogliare (*Leaf Area Index – LAI*). Le capitozzature causano un notevole stress agli alberi che può indebolirli e renderli più suscettibile a malattie, infestazioni di insetti e altri problemi. La rimozione di grandi sezioni della chioma lascia ferite

aperte e tagli che possono diventare dei punti di ingresso per malattie fungine e batteriche. La risposta della pianta potrebbe essere la grande produzione di germogli deboli, con crescita rapida e poca vigoria che a loro volta possono portare ad una crescita irregolare della chioma. Inoltre, un albero capitozzato ha un'aspettativa di vita inferiore rispetto ad un albero potato correttamente, con maggiore suscettibilità a carie del legno e scottature per eccessiva esposizione alla radiazione solare (Società Italiana Arboricoltura – SIA, 2022)

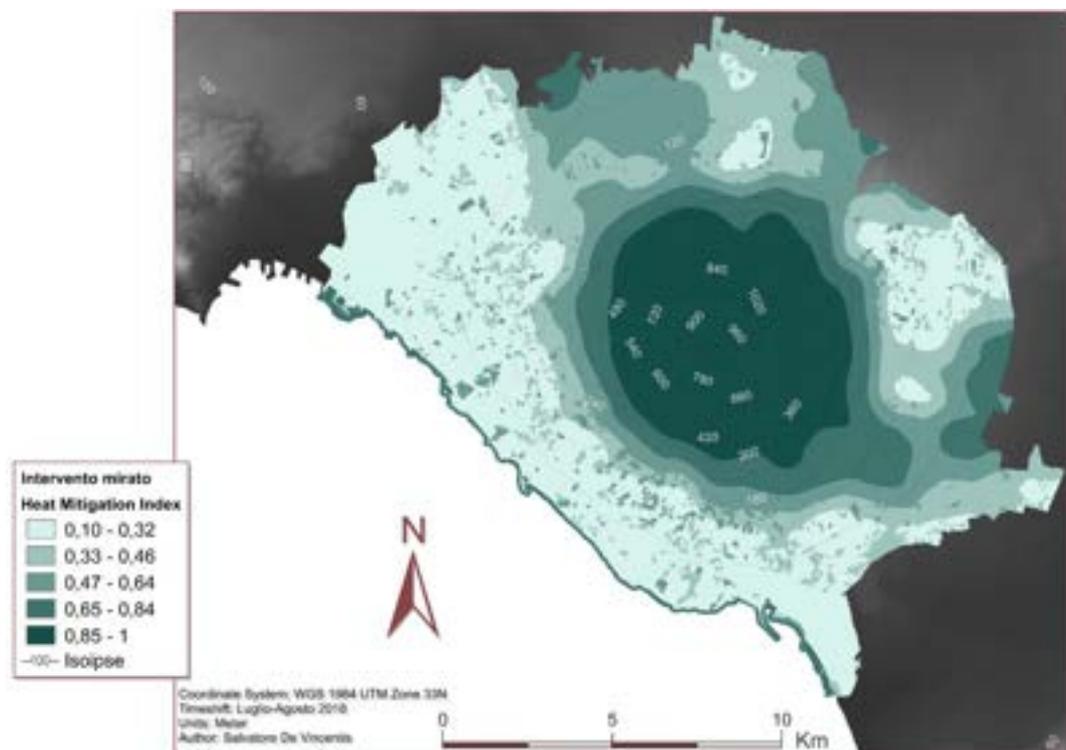


Figura 20 – Heat Mitigation Index – scenario di “intervento mirato”

Nella *Figura 20* sono riportati invece i risultati dell'analisi con riferimento allo scenario di intervento mirato, ovvero avente interventi localizzati atti ad aumentare il 25% dello shade effect delle sole aree verdi urbane con superficie maggiore di 2 ettari. La scelta dietro questa tipologia di interventi è stata ispirata da studi mostrati evidenze dei

benefici ottenibili da questo tipo di interventi (Mariani et al., 2016) in altri contesti urbani. L'elaborato mostra una variazione del *cluster* della banda assegnata per le zone appartenenti alle *Green Urban Area*, passando dalla banda 0,33-0,46 alla 0,47-0,64, ma nessuna evidenza macroscopica che queste zone riescano a far variare significativamente i valori nelle zone immediatamente adiacenti.

Le stime dell'HMI dei differenti scenari sono state sottoposte ad un confronto (*Tabella 14, 15, 16*) per quantificare la grandezza dell'impatto degli interventi e come già descritto in precedenza solo l'intervento generalizzato ha dimostrato dei valori significativi.

Tabella 14 - Confronto delle percentuali di superficie di HMI tra scenario baseline e di intervento generalizzato

HMI	Percentuali superficie area totale		Δ base/gen
	baseline	generalizzato	
0.85-1	17.68	17.68	1
0.65-0.84	12.58	12.58	1
0.47-0.64	16.78	18.30	0.9475
0.33-0.46	20.41	23.73	0.81533
0.10-0.32	32.55	27.71	0.88529

Tabella 15 - Confronto delle percentuali di superficie di HMI tra scenario baseline e di intervento mirato

HMI	Percentuali superficie area totale		Δ base/mir
	baseline	mirato	
0.85-1	17.68	17.68	1
0.65-0.84	12.58	12.58	1
0.47-0.64	16.78	18.30	0.9475
0.33-0.46	20.41	18.89	0.9519
0.10-0.32	32.55	32.55	1

Tabella 16 - Confronto delle percentuali di superficie di HMI tra scenario di intervento generalizzato e mirato

HMI	Percentuali superficie area totale		Δ gen/mir
	generalizzato	mirato	
0.85-1	17.68	17.68	1
0.65-0.84	12.58	12.58	1
0.47-0.64	18.30	18.30	1
0.33-0.46	23.73	18.89	0.85609
0.10-0.32	27.71	32.55	0.88529

I risultati ottenuti sono tutti derivati da una serie di approssimazioni e mancanza di dati puntuali, nel caso dei valori del HMI non ci possono mostrare per via dell'aggregazione le piccole variazioni di valori che sono presenti in prossimità delle aree verdi. Ciò è stato voluto per via delle semplificazioni adottate durante lo studio e per la mancanza di ulteriori dati puntuali. Tuttavia, la comparazione diretta tra lo scenario di intervento generalizzato ed intervento mirato (*Figura 21*) ci permette di figurare quali sono le zone che potrebbero interessare maggiormente per degli ulteriori interventi localizzati.

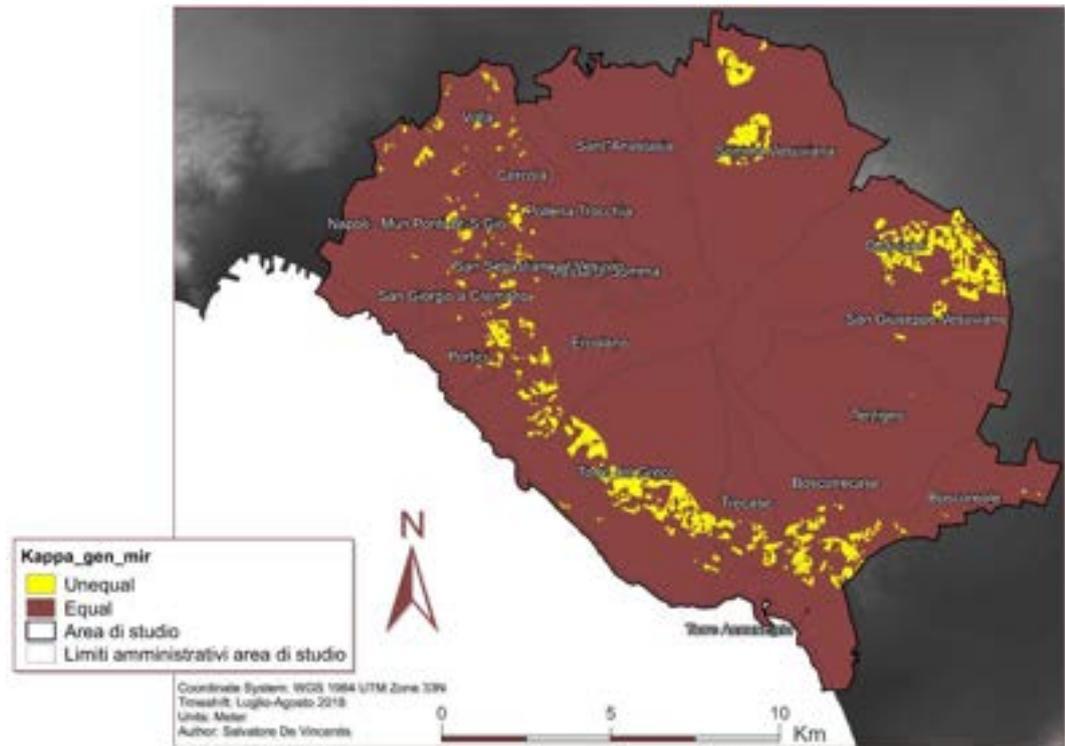


Figura 21 - Comparazione dei valori HMI tra l'intervento generalizzato e quello mirato

Gli interventi localizzati in questi areali potrebbero strutturarsi come *Nature-based Solutions* (NbS) come definiti dalla *Europe Commission*, 2020, ovvero soluzioni ispirate e sostenute dalla natura che siano efficienti sia in termini di costi e che forniscano simultaneamente benefici ambientali, sociali ed economica in un'ottica di sostenere la resilienza dei territori. La valorizzazione di aree naturali all'interno del contesto urbano per la generazione del servizio ecosistemico della regolazione del mesoclima dell'area di studio per il contenimento delle UHI può comportare tutta una serie di benefici che verranno illustrati nel paragrafo a seguire.

3.3. Risultati *Urban Cooling Model*

La *Tabella 17* presenta alcune statistiche descrittive relative all'Urban Cooling Model applicato ai tre diversi scenari: "Baseline", "Generalizzato" e "Mirato".

Tabella 17 – Risultati dell'Urban Cooling Model (shapefile UHI_results)

Alias	Descrizione	Scenario		
		Baseline	Generalizzato	Mirato
avg_cc_	Cooling Capacity (CC)	0,29 kW/ kg/s	0,37 kW/ kg/s	0,29 kW/ kg/s
avg_tmp_v	Temperatura media dell'area	25,33 °C	25,17 °C	25,32 °C
avg_tmp_an	Anomalia media nelle temperature	2,33 °C	2,17 °C	2,32 °C
avd_eng_cn	Risparmio sul consumo energetico	7426,58 MWh	9029,02 MWh	7513,63 MWh
mean_t_air	Temperatura media all'interno degli edifici	26,16 °C	25,86 °C	26,14 °C

La CC rappresenta la capacità di raffreddamento del sistema come spiegato nei precedenti capitoli, ovvero la quantità di raffreddamento (generalmente espressa in kW o tonnellate di raffreddamento) fornita dal sistema diviso per la quantità di aria che attraversa il sistema (in kg/s o cfm). Nel caso dello scenario *baseline* e quello di intervento mirato, il valore della CC per tutta l'area di studio è pressoché invariato (0,29 kW/kg/s), mentre nel caso di un intervento generalizzato è leggermente maggiore (0,37 kW/kg/s).

Il valore delle temperature medie dell'area rappresenta il valore medio della temperatura espresso in gradi Celsius. Nel caso *baseline*, la temperatura media è di 25,33°C, mentre negli altri due casi il valore è leggermente più basso (rispettivamente 25,17°C per l'intervento generalizzato e 25,32°C per l'intervento mirato). Una variazione ben lontana dagli obiettivi prefissati dall'accordo di Parigi ma un buon punto d'inizio per una discussione su quanto l'entità degli interventi

volti ad aumentare la copertura arborea in contesti urbani possa offrire un servizio ecosistemico quantomeno quantificabile.

L'average temperature anomaly rappresenta l'anomalia della temperatura media rispetto ad un valore di riferimento, espresso in gradi Celsius. In tutti e tre i casi, l'anomalia rimane superiore a 2°C.

Il risparmio sul consumo energetico rappresenta il consumo di energia evitato, ovvero la quantità di energia risparmiata grazie al sistema di condizionamento dell'aria e quantifica in altri termini il servizio ecosistemico fornito dall'effetto refrigerante fornito dalla copertura arborea. Le approssimazioni considerate fanno sì che questi valori siano solo una stima e potrebbero non rappresentare accuratamente la situazione reale ma forniscono comunque delle grandezze utili alla comprensione del fenomeno ed alla valutazione di diverse alternative di gestione. Nel caso *baseline*, il valore è di 7426,58 MWh mentre nei casi Generalizzato e Mirato il valore è più elevato (rispettivamente 9029,02 MWh e 7513,63 MWh). Le temperature medie all'interno degli edifici rappresenta la temperatura media all'interno degli edifici. Nel caso *baseline*, la temperatura media è di 26,16°C, mentre nei casi d'intervento generalizzato e mirato il valore è leggermente più basso (rispettivamente 25,86°C e 26,14°C).

Viste alcune semplificazioni riportate sopra, il modello presenta una serie di limitazioni. L'indice della CC si basa su pesi empirici, derivati da un numero limitato di casi di studio, che modulano l'effetto dei fattori chiave che contribuiscono al risultato effettivo di raffreddamento. Questa fase di ponderazione comprende molte incertezze (Zardo et al. 2017) e per caratterizzare e ridurre questa incertezza ci sarebbe bisogno di misurazioni in loco che forniscano chiarimenti sugli effetti relativi di

ombra, albedo ed evapotraspirazione. Inoltre, d_{cool} e r sono due parametri che esprimono l'effetto dei grandi spazi verdi e del rimescolamento dell'aria ma sono difficili da derivare dalla letteratura in quanto variano con le proprietà della vegetazione, del clima e i modelli di vento (rimescolamento dell'aria). Analogamente a quanto accade per la CC, si possono caratterizzare e ridurre queste incertezze testando la sensibilità del modello a questi parametri e confrontando successivamente i dati delle temperature stimate dal modello con altri dati osservati o previsti di altri modelli (Bartesaghi et al. 2018 e Deilami et al. 2018).

Nonostante i limiti sopra elencati, i risultati ottenuti ci donano una direzione dove concentrare maggiormente l'attenzione che sia da parte di un decisore politico o da chi appronta uno studio di valutazione dei servizi ecosistemici. Nel caso dello studio affrontato, l'aumento del LAI può essere sia ottenuta attraverso una coincisa progettazione ed investimento nel rinfoltire il numero di esemplari arborei sempreverdi, non allontanandosi dalle specie già presenti nell'areale come l'*Acacia dealbata*, la *Ceratonia siliqua*, la *Grevillea robusta*, l'*Hibiscus syriacus*, il *Ligustrum japonicum* ed altre già elencate nel documento del “*Bilancio arboreo e gestione del verde della città di Napoli 2011-2015*” (comune.napoli.it). Negli areali dove sono già presenti diversi esemplari l'aumento del LAI deve far riferimento a delle operazioni di potatura adeguate, con maggiore sensibilità sia degli operatori sia dei supervisor dei cantieri urbani a non compromettere irrimediabilmente le chiome.

4. Conclusioni

Grazie alle metodologie delineate lo studio ha permesso la definizione di un metodo capace di ottenere e quantificare dati riguardo il servizio ecosistemico fornito dalle specie arboree in contesti urbani per fronteggiare le UHI. È stato possibile sia lo studio di uno scenario di riferimento che la definizione di differenti ipotesi a fronte dell'assenza di misurazioni in loco e della semplicità di riproduzione dei metodi con ulteriori nuove ipotesi. L'areale di questo studio, nonostante i limiti, ha permesso l'approccio ad uno scenario di un contesto fortemente urbanizzato che presenta due aree naturali molto ampie (il fronte costiero ed il Parco Nazionale del Vesuvio) che non riescono ad impattare significativamente alla riduzione del calore generato da zone artificiali. L'ipotesi di interventi volti ad aumentare la copertura vegetale presente nel contesto urbano hanno mostrato i loro limiti soprattutto nel caso di interventi mirati solo nelle zone dei grandi parchi verdi urbani. Sebbene un aumento ulteriore della copertura vegetale generalizzata in tutta l'area ha stimato un significativo incremento di capacità rinfrescante, il maggior risultato è stata la possibilità di comparazione diretta tra interventi generalizzati e interventi mirati che mostra dove si può aumentare l'attenzione per futuri interventi localizzati.

5. Bibliografia

- Alcoforado, M.J., *Assessing and Modeling the Urban Climate in Lisbon*, 2010
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Roma, Italy, 1998
- Allen, R.G., Burt, C., Solomon, K., *Prediction Accuracy for Projectwide Evapotranspiration Using Crop Coefficients and Reference Evapotranspiration*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005
- Boumans, Roelof & Phillips, Donald & Victory, Winona & Fontaine, Thomas. *Developing a model for effects of climate change on human health and health–environment interactions: Heat stress in Austin, Texas*. *Urban Climate*, 2014
- Chakrabarty, Dipesh. *The Climate of History in a Planetary Age*. University of Chicago Press, 2021
- Elliot T., Almenar J.B., Rugani B., *Modelling the relationships between urban land cover change and local climate regulation to estimate urban heat island effect*, *Urban Forestry & Urban Greening* Volume 50, 2020
- Erell, Evyatar & Pearlmutter, David & Williamson, T... *Urban Microclimate – Designing the Spaces Between Buildings*, 2011
- Fokaides, P., Kylili, A., Nicolaou, L., Ioannou, B. "The effect of soil sealing on the urban heat island phenomenon." *Indoor and Built Environment* 25.7, 2016
- Fujibe, F., *Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring*. *Int. J. Climatol.*, 31: 162-173, 2011
- Haase, D., Frantzeskaki, N., Elmqvist, T., *Ecosystem Services in Urban Landscapes: Practical Applications and Governance Implications*, 2014
- Hathway, Abigail & Sharples, S., *The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study*. *Building and Environment*. 58, 2012
- Hübler, M., Klepper, G., Peterson, S., *Costs of climate change: The effects of rising temperatures on health and productivity in Germany*, *Ecological Economics*, Volume 68, Issues 1–2, Pages 381-393, 2008
- Jenks, G. F., *The Data Model Concept in Statistical Mapping*. *International Yearbook of Cartography*, 7, 186-190, 1967
- Jusuf, S., Wong, N. H., Hagen, E., Anggoro, R., Hong, Y., *The influence of land use on the urban heat island in Singapore*. *Habitat International*, 2007
- Kolokotroni, M; Ren, X; Davies, M; Mavrogianni, A; *London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings*. *Energy and Buildings*, 47 302 – 311, 2012
- Lopes, A., Alves, E., Alcoforado, M.J., Machete, R., "Lisbon Urban Heat Island Updated: New Highlights about the Relationships between Thermal Patterns and Wind Regimes", *Advances in Meteorology*, 2013
- Mariani, L., Parisi, S.G., Cola, G., Laforteza, R., Colangelo, G., Sanesi, G., *Climatological analysis of the mitigating effect of vegetation on the urban heat island of Milan, Italy*. *Sci Total Environ.*, 2016
- Matzarakis, A., Martinelli, L., Ketterer, C., *Relevance of Thermal Indices for the Assessment of the Urban Heat Island*, 2016
- Mohajerani A, Bakaric J, Jeffrey-Bailey T. *The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete*. *J Environ Manage*, 2017
- Nelson, Erik, et al. "Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales." *Frontiers in Ecology and the Environment* 7.1 pp: 4-11, 2009

- Odum, E.P., “Principi di ecologia”, Piccin Editore, 1971
- O’Malley, C., Piroozfar, P., Farr, E., Pomponi, F., Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis. *Sustainable Cities and Society*, 2015
- Phelan, Patrick E., et al. “Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies.” *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 40, pp. 285-307, 2015
- Potschin-Young, M., Haines-Young, R., Görg, C., Heink, U., Jax, K., Schleyer, C., Understanding the role of conceptual frameworks: Reading the ecosystem service cascade. *Ecosystem Services*. 29, 2017
- Ronchi, S., Salata, S., Arcidiacono, A., Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies, *Sustainable Cities and Society*, Volume 63, 2020
- Rydin, Y., Bleahu, A., Davies, M., Dávila, J.D., Friel, S., De Grandis, G., Groce, N., Hallal, P.C., Hamilton, I., Howden-Chapman, P., Lai, K.M., Lim, C.J., Martins, J., Osrin, D., Ridley, I., Scott, I., Taylor, M., Wilkinson, P., Wilson, J., Shaping cities for health: complexity and the planning of urban environments in the 21st century. *Lancet*, 2012
- Sailor, D.J., Fan, H., Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities, *Atmos. Environ.*36, 2002
- Santamouris, Mattheos et al. “On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review.” *Energy and Buildings* 98, pp:119-124, 2015
- Sepe, C.; Calcaterra, D.; Cecconi, M.; Di Martire, D.; Pappalardo, L.; Scarfone, R.; Vitale, E.; Russo, G. Capillary Barriers during Rainfall Events in Pyroclastic Deposits of the Vesuvian Area. *Geosciences* 2021
- Smith, R.B., “The heat budget of the earth’s surface deduced from space”, 2010
- Smith, C., Levermore, G., Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world, *Energy Policy*, 36, pp. 4558-4562, 2008
- Takebayashi, H., Moriyama, M., Study on Surface Heat Budget of Various Pavements for Urban Heat Island Mitigation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012
- Weisman, Alan. “*Il mondo senza di noi. Einaudi*”, 2008
- Zawadzka, J.E., Harris, J.A., Corstanje, R., Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, Volume 214, 2021
- Zhang, K., Pan, S., Zhang, W., Xu, Y., Cao, L., Hao, Y., Wang, Y., Influence of climate change on reference evapotranspiration and aridity index and their temporal-spatial variations in the Yellow River Basin, China, from 1961 to 2012. *Quaternary International*. 380., 2015

6. Sitografia

- Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
<https://www.cmcc.it/it/report-napoli>
- Comune di Napoli
<https://www.comune.napoli.it/>
- Database WorldClim 2.1
www.worldclim.org
- Dati ISTAT 2022
<https://demo.istat.it/popres/index2.php?anno=2022&lingua=ita>
- Earth Explorer dell'USGS - United States Geological Survey
<https://earthexplorer.usgs.gov/>
- EuroStat
<https://ec.europa.eu/eurostat/>
- Geoportale Regione Campania
<https://sit2.regione.campania.it/content/dati-di-base>
- Global Surface UHI Explorer
<https://yceo.yale.edu/research/global-surface-uhi-explorer>
- IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007
https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html
- Organizzazione Meteorologica Mondiale
<https://public.wmo.int/en/media/press-release/>
- Natural Project – InVEST User Guide
<https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org>
- Società Italiana Arboricoltura – SIA
<https://www.isaitalia.org/>