



REGIONE PUGLIA



PROVINCIA di FOGGIA



COMUNE di APRICENA



COMUNE di SAN SEVERO



Società Proponente	AM ENERGY S.R.L. * Sede: via Tiberio Solis, n. 128 - 71016 San Severo (FG) Pec: amenergysrl@pec.it P.iva: 04304150719 * Società con socio unico, soggetta a direzione e coordinamento di PLAN A HOLDING S.R.L. p.iva 03930741206	Sviluppo e Coordinamento	 PLAN A ENERGY S.R.L. Sede: Via Cavour n.104 40026 Imola BO Pec: planaenergy@pec.it C.F e P.IVA : 03930841204
Progettazione generale e progettazione elettrica	 STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA MEZZINA dott. ing. Antonio Via T. Solis 128 71016 San Severo (FG) Tel. 0882.228072 Fax 0882.243651 e-mail: info@studiomezzina.net Ordine degli ingegneri della Provincia di Foggia matr. n 1604  	Supervisione scientifica piani culturali e montaggio	 Università di Foggia Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimenti, Risorse Naturali e Ingegneria (DAFNE) Sede: via Antonio Gramsci,89/91 Foggia 71122 P.iva: 03016180717
Studio e progetto ecologico vegetazionale	 Dott. Biol. Leonardo Beccarisi Via D'Enghien, 43 - 73013 Galatina (LE) cell. 3209709895 E-Mail: beccarisil@gmail.com Ordine nazionale dei Biologi Albo-Sezione matr. n. AA_067313	Studio di impatto ambientale	 Dott.ssa Anastasia Agnoli Via Armando Diaz, 37 73100 Lecce (LE) cell. 3515100328 E-Mail: anastasia.agnoli989@gmail.com
Studio meteorologico	Dott. Biol. Elisa Gatto Via S. Santo, 22 73044 Galatone (LE) cell. 3283433525 E-Mail: dottelisagatto@gmail.com Ordine nazionale dei Biologi matr.n. AA_090001	Studio paesaggistico e di inserimento urbanistico	 Dott. Agr. Barnaba Marinosci via Pilella 19, 73040 Alliste (LE) Cell. 329 3620201 E-Mail: barnabamarinosci@gmail.com Ordine dei Dottori Agronomi e Forestali provincia di Lecce matr. n 674
Studio faunistico	 Dott. Antonio Feola Via Civitella n°25 84060 Moio della Civitella (SA) cell. 338 2593262 E-Mail: feolantx@gmail.com Ordine Nazionale dei Biologi matr. n . AA_047004	Rappresentazioni fotorealistiche	 Arch. Gaetano Fornarelli Via Fulcignano Casale 17 73100 Lecce (LE) cell. 3358758545 E-Mail: forgaet@gmail.com Ordine degli Architetti della provincia di Lecce matr. n 1739
Studio archeologico	 NOSTOI s.r.l. Dott.ssa Maria Grazia Liseno Tel. 0972.081259 Fax 0972.83694 E-Mail: mgliseno@nostoisrl.it Elenco Nazionale Archeologo Fascia I matr n. 1646	Consulenza strutturale	 Ing. Tommaso Monaco Tel. 0885.429850 Fax 0885.090485 E-Mail: ing.tommaso@studiotecnicomonaco.it Ordine degli Ingegneri della provincia di Foggia matr. n. 2906
Studio acustico	 STUDIO FALCONE Ingegneria Ing. Antonio Falcone Tel. 0884.534378 Fax. 0884.534378 E-Mail: antonio.falcone@studiofalcone.eu Ordine degli Ingegneri di Foggia matr. n.2100	Consulenza topografica	Geom. Matteo Occhiochiuso Tel. 328 5615292 E-Mail: matteo.occhiochiuso@virgilio.it Collegio dei Circondari Geometri e Geometri Laureati di Lucera matr. n. 1101
Studio grafico geologico e geotecnico	Dott. Nazario Di Lella Tel./Fax 0882.991704 cell. 328 3250902 E-Mail: geol.dilella@gmail.com Ordine regionale dei Geologi della Puglia matr. n. 345		
Opera	Progetto definitivo per la realizzazione di un impianto Fotovoltaico denominato "Apricena Industriale" da realizzarsi su aree industriali e cave nelle località "Podere Camilli - Tufara - San Giovanni - San Sabino", nel territorio comunale di Apricena (FG) per una potenza complessiva di 121,023 MWp e immissione di 96,300 MW, nonché delle opere connesse ed infrastrutture indispensabili alla costruzione e all'esercizio dell'impianto nei comuni di Apricena (FG) e San Severo (FG)		
AUTORITA' PROCEDENTE V.I.A. :	 MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA		AUTORITA' PROCEDENTE A.U. :  REGIONE PUGLIA
Oggetto	Nome Elaborato: P7MVN25_Docu.Specialistica_01.2.pdf		
	Descrizione Elaborato: Studio meteo-climatico		
00	Novembre 2022	Progetto definitivo	Ing. A. Mezzina AM ENERGY S.R.L.
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione Verifica Approvazione
Scala:			
Formato:	Codice Pratica P7MVN25		



STUDIO METEO – CLIMATICO COMUNE DI APRICENA

*Progetto di realizzazione di un impianto
fotovoltaico denominato "AM industriale"*

A cura di
Dott.ssa Elisa Gatto, PhD
Biologa

Sommario

Introduzione e nota metodologica	2
1. Inquadramento meteo-climatico	3
1.1 Qualità climatica dell'area di studio	6
1.1.1. Benessere animale.....	6
1.1.2. Benessere umano.....	7
2. Analisi dei rischi climatici fisici.....	8
2.1 Alte temperature	9
2.2. Precipitazioni intense.....	11
2.3. Siccità.....	12
2.4. Incendi.....	13
3. Analisi modellistica degli impatti dell'opera sul microclima.....	13
3.1. Studio modellistico: ENVI-met	14
3.1.1. Metodologia e set-up modellistico.....	15
3.2. Parametri investigati	16
3.2.1. Dispersione delle polveri da cava.....	16
3.2.2. Microclima.....	17
3.2.2.1. Albedo e inquinamento termico.....	17
3.2.2.2. Indici di comfort termico	18
Temperatura media radiante MRT	18
Temperatura fisiologica equivalente PET.....	18
4. Risultati.....	19
Dispersione delle polveri da cava	19
Micrometeorologia e Comfort termico.....	19
5. Piano di Monitoraggio Ambientale.....	21
6. Conclusioni.....	22

Introduzione e nota metodologica

Il presente elaborato tecnico ha come obiettivo lo studio e caratterizzazione della condizione climatica e dei mutamenti prevedibili della stessa in un'area a carattere industriale di Apricena (FG) da destinare alla realizzazione di un impianto fotovoltaico. È altresì mirato alla definizione della criticità climatica dell'area che supporta la scelta di interventi tecnici volti ad aumentare la resilienza dell'intervento e il *climate proofing* degli investimenti auspicato dalla Commissione Europea nella Strategia Europea per l'Adattamento ai Cambiamenti Climatici¹.

Le infrastrutture energetiche sono particolarmente esposte ai cambiamenti a lungo termine. È quindi necessario che si tenga conto dei cambiamenti climatici a partire dalle fasi iniziali del progetto, attraverso l'utilizzo di opportuni criteri di progettazione e l'adozione di misure tecnologiche specifiche.

Lo studio è strutturato nelle seguenti fasi di analisi:



La metodologia operativa è guidata dai documenti tecnico-scientifici di supporto della Strategia di Adattamento Europea, recepita dalla Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNAC, MATTM 2015)², e in particolare alla linea d'azione 1 della stessa: “Sviluppare e migliorare la conoscenza di base sugli impatti dei cambiamenti climatici, la mappatura delle vulnerabilità, e i costi e i benefici delle misure di adattamento”.

Tale studio tiene conto, inoltre, degli orientamenti tecnici sull'applicazione del principio “non arrecare un danno significativo”³ a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e resilienza⁴ ed è, quindi,

¹ EC (Commissione Europea), 2009. Libro Bianco. L'adattamento ai cambiamenti climatici: verso un quadro d'azione europeo.

² <http://www.minambiente.it/pagina/adattamento-ai-cambiamenti-climatici-0>. La SNAC (MATTM 2015) è stata approvata con decreto direttoriale n. 86 del 16 giugno 2015.

³ Regolamento (UE) 2020/852, detto “regolamento Tassonomia”, relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili, tramite la definizione di un sistema di classificazione (“tassonomia”) delle attività ecosostenibili.

⁴ Regolamento (UE) 2021/241 del Parlamento europeo e del Consiglio riguardo i piani di ripresa e resilienza che prevede che “Nessuna misura per l'attuazione delle riforme e dei progetti di investimento inclusi nel piano per la ripresa e la resilienza arreca

altresi focalizzata a garantire che l'opera in esame non pregiudichi il conseguimento degli obiettivi climatici e ambientali ai sensi dell'articolo 17 del Regolamento (UE) 2020/852.

1. Inquadramento meteo-climatico

Per la descrizione meteo-climatica dell'area di studio sono state analizzate le medie mensili e annue di temperatura ($^{\circ}\text{C}$), precipitazione (mm) e umidità relativa (%) registrate nel periodo di riferimento considerato 2009-2020 dalla stazione meteorologica della Protezione Civile Puglia sita in Apricena. I dati relativi alle ore di sole sono stati invece raccolti nel periodo 1999-2019 dal dataset di rianalisi di quinta generazione ERA5⁵, prodotto utilizzando il sistema di assimilazione dei dati a variazione quadrimensionale e le previsioni dei modelli in CY41R2 dell'ECMWF, IFS (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Integrated Forecast System*).

Secondo la classificazione di Köppen - Geiger⁶, l'areale in oggetto è inquadrabile nella zona "Cfa" (**clima subtropicale umido** o **clima temperato caldo**), una zona climatica caratterizzata da estati calde e umide e inverni da freschi a miti (Figura 1).

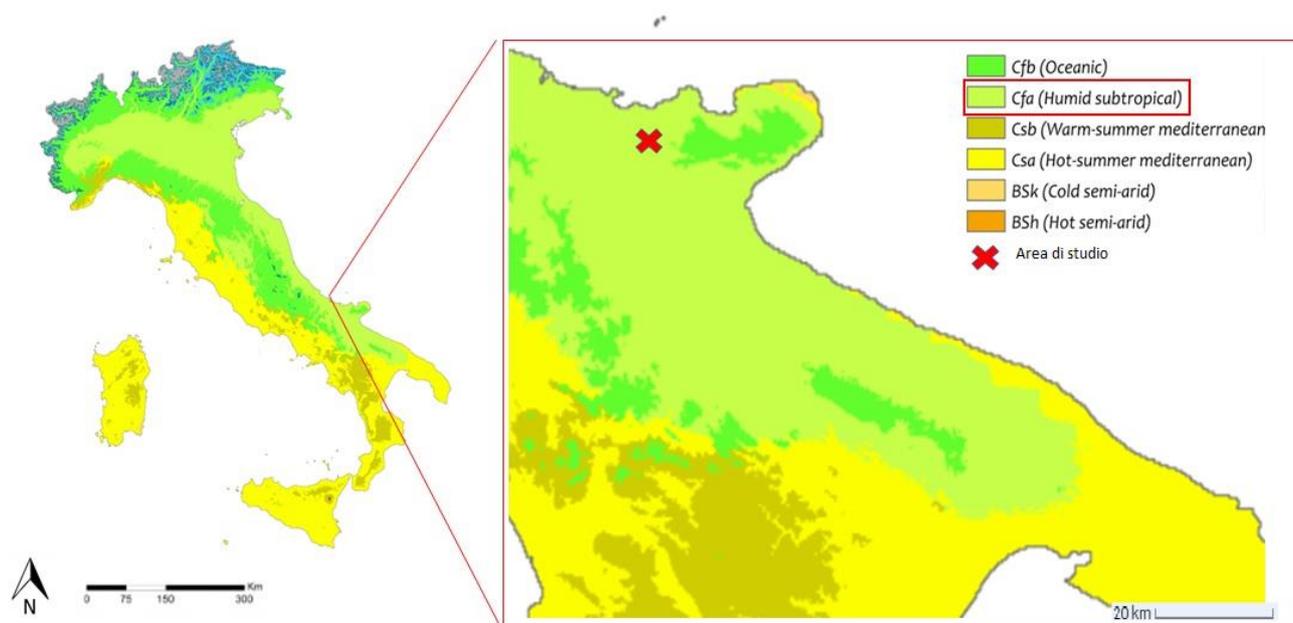


Figura 1. Carta della classificazione climatica di Köppen – Geiger del territorio italiano (sinistra) e dettaglio dell'areale di interesse (destra).

Nello specifico, la Tabella 1 riporta i valori medi dei parametri meteorologici che influenzano il clima dell'area di studio, misurati dalla stazione di riferimento nel dataset temporale 2009-2020. Dall'analisi del dataset, emerge che l'area è caratterizzata da una temperatura media annuale di 15.6°C e da una piovosità annuale di 632 mm.

un danno significativo agli obiettivi ambientali ai sensi dell'articolo 17 del regolamento (UE) 2020/852 (principio «non arrecare un danno significativo»)"

⁵ <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>

⁶ Wladimir Köppen, 1936. *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Berlino, Borntraeger.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	6.8	7.9	10.3	13.7	17.5	21.7	25.3	25.6	21.4	16.4	12.3	8.0
Temperatura minima (°C)	2.0	2.8	4.2	7.1	10.8	15.6	18.1	18.8	15.3	10.9	7.5	3.1
Temperatura massima (°C)	11.6	13.0	16.3	20.4	24.2	29.8	32.4	32.4	27.5	21.9	17.1	12.9
Precipitazioni (mm)	62	54	59	63	47	34	29	32	57	58	69	68
Umidità(%)	76	73	71	68	63	56	52	56	65	73	75	77
Giorni di pioggia (g.)	7	8	7	7	6	4	3	4	6	6	7	8
Ore di sole (ore)	5.7	6.4	8.1	9.9	11.6	12.7	12.7	11.7	9.4	7.5	6.4	5.6

Tabella 1. Medie mensili per i parametri meteorologici considerati. L'intensità del colore è direttamente proporzionale all'intensità del valore misurato. I dati sono estrapolati dal dataset della stazione meteorologica di Apricena della Protezione Civile Puglia⁷ e si riferiscono al range temporale 2009-2020. I dati relativi alle ore di sole sono estratti dal dataset di rianalisi ERA5 (ECMWF).

I mesi più caldi dell'anno sono Luglio e Agosto con una temperatura media di 25 °C circa e valori massimi che raggiungono 32 °C, mentre il mese più freddo è Gennaio con una media di 6.8 °C. Il mese più secco è Luglio, con una media di 29 mm di pioggia e un'umidità relativa del 52 %, mentre i mesi con maggiori piogge sono Novembre con una media di 69 mm e un'umidità relativa del 75 % e Dicembre con una media di 68 mm e un'umidità relativa del 77%. La differenza tra le precipitazioni del mese più secco e quelle del mese più piovoso è 40 mm.

Dicembre ha in media i giorni più piovosi al mese (giorni: 8). Il minor numero di giorni di pioggia si registra nei tre mesi estivi Giugno, Luglio e Agosto (giorni: 4-3-4 rispettivamente).

Il riferimento principale per definire il **regime anemologico** dell'area in esame è rappresentato dalla rosa dei venti riprodotta in Figura 2, calcolata considerando il dataset degli ultimi 30 anni (1991-2021) di ERA5 (ECMWF). La forma della rosa dei venti evidenzia una prevalenza delle direzioni Ovest, Nord - ovest. Come si può notare dall'istogramma in Figura 2, le maggiori frequenze sono associate a venti con velocità >3 m/s e 2,1 m/s che costituiscono circa il 60% del totale dei casi analizzati.

⁷ <https://protezionecivile.puglia.it/>

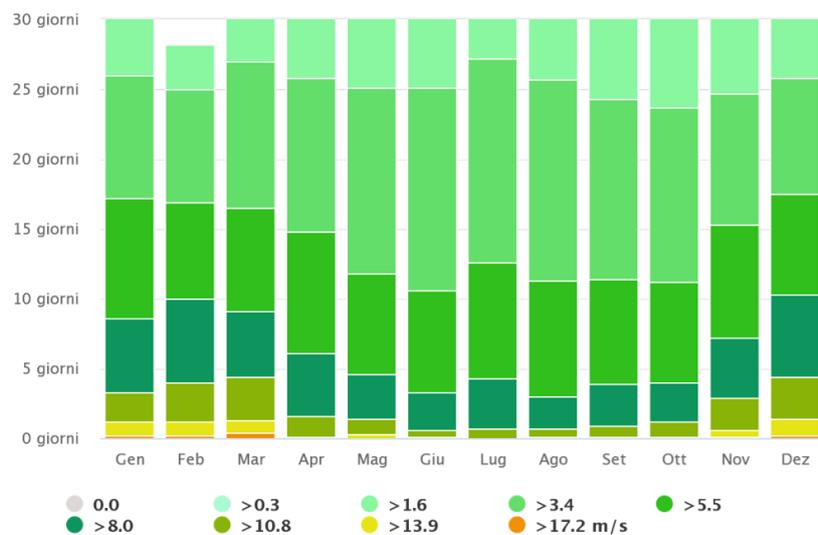
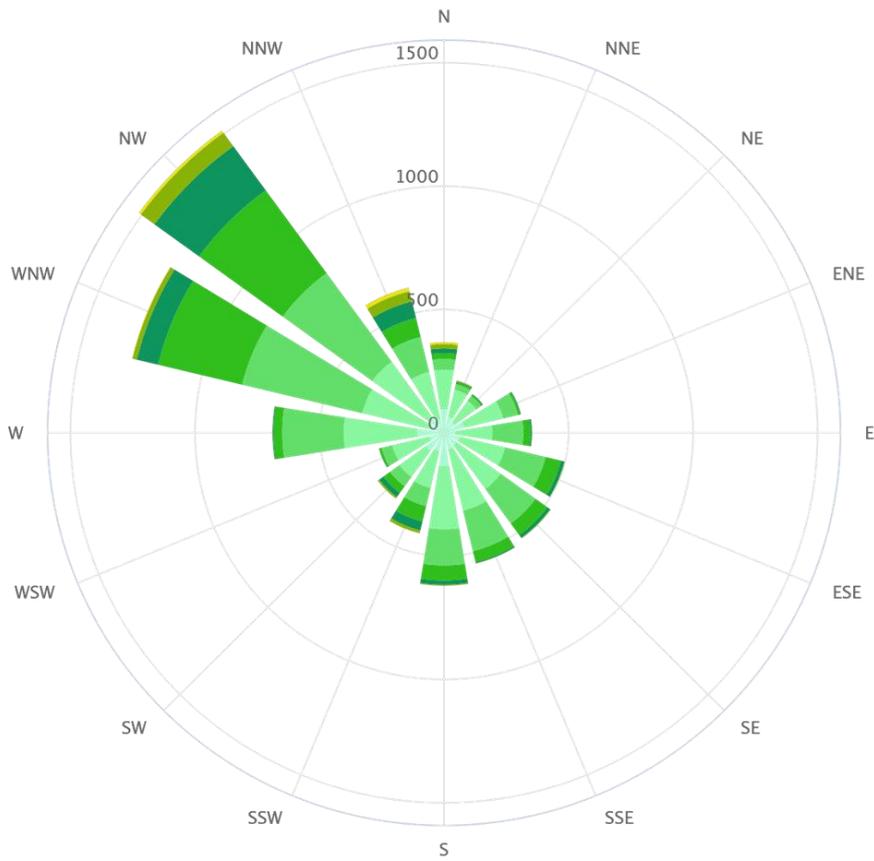


Figura 2. In alto: Rosa dei venti che riporta le direzioni e le velocità del vento (m/s); In basso: istogramma che riporta la frequenza (espressa in giorni al mese) delle velocità del vento. Il dataset considerato comprende gli anni dal 1991 al 2019 (ERA5, ECMWF).

1.1 Qualità climatica dell'area di studio

La qualità o la criticità di un'area dal punto di vista climatico è tipicamente data dal rapporto tra temperatura e umidità. La Figura 3 mostra graficamente il rapporto tra le due variabili meteorologiche. In particolare, riporta i valori massimi, minimi e medi della temperatura (Ta) e i valori medi dell'umidità relativa (RH).

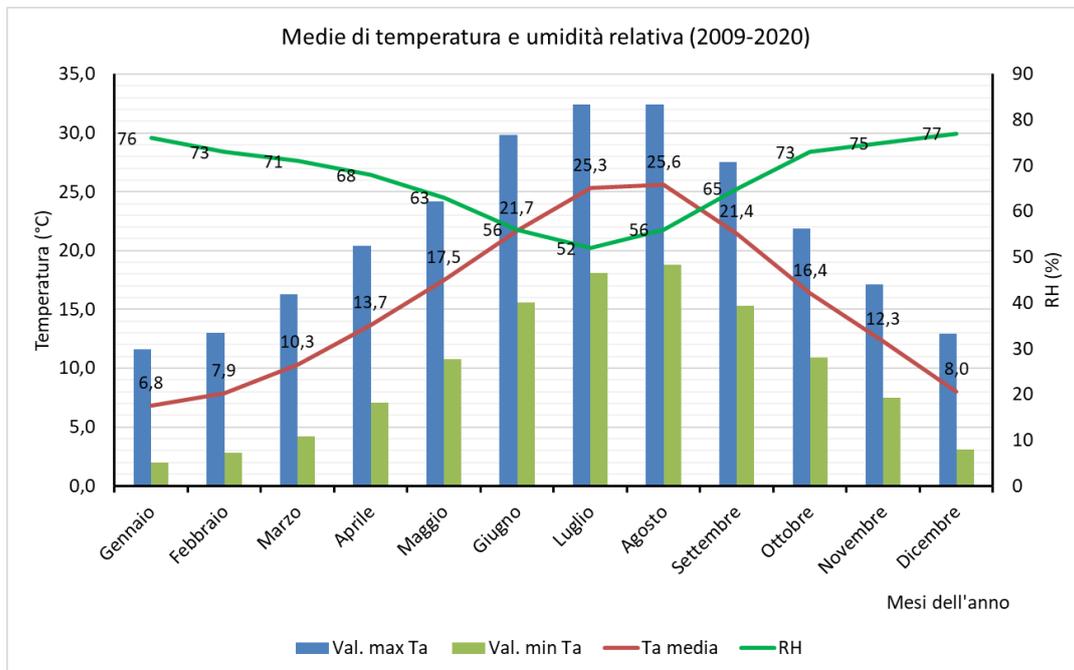


Figura 3. Valori massimi (Val. max Ta), minimi (Val. min Ta) e medi (Ta media) della temperatura (°C) e i valori medi dell'umidità relativa (RH, %).

In questa sezione sono stati analizzati gli effetti combinati della temperatura ambientale e dell'umidità relativa ed è stato valutato il rischio di stress da calore sia sulla componente animale che umana attraverso il calcolo dei due indici di qualità climatica: *Temperature Humidity Index* (THI) e il *Discomfort Index* (DI)⁸. Tale indagine è stata ritenuta necessaria considerato che all'interno del progetto di ripristino ecologico è previsto l'impiego del pascolamento estensivo come metodo di gestione.

1.1.1. Benessere animale

L'indice THI massimo giornaliero permette di valutare la temperatura ambientale percepita dagli animali in relazione ai valori dell'umidità relativa dell'aria (ottenuto applicando il modello NOAA, 1976⁹) è stato proposto dal CRA-CMA¹⁰ come miglior indicatore bioclimatico per la pianificazione delle strategie di mitigazione degli effetti del caldo sulla salute e sulle performance produttive degli animali allevati in settori altamente specializzati.

⁸ Thom E. C. 1959. *The discomfort index*. *Weatherwise*, 12, 57-60

⁹ National Oceanic and Atmospheric Administration National Aeronautics and Space Administration United States Air Force, Washington, D.C, October 1976

¹⁰ Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria - Unità di ricerca per la Climatologia e la Meteorologia Applicate all'Agricoltura

L'indice THI¹¹ è stato calcolato come: $THI = 0.8 \cdot Ta + RH \cdot (Ta - 14.4) + 46.4$; con Ta = temperatura dell'aria (°C) e RH = umidità relativa espressa come proporzione.

I livelli di stress sono stati suddivisi in: Lieve (da 72 a 79 THI); Moderato (da 80 a 89 THI); Grave (90 THI o superiore).

La soglia limite dell'indice di benessere animale è differente per le specie animali. Studi recenti mostrano che oggi i bovini sono molto più sensibili allo stress da calore a causa dell'aumento della produzione di latte e dell'assunzione di cibo. Le vacche da latte moderne cominciano a patire il caldo a partire da un THI medio di 68 (Vitali, 2009¹²). Quando il THI supera 72, è probabile che le mucche inizino a subire uno stress da calore e la loro fertilità venga influenzata. Quando il THI supera 78, la produzione di latte vaccino è seriamente compromessa. Quando il THI sale sopra l'82, sono probabili perdite significative nella produzione di latte, le mucche mostrano segni di grave stress e alla fine possono morire. La scrofa lo stress da caldo inizia con valori del THI maggiori di 74 e per i polli da carne lo stress da caldo inizia con valori del THI maggiori di 78.

La Tabella 2 riporta i valori di THI calcolati sulle medie mensili (2009-2020). In generale, **si osserva che non si hanno condizioni importanti di stress termico. Dicembre, Gennaio e Febbraio hanno i valori più bassi di THI mentre Luglio e Agosto rientrano nella categoria di stress lieve.**

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
THI (°C)	46	48	52	57	62	68	73	74	68	61	55	48

Tabella 2. Risultati di *Temperature Humidity Index* calcolati sulle medie mensili di Ta e RH riportate in Tabella 1.

1.1.2. Benessere umano

L'indice DI per il disagio climatico stima la "temperatura effettiva", definita come la combinazione, in un unico valore espresso in gradi Celsius, dell'effetto di temperatura, umidità e movimento dell'aria sulla sensazione di caldo o freddo percepita dal corpo umano. Questo indice è adatto per descrivere le condizioni di disagio fisiologico dovute al caldo-umido ed è sensibile in un intervallo termico compreso tra 21°C e 47°C. Al di fuori di tale intervallo, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice attribuisce sempre la condizione fisiologica alle classi estreme, cioè "benessere" per temperature inferiori a 21°C e "stato di emergenza sanitaria" per temperature superiori a 47°C.

È stato calcolato come: $DI = 0.4 (Ta + Tw) + 4.8$; dove Ta = temperatura di bulbo asciutto (°C) e Tw = temperatura di bulbo umido (°C). I livelli di stress termico sono indicati in Tabella 4.

¹¹ Steadman RG. 1979. *The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. J. Appl. Meteorol. Climatol.* 18: 861–873.

¹² A. Vitali, A. Felici, S. Esposito, U. Bernabucci, L. Bertocchi, C. Maresca, A. Nardone, N. Lacetera, 2015. *The effect of heat waves on dairy cow mortality. Journal of Dairy Science, Volume 98, Issue 7, Pages 4572-4579*

▶ ≤ 21	Stato di benessere generalizzato, nessun disagio.
▶ 21 ÷ 24	Meno di metà della popolazione prova disagio.
▶ 25 ÷ 27	Più di metà della popolazione prova disagio.
▶ 28 ÷ 29	La maggioranza della popolazione prova disagio e un deterioramento dello stato psico-fisico.
▶ 30 ÷ 32	Tutta la popolazione prova un forte disagio.
▶ ≥ 32	Stato di emergenza sanitaria per il disagio molto forte con elevato rischio di colpi di calore.

Tabella 3. Scala di valori di *Discomfort Index* cui corrisponde una categoria di stress termico.

Dai risultati illustrati nella Tabella 4 è possibile osservare che solo per i mesi estivi Luglio e Agosto, in linea con quanto già osservato nei profili delle variabili meteorologiche in Figura 3, si osserva che meno di metà della popolazione prova disagio mentre per i restanti mesi dell'anno non si registra nessun disagio e vi è una condizione di benessere generalizzato.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
DI (°C)	<21	<21	<21	<21	<21	<21	22	23	<21	<21	<21	<21

Tabella 4. Risultati di *Discomfort Index* calcolati sulle medie mensili di Ta e RH riportate in Tabella 1.

Dai risultati emersi è possibile concludere che nell'area di studio non sussistono criticità climatiche e che la stessa non è soggetta a condizioni di stress termico estreme e che, dunque, ha una qualità climatica tale da non richiedere, allo stato di fatto, urgenti opere di mitigazione.

2. Analisi dei rischi climatici fisici

Partendo dalle condizioni climatiche attuali dell'area, questa sezione riporta le proiezioni climatiche valutate per identificare i rischi climatici fisici; gli impatti sono stati valutati sulla base delle migliori pratiche e degli orientamenti disponibili e tenendo conto delle più attuali conoscenze scientifiche per l'analisi della vulnerabilità e del rischio e delle relative metodologie adottate dal Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico¹³.

La valutazione dei rischi fisici dell'area è effettuata utilizzando proiezioni climatiche avanzate alla massima risoluzione disponibile nella serie esistente di scenari futuri coerenti con la durata prevista dell'attività. In particolare, sono stati considerati gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5¹⁴ che corrispondono a due dei quattro *Representative Concentration Pathways* (RCP) che la comunità scientifica internazionale¹⁵ ha selezionato per rappresentare l'evoluzione delle concentrazioni future di gas ad effetto serra del nostro pianeta. Gli scenari selezionati sono i due più comunemente utilizzati in quanto

¹³ Relazioni di valutazione sui cambiamenti climatici relative a impatti, adattamento e vulnerabilità, pubblicati periodicamente dal Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC), l'organismo delle Nazioni Unite per la valutazione delle informazioni scientifiche prodotte relativamente al cambiamento climatico, <https://www.ipcc.ch/reports/>.

¹⁴ Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, et al (2011) *The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300*. *Clim Change* 109:213-241

Moss R, Babiker M, Brinkman S, et al (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland Mrozinski RD, Cromley

¹⁵ IPCC, 2013. *Summary for Policymakers*. In: Stocker TF, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (United Kingdom) and New York (NY, USA), pp 1-30

rappresentano rispettivamente livelli di emissioni intermedi e alti cui corrispondono incrementi di temperatura medi globali a fine secolo al di sotto dei 2 °C e dei 4 °C rispettivamente.

Per approfondire gli *stressor* climatici che porteranno ad un aumento del rischio nell'area indagata sono stati utilizzati i seguenti strumenti: *ThinkHazard!*¹⁶, un modello web-based sviluppato dal *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* e la piattaforma *Climate-ADAPT*¹⁷ sviluppata dalla Commissione Europea e dall'Agenzia Europea dell'Ambiente.

Considerata la natura del progetto, la posizione dell'area di studio e le caratteristiche ambientali e microclimatiche attuali, la Tabella 5 riporta una panoramica degli *stressor* climatici considerati e una panoramica dei livelli di rischio che saranno poi approfonditi nelle sottosezioni che seguono.

RISCHIO	LIVELLO DI RISCHIO
ALTE TEMPERATURE	Moderato
PRECIPITAZIONI INTENSE	Moderato
SICCITA'	Moderato
INCENDI	Alto

Tabella 5. Rischi climatici fisici e livelli di pericolo riferiti a proiezioni future nell'area di studio.

2.1 Alte temperature

Le alte temperature sono probabilmente il pericolo climatico più urgente per le città in termini di rischi per la vita umana. Il calore influisce sul benessere e può essere letale per gli anziani e le persone in gravi condizioni di salute, in particolare quando si verificano lunghi periodi di giorni caldi e notti calde (ondate di calore)¹⁸. Secondo il sesto rapporto di valutazione del gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici¹⁹ le continue emissioni di gas serra causeranno un ulteriore riscaldamento, ed è praticamente certo che nei prossimi cinquant'anni ci saranno più frequenti estremi di temperatura calda sulla maggior parte delle aree terrestri. Il riscaldamento non sarà uniforme a livello regionale.

Nell'area interessata dal progetto, l'aumento della temperatura nei prossimi cinquant'anni sarà leggermente superiore alla media mondiale. Sarebbe perciò prudente dotare i progetti in quest'area di misure di mitigazione e adattamento al riscaldamento globale.

Il pericolo di calore estremo nell'area di studio è classificato come **moderato** in base alle informazioni sul calore attualmente disponibili nel modello *ThinkHazard!* e questo significa che c'è più del 25% di possibilità che almeno un periodo di esposizione prolungata al calore estremo, con conseguente stress da calore, si verifichi nei prossimi cinque anni.

Il modello *ThinkHazard*, nella stima di tale rischio climatico, calcola l'indice *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT, in °C) e più precisamente il massimo giornaliero WBGT. Tale indice è una misura dello stress termico alla luce diretta del sole e tiene conto di: temperatura, umidità, velocità del vento, angolo del sole e copertura nuvolosa (radiazione solare). Ha un'ovvia rilevanza per la salute umana ed è rilevante

¹⁶ GNU General Public Licence, Version 3, 29 June 2007

¹⁷ <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>

¹⁸ EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

¹⁹ IPCC, 2021: *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press

in tutti i tipi di progetti e settori, compresi quelli relativi alle infrastrutture. Gli studi sullo stress da calore nella letteratura scientifica che fanno uso del WBGT applicano soglie di 28°C e 32°C per classificare il rischio di stress da calore. Le soglie di intensità del danno sono applicate seguendo questa definizione: stress da calore lieve/basso (<28°C), moderato/alto (28-32°C) e grave/molto alto (>32°C).

In Figura 5 è riportata la proiezione su 20 anni della distribuzione dell'indice WBGT in una sezione della Puglia vicina all'area di interesse. Il **valore di WBGT** nella zona di interesse è di **28.11 stress da calore moderato**.

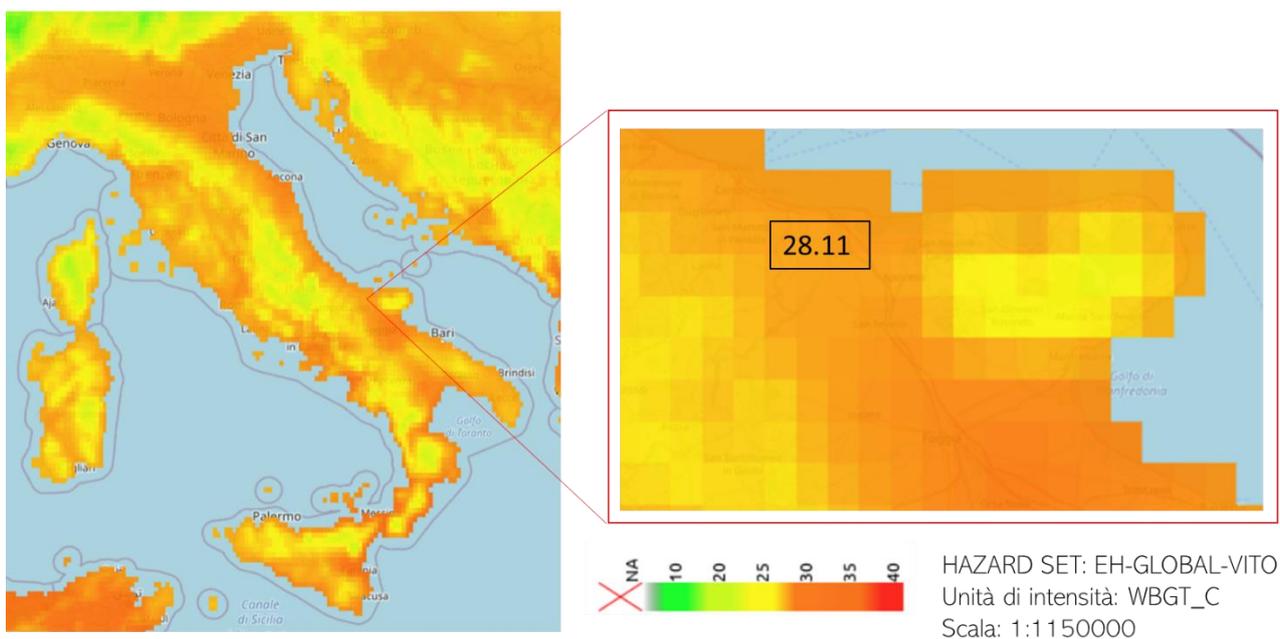


Figura 4. Distribuzione spaziale dell'indice WBGT in una proiezione futura di 20 anni secondo la stima del modello *ThinkHazard!*.

La piattaforma *Climate-ADAPT* per calcolare il possibile sviluppo del clima utilizza gli scenari di emissione dei gas a effetto serra e degli aerosol detti Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (*Representative Concentration Pathways*, RCP) che indicano un andamento rappresentativo delle concentrazioni dei gas a effetto serra e degli aerosol per un determinato obiettivo climatico.

Nella Figura 5 è riportato il numero di ondate di calore estreme previste dal modello *Climate-ADAPT* nei 33 anni compresi tra il 2020 e il 2052 nell'area di riferimento. Il modello considera lo scenario RCP 8.5 che suppone che non vi sia alcun provvedimento in favore della protezione del clima e che quindi le emissioni di gas a effetto serra aumentino in modo continuo fino ad un forzante radiativo di 8.5 W/m² nel 2100.

La previsione per l'area di riferimento è di **9 ondate di calore estremo** (pericolo **moderato/alto**) negli anni tra il 2020-2052.

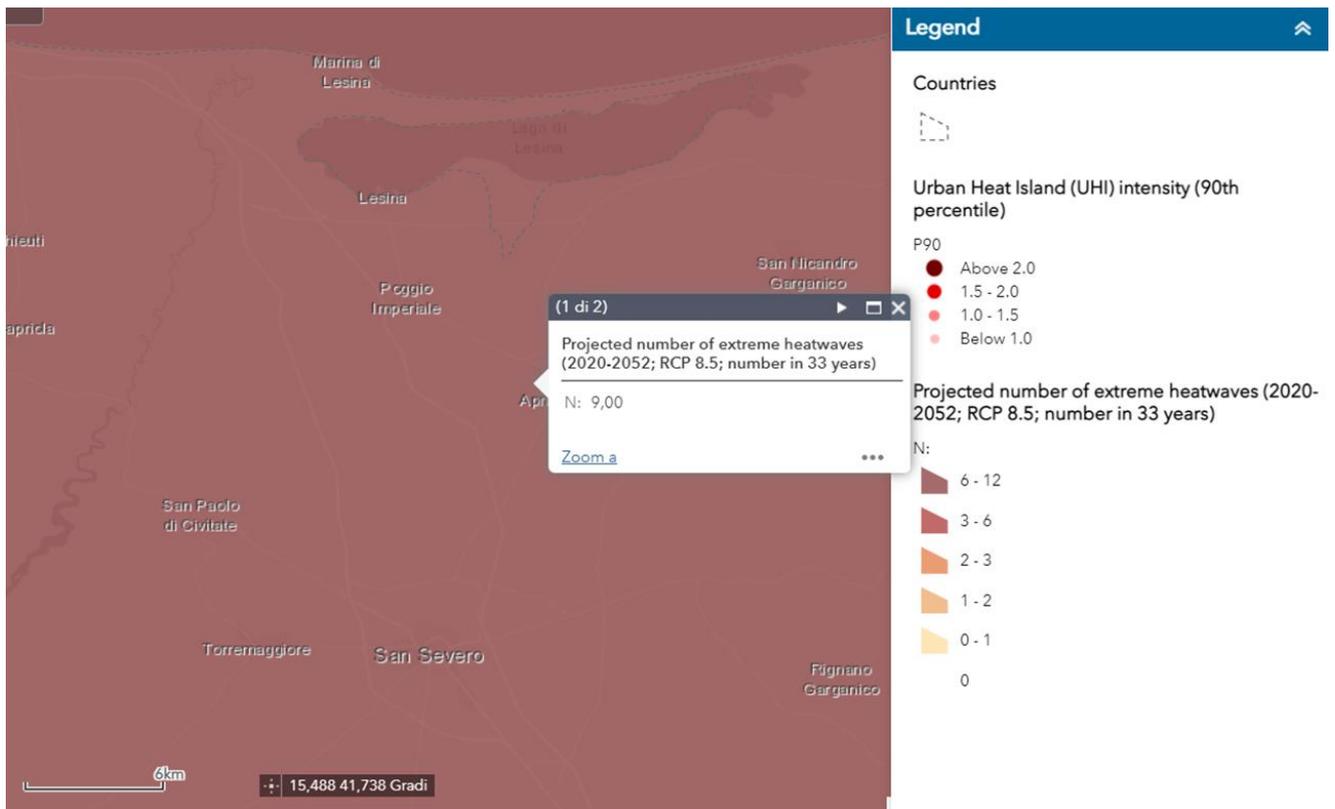


Figura 5. Ondate di calore estreme previste dal modello *Climate-ADAPT* nei 33 anni compresi tra il 2020 e il 2052 nell'area di riferimento

2.2. Precipitazioni intense

Le precipitazioni intense (troppa pioggia che cade troppo velocemente) possono provocare inondazioni e frane. Un decimo della popolazione urbana europea vive attualmente in zone a rischio inondazioni²⁰. Tra il 1980 e il 2017, le inondazioni hanno tolto la vita a circa 4.300 persone e sono costate all'economia europea più di 170 miliardi di euro, rappresentando quasi un terzo dei danni totali dovuti ai pericoli naturali²¹. Si prevede che il riscaldamento globale porti a una maggiore intensità delle precipitazioni e a periodi di siccità più lunghi in Europa²². Le proiezioni mostrano un aumento delle precipitazioni pesanti giornaliere nella maggior parte dell'Europa in inverno, fino al 35% durante il XXI secolo.

In Figura 6 è riportata la previsione, ottenuta con il modello *Climate-ADAPT*, dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 basato sulla media dei risultati di diversi modelli climatici regionali annidati in diversi modelli di circolazione generale.

Per l'area di riferimento il rischio è moderato con un aumento previsto delle precipitazioni intense compreso tra il 5 e 15%.

²⁰ AEA, 2020: *Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe*

²¹ AEA, 2020: *Economic losses from climate-related extremes in Europe*

²² IPCC, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press, 2012), <http://ipcc-wg2.gov/SREX/report/>; Hov et al., *Extreme Weather Events in Europe: Preparing for Climate Change Adaptation*.

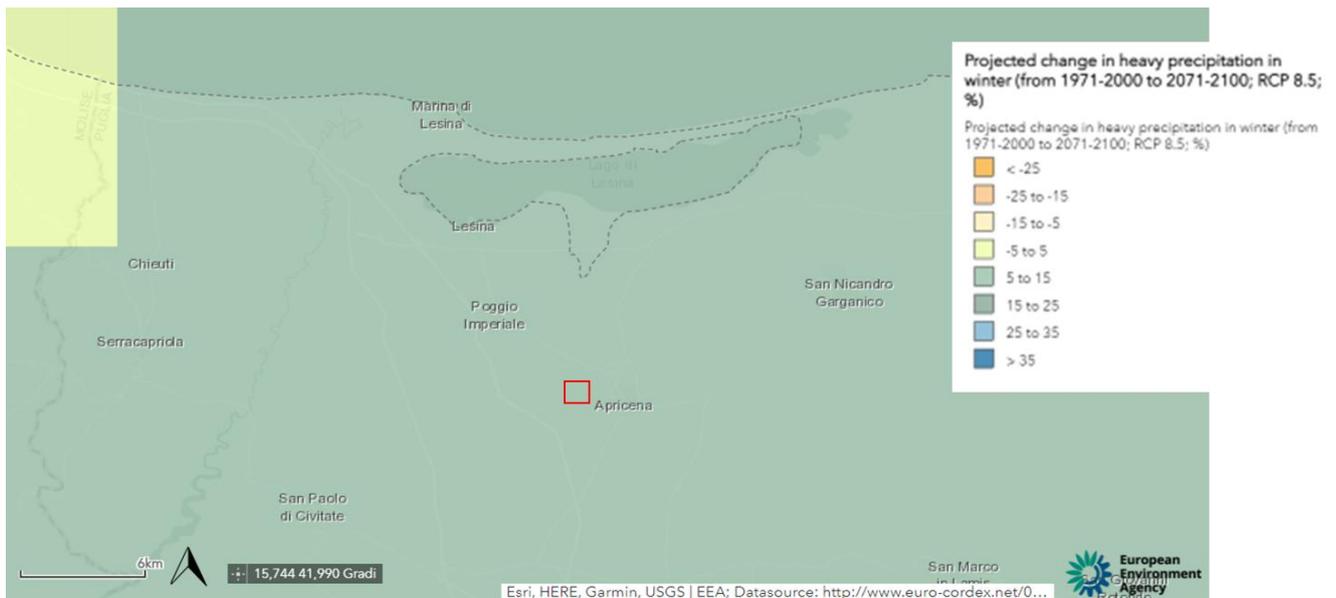


Figura 6. Previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 (*Climate-ADAPT*). L'area di studio è indicata con un quadrato rosso.

2.3. Siccità

Nell'area d'interesse il **rischio** di siccità è classificato, secondo i modelli *Climate-ADAPT* e *ThinkHazard* come **moderato** secondo le informazioni attualmente disponibili. Ciò significa che c'è fino al 20% di possibilità che si verifichino condizioni di siccità nei prossimi 10 anni.

La Figura 7 riporta la previsione, ottenuta con il modello *Climate-ADAPT*, della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5. La frequenza è compresa tra **2 e 4 eventi siccitosi**.

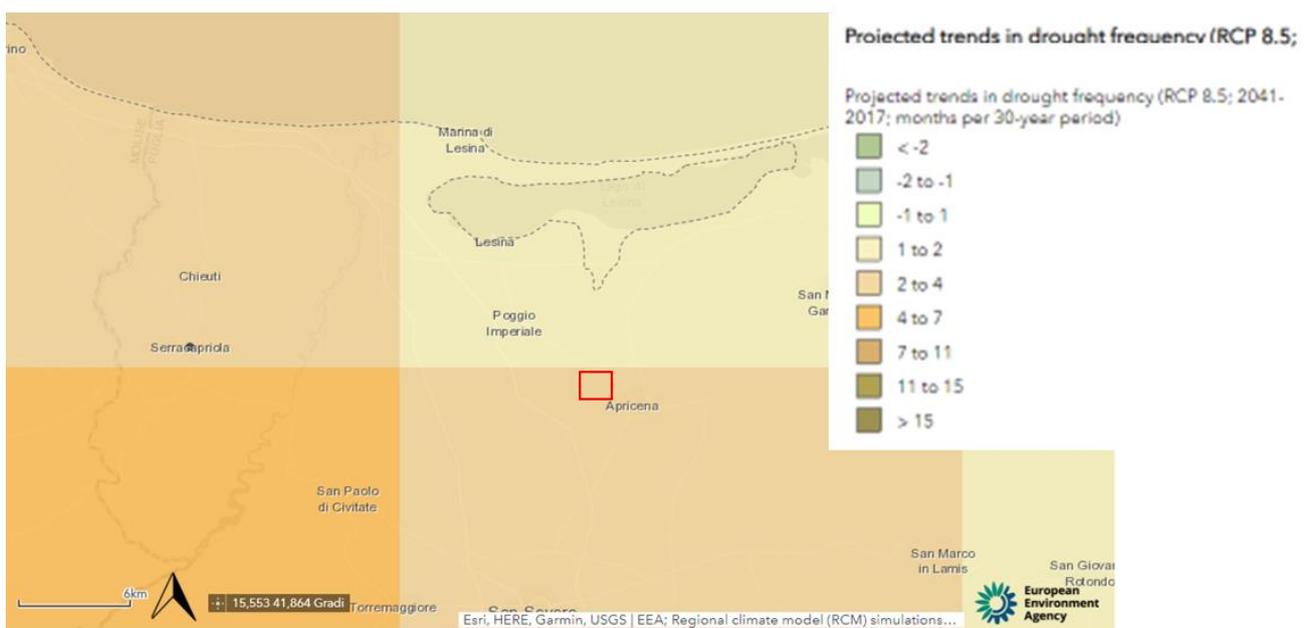


Figura 7. Previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5 (*Climate-ADAPT*). L'area di studio è indicata con un quadrato rosso.

2.4. Incendi

Il rischio di incendi ai margini di molte città europee sta crescendo a causa del verificarsi più frequente di ondate di calore e siccità. Il più alto rischio di incendi si verifica nei paesi dell'Europa meridionale, in particolare in Portogallo, Spagna, Francia meridionale, Italia meridionale e Grecia, dove nel 2018 quasi 100 persone hanno perso la vita in incendi nella zona costiera dell'Attica²³.

Il rischio incendi viene calcolato nel modello *ThinkHazard!* attraverso l'indice *Canadian Fire Weather Index* (FWI) che è il sistema di classificazione del pericolo di incendio più usato a livello mondiale. Il FWI integra diversi fattori meteorologici che influenzano la probabilità che un incendio di una copertura vegetativa si accenda e si diffonda. L'indice si basa su misurazioni istantanee (o previsioni) di temperatura, umidità relativa e velocità del vento. Inoltre, lo storico delle precipitazioni a lungo termine viene usato per valutare la secchezza del materiale combustibile disponibile e dunque per valutare il livello di diffusione del fuoco.

In *ThinkHazard!* le soglie di intensità dannose sono: alta: FWI >30; media: 30 <FWI< 20; bassa: FWI< 20.

Nell'area di interesse il pericolo di incendi è classificato come **alto** secondo le informazioni attualmente disponibili e valutando i prossimi 10 anni, con un indice **FWI** di circa **132**. Questo significa che c'è più del 50% di possibilità che si sviluppi un incendio significativo.

3. Analisi modellistica degli impatti dell'opera sul microclima

Nell'ambito del *Recovery and Resilience Facility* RRP (Regolamento (UE) 2021/241), la produzione di elettricità da pannelli solari è considerata un'attività che contribuisce in modo sostanziale all'obiettivo della mitigazione dei cambiamenti climatici. La diffusione di dette tecnologie è infatti ritenuta necessaria per un'economia climaticamente neutra e per il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per il 2030 e 2050. Tuttavia, per garantire il rispetto del contributo sostanziale alla mitigazione dei cambiamenti climatici e la significativa riduzione di emissioni di gas a effetto serra, le linee guida della Commissione Europea previste dal RRP dispongono l'adozione di tutte le **strategie** disponibili perché la **produzione di elettricità da pannelli solari sia efficiente**.

La produzione di energia rinnovabile attraverso moduli fotovoltaici è strettamente dipendente dalle variabili meteorologiche in termini di efficienza energetica dell'impianto. L'efficienza riportata dai produttori di pannelli solari si riferisce alle prestazioni in condizioni di test standard (STC) solitamente con un irraggiamento di 1000 W/m² e una temperatura delle celle di 25 °C (IEC, 2016). Tuttavia, in condizioni operative reali, la temperatura del modulo è spesso superiore a 25 °C, causando un'efficienza energetica inferiore. Secondo Bücher (1997) per le celle in silicio cristallino, la caduta dell'efficienza, che è descritta dal coefficiente di temperatura (β_{ref}), è circa 0,4 % per ogni °C di aumento della temperatura della cella al di sopra della temperatura di riferimento STC. A seconda del periodo dell'anno, questo può portare a diminuzioni nella produzione di energia fino al 30% in meno di quanto ci si aspetta dalle condizioni STC.

I rischi fisici legati al clima che potrebbero pesare sulla misura sono stati valutati in un'analisi dell'esposizione, riguardante sia il clima attuale che quello futuro (vedi sez. 1 e 2), dalla quale è emerso che nell'area di studio non sussistono attualmente criticità climatiche e che la stessa non è soggetta a

²³ EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

condizioni di stress termico estreme ma, analizzando le proiezioni future, essa si troverà esposta a ondate di calore e sarà soggetta a eventi siccitosi.

Considerati dunque gli scenari climatici futuri, gli obiettivi principali del seguente studio sono: (i) calcolare la variazione dei parametri microclimatici in diversi scenari di progetto valutando l'impatto ambientale dell'opera e di ciascuna misura adottata nel progetto rispetto ad una situazione senza alcun impatto ambientale²⁴, (ii) elaborare le più efficaci soluzioni di adattamento e mitigazione.

3.1. Studio modellistico: ENVI-met

ENVI-met è un modello microclimatico prognostico tridimensionale ad alta risoluzione²⁵ basato sulle leggi fondamentali della fluidodinamica e della termodinamica, che risolve nell'elaborazione dei dati le equazioni di Navier-Stokes (www.envimet.com). Il modello è progettato per indagare sui processi che avvengono alla microscala con una risoluzione orizzontale che va da 0.5 a 10 m e un intervallo di tempo che varia dalle 24 h alle 48 h, con un intervallo temporale compreso tra 1 s e 5 s. Questa risoluzione consente di analizzare le interazioni su piccola scala tra singoli edifici, superfici e vegetazione.

Nello specifico il modello considera:

- flussi di radiazione su uno spettro che va dall'infrarosso all'ultravioletto, rispettando l'ombreggiamento, la riflessione e l'emissione dagli edifici e dalla vegetazione;
- traspirazione, evaporazione e flusso di calore sensibile dalla vegetazione nell'aria;
- tutti i parametri fisici della pianta;
- la temperatura superficiale e la temperatura delle superfici;
- gli scambi di acqua e di calore all'interno del sistema suolo, compreso l'assorbimento di acqua delle piante;
- rappresentazione 3D della vegetazione inclusa la modellizzazione dinamica del bilancio idrico delle singole specie;
- dispersione di gas e particelle. Il modello supporta particelle (inclusi sedimentazione e deposizione su foglie e superfici), gas inerti e gas reattivi del ciclo di reazione NO-NO₂-O₃;
- indici biometeorologici come la temperatura media radiante (MRT, *Temperatura media radiante*), e il PET (*temperatura fisiologica equivalente*).

Attraverso un approccio olistico, il modello considera l'ambiente come un unico organismo in cui tutti i diversi elementi di un ambiente urbano o il paesaggio e la vegetazione interagiscono tra loro. ENVI-met è particolarmente utile nella valutazione di impatto di nuovi interventi di *urban-design* e *land planning* in

²⁴ L'approccio è in linea con la logica del regolamento Tassonomia (Regolamento (UE) 2020/852) ed è ulteriormente corroborato dal principio di precauzione e scaturisce dalla necessità di considerare un danno all'ambiente da una prospettiva assoluta e non relativa.

²⁵ Bruse M., Fleer H., 1998. *Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environment Modelling & Software* 13, 373–384.

quanto è in grado di simulare in modo preventivo gli effetti dovuti a determinate azioni fornendo previsioni utili e numeriche sull'impatto ambientale di nuove strutture o aree verdi.

3.1.1. Metodologia e set-up modellistico

Sono stati analizzati **3 scenari** attraverso il modello di fluidodinamica computazionale (CFD) ENVI-met: **scenario 1 attuale** (ambiente allo stato di fatto), **scenario 2 fotovoltaico** (moduli fotovoltaici), **scenario 3 fotovoltaico con fasce perimetrali a vegetazione arbustiva e arborea** (ampia 10m).

Le fasce perimetrali a vegetazione arbustiva e arborea intorno agli impianti fotovoltaici sono un'ottima strategia ecologica per garantire l'efficienza della produzione di energia elettrica da pannelli solari, specialmente nei periodi più caldi estivi in cui il rischio delle alte temperature si intensifica. Inoltre, considerata la presenza di una cava dismessa, la vegetazione svolge funzione di barriera fisica e porosa alla dispersione delle polveri da cava. Tali effetti sono investigati nel dettaglio nella sezione 3.2.

La metodologia e il processo investigativo del seguente studio sono stati validati scientificamente in pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali con peer-review²⁶.

Il set-up del modello ENVI-met è riportato in Tabella 6. Le simulazioni svolte hanno avuto una durata di 16 h in totale. Per migliorare l'efficienza computazionale è stata simulata solo una piccola porzione di area poiché la stessa può essere replicata nello spazio. L'area simulata in 3D (dominio computazionale) ha una dimensione di 500 m (orizzontale) x 500 m (verticale), con un'altezza verticale di 40 m. Il dominio computazionale, che include edifici e vegetazione descritti nella Sezione 2, è stato suddiviso con una griglia di risoluzione 2 m x 2 m x 2 m con eccezione delle prime 5 celle (vicine al suolo) aventi una risoluzione verticale di 0.4 m. Per migliorare l'accuratezza e stabilità del modello sono state aggiunte 10 *nesting grids* al contorno. Per l'input meteorologico è stata fissato un valore medio e massimo di temperatura e di umidità relativa in 24h, una velocità del vento e una direzione del vento coerenti con i dati riportati nella rosa dei venti in Figura 2. Per studiare la deriva delle polveri da cava e analizzare nel dettaglio l'azione delle misure di mitigazione, è stata inserita una sorgente di 100 ug di polveri all'interno del dominio computazionale. La concentrazione utilizzata è casuale poiché l'obiettivo dell'indagine era individuare il cambiamento tra gli scenari investigati in termini di distribuzione spaziale delle polveri.

²⁶ Gatto, E., Buccolieri, R., Aarrevaara, E., Ippolito, F., Emmanuel, R., Perronce, L., Santiago, J.L., 2020. Impact of urban vegetation on outdoor thermal comfort: comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a Northern European city (Lathi, Finland). *Forests*, 11, 228.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perronace, L., Santiago, J., 2021a. The Challenge in the Management of Historic Trees in Urban Environments during Climate Change: The Case of Corso Trieste (Rome, Italy). *Atmosphere*, 12, 500.

Gatto, E., Ippolito, F., Rispoli, G., Carlo, O. S., Santiago, J.L., Aarrevaara, E., Emmanuel, R., Buccolieri, R., 2021b. Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy). *Climate*, 9, 116.

Semeraro, T., Aretano, R., Barca, A., Pomes, A., Del Giudice, C., Gatto, E., Lenucci, M., Buccolieri, R., Emmanuel, R., Gao, Z., Scognamiglio, A., 2020. A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems. *Land*, 9, 238.

		METEOROLOGIA settata nel modello	MISURE DI COMPENSAZIONE E MITIGAZIONE
ATTUALE	<p>SCENARIO 1</p> 	<p>Giorno simulato: 02 Agosto 2021</p> <p>Media Temperatura dell'aria: 27 °C</p>	Nessuna.
OPERA	<p>SCENARIO 2</p> 	<p>Valore massimo Temperatura dell'aria: 33 °C</p> <p>Media Umidità relativa: 55 %</p> <p>Valore massimo Umidità relativa: 74 %</p>	Nessuna.
OPERA + MITIGAZIONE	<p>SCENARIO 3</p> 	<p>Velocità del vento: 1.50 m/s</p> <p>Direzione del vento: 290°</p>	Fascia perimetrale a vegetazione arbustiva e arborea ampia 10 m.

Tabella 6. Scenari investigati con set-up delle condizioni meteorologiche al contorno.

3.2. Parametri investigati

3.2.1. Dispersione delle polveri da cava

Considerata la presenza di una cava di estrazione in prossimità dell'area di interesse (Figura 8) e che le polveri della stessa potrebbero compromettere l'efficienza dei moduli solari, è stata valutata, con ENVI-met, la dispersione delle polveri inserendo nel dominio computazionale una sorgente diffusa areale a 100 m dall'area con fotovoltaico.



Figura 8. Cava di estrazione in prossimità dell'area sottoposta a progetto.

3.2.2. Microclima

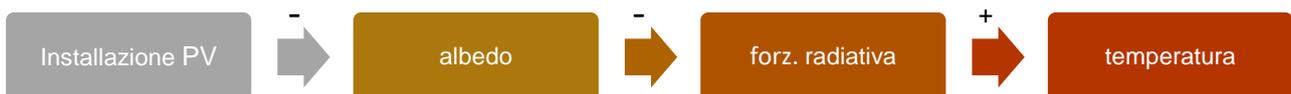
L'impatto sul **microclima** è stato valutato con ENVI-met nei vari scenari strategici e di progetto in termini di **albedo**, **temperatura dell'aria Tair (°C)**, **RH (%)**, **temperatura media radiante MRT (°C)** e **percentuale di umidità al suolo (%)**. Lo studio di specifici indici (temperatura media radiante, *temperatura fisiologica equivalente PET*) ha permesso invece di valutare l'impatto delle scelte progettuali sul **comfort termico**.

3.2.2.1. Albedo e inquinamento termico

Con il termine **albedo** si indica il rapporto tra la quantità di radiazione solare riflessa e quella incidente ed è solitamente espresso come una percentuale o un valore decimale, con 1 che indica un riflettore perfetto e 0 che indica un materiale che assorbe tutta la luce in ingresso.

I pannelli fotovoltaici (PV) utilizzano rivestimenti antiriflesso e superfici strutturate per massimizzare la radiazione solare in entrata assorbita dalla cella e minimizzare la quantità di radiazione riflessa e presentano valori di albedo piuttosto bassi: in laboratorio si può scendere fino allo 0.01, ma valori più realistici ricavabili da installazioni reali si aggirano attorno allo 0.10²⁷. Di contro, secondo i valori di albedo riportati dalla norma UNI 8477, l'albedo di un terreno incolto si aggira intorno allo 0.30.

Quindi, la copertura di terreno con pannelli fotovoltaici riduce l'albedo della superficie terrestre, aumentando così la forzante radiativa e, in ultima analisi, aumentando la temperatura.



Per tale ragione si è ritenuto necessario quantificare la variazione di albedo tra gli scenari col fine di quantificare l'impatto termico delle soluzioni adottate. L'albedo assegnato ai pannelli fotovoltaici all'interno del dominio computazionale è di 0.10 mentre l'albedo del terreno è di 0.30.

²⁷ Nemet G. F., 2009. Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics. *Environmental science & technology*, 43, 2173-2178.

3.2.2.2. Indici di comfort termico

Temperatura media radiante MRT

La MRT è definita come “la temperatura di un involucro nero uniforme che scambia la stessa quantità di calore per irraggiamento con l’occupante dell’ambiente reale” (ASHRAE 55-92²⁸). Essa è espressa dalla formula²⁹:

$$MRT = [(T_g + 273.15)^4 + \frac{1335 \times 10^8 v^{0.71}}{\epsilon D^{0.4}} \times (T_g - T_{air})^4]^{1/4} - 273.15$$

dove T_g = temperatura di bulbo umido (°C); v = velocità del vento (ms^{-1}); T_{air} = temperatura dell’aria (°C); D = diametro del globo (m) = 44 mm e ϵ = emissività del globo. Il modello ENVI-met simula accuratamente i valori di picco della MRT diurna³⁰, una caratteristica di grande importanza quando si tratta dell’indagine sull’analisi del **comfort termico**; essa considera tutti i flussi di radiazione a onde corte e lunghe, sia quelli emessi dalla radiazione solare, che quelli provenienti da ambienti con temperature superficiali differenti e la sua distribuzione spaziale risulta influenzata dalla posizione e dal modello spaziale della vegetazione.

Temperatura fisiologica equivalente PET

Il PET è un indice di comfort termico basato su un modello prognostico del bilancio energetico umano che calcola la temperatura della pelle, la temperatura del nucleo corporeo, il tasso di sudorazione e, come variabile ausiliaria, la temperatura degli indumenti³¹.

Si basa sul *Munich Energy Balance Model for Individuals* (MEMI) che definisce l’equazione del corpo umano come:

$$M + W + R + C + ED + ERe + ESw + S = 0$$

dove M è l’attività metabolica, W è il lavoro fisico prodotto, R è la radiazione netta del corpo, C è il flusso di calore convettivo, ED è il flusso di calore latente che si diffonde attraverso la pelle sotto forma di vapore acqueo, ERe è la somma dei flussi di calore per il riscaldamento e l’umidificazione dell’aria inspirata, ESw è il flusso di calore dovuto all’evaporazione del sudore, S è il flusso di calore di accumulo per il riscaldamento o il raffreddamento della massa corporea. Tutti i valori sono espressi in *watt*. Il PET si presta bene alla valutazione della componente termica di diversi climi. È preferibile ad altri indici termici per la sua unità di misura (°C), che rende i risultati più comprensibili e in linea con la moderna terminologia biometeorologica umana.

L’indice PET è stato calcolato da ENVI-met che ha rielaborato i flussi di radiazione all’interno dell’area investigata, la temperatura dell’aria, la velocità del vento e la radiazione solare.

²⁸ American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) 1992. *Standard 55-92: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, Georgia

²⁹ Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., Holmer, B., 2007. *Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting*. *International Journal of Climatology*, 27, 983-1993

³⁰ Gatto, E., Buccolieri, R., Aarrevaara, E., Ippolito, F., Emmanuel, R., Perronce, L., Santiago, J.L., 2020. *Impact of urban vegetation on outdoor thermal comfort: comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a Northern European city (Lathi, Finland)*. *Forests*, 11, 228.

³¹ Höppe, P. 1999. *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*. *Int J Biometeorol* 43, 71-75.

I valori di PET e le corrispondenti percezioni termiche sono indicati nella Tabella 7.

SCALA DI VALORI (PET °C)	PERCEZIONE TERMICA
<4	Molto freddo
4-8	Freddo
8-13	Fresco
13-18	Fresco moderato
18-23	Neutro
23-29	Caldo leggero
29-35	Caldo moderato
35-41	Molto caldo
>41	Caldo estremo

Tabella 7. Scala di percezione termica PET

4. Risultati

Dispersione delle polveri da cava

In Figura 9 sono riportate le mappe spaziali di distribuzione delle polveri da cava nello scenario con il fotovoltaico (scenario A) e nello scenario con fotovoltaico e barriera vegetazionale (scenario B). Dalle mappe si può osservare una **diminuzione media delle polveri da cava pari a 0.08 ug/s**. In particolare, se si osserva la mappa dello scenario B, è possibile osservare come **la deriva delle polveri sia in parte bloccata dalla barriera vegetazionale** e non raggiunga i 250 m a differenza dello scenario A nel quale si osservano basse concentrazioni di polveri superare i 250 m.

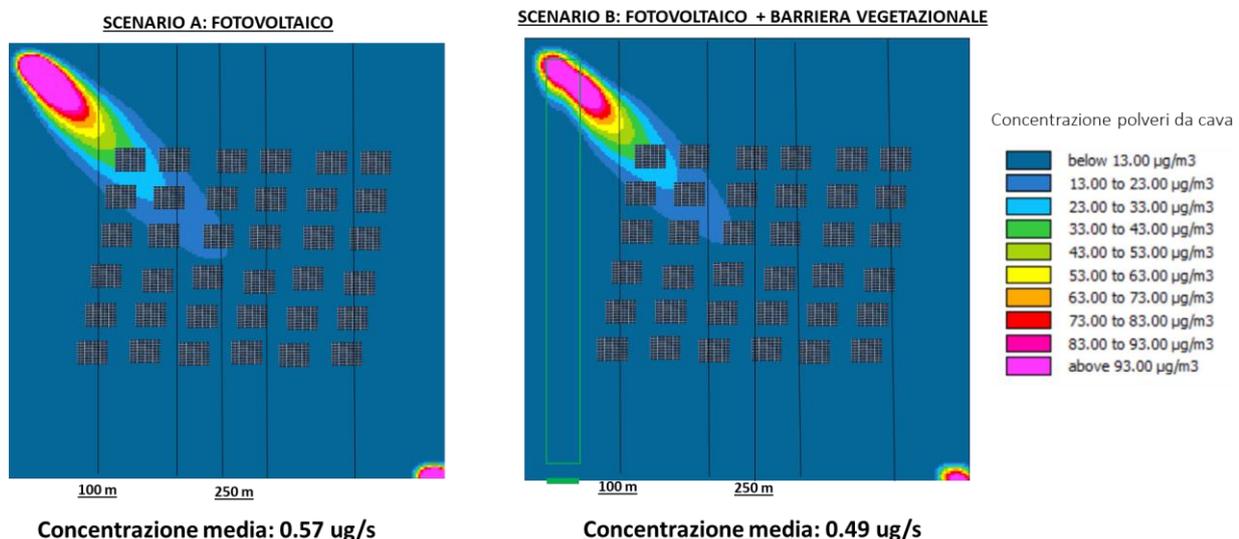


Figura 9. Mappe spaziali di distribuzione di polveri da cava estratte dal modello CFD ENVI-met.

Micrometeorologia e Comfort termico

La Tabella 8 riporta le medie spaziali di *Albedo*, *Tair*, *RH* ed *MRT* alle 15:00, orario in cui si registra il valore massimo di temperatura e in cui è possibile stimare il miglior contributo delle soluzioni di

adattamento previste. I dati di *albedo* e di *RH del suolo* sono stati estratti ad altezza 0 mentre i dati di *Tair*, *RH* e *MRT* ad altezza pedestre pari a 1.5m.

Come si può osservare, le medie spaziali mostrano una variazione poco importante dell'albedo: passando dallo scenario 1 (scenario attuale) allo scenario 2 e 3 (fotovoltaico) si ha una diminuzione media pari a 0.01.

Per verificare l'impatto dell'effetto albedo sull'inquinamento termico l'indagine è stata approfondita con l'analisi dei valori spaziali di **Tair** e **RH**.

Osservando i **valori della temperatura**, si osserva una **diminuzione** importante in tutti gli scenari di progetto confrontandoli con lo scenario attuale. Nel fotovoltaico (scenario 2) si registra una diminuzione media spaziale di **1.31 °C**. Tale diminuzione aumenta nello scenario 3 dove la presenza della vegetazione mitiga la temperatura portando ad una differenza di **1.72 °C** rispetto allo scenario attuale.

I **valori di umidità relativa aumentano** in tutti gli scenari di progetto. Tale dato è strettamente correlato all'aumento della percentuale di umidità al suolo. Il maggior ombreggiamento, dovuto principalmente alla presenza di pannelli solari, trattiene maggiori concentrazioni di acqua e porta ad un aumento dell'umidità relativa dell'aria nelle zone sottostanti i moduli. Tale aumento della RH in atmosfera è pari a 4.57% nello scenario fotovoltaico e a 5.69% nello scenario con vegetazione. La concentrazione di umidità nel suolo, invece, aumenta di 2.17% nel fotovoltaico e del 31.98% nello scenario con vegetazione.

L'effetto positivo dell'ombreggiamento è maggiormente confermato dal calcolo dell'indice MRT la cui misura dipende strettamente dallo stesso. In generale si osserva un miglioramento della MRT **negli scenari di progetto con una diminuzione massima di 9.17 °C nello scenario 3. Si ha conferma del miglioramento del comfort termico dall'analisi dell'andamento del PET**. Si passa, infatti, dalla percezione termica di "**caldo estremo**" dello scenario attuale alla percezione di "**caldo**" nello scenario fotovoltaico e fotovoltaico con vegetazione con una diminuzione registrata è di 4.69 e 6.4 °C rispettivamente.

	Albedo	Tair (°C)	RH (%)	RH del suolo (%)	MRT (°C)	PET (°C)
SCENARIO 1	0.31	29.49	43.43	0.43	63.5	44.68 <i>(caldo estremo)</i>
SCENARIO 2	0.30	28.18	48.00	2.60	58.92	40.00 <i>(caldo)</i>
SCENARIO 3	0.30	27.77	49.12	32.41	54.33	38.28 <i>(caldo)</i>

Tabella 8. Media spaziale dei parametri investigati nei diversi scenari alle 15:00.

Quanto emerso dai risultati rivela che **l'effetto dell'albedo** sul comfort termico è mitigato dall'effetto della copertura arborea³² e dalla stessa presenza dell'impianto fotovoltaico che, per effetto dell'ombreggiamento, riduce la temperatura e aumenta la concentrazione di acqua nel suolo. Perciò,

³²Mohammad, P. Aghlmand, S., Fadaei, A., Gachkar, S., Gachkar, D., Karimi, A., 2021. Evaluating the role of the albedo of material and vegetation scenarios along the urban street canyon for improving pedestrian thermal comfort outdoors. *Urban Climate*, 40, 100993

per i valori di albedo considerati e per gli scenari investigati, la diminuzione dell'albedo **non comporta un rischio di inquinamento termico**.

In Figura 10 e 11 sono riportate le mappe spaziali di Tair (°C) e PET (°C) alle 15:00 estratte dal modello ad altezza pedestre di 1.5m per gli scenari esaminati. Le mappe spaziali consentono di osservare le differenze di temperatura e comfort termico all'interno del dominio computazionale e di discriminare l'effetto locale delle misure di mitigazione e dei moduli fotovoltaici.

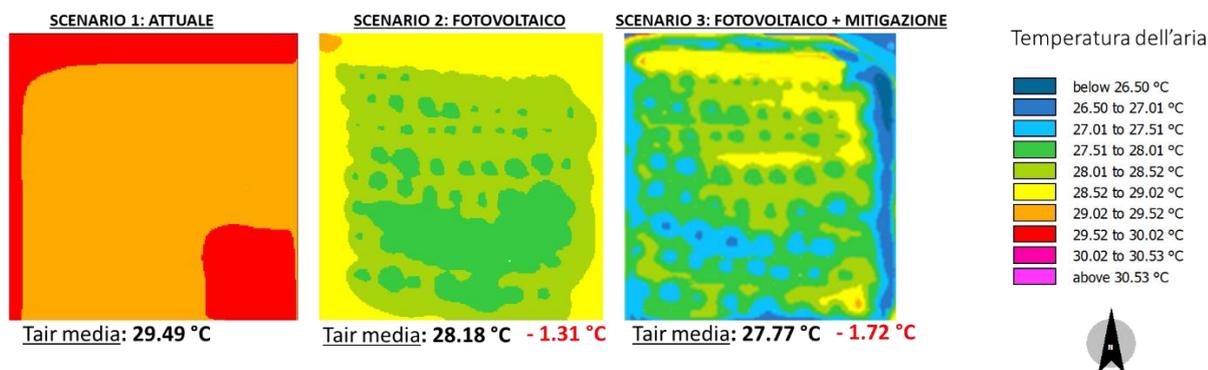


Figura 10. Mappe spaziali di Tair alle 15:00 estratte ad altezza pedestre negli scenari esaminati. In rosso è riportata la differenza media rispetto allo scenario 1 attuale.

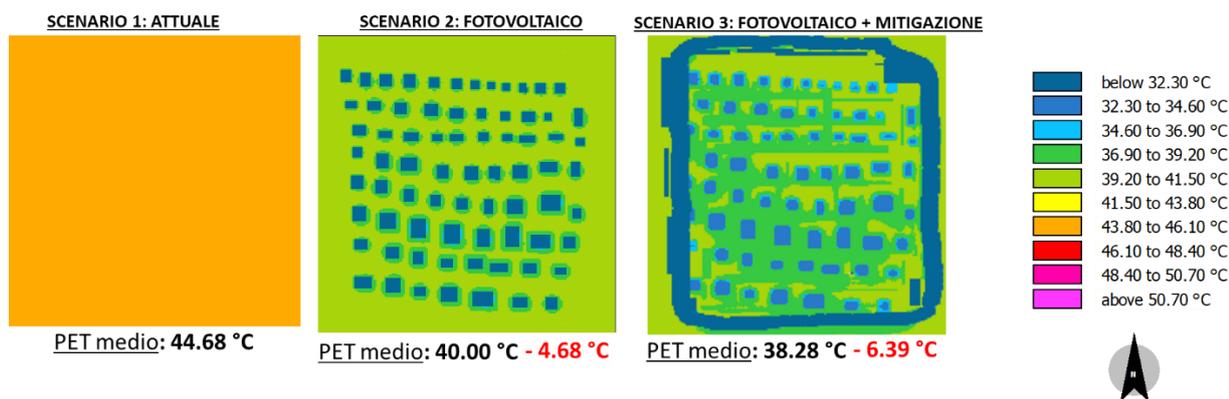


Figura 11. Mappe spaziali di PET alle 15:00 estratte ad altezza pedestre negli scenari esaminati. In rosso è riportata la differenza media rispetto allo scenario 1 attuale.

Dalle mappe spaziali è evidente l'effetto localizzato della vegetazione nello Scenario 3 sia sulla temperatura dell'aria che sull'indice PET. Una tale diminuzione della temperatura è importante per garantire l'efficienza energetica dell'impianto, la riduzione della richiesta idrica e per garantire un comfort termico ottimale per il benessere animale.

5. Piano di Monitoraggio Ambientale

Considerata l'importanza dei rischi climatici legati alle proiezioni future è necessario che le condizioni climatiche dell'area siano costantemente monitorate nella fase ante operam, durante la fase di cantiere, di esercizio e in seguito alla dismissione dell'impianto. In particolare dovranno essere monitorati i seguenti dati meteorologici: velocità del vento (anemometro a monte e a valle dell'impianto in funzione della direzione principale del vento), temperatura radiante (al di sopra della superficie dei pannelli), temperatura dell'aria (a monte e a valle dell'impianto in funzione della direzione principale del vento) e

umidità relativa (a livello del suolo e a valle dell'impianto a una distanza dal perimetro dell'impianto pari al doppio dell'altezza dei pannelli fotovoltaici).

Per il monitoraggio si considerino gli indicatori analizzati nel presente elaborato sintetizzati nella Tabella 9.

CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA ATTUALE							
T _{media}	T _{max}	T _{min}	Precipit. media	Precipit. max	Precipit. min	RH _{max}	RH _{min}
15.6 °C	32.4 °C (LUGLIO-AGOSTO)	2 °C (GENNAIO)	632 mm	69 mm (NOVEMBRE)	29 mm (LUGLIO)	77% (DICEMBRE)	52% (LUGLIO)

PROIEZIONI CLIMATICHE INTENSE			
T _{estrema}	Precipitazioni	Siccità	Incendi
9 ondate di calore estremo	5 – 15% aumento precipit. intense	2-4 eventi siccitosi	FWI: 132

PROIEZIONI CLIMATICHE INTENSE*						
	Albedo	T _{air} (°C)	RH (%)	RH del suolo (%)	MRT (°C)	PET (°C)
SCENARIO 2	0.30	28.18	48.00	2.60	58.92	40.00
SCENARIO 3	0.30	27.77	49.12	32.41	54.33	38.28

Tabella 9. Sintesi degli indicatori analizzati nel presente elaborato tecnico che caratterizzano le condizioni climatiche attuali e future dell'area di studio. Gli stessi sono strumento di confronto e analisi nelle fasi di monitoraggio ambientale dell'opera. T_{media}: temperatura media annuale considerando il dataset storico; T_{max}: temperatura massima annuale considerando il dataset storico; T_{min}: temperatura minima annuale considerando il dataset storico; Precipit._{media}: precipitazione media annuale considerando il dataset storico; Precipit._{max}: precipitazione massima annuale considerando il dataset storico; Precipit._{min}: precipitazione minima annuale considerando il dataset storico; RH_{max}: umidità relativa massima annuale considerando il dataset storico; RH_{min}: umidità relativa minima annuale considerando il dataset storico; T_{estrema}: temperatura estrema. *I dati si riferiscono alle ore 15:00.

6. Conclusioni

Lo studio modellistico di fluidodinamica computazionale condotto per porzioni di area di 500m x 500m ha permesso di valutare gli effetti sul microclima derivanti dalla realizzazione di un impianto fotovoltaico in un'area a vocazione industriale del comune di Apricena (FG). Al fine di valutare la potenzialità delle strategie di mitigazione e compensazione previste e quantificare la variazione dei parametri di *albedo*, *T_{air}*, *RH*, *RH del suolo*, *MRT* e *PET* sono stati simulati diversi scenari che sono stati confrontati con lo scenario allo stato di fatto.

Le aree simulate possono essere replicate nello spazio e dunque i risultati ottenuti possono ritenersi validi per l'intera area di intervento.

I risultati sono in linea con quanto già osservato in letteratura scientifica e cioè che la **vegetazione** svolge **funzioni regolatrici** nel controllo delle condizioni **micrometeorologiche** e sulla percezione di comfort termico attraverso ombreggiamento ed evapotraspirazione³³.

³³ FAO., 2016. *Guidelines on urban and peri-urban forestry*, by F. Salbitano, S. Borelli, M. Conigliaro and Y. Chen. FAO Forestry Paper No. 178. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Nello specifico, dai risultati ottenuti con il modello ENVI-met e analizzando nello specifico i dati della temperatura media radiante si ha evidenza che il maggior ombreggiamento dovuto alla presenza di pannelli solari **aumenta l'umidità del suolo e diminuisce la probabilità che si verifichino eventi siccitosi**. In un contesto climatico europeo, è stato osservato che l'ombreggiamento comporta un **risparmio idrico** compreso fra il 14 ed il 29% a seconda del livello di ombreggiamento realizzato³⁴. Inoltre, l'aumento dell'umidità relativa dell'aria nelle zone sottostanti i moduli aumenta la produttività dell'impianto e produce quindi evidenti **vantaggi nella conversione in energia elettrica**.

Per le ragioni sopra esposte **è importante dotare l'impianto di aree imboschite e fasce di mitigazione che limitino le alte temperature nei mesi più caldi e garantiscano un'alta efficienza energetica**.

Inoltre, tale azione di mitigazione microclimatica della vegetazione è di strategica importanza considerata la presenza, nel progetto, di aree destinate al pascolo e in linea con quanto riportato nella sottosezione 1.1.1 riguardo la relazione tra stress termico e benessere animale.

Non vi sono prove di effetti negativi significativi connessi agli effetti diretti e indiretti primari della misura nel corso del suo ciclo di vita in relazione all'obiettivo ambientale dell'adattamento ai cambiamenti climatici.

Da come si è visto, sebbene l'albedo diminuisca, **l'effetto della vegetazione porta comunque un effetto positivo sulla temperatura dell'aria con una diminuzione massima registrata di 1.72 °C. Il miglioramento massimo del comfort termico, misurato in termini in PET, è di 6.4 °C.**

Quanto riscontrato è in linea con diversi studi nel settore del fotovoltaico che confrontano il calore emesso da una centrale termoelettrica convenzionale con l'incremento di energia assorbita per la diminuzione dell'albedo³⁵. I pannelli causano un effetto che mediamente è 30 volte minore rispetto a quello dovuto all'incremento di gas serra che si verifica con la combustione di gas naturale, carbone e olio combustibile; anche sommando tutte le ipotesi più sfavorevoli (impianti posti in luoghi con albedo relativamente alte come il deserto, basso rendimento dei pannelli ecc.), il fotovoltaico rimane una soluzione migliore.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perronace, L., Santiago, J., 2021a. *The Challenge in the Management of Historic Trees in Urban Environments during Climate Change: The Case of Corso Trieste (Rome, Italy)*. *Atmosphere*, 12, 500.

Gatto, E., Ippolito, F., Rispoli, G., Carlo, O. S., Santiago, J.L., Aarrevaara, E., Emmanuel, R., Buccolieri, R., 2021b. *Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy)*. *Climate*, 9, 116.

³⁴ Marrou, H., Dufour, L., Wery, J. 2013. *How Does a Shelter of Solar Panels Influence Water Flows in a Soil-Crop System?* In: *European Journal of Agronomy* 50, 38-51.

³⁵ Nemet Gregory F., 2009. *Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics*. *Environmental science & technology*, 43, 2173-2178.

Claude-Alain R., 2001. *Solar energy and global heat balance of a city*. *Solar Energy*, 70, 255-261.