

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO AGRIVOLTAICO
E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN
LOCALITA' LAMA PAGLIARA
COMUNE DI RUVO DI PUGLIA (BA)
DENOMINAZIONE IMPIANTO - PVA004 RUVO LAMA PAGLIARA
POTENZA NOMINALE 12.7 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

PROGETTAZIONE E SIA

HOPE engineering

ing. Fabio PACCAPELO
ing. Andrea ANGELINI
arch. Gaetano FORNARELLI
dott.ssa Anastasia AGNOLI

Studio ALAMI

Arch.Fabiano SPANO
Arch. Valentina Marta RUBRICHI
Arch. Susanna TUNDO

AGRONOMIA E STUDI COLTURALI

dott.ssa Lucia PESOLA

STUDI SPECIALISTICI E AMBIENTALI

MICROCLIMATICA
dott.ssa Elisa GATTO

ARCHEOLOGIA
dott.ssa Domenica CARRASSO

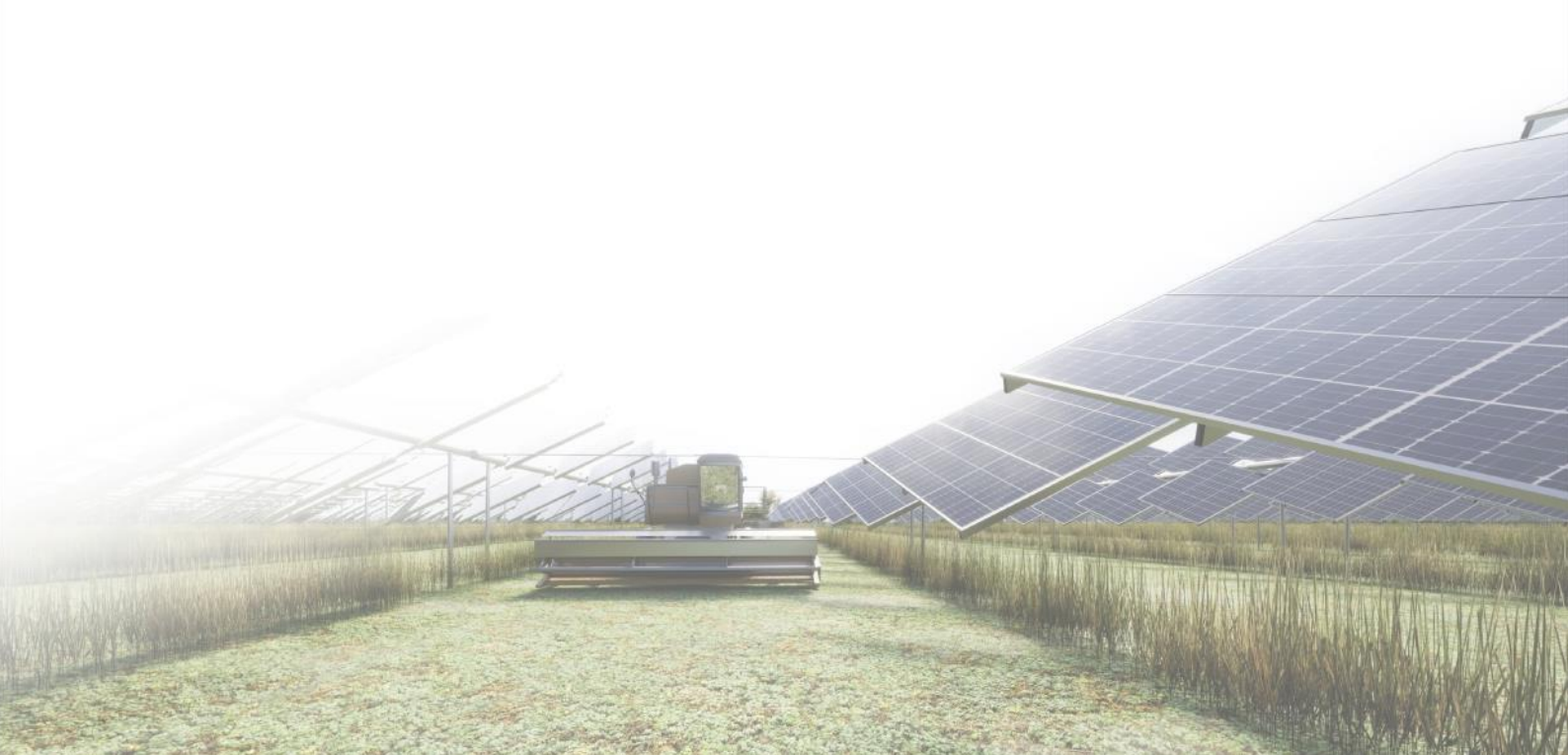
GEOLOGIA
Apogeo Srl

ACUSTICA
dott.ssa Sabrina SCARAMUZZI

R.2 RELAZIONI SPECIALISTICHE

R.2.9 Analisi microclimatica del sito

REV.	DATA	DESCRIZIONE
	12-23	prima emissione





Sommario

Introduzione e nota metodologica	5
1. Inquadramento meteo-climatico	6
1.1. Caratterizzazione climatica: gli indicatori climatici	9
1.1.1. Continentalità / oceanicità	10
1.1.2. Aridità / Umidità	12
1.1.2.1. Pluviofattore di Lang	12
1.1.2.2. Indice di De Martonne	12
1.1.2.3. Indice di Crowther	13
1.1.2.4. Indice bioclimatico di J. L. Vernet	14
1.1.2.5. Indice FAO	14
1.1.2.6. Quoziente pluviometrico di Emberger	14
1.2. Caratterizzazione climatica: i risultati per l'area di interesse	15
1.3. Climogrammi	16
1.3.1. Diagramma ombrotermico	16
1.3.2. Diagramma Walter & Lieth	17
1.3.3. Climogramma di Peguy	19
2. Analisi dei rischi climatici fisici	19
2.1. Proiezioni climatiche future: un'analisi a scala regionale	20
2.1.1. Proiezioni CMIP6	20
Scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5	21



3.1.1.1	Variazione delle principali variabili climatiche	21
3.1.1.2.	Impatto sui servizi ecosistemici	24
4.	Stressor climatici nell'area di interesse: un'analisi a scala locale	27
4.1.	Alte temperature.....	28
4.2.	Precipitazioni intense	29
4.3.	Siccità.....	31
4.4.	Indice di sfruttamento della risorsa idrica	33
4.5.	Incendi.....	35
4.6.	Innalzamento del livello del mare	37
5.	Resilienza dell'impianto agrivoltaico al rischio climatico: strategie di compatibilità e gestione.....	38
6.	Analisi modellistica previsionale.....	39
1.	ENVI-met: set up modellistico.....	40
1.1.	Parametri modellistici investigati.....	42
	<i>Calcolo del comfort termico: l'indice Temperatura fisiologica equivalente PET</i>	42
2.	Analisi dei servizi ecosistemici legati allo stoccaggio e assorbimento di inquinanti	43
3.	Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica.....	45
3.1.	Analisi dell'impatto del progetto agrivoltaico: le mappe tematiche.....	46
	<i>Temperatura dell'aria (Tair)</i>	46
	<i>Umidità relativa atmosferica (RHair)</i>	48
	<i>Turbolent kinetic energy (TKE)</i>	49
	<i>Temperatura delle superfici (Tsoil)</i>	50



Umidità relativa del suolo (RH_{soil})	51
4. Conclusioni	53



Introduzione e nota metodologica

Il presente elaborato tecnico ha come **obiettivo** lo **studio e la caratterizzazione della condizione climatica e dei mutamenti prevedibili** della stessa in un'area sita nel territorio comunale di **Ruvo di Puglia** (BA, Italia) da destinare alla realizzazione di un impianto agrivoltaico. È altresì mirato alla definizione di un Indice di Rischio Climatico – *Climate Risk Index* che aumenti la resilienza dell'intervento e promuova il *climate proofing* degli investimenti auspicato dalla Commissione Europea nella Strategia Europea per l'Adattamento ai Cambiamenti Climatici¹.

Nello specifico, tale studio tiene conto degli **Orientamenti tecnici sull'applicazione del principio "non arrecare un danno significativo"**² a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e resilienza³ ed è, quindi, altresì focalizzato 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. L'analisi condotta è inoltre conforme agli **Orientamenti tecnici per infrastrutture a prova di clima nel periodo 2021-2027 (2021/C 373/01)** e si configura come una documentazione consolidata di **screening climatico/resa a prova di clima**.

Le infrastrutture energetiche sono particolarmente esposte ai cambiamenti a lungo termine. Si è perciò ritenuto necessario considerare i cambiamenti climatici a partire dalle fasi iniziali del progetto, attraverso l'utilizzo di opportuni criteri di progettazione, l'adozione di misure tecnologiche specifiche e l'analisi di proiezioni climatiche future su scala appropriata.

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

² 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.

³ 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 un danno significativo agli obiettivi ambientali ai sensi dell'articolo 17 del regolamento (UE) 2020/852 (principio «non arrecare un danno significativo»)"



1. Inquadramento meteo-climatico

Secondo la classificazione di Köppen - Geiger⁴, l'areale in oggetto, sito nel comune di Ruvo di Puglia (BA), 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 (Figura 1).

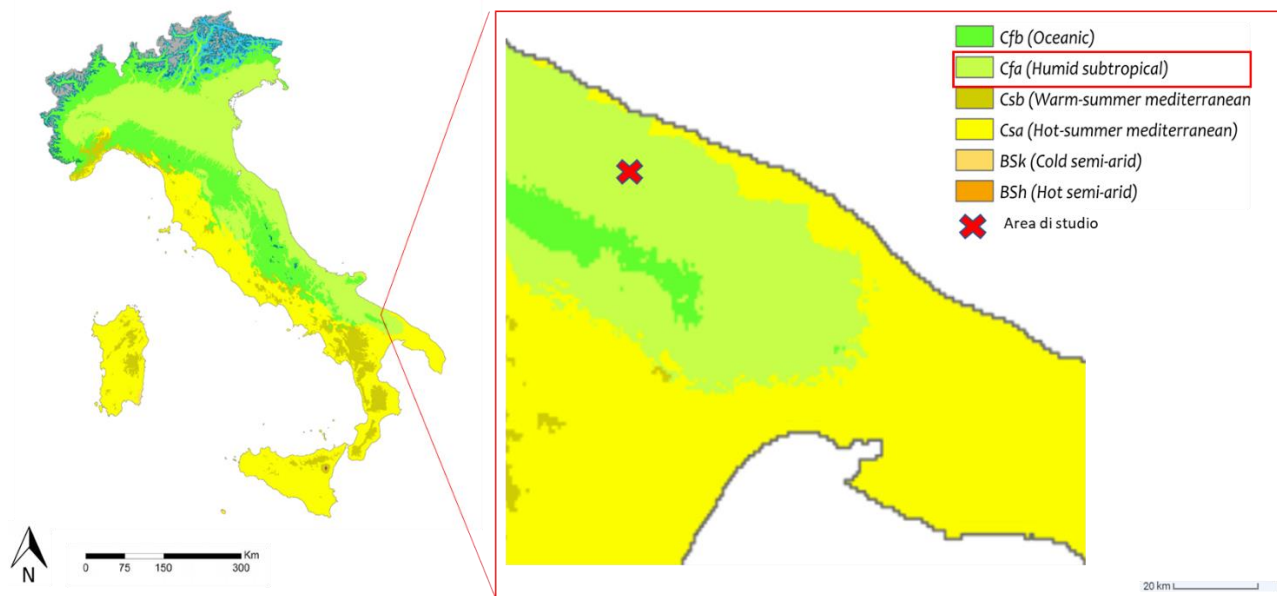


Figura 1: Carta della classificazione climatica di Köppen – Geiger del territorio italiano (sinistra) e dettaglio dell'areale di interesse (destra).

Per la descrizione meteo-climatica dell'area è stato utilizzato il 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*). ERA5 permette un'analisi del clima locale e globale ad alta risoluzione spaziale e temporale e consente studi di maggior dettaglio e affidabilità. Le rianalisi forniscono una descrizione numerica del clima recente integrando opportunamente dati da modello e osservazioni.

La caratterizzazione climatica riportata in Tabella 1 considera l'intervallo di tempo 1990-2022 e, in particolare, le variabili di temperatura (°C), precipitazioni (mm), umidità relativa (%) e giorni di pioggia (gg). I dati relativi alle ore di sole sono stati invece raccolti nel periodo 1999-2019.

Dall'analisi del dataset emerge che l'area è caratterizzata da una temperatura media annuale di 18 °C e da una piovosità annuale di 637 mm.

⁴ Wladimir Köppen, 1936. *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Berlino, Borntraeger.

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



Tabella 1: Medie mensili per i parametri meteorologici considerati. L'intensità del colore è direttamente proporzionale all'intensità del valore misurato. I dati sono stati estrapolati dal dataset ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 1990-2022.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	7.4 °C	7.7 °C	10.4 °C	13.6 °C	18 °C	22.6 °C	25.3 °C	25.3 °C	20.8 °C	16.9 °C	12.7 °C	8.7 °C
Temperatura minima (°C)	4.3 °C	4.2 °C	6.5 °C	9.3 °C	13.4 °C	17.7 °C	20.2 °C	20.4 °C	16.9 °C	13.4 °C	9.5 °C	5.8 °C
Temperatura massima (°C)	10.9 °C	11.6 °C	14.8 °C	18.1 °C	22.5 °C	27.2 °C	30 °C	30.2 °C	25.1 °C	20.9 °C	16.3 °C	12 °C
Precipitazioni (mm)	59	59	63	64	47	37	26	26	59	65	70	62
Umidità(%)	78%	75%	72%	70%	66%	59%	54%	57%	68%	76%	78%	79%
Giorni di pioggia (g.)	7	7	7	8	6	5	3	4	6	7	6	7
Ore di sole (ore)	6.0	6.6	8.2	9.7	11.5	12.6	12.7	11.9	9.6	7.5	6.4	5.9

La temperatura media di Agosto, il mese più caldo dell'anno, è di 25,3 °C. Durante l'anno, Gennaio ha una temperatura media di 7,4 °C, la temperatura media più bassa.

I mesi più secchi sono Luglio e Agosto con una media di 26 mm di pioggia e un'umidità relativa del 54% e 57% rispettivamente, mentre il mese con maggiori piogge è Novembre con una media di 70 mm circa e un'umidità relativa del 79%. La differenza tra le precipitazioni del mese più secco e quelle del mese più piovoso è 44 mm.

Le ore di sole vanno da un minimo di 5,9/6 nei mesi invernali di Dicembre e Gennaio, a un massimo di 13 nei mesi di Giugno e Luglio. L'area di interesse gode di **un'abbondante quantità di luce solare** durante tutto l'anno, con una media di oltre 2.500 ore di sole annue. Ciò contribuisce alla **vitalità della vegetazione locale e alla produttività agricola** della regione circostante. In termini di irraggiamento, le aree designate per la realizzazione dell'opera godono di **un'ottima insolazione**, come, peraltro, gran parte della Regione (Figura 2), dove la maggior parte dei territori beneficiano di un irraggiamento solare annuo cumulato con valori superiori ai **2000 kWh/m²** (Joint Research Center, 2019⁶).

⁶ Joint Research Centre (2019). https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html#!.

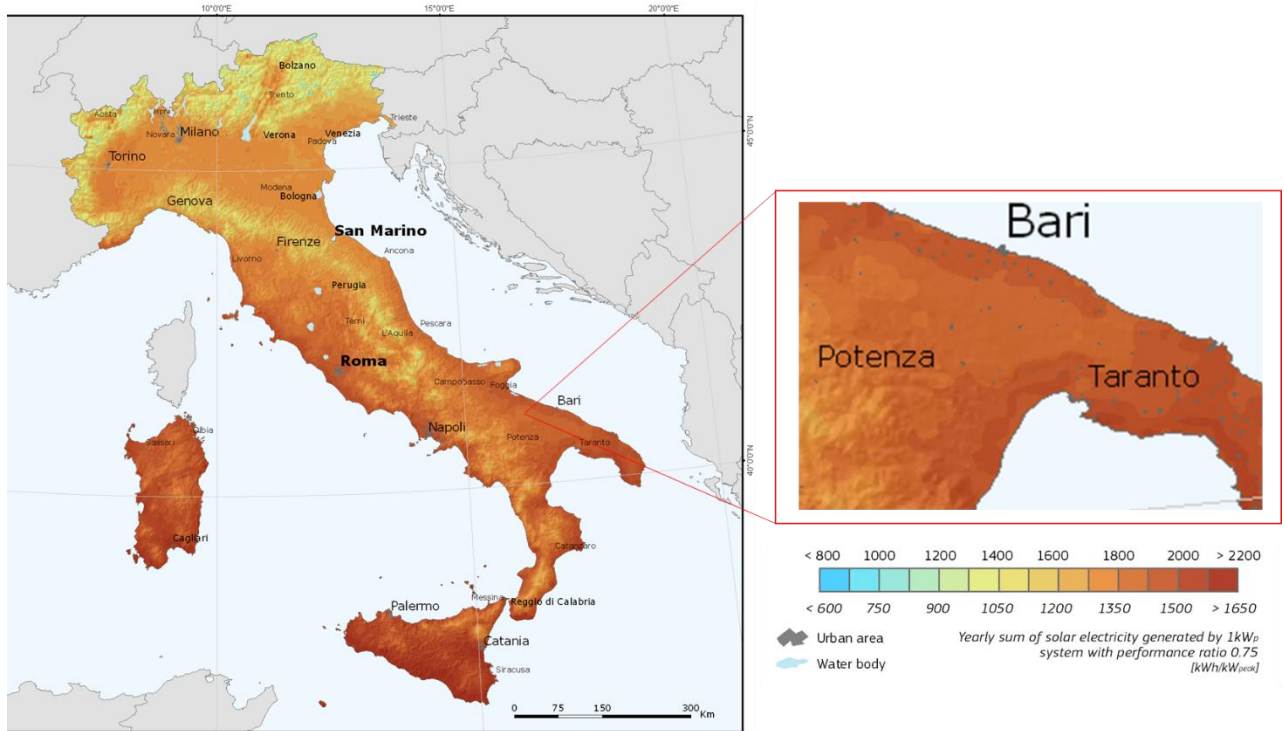


Figura 2: Somma della radiazione globale annua con inclinazione ottimale dei pannelli (European Commission, PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM).

Perciò, sotto quest'aspetto, l'area risulta potenzialmente adatta alla realizzazione di un impianto agrivoltaico.

Il riferimento principale per definire il **regime anemologico** dell'area in esame è rappresentato dalla rosa dei venti riprodotta in Figura 3, calcolata considerando il dataset di dati dal 2008 al 2021 e i dati del vento estratti a 10m.

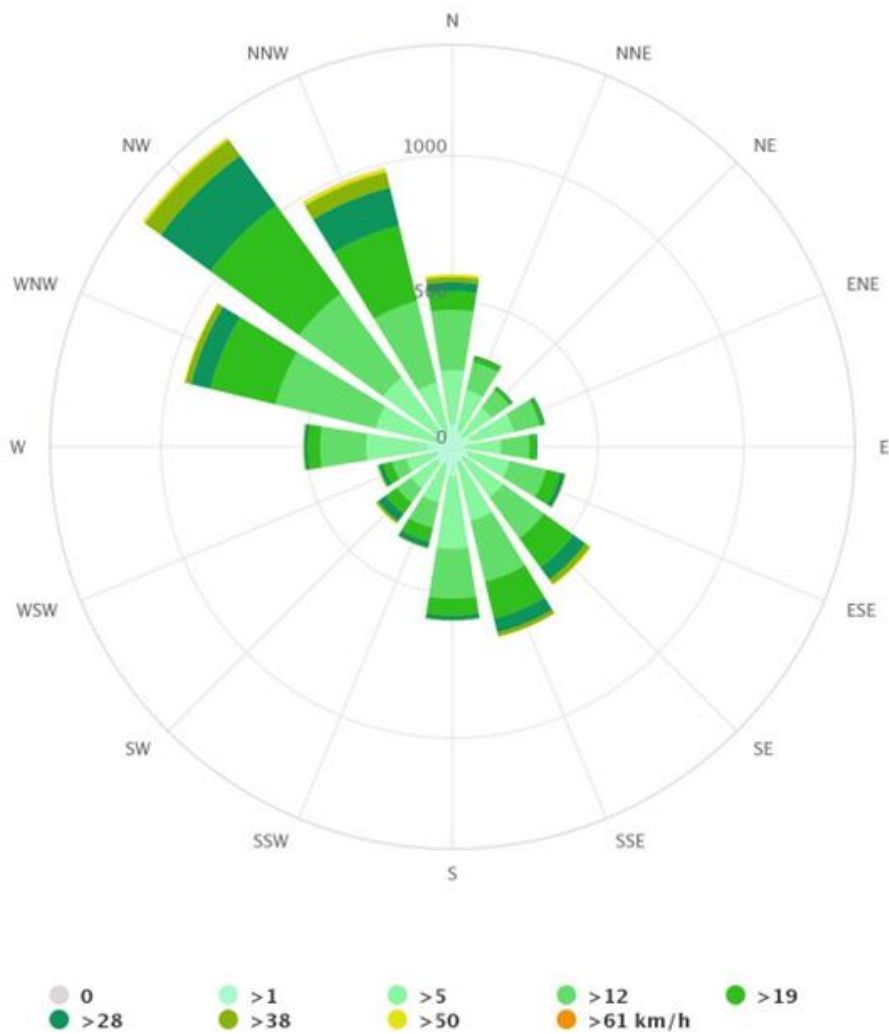


Figura 3: Rosa dei venti calcolata in base ai dati degli anni 2008-2021 (ERA5, ECMWF)

La forma della rosa dei venti evidenzia una prevalenza delle direzioni Nord Ovest. Come si può notare, le maggiori frequenze sono associate a venti di 3 - 5.5 m/s.

1.1. Caratterizzazione climatica: gli indicatori climatici

Questa sezione si propone di offrire una visione dettagliata delle caratteristiche climatiche dell'area di studio attraverso l'analisi approfondita di indicatori climatici specifici che, rappresentati da parametri chiave come temperatura, umidità, precipitazioni ecc., sono strumenti fondamentali per valutare le dinamiche atmosferiche e le variazioni climatiche.

La lettura accurata e l'interpretazione degli indicatori climatici è fondamentale perché permette di:



- **Comprendere le dinamiche climatiche locali:** gli indicatori climatici offrono un'analisi dettagliata delle caratteristiche termiche, pluviometriche e altre dinamiche climatiche specifiche dell'area in esame.
- **Valutare impatti ambientali:** l'analisi degli indicatori climatici supporta la valutazione degli impatti ambientali, consentendo di anticipare e comprendere le variazioni climatiche che possono influenzare ecosistemi, risorse idriche, e agricoltura.
- **Ottimizzare la progettazione di sistemi:** la conoscenza dettagliata degli indicatori climatici è cruciale per ottimizzare la progettazione del sistema, considerando fattori come l'ombreggiamento, la temperatura, e le esigenze idriche delle colture.
- **Supportare decisioni di gestione:** la gestione efficiente delle risorse agricole e ambientali richiede una comprensione approfondita delle condizioni climatiche locali, resa possibile dalla corretta interpretazione degli indicatori climatici.

1.1.1. Continentalità / oceanicità

La continentalità climatica emerge quando una regione si trova a una notevole distanza dalle masse marine o oceaniche, in contrasto con l'oceanicità che denota la prossimità a tali masse d'acqua. Tale condizione solitamente comporta un'accentuata escursione termica annuale, ossia una significativa differenza tra le temperature del mese più caldo e quello più freddo. Questa caratteristica esercita un'influenza significativa sul regime pluviometrico, spesso risultando in una diminuzione delle precipitazioni allontanandosi dalla costa.

Gli indici di continentalità sono spesso calcolati sull'escursione termica annuale. Dal semplice indice I_c di Rivas - Martinez proposto nell'ambito del Worldwide Bioclimatic Classification System (1996 – 2009), che consiste nella semplice differenza di temperatura tra il mese più caldo e quello più freddo, si passa ai classici indici di Gorczynski (1920) e della rivisitazione di Conrad (1946), che compensano la naturale diminuzione dell'escursione termica verso l'equatore, includendo la latitudine come variabile nella formula.

La valutazione della continentalità e degli indici ad essa associati risulta fondamentale per una completa comprensione del clima in una specifica area. Le tre equazioni impiegate per la definizione del grado di continentalità sono le seguenti, dove T_m è la temperatura media dei singoli 12 mesi, Lat la latitudine (gradi):



$$\text{Gorczyński (1920)}^7: K_G = 1.7 \frac{\max(T_m) - \min(T_m)}{\sin(\text{Lat} - 20.4)}$$

$$\text{Conrad (1946)}^8: K_C = 1.7 \frac{\max(T_m) - \min(T_m)}{\sin(\text{Lat} - 14)}$$

$$\text{Rivas-Martínez (1996-2009)}^9: I_c = \max(T_m) - \min(T_m)$$

Le scala di classificazione degli indici è solitamente interpretata in termini di grado di continentalità, che varia da bassa a elevata a seconda dei valori degli indici specifici. Nello specifico, per K_G e K_C valori <33 indicano un Clima marittimo di transizione (verso la continentalità), valori compresi o uguali a $34 - 66$ un Clima continentale e valori >77 un Clima estremamente continentale. Per I_c valori <10 indicano una Bassa continentalità, valori compresi tra $10 - 20$ una Moderata continentalità e valori >20 un'Alta continentalità.

Tabella 2: Valori degli indici di continentalità

INDICE DI CONTINENTALITÀ	VALORE	CLIMA
K_G	25,88	Clima marittimo di transizione (verso la continentalità)
K_C	32,28	Clima marittimo di transizione (verso la continentalità)
I_c	17,90	Moderata continentalità

La presenza di un clima marittimo di transizione, inclinato verso una moderata continentalità, ha implicazioni significative per la pianificazione e l'esecuzione del progetto agrivoltaico. Ecco alcuni punti chiave da considerare:

1. Variabilità termica stagionale: la moderata continentalità e il clima marittimo di transizione suggeriscono una variabilità termica stagionale moderata. La transizione alla continentalità, tuttavia, visibile soprattutto con l'indice K_C , indica un'escursione termica annuale maggiore ed è soprattutto causata dalle elevate temperature estive delle quali bisogna dunque tener conto per le colture.

⁷ Gorczyński, L. (1920) : Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. Geografiska Annaler 2, 324-331

⁸ Conrad, V. 1946: Usual formulas of continentality and their limits of validity. Transactions, American Geophysical Union, Volume 27, Issue 5, p. 663-664.

⁹ Rivas – Martínez: http://www.iao.florence.it/training/geomatics/BenSlimane/Marocco21_3_1_2.htm



2. Gestione Idrica: la continentalità potrebbe influire sui *pattern* di precipitazioni. Una gestione dell'acqua efficace è essenziale per garantire che la coltura riceva l'irrigazione necessaria durante periodi più secchi o con potenziali variazioni nella distribuzione delle precipitazioni.
3. Ombreggiamento e impatto dell'Agrivoltaico: la presenza di una moderata continentalità potrebbe suggerire la necessità di un adeguato ombreggiamento per proteggere le colture dagli stress termici. L'ombreggiamento dei pannelli dell'impianto agrivoltaico può contribuire a mitigare le temperature più elevate durante l'estate.

La natura di un clima marittimo di transizione con moderata continentalità indica una situazione favorevole per tale progetto agrivoltaico. Tuttavia, è fondamentale un'attenta attività di monitoraggio che garantisca una risposta flessibile alle variazioni stagionali ottimizzando l'efficienza complessiva del progetto.

1.1.2. Aridità / Umidità

Il concetto di clima arido o umido (con tutti i gradi in cui questa schematizzazione si manifesta) è insito in ogni classificazione climatica di per sé, prima fra tutte proprio quella di Köppen, qui impiegata. Tuttavia, l'uso di indici specifici chiarisce con maggior dettaglio il grado di aridità o di umidità del clima di una regione. In generale, gli indici di aridità hanno lo scopo di stimare in modo molto approssimativo la possibilità del verificarsi o meno di condizioni di deficit idrico durante l'anno; per fare ciò, risulta necessario stimare le perdite evapotraspirative annuali (o in qualche caso con dettaglio superiore, mensile).

1.1.2.1. Pluviofattore di Lang

Lang ha messo in relazione la piovosità media annua P (in mm) con la temperatura media annua T (in °C), e ha definito questo rapporto pluviofattore $P_f = P/T$. L'indice ha un significato ecologico in quanto esprime l'umidità di un determinato areale entro determinati limiti di temperatura. L'indice classifica il clima secondo la seguente scala di valori: >160 il clima è Umido, 160-100 Temperato Umido, 100-60 Temperato Caldo, 60-40 Semiarido, <40 Steppico.

1.1.2.2. Indice di De Martonne

L'indice di De Martonne rappresenta un perfezionamento del pluviofattore di Lang. L'indice è rappresentato mediante la formula: $IA = P / (T+10)$ dove IA è l'indice di aridità, P le precipitazioni medie annue in mm e T le temperature medie annue in °C. In base all'indice di De Martonne, i vari gradi di aridità vengono indicati come:



Tabella 3. Classificazione climatica secondo l'indice di De Martonne

Valori dell'indice	Tipo	Valori dell'indice	Tipo
0 - 5	arido estremo (deserto)	20 - 30	Subumido <u>irrigazione opportuna</u>
5 - 15	arido (steppe circumdesertiche) <u>irrigazione continua</u>	30 - 60	Umido <u>irrigazione occasionale</u>
15 - 20	semiarido (di tipo mediterraneo) <u>irrigazione necessaria</u>	> 60	Perumido <u>autosufficienza idrica</u>

Secondo l'analisi di De Martonne, valori dell'Indice superiori a 20 indicano la prevalenza di vegetazione forestale. Questo indice assume un ruolo cruciale nella caratterizzazione climatica e vegetazionale, permettendo di definire con precisione i gradi di umidità nell'ambiente e quantificando numericamente le condizioni ambientali.

L'utilità dell'Indice di De Martonne va oltre il solo aspetto climatologico, estendendosi alla valutazione delle condizioni ideali per la crescita di specifici tipi di piante o colture. La sua capacità di quantificare le esigenze vegetative attraverso valori numerici consente una pianificazione agricola più mirata.

Particolarmente rilevante è il ruolo dell'indice nella determinazione della necessità di irrigazione. La conoscenza dei gradi di umidità fornita dall'Indice di De Martonne è essenziale per valutare la disponibilità d'acqua nell'area, diventando cruciale per la gestione dell'acqua in progetti agrivoltaici.

1.1.2.3. Indice di Crowther

L'indice di aridità di Crowther tiene conto del bilancio tra precipitazioni e evaporazione ed è calcolato attraverso la seguente espressione: $I_a = P - 3.3 * T$ dove:

P = precipitazione totale annua espressa in cm; T = temperatura media annua in °C; 3,3 = costante numerica. Si possono presentare i seguenti casi:

Tabella 4: Classificazione climatica secondo l'indice di Crowther

Valori dell'indice	Tipo	Valori dell'indice	Tipo
< -30	Zone desertiche o limitrofe	$0 < I_c < 15$	Modeste condizioni di umidità <u>irrigazione opportuna</u>
$-30 < I_c < -15$	Semiaridità (<u>irrigazione costante e continua</u>)	$15 < I_c < 40$	Apprezzabile acqua di scorrimento <u>irrigazione stagionale</u>



-15 < Ic < 0	Formazioni erbacee ed alberi <u>irrigazione necessaria</u>	> 40	Molta acqua
--------------	---	------	-------------

1.1.2.4. Indice bioclimatico di J. L. Vernet

L'indice è rappresentato mediante la formula:

$$IB = 100 \times \frac{H - h}{P} \times \frac{Me}{Pe}$$

dove IB è l'indice di aridità, H indica le precipitazioni medie della stagione più piovosa (in mm), h le precipitazioni medie della stagione meno piovosa (in mm), P le precipitazioni medie annuali (in mm), Pe le precipitazioni medie estive e Me la temperatura media massima estiva (in °C). L'indice dà valori proporzionali all'umidità.

La classificazione climatica secondo tale indice è:

Tabella 5: Classificazione climatica secondo l'indice bioclimatico di J.L. Vernet

Valori dell'indice	Tipo	Valori dell'indice	Tipo
> +2	Clima continentale	-3 < I < -2	Clima mediterraneo di transizione oceanico
0 < I < + 2	Clima oceanico continentale	-4 < I < -3	Clima Mediterraneo
-2 < I < 0	Clima pseudo-oceanico		

1.1.2.5. Indice FAO

L'indice bioclimatico di aridità e desertificazione FAO-UNEP, introdotto in base alle convenzioni delle Nazioni Unite, è calcolato dalla seguente espressione: Ia = P/ETP dove: P = precipitazioni medie annue; ETP = evapotraspirazione media annua; si possono presentare i seguenti casi:

Tabella 6: Classificazione climatica secondo l'indice FAO

Valori dell'indice	Tipo	Valori dell'indice	Tipo
< 0,05	Clima iperarido	< 0,65	Clima subumido secco
< 0,2	Clima arido	> 0,65	Clima umido
< 0,5	Clima semiarido		

1.1.2.6. Quoziente pluviometrico di Emberger

La classificazione bioclimatica di Emberger ha trovato larga applicazione nella caratterizzazione dei climi del Bacino mediterraneo per la relativa semplicità di calcolo e per la buona



corrispondenza che, in genere, si riscontra con i caratteri vegetazionali delle diverse regioni geografiche di quest'area.

L'elemento fondamentale della classificazione bioclimatica di Emberger è il quoziente pluviometrico (Q), che esprime la siccità generale in clima mediterraneo. Il clima è tanto più secco quanto più basso è il valore di questo quoziente. Il quoziente di Emberger, proposto inizialmente nel 1923, corrisponde alla formulazione seguente: $Q = (2000 \times P) / (T_{max}^2 - T_{min}^2)$.

Tabella 7: Classificazione climatica secondo l'indice Emberger

Valori dell'indice	Tipo
> 90	Umido
90 - 50	Subumido
50 - 30	Semiarido
30 - 0	Arido

Nello specifico, nell'area Mediterraneo questo indice comprende valori che vanno da 50 – 250.

L'area Mediterranea è così caratterizzata:

- una estate calda con scarse precipitazioni (periodo arido);
- temperature invernali non tanto basse;
- precipitazioni concentrate principalmente in autunno-inverno (periodo umido).

1.2. Caratterizzazione climatica: i risultati per l'area di interesse

L'area interessata dal progetto agrivoltaico in esame è descritta dagli indici riportati in Tabella 8.

Tabella 8: Classificazione climatica dell'area di studio

INDICE	VALORE	CLIMA
Pluviofattore di Lang	40,24	Semiarido
Mesi Aridi:	Secondo Koppen: lug ago	-
	Secondo Gaussen: giu lug ago	
Indice di De Martonne	24,66	Subumido (irrigazione opportuna)
Indice di aridità di Crowther	11,46	Modeste condizioni di umidità <u>irrigazione opportuna</u>
Indice bioclimatico di J.L. Vernet	2	Continentale (variabilità stagionale moderata per le



		precipitazioni)
Indice FAO	1,19	Umido
Evaporazione media mensile [mm]	141,71	-
Quoziente pluviometrico di Emberger	85,38	Subumido

L'indice di De Martonne è stato calcolato per ogni mese:

Tabella 9: Indice di De Martonne mensile; il giallo indica un clima arido, il celeste chiaro un clima subumido, il celeste scuro un clima umido.

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Indice di De Martonne	40,69	40,00	37,06	32,54	20,14	13,62	8,84	8,84	22,99	29,00	37,00	39,79

L'analisi complessiva suggerisce una disponibilità moderata d'acqua con fluttuazioni stagionali e con periodi estivi aridi. La gestione oculata dell'irrigazione, particolarmente durante la stagione secca, diventa essenziale per massimizzare la produzione agricola e l'efficienza del sistema agrivoltaico.

Il progetto agrivoltaico è compatibile con gli indici e la classificazione climatica presa in considerazione. La moderata disponibilità d'acqua, le variazioni stagionali e le esigenze di irrigazione suggerite dagli indici climatici sono aspetti che possono essere adeguatamente gestiti attraverso una pianificazione accurata del progetto. **La compatibilità con l'ambiente climatico delineato conferma la fattibilità e la sostenibilità del progetto agrivoltaico nell'area di studio.**

1.3. Climogrammi

I climogrammi rappresentano un potente strumento visuale che combina dati mensili di temperatura e precipitazioni, offrendo una panoramica completa delle caratteristiche climatiche nel corso dell'anno. In questa sezione, esamineremo attentamente i climogrammi dell'area di studio. Queste rappresentazioni grafiche non solo ci consentiranno di identificare i modelli climatici stagionali, ma ci aiuteranno anche a valutare l'idoneità del sito per il progetto in questione.

1.3.1. Diagramma ombrotermico

Il climogramma ombrotermico è un grafico che rappresenta graficamente la distribuzione mensile delle temperature medie e delle precipitazioni. Per l'area in esame si nota ciò che è già



stato evidenziato per l'area in esame e cioè la variabilità stagionale con una stagione più secca estiva con temperature più alte e una più umida.

Dal climogramma riportato in Figura 4 emerge visivamente la variabilità stagionale che caratterizza l'area di interesse con un periodo caratterizzato da temperature più alte e basse precipitazioni (giugno-agosto) e un periodo con abbondanti precipitazioni (settembre-maggio).

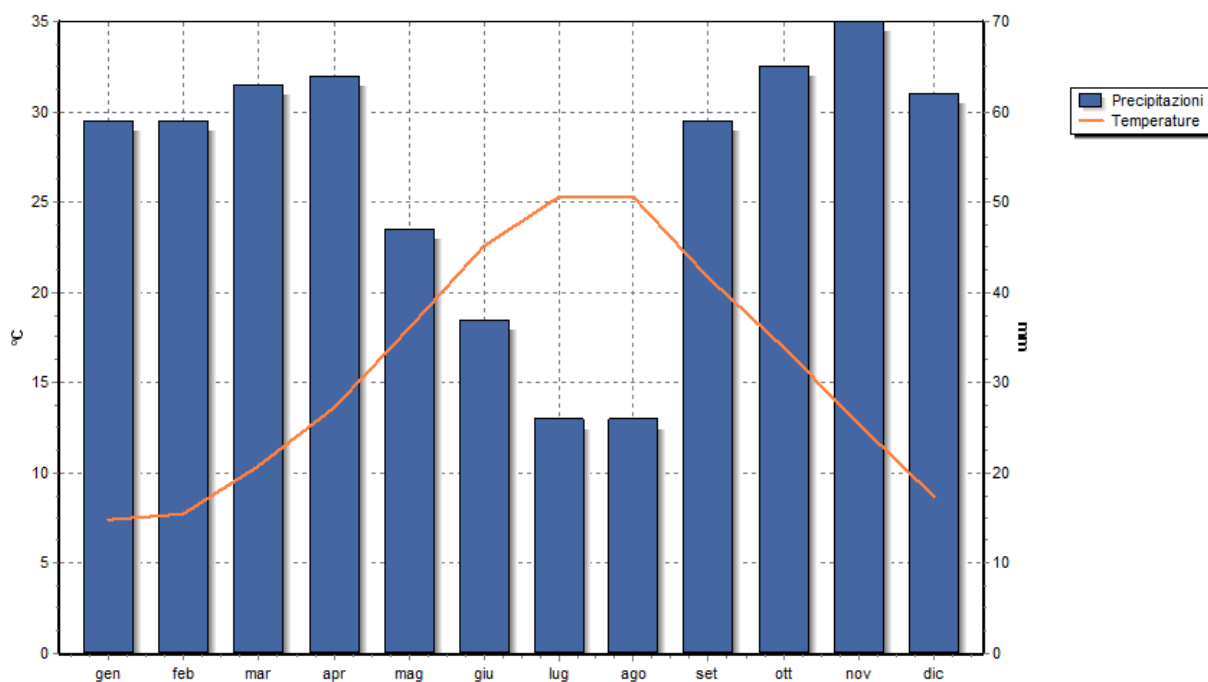


Figura 4: Diagramma ombrotermico

1.3.2. Diagramma Walter & Lieth

Questo diagramma¹⁰ è particolarmente utile per valutare la disponibilità di acqua in relazione alle temperature. Nello specifico, analizzando la posizione relativa delle curve delle temperature e delle precipitazioni, è possibile identificare visivamente i periodi in cui potrebbero verificarsi condizioni di aridità o eccesso idrico. Quando la curva delle precipitazioni scende sotto quella delle temperature medie il mese/periodo interessato viene considerato “arido”, altrimenti con “disponibilità idrica”. Inoltre, sono indicati anche i mesi/periodi con rischio gelate ($T < 0$ °C).

Dal climogramma rappresentato dalla Figura 5 si evince che il periodo con disponibilità idrica va da Settembre fino a Maggio. Questi mesi rappresentano la stagione piovosa nella regione. Il periodo da Giugno a inizio Settembre è invece prettamente arido. Questi mesi rappresentano la

¹⁰ Lieth, H., Berlekamp, J., Fuest, S., and Riediger, S., 1957: Walter-Lieth: Climate Diagram World Atlas, CD-Series I of Climate and Biosphere, 1st edit.



stagione secca in cui la disponibilità di precipitazioni è bassa. Quanto descritto è anche visibile dal climogramma in Figura 6.

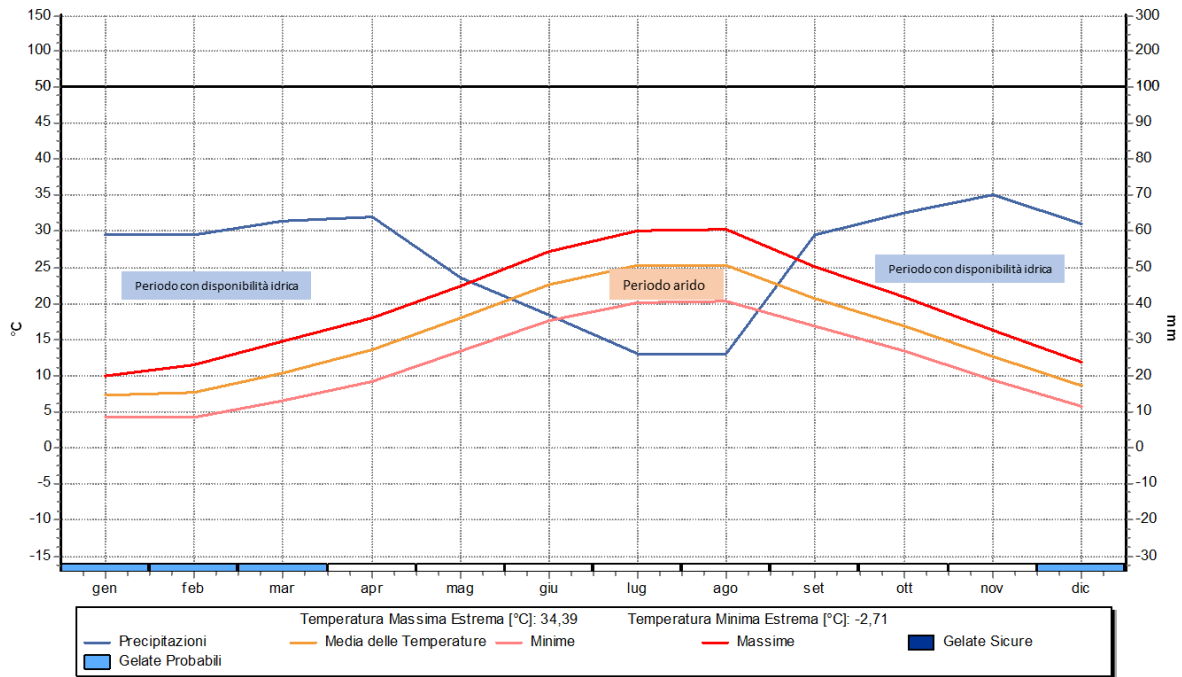


Figura 5: Climogramma di Walter & Lieth

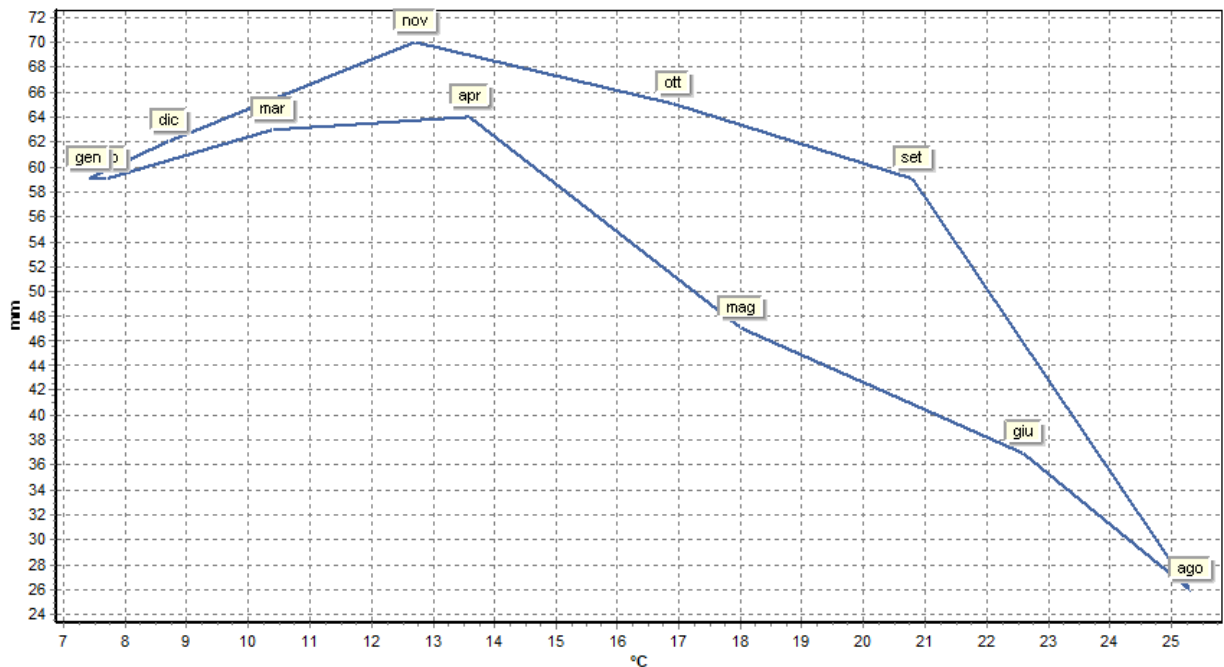


Figura 6: Climogramma Precipitazioni e Temperature



1.3.3. Climogramma di Peguy

I climogrammi di Péguy¹¹ rappresentano la climatologia mensile di una stazione nei confronti di una schematica classificazione climatica che viene rappresentata nel grafico in base a temperatura e precipitazione (Figura 7). I diversi mesi si collocano così dentro il grafico in diverse aree, ognuna identificata con un termine. **Il mese più arido è Agosto mentre Giugno e Luglio sono debolmente aridi. I restanti mesi dell'anno sono Temperati.**

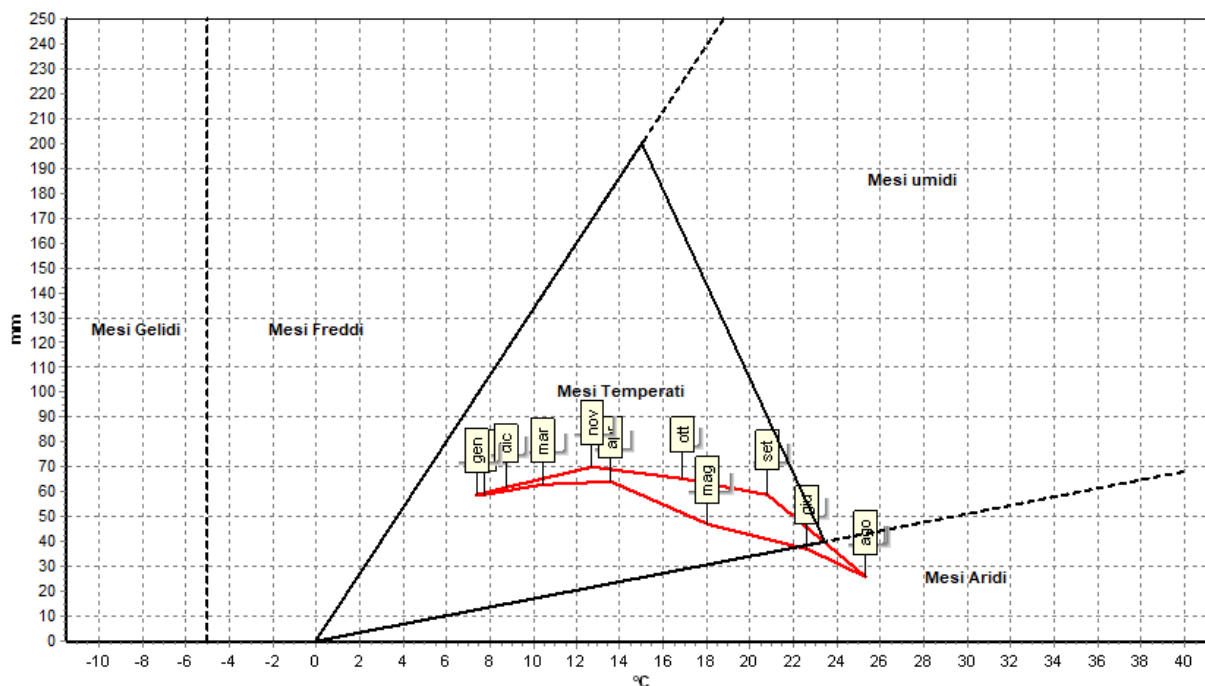


Figura 7: Climogramma di Peguy

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 climatico¹².

¹¹ Péguy, C.P. , 1970 : Precis de climatologie, ed. Masson, Paris

¹² 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/>.



Nel contesto del cambiamento climatico, **l'analisi del rischio climatico rappresenta uno strumento fondamentale per valutare e comprendere gli impatti futuri del clima su diverse attività umane**, tra cui l'agricoltura e l'installazione di nuovi impianti per la produzione di energia rinnovabile. Il cambiamento climatico è una delle sfide più pressanti del nostro tempo, con il riscaldamento globale e i cambiamenti nei pattern meteorologici che influenzano direttamente i sistemi agricoli e le pratiche di coltivazione.

L'analisi del rischio climatico permetterà di **identificare le potenziali vulnerabilità e gli impatti del cambiamento climatico sull'efficienza e la sostenibilità dell'impianto agrivoltaico, consentendo una migliore pianificazione e adattamento per affrontare le sfide future.**

2.1. Proiezioni climatiche future: un'analisi a scala regionale

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.

Per comprendere meglio gli impatti futuri del cambiamento climatico e fornire basi solide per la pianificazione e l'adattamento, il Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC) ha sviluppato il sesto progetto di intercomparazione dei modelli climatici accoppiati (CMIP6 *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*). Nel presente capitolo, esamineremo le proiezioni climatiche future relative agli scenari SSP2-4.5 (*Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5*) e SSP5-8.5 (*Shared Socioeconomic Pathway 5-8.5*) al fine di valutare le potenziali tendenze climatiche nell'area Mediterranea in cui rientra la nostra area di interesse.

2.1.1. Proiezioni CMIP6

Il CMIP6 rappresenta un'importante iniziativa scientifica che coinvolge una vasta rete di modellisti climatici in tutto il mondo. L'obiettivo principale del progetto è migliorare la comprensione delle risposte climatiche ai cambiamenti nell'emissione di gas serra e **fornire proiezioni climatiche avanzate basate su scenari socio-economici** noti come *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP). Le proiezioni CMIP6 costituiscono un significativo progresso rispetto ai progetti precedenti, incorporando modelli climatici più sofisticati e raffinati per fornire una maggiore precisione nelle previsioni climatiche.



Scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5

Gli scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5 rappresentano diverse traiettorie socio-economiche future definite nel contesto del CMIP6. Essi consentono di esplorare **le possibili evoluzioni globali basate su una combinazione di fattori socio-economici e tecnologici**.

SSP2-4.5 descrive un futuro in cui le politiche globali mirano a **una mitigazione significativa delle emissioni di gas serra**, risultando in una stabilizzazione delle concentrazioni atmosferiche e un moderato aumento delle temperature globali rispetto agli scenari più inquinanti.

SSP5-8.5, al contrario, rappresenta un futuro in cui le **politiche di mitigazione delle emissioni sono scarse o inefficaci, portando a una crescita continua delle concentrazioni di gas serra e ad un aumento più marcato e rapido delle temperature globali**.

3.1.1.1 Variazione delle principali variabili climatiche

Nella nostra analisi, esamineremo una serie di variabili climatiche cruciali per comprenderne l'evoluzione futura nella nostra area di interesse. Queste variabili includono:

- **Mean temperature** (T) (temperatura media): La temperatura media annuale e in una specifica area geografica.
- **Minimum temperature** (TN) (temperatura minima): La temperatura minima giornaliera annuale e in una specifica area geografica.
- **Frost days** (FD) (giorni di gelo): Il numero di giorni in un anno in cui la temperatura scende al di sotto dello zero.
- **Maximum temperature** (TX) (temperatura massima): La temperatura massima giornaliera in un anno e in una specifica area geografica.
- **Days with TX above 35°C** (TX35) (giorni con temperatura massima sopra i 35°C): Il numero di giorni in cui la temperatura massima supera i 35°C.
- **Days with TX above 40°C** (TX40) (giorni con temperatura massima sopra i 40°C): Il numero di giorni in cui la temperatura massima supera i 40°C.
- **Total precipitation** (PR) (precipitazioni totali): La quantità totale di precipitazioni su un periodo di tempo e in una specifica area geografica.
- **Maximum 1-day precipitation** (RX1day) (massima quantità di precipitazioni in un giorno): La massima quantità di precipitazioni registrata in un singolo giorno.



- **Maximum 5-day precipitation** (RX5day) (massima quantità di precipitazioni in 5 giorni): La massima quantità di precipitazioni registrata in un periodo di 5 giorni.
- **Consecutive Dry Days** (CDD) (giorni consecutivi senza precipitazioni): Il numero di giorni consecutivi senza precipitazioni sopra una soglia specifica.
- **Standardized Precipitation Index** (SPI-6) (Indice Standardizzato di Precipitazione): Un indicatore di siccità basato sulla distribuzione delle precipitazioni su un periodo di tempo e luogo specifici. Valori negativi indicano condizioni di siccità, mentre valori positivi indicano condizioni di abbondanti precipitazioni.
- **Sea level rise** (SLR) (innalzamento del livello del mare): si riferisce al fenomeno di aumento del livello medio dei mari e degli oceani a livello globale.

In Tabella 10 si riporta la **variazione delle variabili climatiche** (rispetto all'arco di tempo recente 1990-2014) espressa in valori medi annuali per gli scenari **SSP2 4.5** (ottimistico - migliorativo) e **SSP5 8.5** (pessimistico – peggiorativo) calcolati per il **vicino (NT)** (2021-2040), **medio (MT)** (2041-2060) e **lungo periodo (LT)** (2081-2100).

Tabella 10: *Variazione delle variabili climatiche per gli scenari SSP2 4.5 (ottimistico - migliorativo) e SSP5 8.5 (pessimistico – peggiorativo) calcolati per il vicino (NT) (2021-2040), medio (MT) (2041-2060) e lungo periodo (LT) (2081-2100).*

Variabile	Periodo	SSP2 4.5	SSP5 8.5
Mean temperature (T) (°C)	NT	0.9	1.1
	MT	1.5	2.0
	LT	2.4	4.6
Minimum temperature (TN) (°C)	NT	0.9	1
	MT	1.4	2
	LT	2.3	4.5
Frost days (FD) (giorni)	NT	-3.1	-3.5
	MT	-4.6	-6.5
	LT	-7.2	-12.4
Maximum temperature (TX) (°C)	NT	1.0	1.1
	MT	1.6	2.2
	LT	2.5	4.8
Days with TX above 35°C (TX35) (giorni)	NT	11.9	12.8
	MT	16.3	20.5
	LT	23.0	43.1
Days with TX above	NT	6.3	6.8



40°C (TX40) (giorni)	MT	8.8	11.3
	LT	13.1	26.8
Total precipitation (PR) (%)	NT	-5.7	-7
	MT	-8.7	-12
	LT	-11.3	-22.2
Maximum 1-day precipitation (RX1day) (%)	NT	1.8	1.7
	MT	2.2	3.1
	LT	3.9	5.4
Maximum 5-day precipitation (RX5day) (%)	NT	0.8	0.6
	MT	0.5	0.2
	LT	0.9	-1.4
Consecutive Dry Days (CDD) (giorni)	NT	3.2	4.3
	MT	6.5	9.4
	LT	10.1	20.4
Standardized Precipitation Index (%)	NT	-8.8	-12.3
	MT	-19.7	-30.9
	LT	-30.2	-68.4
Sea level rise (SLR) (m)	NT	0.1	0.1
	MT	0.2	0.3
	LT	0.5	0.7

Rielaborando i dati possiamo osservare:

- **Aumento della temperatura media (T):** In entrambi gli scenari, si nota un trend in aumento della temperatura media (T) nel corso dei periodi "NT", "MT" e "LT". Tuttavia, nel caso dello **scenario SSP2 4.5**, i valori sono più contenuti e controllati rispetto allo scenario SSP5 8.5, indicando un **impatto minore delle emissioni di gas serra sulla temperatura**.
- **Aumento dei giorni con temperature superiori a 35°C e 40°C (TX35 - TX40):** Entrambi gli scenari mostrano un aumento del numero di giorni con temperature massime sopra i 35°C e 40°C nei periodi "MT" e "LT". Tuttavia, anche in questo caso, lo scenario **SSP2 4.5** presenta valori più contenuti rispetto allo scenario "SSP5 8.5", suggerendo una **minore probabilità di ondate di calore estreme**.
- **Precipitazioni negative e condizioni siccitose:** Entrambi gli scenari mostrano valori negativi per le precipitazioni totali (PR) e per l'Indice di Precipitazione Standardizzato (SPI) nei periodi "MT" e "LT". Questo suggerisce un aumento delle **condizioni siccitose**



nel futuro, con una diminuzione delle precipitazioni. Anche in questo caso, lo scenario SSP2 4.5 presenta valori meno negativi rispetto allo scenario SSP5 8.5, indicando una maggiore probabilità di avere condizioni meno severe di siccità.

- **Aumento del livello del mare (SLR):** Entrambi gli scenari indicano un aumento proiettato del livello del mare (SLR) nei periodi "MT" e "LT", ma i valori nello scenario SSP2 4.5 sono più contenuti e controllati rispetto allo scenario SSP5 8.5. Questa tendenza è coerente con le proiezioni dell'innalzamento del livello del mare legato al cambiamento climatico.

In sintesi, i dati della tabella suggeriscono che entrambi gli scenari mostrano **una tendenza in aumento della temperatura, dei giorni con temperature elevate e dell'innalzamento del livello del mare**. Inoltre, entrambi gli scenari prospettano un **futuro caratterizzato da condizioni siccitose, con una diminuzione delle precipitazioni**. Tuttavia, **lo scenario SSP2 4.5 mostra valori più contenuti** e controllati per tutte le variabili climatiche considerate rispetto allo scenario SSP5 8.5 indicando che **politiche di mitigazione e riduzione delle emissioni di gas serra potrebbero avere un impatto positivo nel limitare gli effetti del cambiamento climatico**.

3.1.1.2. Impatto sui servizi ecosistemici

Come osservato, la regione Puglia sarà interessata da un **cambiamento climatico** che **porterà a perdite nei rendimenti agricoli e nel potenziale di stoccaggio del carbonio, ad un aumento dei rischi legati agli incendi e cambiamenti nella tipologia del bioma**¹³. I servizi ecosistemici nell'area di interesse risultano particolarmente sensibili ad eventi o stagioni estreme, come estati molto calde e secche¹⁴ così come a inverni miti, tempeste di vento e forti piogge. Inoltre, tali servizi

¹³ Navarra, A. and Tubiana, L. (eds), 2013. *Regional assessment of climate change in the Mediterranean. Volume 1: Air, Sea and precipitation and water, Advances in Global Change Research, Springer Netherlands, Dordrecht.*

Santini, M., Caccamo, G., Laurenti, A., Noce, S. and Valentini, R., 2010. A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index, *Applied Geography* 30(3), 394–415

¹⁴ Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabre, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R. B., Piao, S. and Thornton, P., 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. in: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., 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; New York, pp. 465–570.

Reichstein, M., Ciais, P., Papale, D., Valentini, R., Running, S., Viovy, N., Cramer, W., Granier, A., Ogé, J., Allard, V., Aubinet, M., Bernhofer, C., Buchmann, N., Carrara, A., Grünwald, T., Heimann, M., Heinesch, B., Knohl, A., Kutsch, W. et al., 2007, 'Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: A joint flux tower, remote sensing and modelling analysis', *Global Change Biology* 13(3), 634–651.



ecosistemici sono minacciati dai cambiamenti climatici a lungo termine, come l'aridificazione e la degradazione, i quali potrebbero portare a una desertificazione irreversibile¹⁵.

La Tabella 11 fornisce un riassunto degli stress climatici, impatti e sensibilità per i diversi servizi ecosistemici e i settori che essi supportano.

¹⁵ Rubio, J. L., Safriel, U., Daussa, R., Blum, W. and Pedrazzini, F. (eds), 2009. *Water scarcity, land degradation and desertification in the Mediterranean region*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer Netherlands, Dordrecht.



Tabella 11: Impatti di diversi stress climatici e antropici sui servizi ecosistemici e i settori che essi supportano.

<i>Settore</i>	<i>Servizi Ecosistemici</i>	<i>Stress (climatici, altri)</i>	<i>Impatti/Sensibilità</i>
<i>Agricoltura, pascolo, agroforestazione</i>	Produzione di cibo (colture e bestiame)	<ul style="list-style-type: none">- Temperature più elevate- Modelli di precipitazioni variabili- Stress idrico- Malattie- Erosione- Espansione urbana	<ul style="list-style-type: none">- Maggiore domanda di irrigazione- Ridotta produttività- Insuccesso delle colture- Mortalità del bestiame
<i>Agricoltura</i>	Sequestro del carbonio	<ul style="list-style-type: none">- Temperature più elevate- Modelli di precipitazioni variabili- Stress idrico- Malattie- Erosione- Espansione urbana- Maggiore domanda di irrigazione	<ul style="list-style-type: none">- Ridotta produttività- Decomposizione della materia organica del suolo
<i>Agricoltura, foreste</i>	Biocarburanti, compensazione del carbonio	<ul style="list-style-type: none">- Temperature più elevate- Modelli di precipitazioni variabili- Stress idrico- Malattie- Incendi- Erosione/sfruttamento eccessivo- Espansione urbana	<ul style="list-style-type: none">- Ridotta produttività- Mortalità delle colture o degli alberi
<i>Selvicoltura</i>	Produzione di legname	<ul style="list-style-type: none">- Temperature più elevate- Modelli di precipitazioni variabili- Stress idrico- Malattie- Incendi- Erosione/sfruttamento eccessivo	<ul style="list-style-type: none">- Ridotta produttività- Mortalità degli alberi
<i>Selvicoltura, ecosistemi terrestri</i>	Sequestro del carbonio	<ul style="list-style-type: none">- Temperature più elevate- Modelli di precipitazioni variabili- Stress idrico- Malattie- Incendi- Erosione	<ul style="list-style-type: none">- Ridotta produttività- Mortalità degli alberi- Decomposizione della materia organica del suolo
<i>Ecosistemi terrestri e acquatici</i>	Fornitura/regolazione idrica	<ul style="list-style-type: none">- Temperature più elevate- Modelli di precipitazioni variabili- Stress idrico- Cambiamenti nella copertura del suolo- Degradazione del paesaggio- Erosione	<ul style="list-style-type: none">- Riduzione della disponibilità di acqua- Maggiore domanda di acqua- Degradazione della qualità dell'acqua- Produzione di sedimenti



4. Stressor climatici nell'area di interesse: un'analisi a scala locale

Gli *stressor* climatici più rilevanti per l'area di interesse sono le **ondate di calore e l'intensificarsi degli eventi di precipitazione estremi**, che si accompagnano ad una generalizzata riduzione delle precipitazioni nel periodo estivo. Potenziali impatti climatici di particolare rilievo saranno quelli sulla **salute**, derivanti dalle patologie legate all'aumento delle temperature, incluse le ondate di calore. Inoltre, l'aumento della temperatura porterà ad un incremento dell'**aridificazione** (perdita umidità dei suoli) nelle **aree agricole, forestali e pastorali e ad un aumento del rischio di incendi** soprattutto in zone forestali non gestite e in aree abbandonate. L'aumento degli episodi di siccità porterà ad una **riduzione della disponibilità idrica**.

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'Agencia Europea dell'Ambiente.

La Tabella 12 riporta una panoramica degli *stressor* climatici approfonditi, dei livelli di pericolo associati, delle minacce e del livello di rischio che ne consegue. Il livello di rischio è strettamente legato al pericolo e alle minacce.

Tabella 12: Rischi climatici fisici e livelli di pericolo riferiti a proiezioni future nell'area di studio.

STRESSOR CLIMATICI	LIVELLO DI PERICOLO	MINACCE	LIVELLO DI RISCHIO
ALTE TEMPERATURE	Basso	Ecosistemi Salute Umana Risorse idriche Foreste	Moderato
PRECIPITAZIONI INTENSE	Basso-Moderato	Inondazioni Erosione del suolo	Moderato
SICCITA'	Basso-Moderato	Riduzione delle risorse idriche Impatti sull'agricoltura	Moderato
STRESS IDRICO	Alto	Scarsità di acqua Riduzione delle risorse	Alto

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

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



		idriche	
INCENDI	Alto	Incendi boschivi Perdita di biodiversità	Alto
INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE	Alto	Inondazioni costiere Intrusione di acqua salata nelle falde acquifere Perdita di terreni agricoli costieri	Alto

4.1. 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

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



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 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 8 è riportata la proiezione su 20 anni della distribuzione dell'indice WBGT in una sezione della Puglia che comprende l'area di interesse. **Il valore di WBGT nella zona di interesse è di 28.39: stress da calore lieve/basso.**

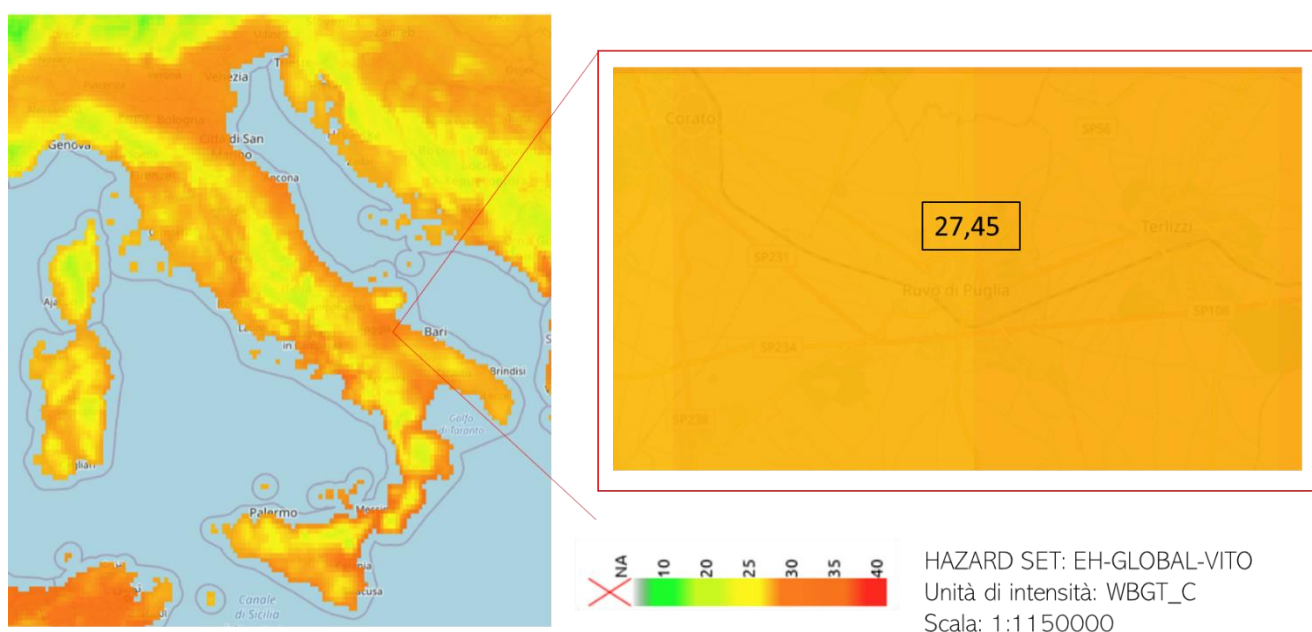


Figura 8: Distribuzione spaziale dell'indice WBGT in una proiezione futura di 20 anni secondo la stima del modello ThinkHazard!.

4.2. Precipitazioni intense

I cambiamenti previsti nelle precipitazioni intense (espressi in percentuale) in inverno (dicembre, gennaio, febbraio) sono stati calcolati a partire dai dati EURO-CORDEX: "Climate change projections for Europe based on an ensemble of regional climate model simulations provided by the EURO-CORDEX initiative" per lo scenario RCP8.5. Le simulazioni del modello climatico regionale CORDEX per il dominio europeo (EURO-CORDEX) sono condotte a due diverse risoluzioni spaziali, la risoluzione generale CORDEX di 0,4 gradi (EUR-44, ~50 km) e in aggiunta



la risoluzione più fine di 0.11 gradi (EUR-11, ~12,5 km), quest'ultima utilizzata in questo set di dati²⁰.

Considerando la previsione 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 **livello di pericolo è moderato con un aumento previsto delle precipitazioni intense invernali dell'19%**.

²⁰ <https://www.euro-cordex.net/060378/index.php.en>.

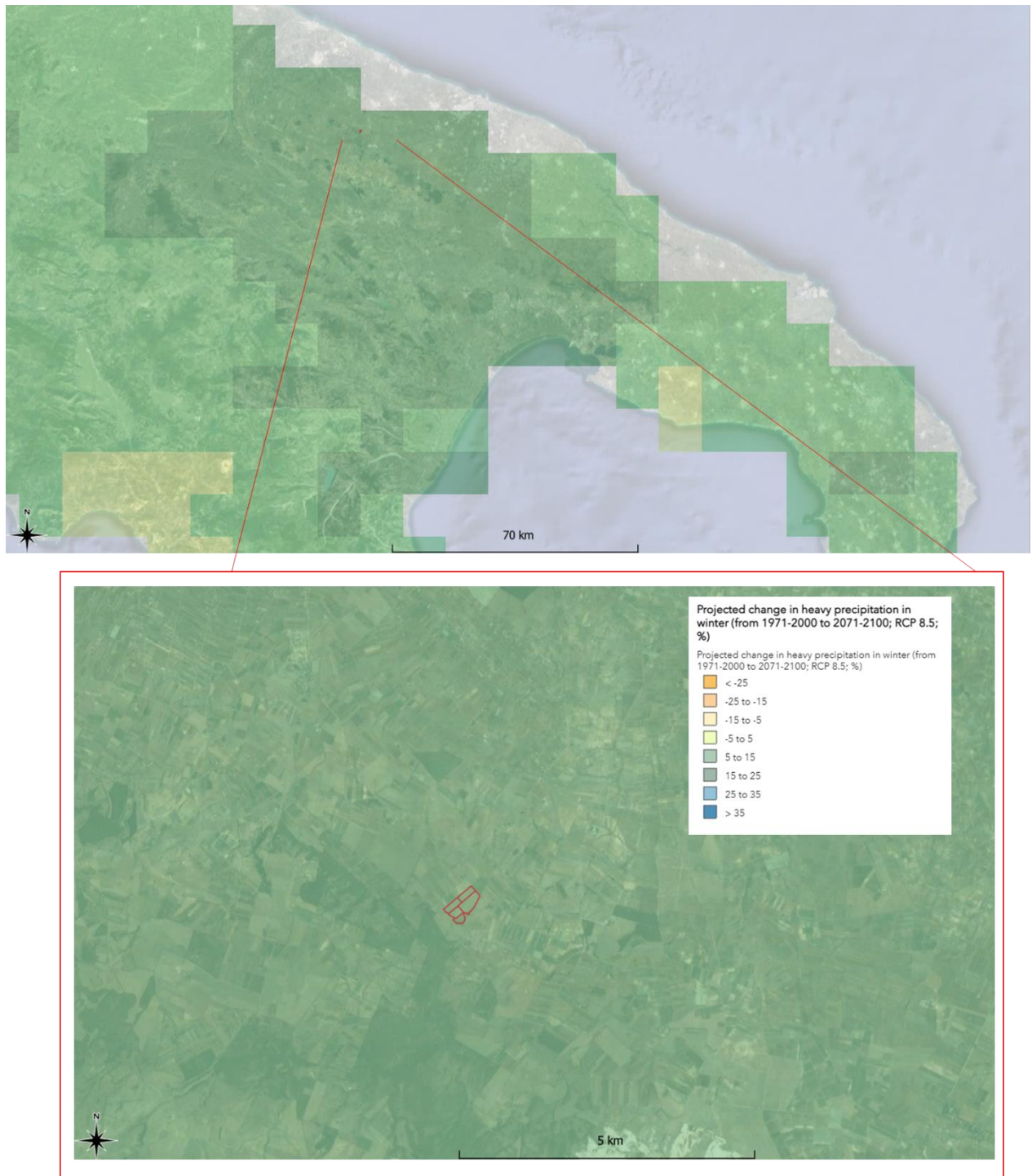


Figura 9: Previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 (EURO-CORDEX). L'area di studio è indicata in rosso.

4.3. Siccità

Nell'area d'interesse il **livello di pericolo di siccità** è classificato, secondo i modelli regionali europei, come **moderato**. Ciò significa che c'è fino al 20% di possibilità che si verifichino condizioni di siccità nei prossimi 10 anni.



La Figura 10 riporta la previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5, ottenuta con il set di dati delle simulazioni dei modelli climatici regionali fornite da EURO-CORDEX.

La siccità meteorologica si basa sull'indice di precipitazione standardizzato per tre mesi (SPI-3). Le tendenze passate si basano sui dati di precipitazione del dataset grigliato E-OBS²¹ mentre le proiezioni si basano su un insieme di modelli del progetto EURO-CORDEX per due scenari di emissioni RCP.

Le tendenze della siccità idrologica sono calcolate in base al deflusso durante il mese più secco nel dataset E-RUN²² che impiega un modello statistico per stimare il deflusso in tutta Europa, basato sul più grande database di osservazioni di flusso e sul dataset E-OBS. Le proiezioni sulla siccità idrologica si basano sul deficit idrico fluviale a 10 anni, calcolato dal modello idrologico LISFLOOD²³ forzato da un insieme di modelli del progetto EURO-CORDEX.

Nell'area oggetto di studio la frequenza probabile di eventi siccitosi nei prossimi 30 anni è compresa tra 4 - 7 eventi.

²¹ <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download-charme.php>

²² https://store.pangaea.de/Publications/Gudmundsson-Seneviratne_2016/e-run_v1.1.nc

²³ *Natural Hazards Project of the Joint Research Centre of the European Commission*

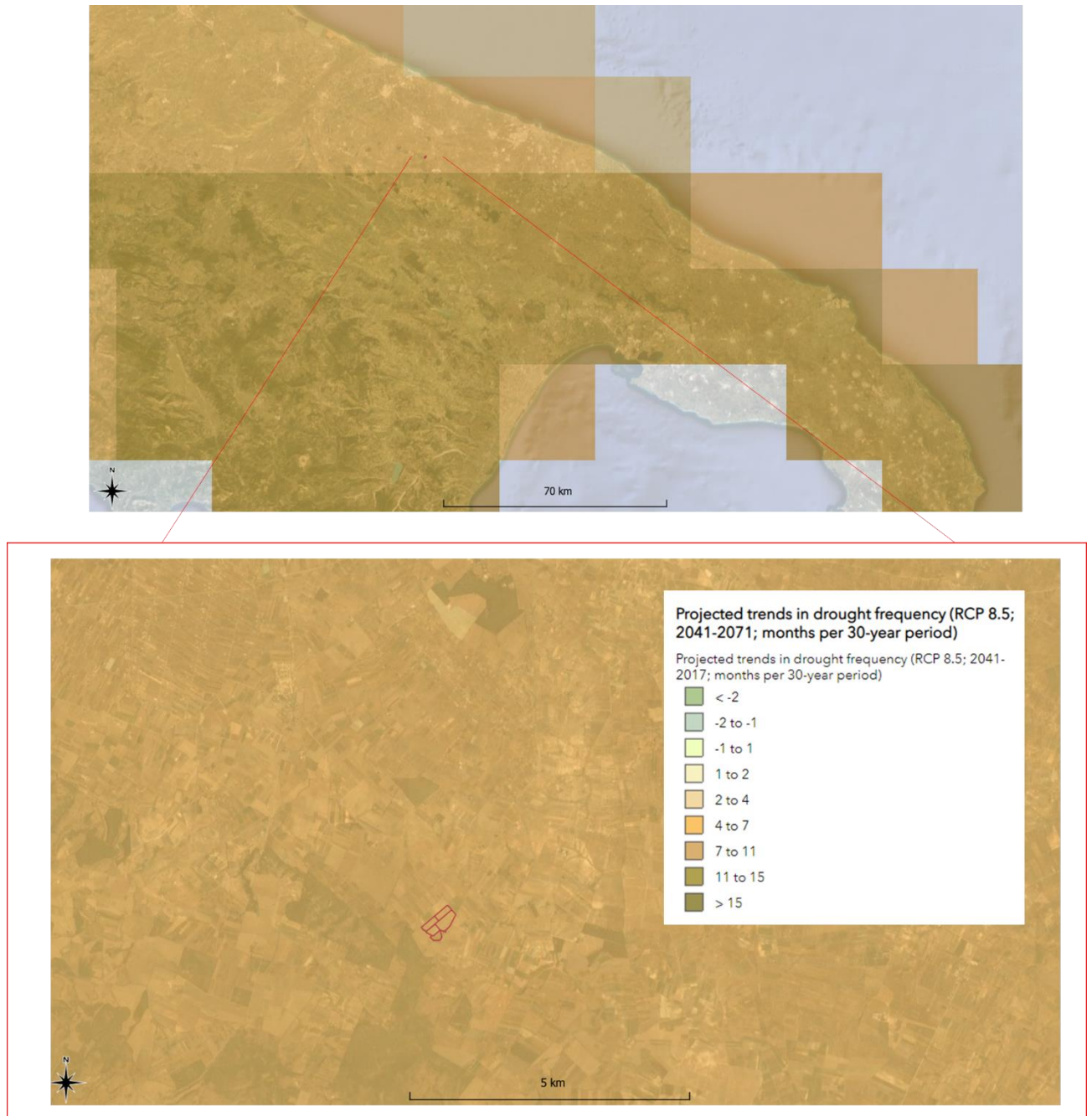


Figura 10: Previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5 (Climate-ADAPT). L'area di studio è indicata in giallo.

4.4. Indice di sfruttamento della risorsa idrica

Strettamente legato allo stress da siccità è l'indice di sfruttamento della risorsa idrica (*Water Exploitation Index plus, WEI+*) che ha lo scopo di illustrare la pressione sulle risorse idriche rinnovabili di un territorio definito in un determinato periodo (ad esempio, stagionale, annuale) come conseguenza dell'uso dell'acqua per le attività umane. I valori superiori al 20% indicano che le risorse idriche sono sotto stress, mentre quelli superiori al 40% indicano uno stress grave



e un uso chiaramente insostenibile delle risorse di acqua dolce²⁴. Il WEI+ è stato stimato come media trimestrale per distretto idrografico, per gli anni 1990-2015, come definito nell'*European catchments and rivers network system* (ECRINS).

L'indice di sfruttamento della risorsa idrica è pari al 42% per l'area di riferimento (Figura 11). Ciò indica un sovrasfruttamento grave della risorsa e che la popolazione è esposta a condizioni di stress idrico.

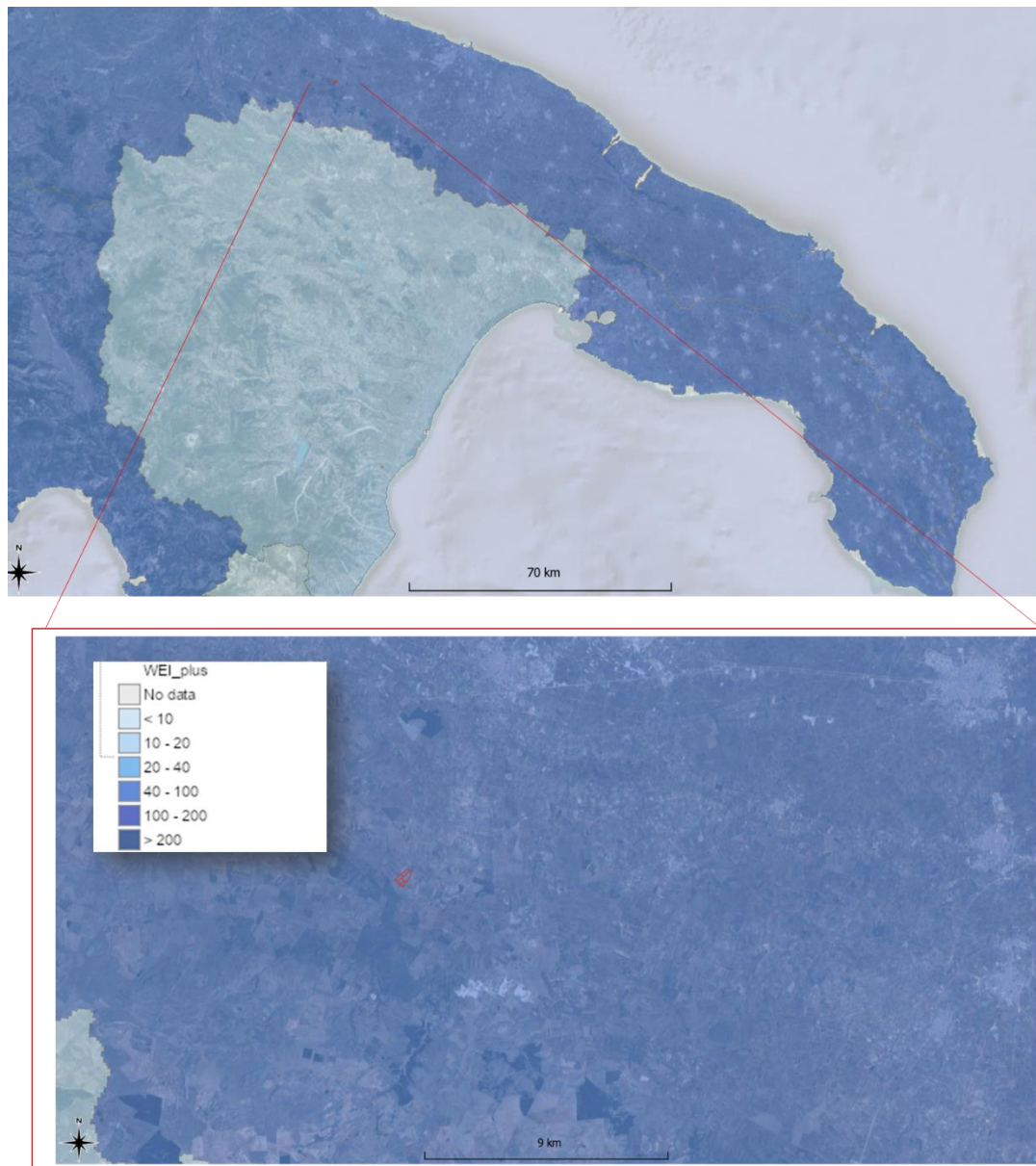


Figura 11: Indice di sfruttamento della risorsa idrica (WEI+). Fonte: European Environment Agency (EEA)

²⁴ Raskin, P., Gleick, P.H., Kirshen, P., Pontius, R. G. Jr and Strzepek, K. ,1997. Indicator codes: CSI 018, WAT 001 Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm Environmental Institute, Sweden. Document prepared for UN Commission for Sustainable Development 5th Session 1997 - Water stress categories are described on page 27-29.



4.5. 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'Attica²⁵.

Il rischio incendi viene qui valutato attraverso l'indice *Forest fire danger* (pericolo di incendi forestali), una misura utilizzata per valutare il rischio di incendi in aree forestali basato su vari parametri climatici e ambientali. Nello specifico l'indice *Forest fire danger* è espresso attraverso l'indice *Seasonal Severity Rating* (SSR), che a sua volta è derivato dal *Canadian Fire Weather Index System*.

Canadian Fire Weather Index System: è un sistema consolidato e ampiamente utilizzato per valutare il rischio di incendi forestali in Canada, ma è stato adottato e adattato anche in molte altre regioni del mondo. Esso combina vari *fattori meteorologici, come temperatura, umidità, velocità del vento e precipitazioni, per calcolare diversi indici che indicano l'essiccazione del combustibile e il potenziale di incendio.*

Seasonal Severity Rating (SSR): è uno degli indici derivati dal sistema sopra menzionato. Rappresenta una misura della severità stagionale degli incendi forestali. Mentre altri indici del sistema canadese potrebbero concentrarsi su condizioni giornaliere o su specifiche componenti del rischio d'incendio (come la disponibilità di combustibile o la probabilità di innesco), l'SSR fornisce una visione d'insieme della gravità prevista per una stagione di incendi, tenendo conto delle condizioni meteorologiche e della disponibilità di combustibili.

Qui, l'indice SSR è stato calcolato per le proiezioni future del clima in Europa, in base alle condizioni previste nello scenario RCP 4.5 per gli anni 2071-2100. Questo significa che sono stati utilizzati modelli climatici per prevedere come cambieranno le condizioni meteorologiche nel futuro, e che tali previsioni sono poi state applicate all'indice SSR per **stimare come il rischio di incendi forestali potrebbe evolversi in Europa nel corso della fine del 21° secolo.**

²⁵ EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*



In sintesi, l'indice *Forest fire danger*, espresso attraverso l'SSR in questo contesto, fornisce una stima della severità stagionale degli incendi forestali in Europa basata su previsioni climatiche future.

Nell'area di interesse il pericolo di incendi è classificato come **alto** secondo le informazioni attualmente disponibili, con un indice FFD di circa 6.

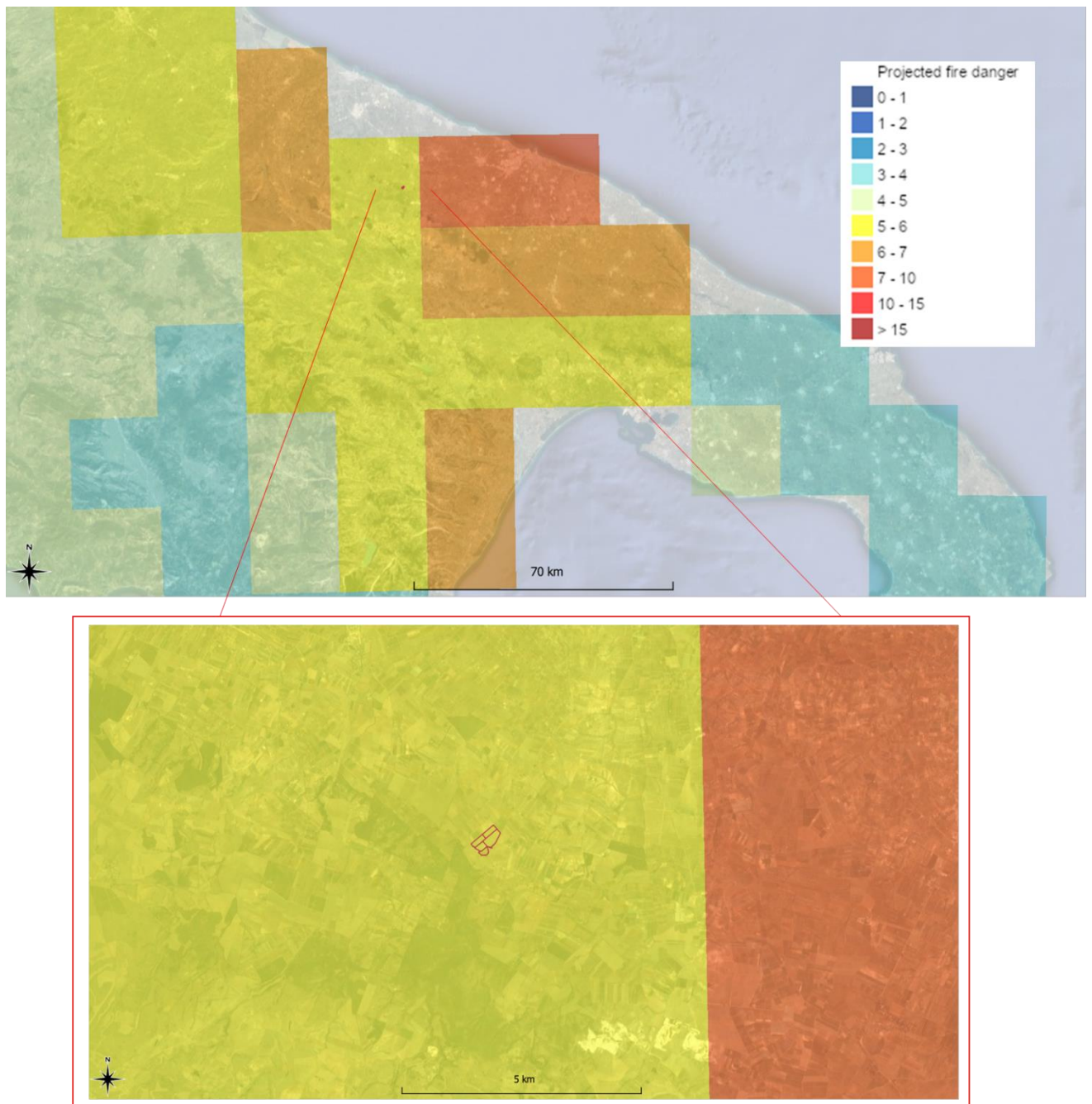


Figura 12: Previsione del rischio incendi classificato con l'indice *Forest fire danger*.



4.6. Innalzamento del livello del mare

Il previsto innalzamento del livello del mare dovuto ai cambiamenti climatici avrà ripercussioni sugli insediamenti costieri, aumentando l'erosione e le inondazioni. Inoltre, l'innalzamento del livello del mare potrà compromettere la disponibilità di acqua dolce a causa dell'intrusione di acqua salata nelle falde acquifere sotterranee. Questo fattore aumenta il livello di rischio nell'area di studio in considerazione del sovrasfruttamento delle risorse idriche analizzato nella sottosezione 4.4.

Nell'area d'interesse il livello di **rischio legato all'innalzamento del livello del mare è classificato alto, secondo i modelli regionali europei**. Ciò significa che si prevede la possibilità che onde potenzialmente dannose inondino la costa almeno una volta nei prossimi 10 anni.

La Figura 12 mostra la variazione prevista del livello relativo del mare (in metri) nel 2081-2100 rispetto al 1986-2005 per lo scenario di emissioni RCP4.5 basato su un insieme di modelli climatici innestati (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5*).

Nell'area di interesse si prevede **un innalzamento del livello del mare di 0.40 m nel periodo 2081-2100**.

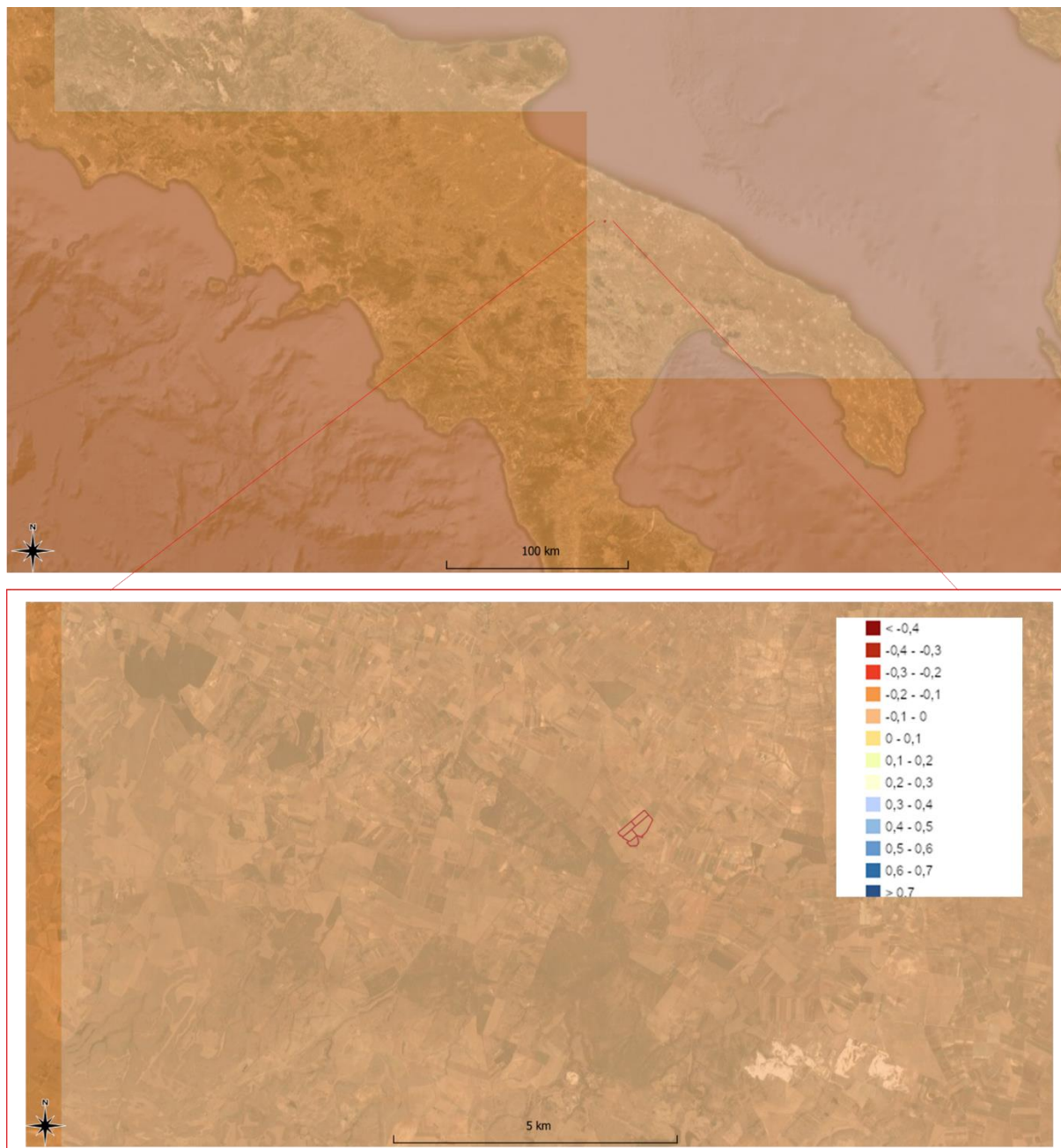


Figura 13: Previsione dell'innalzamento del livello del mare per lo scenario RCP 4.5 (Climate-ADAPT).

5. Resilienza dell'impianto agrivoltaico al rischio climatico: strategie di compatibilità e gestione

Per rendere il progetto agrivoltaico più compatibile con gli *stressor* climatici e **ridurre i livelli di pericolo e rischio** saranno adottate diverse strategie e misure di adattamento. Alcune delle azioni chiave considerate sono:



1. **Sistemi di irrigazione efficienti e sostenibili:** l'utilizzo di sistemi di irrigazione ad alta efficienza può contribuire a ridurre il rischio di stress idrico in caso di siccità o riduzione delle risorse idriche.
2. **Prevenzione e gestione degli incendi:** un'adeguata prevenzione e gestione degli incendi boschivi è essenziale per ridurre il rischio di incendi. Ciò può includere la creazione di fasce di protezione, il controllo delle erbe infestanti, il monitoraggio costante e l'addestramento del personale per la gestione degli incendi.
3. **Scelta di colture adattate al clima locale:** optare per colture adattate alle condizioni climatiche dell'area di interesse può aiutare a mitigare gli effetti negativi delle alte temperature e delle precipitazioni intense. Le colture resistenti alla siccità o alle temperature estreme possono essere preferite per garantire la stabilità del rendimento in caso di cambiamenti climatici.
4. **Conservazione del suolo:** adottare misure per la conservazione del suolo, come la copertura vegetale e l'uso di pratiche di coltivazione sostenibili ed evitare l'erosione del suolo può aiutare a proteggere il terreno da danni e ridurre il rischio di perdita di fertilità del suolo.
5. **Pianificazione e progettazione attente all'ambiente:** una pianificazione e progettazione che tiene conto delle condizioni microclimatiche e ambientali garantisce che il progetto agrivoltaico sia adeguatamente integrato nell'ecosistema circostante. La scelta della posizione, delle colture e delle tecnologie deve essere basata su una valutazione completa delle condizioni locali e dei possibili impatti del cambiamento climatico.

Inoltre, è importante tenere presente che il **monitoraggio continuo del clima e degli effetti del cambiamento climatico nell'area di interesse è fondamentale per adattare il progetto agrivoltaico in modo tempestivo ed efficace**. L'adozione di strategie di adattamento flessibili e la capacità di apportare modifiche in base alle nuove informazioni climatiche contribuiranno a garantire la sostenibilità e la resilienza del progetto agrivoltaico nel lungo termine.

Considerati questi presupposti e l'adozione delle azioni chiave sopra elencate, in linea con gli **Orientamenti tecnici per infrastrutture a prova di clima nel periodo 2021-2027 (2021/C 373/01)**, **il progetto si configura a prova di clima**.

6. Analisi modellistica previsionale

Per esaminare gli **impatti specifici e le interazioni dell'impianto agrivoltaico con l'ecosistema circostante**, è stata condotta un'analisi dettagliata con il modello micrometeorologico CFD ENVI-met. Questo approccio è stato adottato in considerazione dei dati rivelati dall'analisi dei rischi



climatici fisici pertinenti all'area di studio, riconoscendo la **necessità di una progettazione che sia sensibile alle variabili ecosistemiche e ambientali**. In questo contesto, una rigorosa indagine biologica e ambientale è stata integrata per analizzare **l'impatto dell'opera sul microclima nonché gli effetti microclimatici e i servizi ecosistemici delle fasce di mitigazione**: la variazione del microclima (in termini di temperatura dell'aria, umidità relativa, temperatura del suolo, umidità del suolo ecc) è stata valutata in diversi scenari con differenti barriere vegetazionali col fine di valutarne l'efficacia e i servizi ecosistemici.

1. ENVI-met: set up modellistico

Attraverso un approccio olistico, ENVI-met (Bruse & Fleer, 1998) considera l'ambiente come un unico organismo in cui tutti i diversi elementi dell'ambiente urbano o del paesaggio e la vegetazione interagiscono tra loro. ENVI-met è particolarmente utile nella valutazione di impatto di nuovi interventi di *urban-design* in 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 (www.envimet.com)

Il modello di calcolo implementato comprende:

- ✓ flussi di radiazioni su tutto lo spettro, dall'infrarosso all'ultravioletto, rispettando l'ombreggiamento, la riflessione e l'emissione delle radiazioni dal sistema di edifici e vegetazione;
- ✓ traspirazione, evaporazione e flussi di calore sensibile dalla vegetazione nell'aria;
- ✓ simulazione completa dei fattori fisici delle piante, come ad esempio la reazione di fotosintesi ed i suoi effetti;
- ✓ temperatura delle superfici dell'area di simulazione (edifici e suolo);
- ✓ scambi di calore e di acqua all'interno del suolo;
- ✓ calcolo indici biometeorologici dei fruitori dell'area in analisi;
- ✓ dispersione di gas inerti e particolato e sedimentazione su superfici e foglie;
- ✓ flussi d'aria e turbolenze, dati relativi al vento.

Gli input della simulazione possono essere suddivisi in tre componenti: "Area", "File di configurazione" e "Database". Il file "Area" è stato creato attraverso l'interfaccia grafica del software. Esso contiene primariamente i dati geometrici del modello simulato:

- Dimensione dell'area;
- Spazi verdi (a terra ed in quota);
- Tipo di vegetazione;



- Strade;
- Tipologie di suolo;

Attraverso questa interfaccia è stata identificata la zona geografica in cui è posta l'area di modello e l'orientamento cardinale della stessa. La determinazione dell'area geografica è avvenuta mediante l'indicazione delle coordinate di latitudine e longitudine del sito.

Per analizzare l'effetto del progetto agrivoltaico sono stati simulati due scenari e quindi generate due diverse "Aree": lo scenario allo stato di fatto (scenario attuale) e lo scenario di progetto (scenario agrivoltaico) in cui è stata ricostruita l'area con le scelte agronomiche riportate nella progettazione agricola, con il layout di progetto e con le misure di mitigazione previste. Nello specifico, come si osserva nella Figura 14 è stata ricostruita una parte dell'area di progetto con tre fasce di mitigazione:

- **Bordo 1:** mitigazione con uliveto/mandorleto + rimboscimento del verde preesistente;
- **Bordo 2:** agricoltura alternativa con mandorleto + rimboscimento del verde preesistente;
- **Bordo 3:** due fasce di mitigazione con uliveto/mandorleto + mellifere, arbustive, erbacee;

Il bordo 4 non è stato simulato perché gli effetti microclimatici sono comparabili e ritenuti simili al Bordo 3.

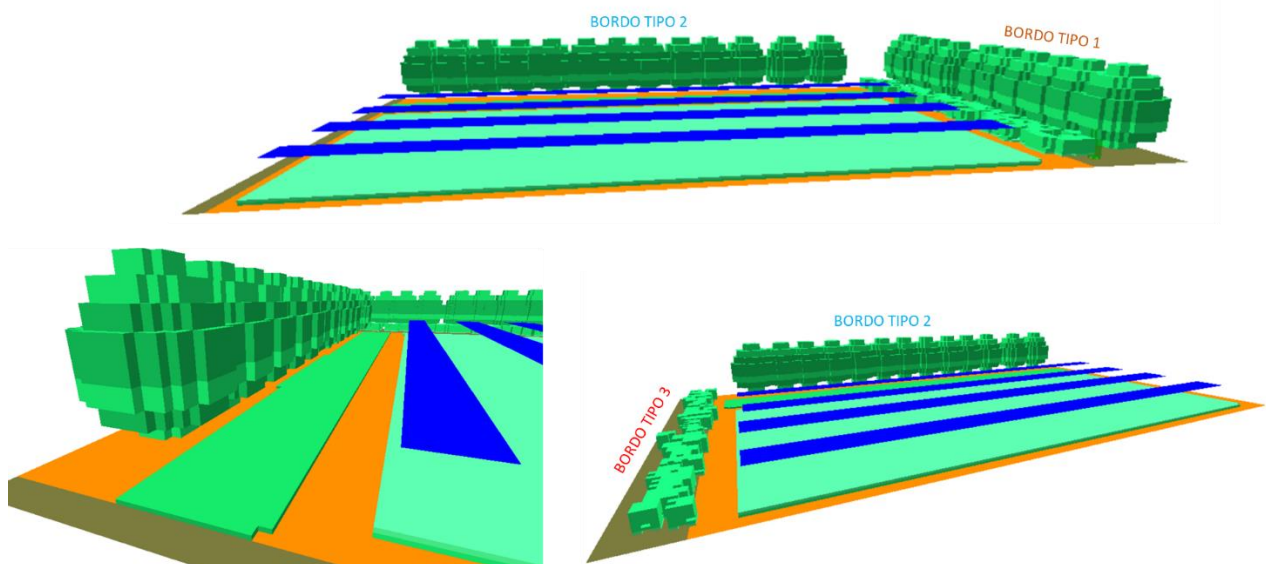


Figura 14: Scenari simulati in ENVI-met e bordi di mitigazione.

Per modellare l'area di lavoro e svolgere i calcoli associati ad equazioni di bilancio, lo spazio del modello di simulazione viene discretizzato in volumi finiti. Il file "Area" è costituito da celle



tridimensionali scelte ed impostate in fase iniziale. Nello specifico, **la dimensione di ogni singola cella nel dominio computazionale della presente elaborazione modellistica è di 1m (asse x) x 1m (asse y) x 1m (asse z)**. L'area simulata in 3D (dominio computazionale) nei due scenari “attuale” e “agrivoltaico” **ha una dimensione di 600 m (orizzontale) x 100 m (verticale), con un'altezza verticale di 50 m.**

Per **aumentare l'accuratezza** delle simulazioni modellistiche e **ridurre il tempo computazionale** richiesto per il modello numerico, **le aree selezionate per l'analisi con ENVI-met rappresentano una porzione ridotta rispetto all'intera area del progetto di agrivoltaico**. Tuttavia, è importante sottolineare che i **risultati ottenuti** da questa area rappresentativa possono essere considerati **replicabili nello spazio**, data l'uniformità del progetto. Ciò significa che le informazioni ricavate dalla simulazione microclimatica possono essere generalizzate all'intero sito del progetto di agrivoltaico, consentendo di formulare conclusioni valide sull'impatto termico e sulla qualità dell'aria nell'intera area interessata.

Per determinare l'andamento giornaliero della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa è stata fissata come dato in ingresso la temperatura minima (T_{min}), la temperatura massima (T_{max}) e l'umidità relativa minima e massima (RH_{min} , RH_{max}) prendendo in considerazione un tipico giorno estivo. Il suolo è stato caratterizzato utilizzando il database di ENVI-met (*Default Soil*) e per la rappresentazione della vegetazione sono state impiegati i modelli 3D delle specie presenti disponibili nel database *Albero* di ENVI-met.

1.1. Parametri modellistici investigati

L'impatto sul **microclima** del progetto di rigenerazione proposto è stato valutato con ENVI-met nei vari scenari in termini di **temperatura dell'aria (T_{air})**, **umidità relativa atmosferica (RH_{air})**, **velocità del vento (WS)**, **temperatura delle superfici (T_{soil})**, **umidità relativa del suolo (RH_{soil})**, **turbolent kinetic energy (TKE)**. Lo studio dell'indice di *temperatura fisiologica equivalente PET* ha permesso invece di valutare l'impatto delle scelte progettuali sul **comfort termico**.

Calcolo del comfort termico: l'indice 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 indumenti²⁶.

²⁶ Höpfe, P. 1999. *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*. *Int J Biometeorol* 43, 71–75.



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.

I valori di PET e le corrispondenti percezioni termiche sono indicati nella Tabella 13.

Tabella 13: Scala di percezione termica PET

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

2. Analisi dei servizi ecosistemici legati allo stoccaggio e assorbimento di inquinanti

L'utilizzo del modello ha fornito un quadro predittivo e quantitativo delle possibili variazioni nella concentrazione di CO₂ atmosferica nell'area di progetto, consentendo una valutazione più accurata e dettagliata degli **effetti del progetto agrivoltaico sulla qualità dell'aria**. Nello specifico, il modello ha considerato il **processo di fotosintesi** delle piante incluse nel progetto agricolo e



quindi ha permesso la **valutazione dell'assorbimento di CO₂ dall'atmosfera** durante la fotosintesi e la conversione della stessa in biomassa.

La quantità di CO₂ atmosferica è stata calcolata in tutta l'area di progetto ed è stato effettuato un confronto dello scenario "Progetto Agrivoltaico" con uno scenario di riferimento senza il progetto "Scenario attuale".

Si è osservata una diminuzione di **CO₂ pari a 0.15 ppm nello scenario "Progetto Agrivoltaico"**.

Questo può essere dovuto a:

1. **Assorbimento di CO₂ dalle piante:** durante il processo di fotosintesi le piante assorbono CO₂ dall'atmosfera e la utilizzano per la produzione di energia. Di conseguenza, la presenza di colture nell'area di progetto può portare a un maggiore assorbimento di CO₂, contribuendo a una diminuzione della sua concentrazione atmosferica.
2. **Effetto mitigante della vegetazione sulla temperatura:** la presenza di piante nell'area di progetto può influire anche sulla temperatura ambientale. Le piante, attraverso l'evapotraspirazione, rilasciano vapore acqueo nell'atmosfera. Questo processo può contribuire a ridurre la temperatura dell'aria circostante, creando un ambiente più fresco. Temperature più basse possono influenzare la capacità di assorbimento della CO₂ da parte delle piante stesse e favorire una maggiore efficienza del processo fotosintetico.

Inoltre, la concentrazione di CO₂ può essere ulteriormente abbattuta da pratiche di gestione del suolo che promuovono la fertilità e la conservazione del terreno. Queste pratiche possono contribuire a migliorare la struttura del suolo, aumentare la sua capacità di trattenere carbonio e ridurre la sua emissione di CO₂. Di conseguenza, uno scenario agrivoltaico può contribuire a un **bilancio del carbonio più equilibrato nel suolo**, influenzando indirettamente anche la concentrazione di CO₂ atmosferica.



3. Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica

La Tabella 14 presenta i risultati dettagliati delle simulazioni ENVI-met, con dati specifici estratti alle ore 12:00. Questi risultati includono misurazioni a 1.4 metri di altezza, che forniscono *insight* approfonditi sui parametri microclimatici atmosferici. Tali dati sono fondamentali per **analizzare l'impatto combinato delle pratiche agricole e dell'installazione fotovoltaica nell'ambiente locale nei contesti degli scenari "Attuale" e "Agrivoltaico"**.

Per quanto riguarda i dati rilevati a livello del suolo (0 metri), questi si concentrano sui parametri relativi alla salute del terreno e sono cruciali per valutare gli impatti dell'agricoltura combinata con l'energia fotovoltaica sulla vitalità del suolo e sulla crescita delle colture.

Infine, si presenteranno delle mappe di distribuzione spaziale per alcuni di questi parametri, che saranno utili per visualizzare l'interazione dinamica tra gli impianti fotovoltaici e il contesto agricolo circostante, permettendo così una valutazione più completa e integrata degli effetti dell'agrivoltaico sull'ambiente.

Tabella 14: Sintesi dei risultati emersi dalla simulazione modellistica previsionale.

	Parametro	Scenario			Impatto
		Attuale	Agrivoltaico (Bordo 1)	Agrivoltaico (Bordo 3)	
MICROCLIMA	Temperatura dell'aria (°C)	35,99	29,24	30,07	Positivo
	Umidità relativa (%)	22,67	42,33	38,5	Non rilevante considerate le specie vegetali da mettere a dimora.
	Velocità del vento (m/s)	2,27	1,89	1,87	Non rilevante.
	Temperatura superficiale (°C)	44,72	34,66	36,47	Positivo
	Umidità del suolo (%)	0,11	3,64	2,22	Positivo
	Turbolent kinetic energy (m ² /m ³)	4,15	2,98	3,04	Positivo
COMFORT TERMICO	Physiological Equivalent Temperature (°C)	52,27	43,82	44,84	Positivo.



QUALITÀ DELL' ARIA	CO2 (ppm)	401	400,8	400,8	Positivo

La presenza di valori elevati nella tabella è attribuibile alla simulazione effettuata per il giorno con il più alto stress termico estivo, tipico dell'area di riferimento. Questa scelta metodologica è stata adottata per fornire una **stima realistica e precisa** degli **impatti climatici più severi che possono verificarsi in condizioni di picco di calore**. Tale approccio è cruciale per comprendere in modo approfondito gli effetti che temperature estreme possono avere sull'interazione tra le pratiche agrivoltaiche e l'ambiente.

Analizzare il sistema sotto condizioni di massimo stress termico permette di valutare la **resilienza dell'ecosistema e dell'infrastruttura agrivoltaica, nonché di prevedere possibili impatti sul microclima, sulla salute del suolo, e sulla crescita delle colture**. Questo tipo di analisi è particolarmente rilevante in contesti afflitti da cambiamenti climatici, dove gli eventi di calore estremo sono sempre più frequenti e intensi. La comprensione di questi scenari aiuta a formulare strategie di mitigazione e adattamento più efficaci, assicurando la sostenibilità a lungo termine del progetto agrivoltaico.

3.1. Analisi dell'impatto del progetto agrivoltaico: le mappe tematiche

Temperatura dell'aria (Tair)

La Figura 15 mostra le differenze di Tair nei due scenari investigati: attuale (terreno incolto) e scenario agrivoltaico. **Si osserva una diminuzione media nello scenario "Agrivoltaico" maggiore per l'area con bordo 1 (agricoltura alternativa con mandorleto + rimboschimento del verde preesistente) con una diminuzione massima osservata di 6,75 °C.**



Scenario Attuale



Tair media: 35,99 °C

Scenario Agrivoltaico



Tair media bordo 1: 29,24 °C
Tair media bordo 3: 30,07 °C

- 6,75 °C
- 5,92 °C

Temperatura dell'aria

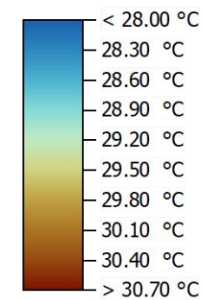


Figura 15: Mappe di distribuzione spaziale di Tair estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



Umidità relativa atmosferica (RHair)

La Figura 16 mostra le differenze di RH nei due scenari investigati: attuale (terreno incolto) e scenario agrivoltaico. È evidente che la presenza di vegetazione incide positivamente sull'umidità relativa, con un aumento medio di circa il 20% nell'intera area dello scenario agrivoltaico. In particolare, le zone con bordo 1, caratterizzate da una maggiore copertura vegetale, mostrano un incremento dell'umidità relativa più significativo.



Figura 16: Mappe di distribuzione spaziale di RH estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



Turbolent kinetic energy (TKE)

La Figura 17 mostra le differenze di TKE nei due scenari investigati: attuale (terreno incolto) e scenario agrivoltaico. Si osserva una diminuzione della TKE nello scenario agrivoltaico di circa $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

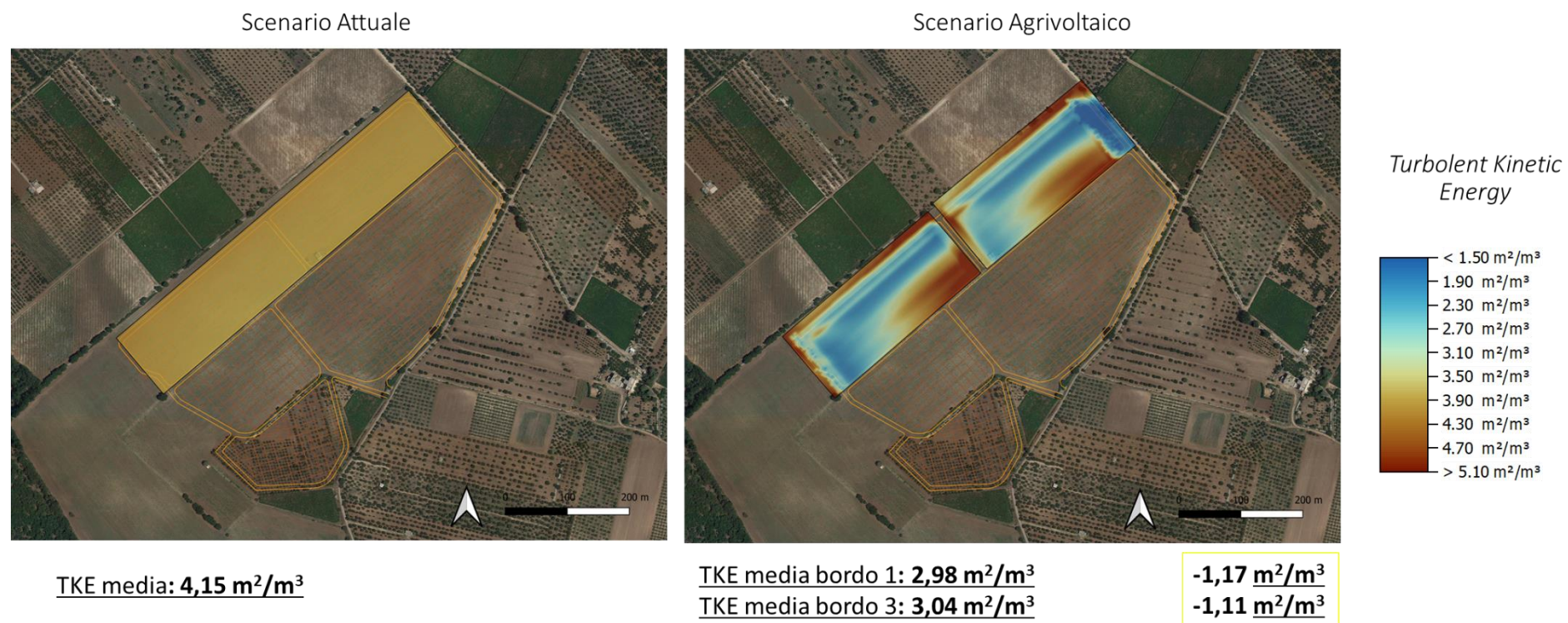


Figura 17: Mappe di distribuzione spaziale di TKE estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



Temperatura delle superfici (Tsoil)

La Figura 18 mostra le differenze di Tsoil nei due scenari investigati. Si osserva che la presenza di vegetazione e dei pannelli genera un maggiore ombreggiamento del suolo e porta ad una diminuzione della temperatura superficiale. Nello scenario “Agrivoltaico” si osserva infatti una diminuzione media massima pari a 10.06 °C.

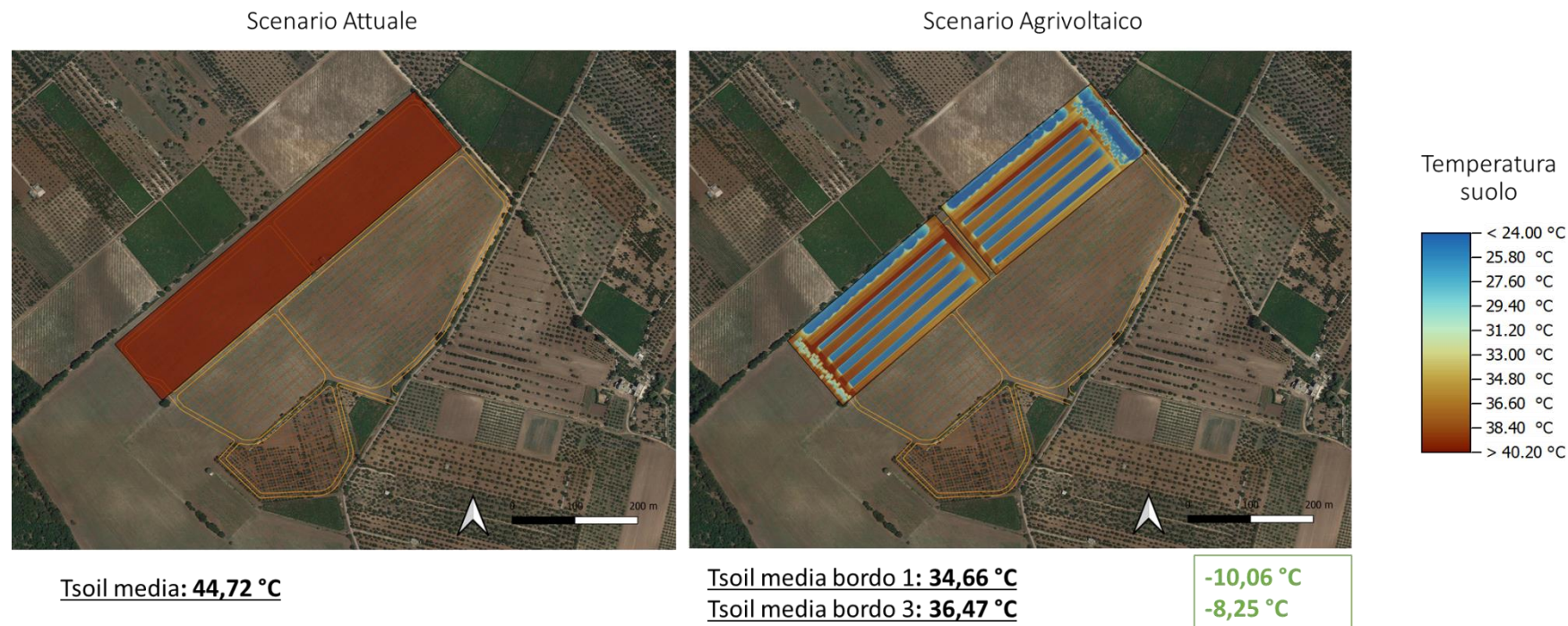


Figura 18: Mappe di distribuzione spaziale di Tsoil estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



Umidità relativa del suolo (RHsoil)

La Figura 19 mostra le differenze di RHsoil nei due scenari investigati. Si osserva che, nello scenario “Agrivoltaico”, l’aggiunta della vegetazione e dei pannelli, generando un maggiore ombreggiamento, porta ad un aumento dell’umidità del suolo pari a 3,5% (con bordo di tipo 1). Tale aumento di umidità si traduce in una maggiore disponibilità di risorsa idrica nel suolo.

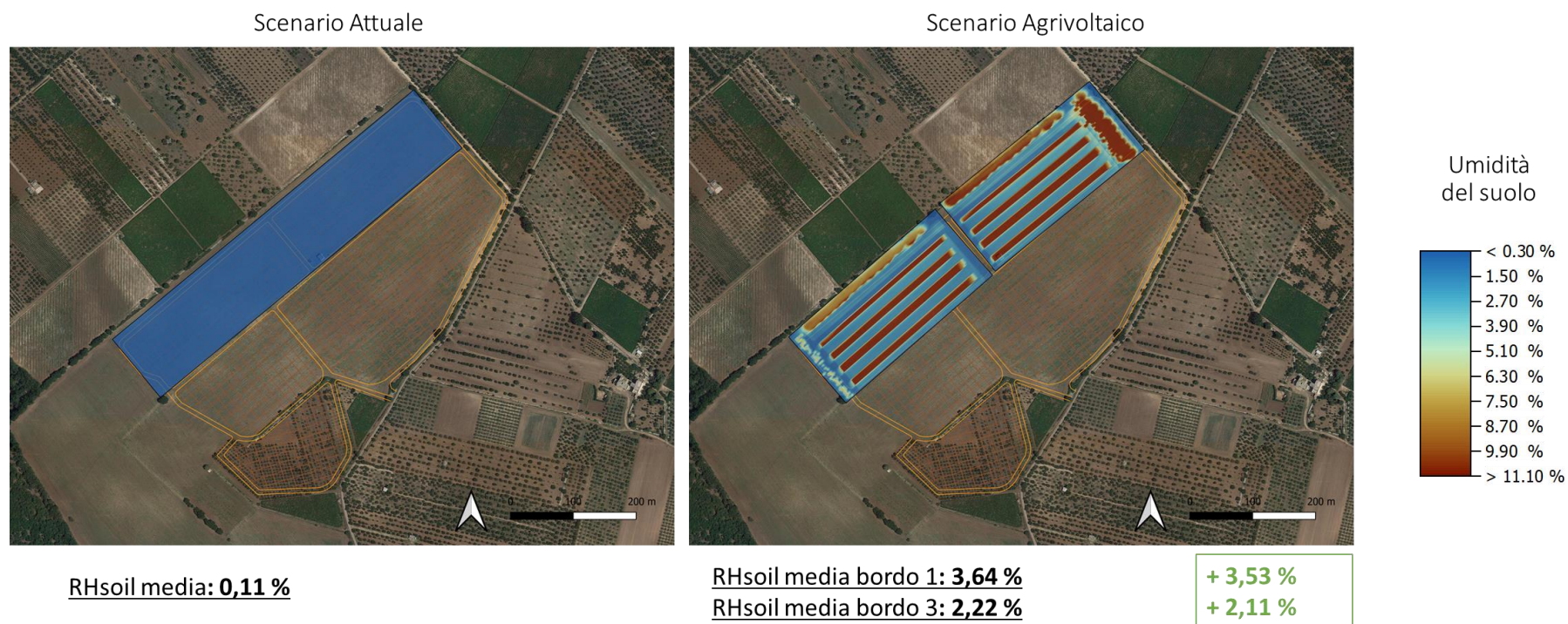


Figura 19: Mappe di distribuzione spaziale di RHsoil estratte alle 12:00 ad un'altezza pedestre di 1.4m.



Dall'analisi dei risultati relativi agli scenari Attuale e Agrivoltaico emerge che:

Microclima:

- Temperatura dell'aria: si nota una **diminuzione significativa di 6.75 °C** della temperatura dell'aria nello scenario agrivoltaico con bordo di tipo 2 e 1 e una **diminuzione di 5.92 °C** nello scenario agrivoltaico con bordo di tipo 2 e 3 rispetto allo scenario attuale. Questo suggerisce che il progetto **agrivoltaico, con le misure di mitigazione implementate, porta ad un netto miglioramento rispetto alla condizione attuale dell'area caratterizzata per lo più da terreno non coltivato.**
- Umidità relativa: l'umidità relativa mostra un incremento di quasi il 20% nello scenario agrivoltaico rispetto allo scenario attuale. Le variazioni non risultano rilevanti per le specie vegetali pianificate.
- Velocità del vento: le variazioni nella velocità del vento tra gli scenari non sono significative. Si osserva comunque una **diminuzione** negli scenari agrivoltaici che aumenta all'aumentare della densità vegetale.
- Turbolent kinetic energy: la TKE è un indice della quantità di energia presente nelle turbolenze del vento. La presenza di vegetazione e strutture agrivoltaiche influisce sulla distribuzione e sull'intensità di questa energia. Una diminuzione della TKE in questi scenari può essere interpretata come segue:
 - Interazione Vento-Vegetazione: **la vegetazione, in particolare alberature e siepi, agisce come una barriera naturale che modifica la dinamica del vento.** Questo può portare a una riduzione della velocità del vento, come osservato, e di conseguenza, della TKE, specialmente nelle aree immediatamente a valle della vegetazione.
 - Effetto dell'agrivoltaico sulla TKE: **gli impianti agrivoltaici, con i loro pannelli e strutture di supporto, alterano la rugosità superficiale e perturbano il flusso d'aria.** Questo può risultare in un **abbassamento della TKE nelle vicinanze delle strutture**, a seconda dell'orientamento e dell'altezza dei pannelli rispetto al terreno.
 - Ripercussioni sul Microclima Locale: **una diminuzione della TKE vicino alla vegetazione e agli impianti agrivoltaici può tradursi in un microclima locale più stabile, con riduzione delle fluttuazioni di temperatura e umidità** a beneficio sia delle colture agricole che della biodiversità locale.
- Temperatura superficiale e umidità del suolo: entrambi questi parametri mostrano miglioramenti nello scenario agrivoltaico, con una **diminuzione sostanziale della temperatura superficiale fino a 10,66 °C** e un aumento dell'umidità del suolo (5,53%).



Comfort Termico:

- Physiological Equivalent Temperature (PET): i cambiamenti microclimatici osservati si traducono in un miglioramento del comfort termico con una diminuzione termica massima percepita pari a 8.4 °C nello scenario agrivoltaico.

Qualità dell'Aria:

4. CO2: la concentrazione di CO2 rimane relativamente stabile tra gli scenari, con una lieve riduzione nello scenario agrivoltaico. Anche se il cambiamento è marginale, suggerisce un potenziale beneficio dell'agrivoltaico sulla qualità dell'aria.

5. Conclusioni

Il presente elaborato tecnico offre un'analisi dettagliata degli effetti che il progetto agrivoltaico, implementato in un'area del comune di Ruvo di Puglia (Ba) ha **sul microclima, sul comfort termico e sulla qualità dell'aria**.

Il **raffreddamento** osservato nello scenario agrivoltaico ha due ragioni principali negli scenari investigati: **l'ombra e l'evapotraspirazione delle specie vegetali** scelte e dei moduli fotovoltaici ed è in linea con quanto riscontrato in letteratura scientifica²⁷.

Considerando le evidenze emerse nel seguente studio e sintetizzate nella Tabella 14 è possibile concludere che:

1. L'impianto agrivoltaico può contribuire a **ridurre l'uso dell'acqua per l'irrigazione** mediante l'**ombreggiamento** dei moduli fotovoltaici. Ciò **ridurrà le esigenze idriche delle colture e aumenterà l'efficienza nell'uso dell'acqua**. Questo è particolarmente importante considerato il **pericolo moderato alla siccità** a cui è soggetta l'area e che un aumento della temperatura atmosferica causato dal riscaldamento globale e un aumento delle condizioni meteorologiche estreme causeranno ulteriore stress alle regioni soggette a siccità.
2. Il progetto agrivoltaico si dimostra efficace nel **migliorare la qualità dell'aria** nell'area interessata dal progetto grazie all'assorbimento e all'accumulo di inquinanti da parte delle specie vegetali

²⁷ Santiago, J.-L.; Rivas, E. *Advances on the Influence of Vegetation and Forest on Urban Air Quality and Thermal Comfort. Forests* 2021, 12, 1133.

Yang, X.; Zhao, L. *Diurnal Thermal Behavior of Pavements, Vegetation, and Water Pond in a Hot-Humid City. Buildings* 2016, 6, 2

Duarte, D.H., Shinzato, P., Santos Gusson C.D., Alves, C.A. *The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance-built density in a subtropical changing climate. Urban Climatology* 2015, 14, 224-239

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.*



selezionate. Questo effetto riveste **un'importanza significativa nel contesto dei rischi climatici**. Attraverso l'assorbimento di CO₂ e altri inquinanti atmosferici da parte delle specie vegetali impiegate nell'agrivoltaico e nel progetto di mitigazione si può contribuire alla riduzione della concentrazione di gas serra nell'atmosfera, **essenziale per contrastare i cambiamenti climatici e i loro effetti negativi, come l'aumento delle temperature, l'innalzamento del livello del mare, l'alterazione dei regimi delle precipitazioni e l'incremento degli eventi meteorologici estremi**.

3. I cambiamenti microclimatici indotti dal progetto agrivoltaico hanno un impatto significativo sul **comfort termico**. Questo contribuisce a creare un ambiente più confortevole per gli addetti alla manutenzione dell'impianto e per il personale addetto alla raccolta agricola e alle colture.

Il presente studio fornisce evidenze concrete sugli impatti positivi del progetto agrivoltaico analizzato, includendo la riduzione dell'inquinamento atmosferico, il miglioramento delle condizioni microclimatiche e la promozione di pratiche agricole più sostenibili. Tali risultati confermano che **il progetto agrivoltaico è in linea con la Convenzione quadro delle Nazioni Unite e degli accordi a essa collegati, quali il Protocollo di Kyoto e gli Accordi di Parigi, per fronteggiare il rischio climatico**. Tali impegni mondiali prevedono che i Paesi si attivino per contenere l'incremento della temperatura media globale tramite la riduzione delle emissioni e l'aumento degli assorbimenti (mitigazione – un esempio è l'attività di rimboschimento), e altresì a predisporre strategie di adattamento per difendersi dagli effetti avversi.