

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali E Ambientali (DAFNAE)
Dipartimento Territorio E Sistemi Agro-Forestali (TESAF)

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

Cambiamenti climatici e irrigazione nel Nordest: uno studio su alcune colture portanti del sistema agricolo veneto

Relatore
Prof. Tarolli Paolo

Correlatrice
Dott.ssa Sofia Giulia

Laureando
Pravato Fabio
Matr. 2062832

Anno Accademico 2022-2023

INDICE

<i>Riassunto</i>	3
1. Introduzione	5
1.1 Cambiamento climatico e l'impatto sul mondo	5
1.2 Cambiamento climatico in Italia	11
1.2.1 Aumento delle temperature e le ripercussioni sull'ambiente	11
1.2.2 I costi economici del cambiamento climatico in Italia.....	14
1.2.3 L'impatto del cambiamento climatico sull'agricoltura italiana	17
1.3 Cambiamenti climatici e precipitazioni	22
1.3.1 Precipitazioni totali.....	22
1.3.2 Distribuzione temporale delle precipitazioni ed eventi estremi	23
1.3.3 Siccità	25
1.4 Cambiamenti climatici e irrigazione	27
1.5 Obiettivo della tesi	28
2. Materiali e metodi	29
2.1 Il comprensorio LEB	29
2.1.1 Irrigazione nel LEB	30
2.1.2 Colture principali.....	32
2.1.3 Suoli.....	33
2.2 Il modello AquaCrop	36
2.2.1 Lo schema di calcolo	37
2.3 Gli scenari climatici	39
2.4 Google Earth Engine	42
2.5 Evapotraspirazione	43
3. Risultati	45
3.1 Analisi climatica	45
3.1 Analisi delle simulazioni per coltura e suoli diversi	49
3.2 Discussione dei risultati	54
4. Conclusioni	58
<i>Riferimenti</i>	59
<i>Ringraziamenti</i>	71

Riassunto

I cambiamenti climatici rappresentano una delle maggiori sfide che il settore agricolo dovrà affrontare nel prossimo futuro, sia a causa della vulnerabilità intrinseca del settore e dei rischi correlati per la produttività e la qualità delle colture, sia in relazione al suo ruolo fondamentale nella mitigazione delle emissioni. Nella regione del Veneto, negli ultimi anni, si sono manifestati significativi cambiamenti nel regime climatico, suscitando riflessioni sulla necessità di migliorare l'efficienza nell'impiego delle risorse idriche.

Si prevede che l'aumento della domanda e gli impatti dei cambiamenti climatici aggraveranno significativamente la pressione sulle risorse idriche del Veneto. In particolare, diventano fondamentali le informazioni relative ai fabbisogni irrigui delle varie colture, che si differenziano tra loro in termini di efficienza nell'uso di acqua anche in funzione del suolo su cui si sviluppano.

L'obiettivo di questa tesi è la valutazione dell'effetto del cambiamento climatico su alcuni distretti irrigui del comprensorio del Consorzio di Bonifica Lessinio Euganeo Berico (LEB), con particolare attenzione ad alcune colture e suoli tipici del comprensorio.

Per il calcolo dei fabbisogni irrigui è stato utilizzato il modello FAO AquaCrop e per le condizioni attuali, dal 2000 al 2022, si è applicato il modello considerando: l'evapotraspirazione potenziale giornaliera [Penman-Montieth], i dati di precipitazione giornaliera CHIRPS, i coefficienti culturali standard del Food and Agricultural Organization of the United States (FAO) Irrigation and Drainage Paper No. 56 (*FAO-56*) e le informazioni sui suoli del comprensorio (ARPAV).

Per modellare le condizioni climatiche future, è stato utilizzato il NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) dataset, ottenuto effettuando il downscaling delle proiezioni climatiche dei modelli globali dell'ultimo Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Questo dataset è stato scelto in quanto già permette di simulare per il clima futuro tutti i parametri necessari per il calcolo di ET secondo Penman Montieth. Questo modello aggiorna gli scenari climatici, simulando climi futuri sulla base di Percorsi Socioeconomici Condivisi – Shared Socioeconomic Pathways (SSP), promossi nel 2021 dall'IPCC (Masson-Delmotte, et al. 2021).

Ci si è concentrati su due scenari SSP analoghi a RCP 4.5 e 8.5, SSP2-4.5 e SSP4-8.5 rispettivamente (Thrasher, et al. 2022).

Il fabbisogno irriguo è stato calcolato ipotizzando di irrigare quando la riserva idrica del suolo scende al di sotto del valore dell'acqua facilmente disponibile e di distribuire una quantità di acqua tale da riportare il suolo a capacità di campo. Si sono ipotizzati diversi deficit idrici, basati sulla individuazione di varie soglie di stress rappresentate dallo scostamento (in percentuale) dal valore dell'acqua disponibile.

I risultati hanno evidenziato un notevole aumento dei fabbisogni idrici stagionali per tutte e tre le colture, con incrementi spesso superiori a 100 mm, soprattutto nel contesto dello scenario SSP4-8.5. In aggiunta, si evidenziano differenze significative dovute alla tipologia di suolo e alla saturazione del terreno durante l'irrigazione.

L'obiettivo, quindi, in futuro è di ottimizzare l'irrigazione delle colture attraverso l'implementazione di strategie adattive basate sui dati emersi dall'analisi, considerando le specificità climatiche e del suolo e garantendo un utilizzo efficiente delle risorse idriche.

1. Introduzione

1.1 Cambiamento climatico e l'impatto sul mondo

Dalla formazione dell'atmosfera terrestre, il clima ha manifestato continue variazioni principalmente a causa dei cambiamenti delle concentrazioni dei gas atmosferici e delle oscillazioni dell'inclinazione dell'asse terrestre (Box 1999). Nel corso delle ere geologiche, il pianeta ha attraversato cicli alternati caratterizzati da glaciazioni e periodi interglaciali, tuttavia, l'aumento delle temperature osservato a partire dalla metà del secolo scorso si distingue per la sua eccezionalità, poiché un incremento termico di tale entità, come quello registrato negli ultimi cento anni (circa 1°C), in condizioni naturali avverrebbe in circa un millennio, ovvero in periodi decisamente più prolungati (Pasini 2021). È fondamentale dare quindi una definizione all'espressione "Cambiamento climatico" e a tale proposito, è opportuno consultare la definizione fornita nel glossario minimo dell'IPCC¹:

“Con il termine cambiamento climatico ci si riferisce a un cambiamento dello stato del clima che persiste per un periodo di tempo prolungato (solitamente di decenni o più), e identificabile (per esempio, attraverso l'uso di test statistici) da cambiamenti della media e/o della variabilità delle sue proprietà. Il cambiamento climatico può essere dovuto a processi naturali interni, o a forzanti esterni, come le modulazioni dei cicli solari, le eruzioni vulcaniche, e i ripetuti cambiamenti antropogenici della composizione dell'atmosfera o dell'uso del suolo.” (IPCC s.d.)

In tal senso, il cambiamento climatico costituisce un concetto ampio che include le alterazioni climatiche in generale, siano esse di origine naturale o derivate dall'azione umana. Dall'altro lato, il cambiamento climatico antropogenico rappresenta una suddivisione all'interno del concetto più vasto del cambiamento climatico ed è strettamente correlato alle influenze dell'attività umana sul sistema climatico del pianeta.

¹ The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): è il foro scientifico formato nel 1988 da due organismi delle Nazioni Unite, l'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM) e il Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) allo scopo di studiare il riscaldamento globale.

È da sottolineare che la comunità scientifica è generalmente unanime nell'accettare l'origine antropica del cambiamento climatico. In particolare, oltre il 99% degli articoli scientifici sottoposti a revisione paritaria, pari, sostiene che l'attuale crisi climatica è principalmente attribuibile alle emissioni di gas serra prodotte dalle attività umane (Lynas, Houlton e Perry 2021).

Il principale gas serra responsabile del cambiamento climatico è l'anidride carbonica, la cui concentrazione attuale supera i 400 ppm (parti per milione), valore che rispetto all'era preindustriale è cresciuto di circa il 40%.

L'anidride carbonica contribuisce al 63% del riscaldamento globale, mentre il rimanente è attribuibile ad altri gas serra, come il metano e il protossido di azoto. Sebbene questi gas siano in grado di trattenere una maggiore quantità di calore rispetto alla CO₂, il loro contributo complessivo è inferiore a causa delle relativamente basse emissioni in atmosfera (Rete Clima 2018).

I settori chiave responsabili delle emissioni di biossido di carbonio (CO₂) e di altri gas serra includono l'energia, i trasporti, l'industria, l'agricoltura, la silvicoltura, le modifiche dell'uso del suolo, la gestione dei rifiuti e l'edilizia (Fig. 1) (Parlamento Europeo 2023).

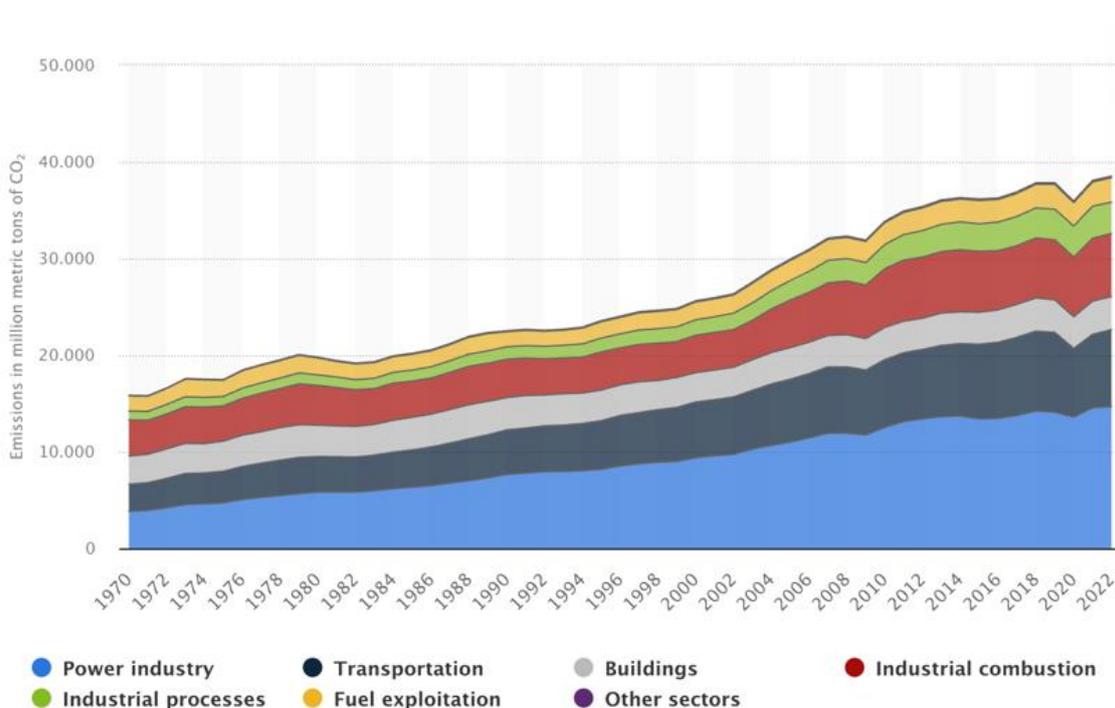


Figura 1 Emissioni globali in giga tonnellate di anidride carbonica dal 1970 al 2022, per settore (Statista 2023)

Globalmente, si osservano in modo sempre più evidente gli effetti derivanti dall'aumento delle concentrazioni di gas serra (Fig. 2). Per ogni intervallo decennale, si registra un incremento della temperatura media globale di 0,2°C, determinando il decennio 2011-2020 come il più caldo mai documentato. Nel corso del 2019, in particolare, è stato raggiunto un incremento di temperatura di 1,1°C rispetto ai livelli preindustriali (Commissione Europea s.d.).

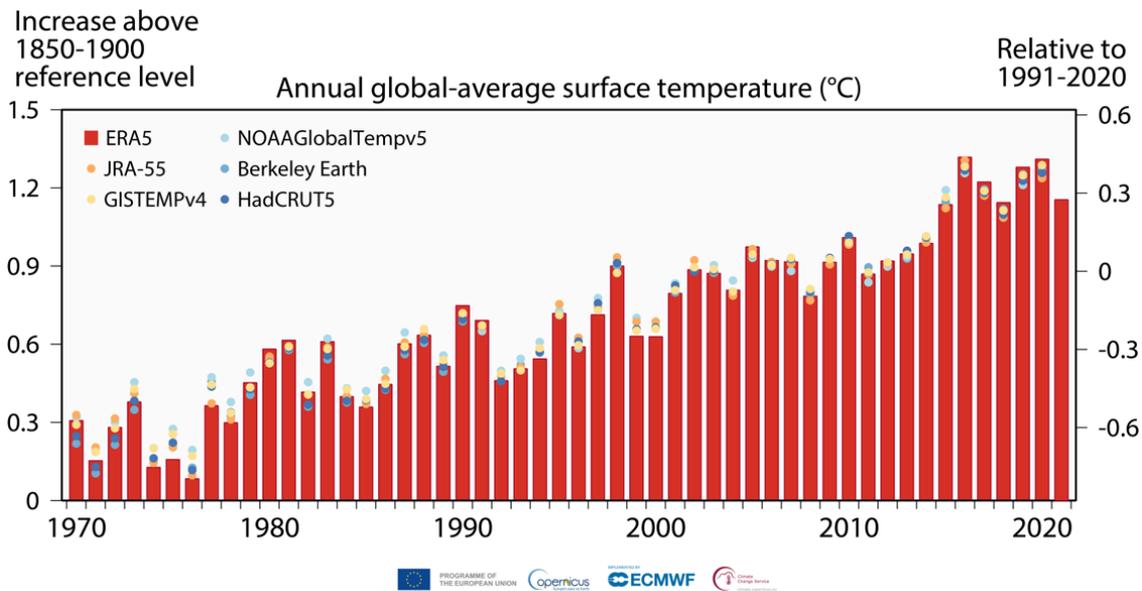


Figura 2 Aumento annuale delle temperature medie globali rispetto al periodo preindustriale (Copernicus 2021)

Le conseguenze dell'incremento delle temperature si manifestano in varie forme, sia a livello ambientale che sociale. Tra queste vi è lo scioglimento dei ghiacciai terrestri e marini, con particolare riferimento alla Groenlandia, la quale ha registrato la perdita di circa 3,8 trilioni di tonnellate di ghiaccio nel periodo compreso tra il 1992 e il 2018, abbastanza da causare un incremento del livello del mare di 10,6 millimetri (The IMBIE Team 2020).

Contemporaneamente, si è osservato un incremento nella frequenza, nella durata e nell'intensità dei periodi di siccità, un fenomeno che è anch'esso attribuibile al cambiamento climatico. Nel periodo compreso tra gli anni 1950 e il 1999, la superficie terrestre globale interessata da situazioni di siccità estrema non aveva mai superato il 13%. Nel 2020, invece, questa percentuale ha raggiunto il 19%. Tale aumento evidenzia l'accentuarsi del problema della gestione delle risorse idriche, con implicazioni significative sia a livello ambientale che socioeconomico (ISPI 2022).

Secondo le attuali prospettive, si prevede che entro il 2050 la crescente carenza di risorse idriche potrebbe spingere circa 700 milioni di individui a intraprendere migrazioni come conseguenza della siccità. Questo fenomeno riveste un'importanza considerevole, considerando che il continente africano è già oggi afflitto da gravi crisi alimentari, ampiamente attribuibili alla scarsità d'acqua (Nazioni Unite 2022). Le implicazioni di queste tendenze pongono ulteriori sfide e questioni di rilevanza globale (ISPI 2020).

Le conseguenze negative della crisi climatica comprendono anche cambiamenti negli ecosistemi, nelle composizioni delle specie e persino l'estinzione a livello locale di alcune specie, con il conseguente impatto sul livello di biodiversità e sul funzionamento complessivo degli ecosistemi. In particolare, si prevede che un aumento della temperatura compreso tra 1 e 2°C provochi una riduzione generale delle specie viventi (FRS²: -14%) e dei rispettivi habitat (FRA²: -35%), con particolare riguardo ai mammiferi e alle piante, che subiranno una diminuzione di FRS del 19% (Nunez, et al. 2019).

Pertanto, tra le sfide globali attuali, il contrasto al cambiamento climatico emerge come una delle problematiche più pressanti che l'umanità deve affrontare nel corso del XXI secolo. Negli ultimi decenni, la comunità internazionale ha adottato una serie di mezzi, accordi e iniziative volti a mitigare gli impatti del cambiamento climatico e adattarsi alle relative conseguenze. Il Summit della Terra tenutosi a Rio de Janeiro nel 1992 costituisce il primo vertice mondiale dei capi di Stato sull'ambiente, nel corso del quale sono stati redatti documenti fondamentali inerenti alla tutela dell'ambiente, tra cui l'Agenda 21, la Convenzione quadro sulla Biodiversità e la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC).

Quest'ultima ha portato alcuni anni dopo alla stesura e all'adozione del Protocollo di Kyoto, il primo accordo che vincola gli Stati aderenti, con oneri di riduzione ponderati in base allo sviluppo industriale, al reddito e ai livelli di efficienza energetica, a ridurre le emissioni di gas che influenzano l'effetto serra del pianeta entro il 2012, portandole al di sotto del 5,2% rispetto ai livelli del 1990. Nonostante le critiche per la scarsa ambizione e le successive defezioni di grandi economie come gli Stati Uniti, il Canada e il Giappone, al termine del 2012 le 36 nazioni rimaste vincolate le avevano ridotto le emissioni del

² Fraction of Remaining Species e Fraction of Remaining Area: indicano la differenza tra lo stato originario e quello previsto, quindi l'integrità della biodiversità

16%, pari a quasi 2,4 miliardi di tonnellate di CO₂ l'anno (Codegoni 2016) e tali risultati hanno posto la base per uno successivo sviluppo delle politiche climatiche mondiali.

Attualmente l'Accordo di Parigi è l'atto internazionale di riferimento per le politiche di contrasto al cambiamento climatico. Adottato nel 2015 durante la Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP21), ha tra gli obiettivi il mantenimento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali e perseguendo attivamente l'obiettivo di limitare l'incremento a 1,5°C.

Parallelamente l'accordo prevede il potenziamento della capacità di adattamento ai danni causati dal cambiamento climatico, sostenendo la resilienza climatica e garantendo che i flussi finanziari siano in linea con un percorso che favorisca uno sviluppo a basse emissioni di gas serra in grado di resistere agli impatti del clima (Eur-Lex 2016).

Nella figura 3 vengono delineati diversi scenari futuri relativi al cambiamento climatico, con variazioni basate sulle quantità di gas serra emesse e sugli impegni assunti nell'ambito dell'Accordo di Parigi, evidenziando così la gamma di possibili sviluppi climatici in relazione alle azioni intraprese per mitigare le emissioni.

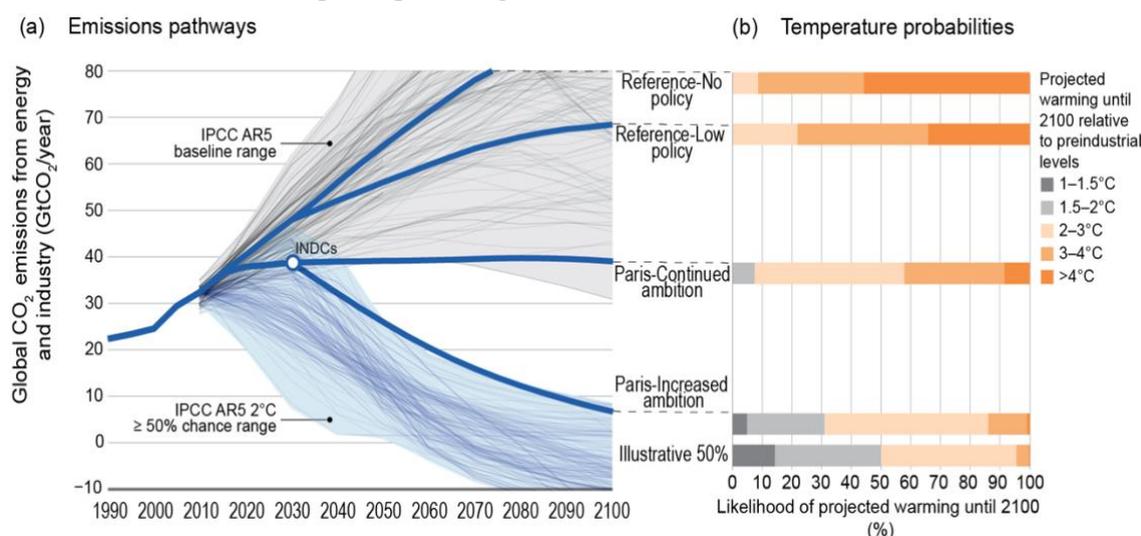


Figura 3 Scenari delle emissioni e delle temperature globali in funzione del rispetto dell'Accordo di Parigi (U.S. Global Change Research Program 2017)

Secondo (DeAngelo, et al. 2017) per rimanere al di sotto dei 2°C le emissioni globali nette dovranno essere azzerate entro il 2080 per poi diventare negative entro la fine del secolo, mentre per evitare un riscaldamento di 1,5°C è necessaria un'azione ancora più aggressiva, con emissioni nette zero entro il 2050 ed emissioni nette negative in seguito. In entrambi i casi, una riduzione più rapida delle emissioni a breve termine riduce significativamente i requisiti per ottenere emissioni nette negative in futuro.

Come indicato dal G20 di Roma del 2021 la neutralità climatica deve essere raggiunta “*entro o attorno metà secolo*”, senza un termine definito; quindi, non tutti gli stati hanno posto come termine il 2050, per esempio Cina e India promettono di raggiungerla rispettivamente entro il 2060 e 2070 (Guidetti 2023).

Nella strategia dell’Unione Europea, oltre alla neutralità climatica entro il 2050 figura l’impegno a ridurre le emissioni di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 (Consiglio Europeo s.d.). Per raggiungere gli obiettivi la Commissione Europea nel 2019 ha lanciato un piano europeo per contrastare il cambiamento climatico, denominato Green Deal (Tamma, Schaart e Gurzu 2019).

Secondo (Climate Action Tracker 2022) gli effetti dell’Accordo di Parigi sono tangibili ma non sufficienti per centrare gli obiettivi preposti. Considerando le azioni attuate negli stati, le previsioni attuali di aumento della temperatura nel 2100 sono di +2,7 °C, in miglioramento rispetto ai +3,6°C stimati nel 2015.

A seguito dell’invasione russa in Ucraina e la riduzione dell’importazione di gas dalla Russia ha spinto diverse nazioni europee ad incrementare il consumo di carbone a fini energetici (ANSA 2022) la situazione riguardante la transizione verde diventa ancora più complessa. In Germania, ad esempio, la dismissione delle centrali nucleari ha ulteriormente aggravato la dipendenza dalle centrali a carbone per la produzione di energia sollevando preoccupazioni sulla capacità del paese di ridurre le emissioni di gas serra e rispettare gli obiettivi climatici stabiliti a livello europeo e globale. (Barretta 2023) Quindi, nei prossimi anni sarà fondamentale un ulteriore sforzo per limitare le emissioni di gas serra e adottare misure concrete per affrontare il cambiamento climatico. Questo richiederà una collaborazione internazionale rafforzata, impegni più ambiziosi da parte degli stati (Nazioni Unite 2021), e l’attuazione di politiche e pratiche che riducano in modo significativo l’impatto ambientale delle attività umane. Solo attraverso uno sforzo concertato a livello globale è possibile raggiungere gli obiettivi di Parigi e mitigare gli impatti sempre più evidenti del cambiamento climatico sulla società e sul pianeta.

1.2 Cambiamento climatico in Italia

1.2.1 Aumento delle temperature e le ripercussioni sull'ambiente

In Italia, analogamente a quanto riscontrato a livello mondiale, si stanno manifestando gli impatti del cambiamento climatico, ma con effetti più marcati rispetto ad altre regioni del pianeta. Secondo le valutazioni dell'IPCC, il bacino del Mediterraneo può essere definito come un "hotspot climatico", quindi un'area in cui i cambiamenti climatici avvengono ad un ritmo più accelerato rispetto alla media globale (IPCC 2019).

Secondo il rapporto "Stato dell'ambiente in Italia" dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), è stato rilevato che l'aumento della temperatura media verificatosi in Italia nei precedenti trent'anni è stato quasi costantemente superiore a quello osservato a livello globale sulla terraferma. Inoltre, nel periodo compreso tra il 1880 e il 2020, le temperature medie in Italia hanno registrato un aumento di circa 1,3°C, superando il tasso di riscaldamento globale medio di circa 0,2°C (Fig. 4). Questi dati confermano quindi una tendenza al riscaldamento più pronunciata rispetto alla media globale (ISPRA 2022).

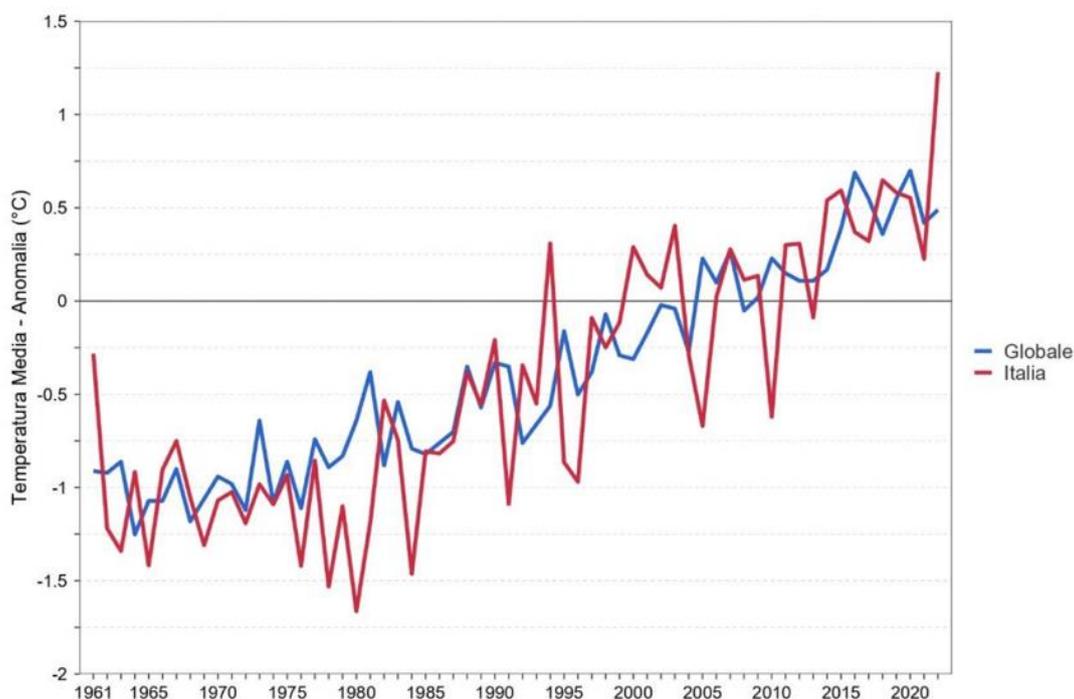


Figura 4 Anomalie medie annuali della temperatura media sulla terraferma, globale e in Italia (SNPA 2023)

L'aumento della temperatura negli anni ha avuto impatti significativi sulle caratteristiche stagionali, nella Pianura Padana tra le tendenze osservate, vi è un aumento della presenza delle alte pressioni miti o calde di origine sub-tropicale durante il periodo invernale, anche se questo fenomeno viene spesso attenuato dall'inversione termica. Al contempo, si è assistito a una diminuzione delle ondate di freddo artiche in grado di bilanciare i regimi anticiclonici. *“In altre parole è come se la Pianura Padana si fosse spostata 500-600 km a sud.”* (Santini s.d.)

Inoltre, la stagione estiva è sempre più interessata dall'aumento delle ondate di calore³ e delle relative intensità (MASE 2022). Questo cambiamento è dovuto al fatto che in passato, le estati erano caratterizzate dalla presenza dell'anticiclone delle Azzorre, una massa d'aria calda semipermanente situata nell'Oceano Atlantico tra approssimativamente i 25° e i 40° di latitudine nord. Questa massa d'aria, sebbene calda, era contraddistinta da umidità e temperature moderate, raramente superando i 25°C. Tuttavia, attualmente, prevale l'anticiclone africano, il quale staziona sul deserto del Sahara. Questo anticiclone presenta temperature più elevate rispetto all'anticiclone delle Azzorre. Durante la sua risalita verso nord, attraversando il Mar Mediterraneo, l'anticiclone africano fa evaporare le acque marine, aumentando notevolmente l'umidità nell'aria. Questo cambiamento ha contribuito a creare il clima afoso tipico delle estati degli ultimi decenni in Italia (Rete Clima 2022).

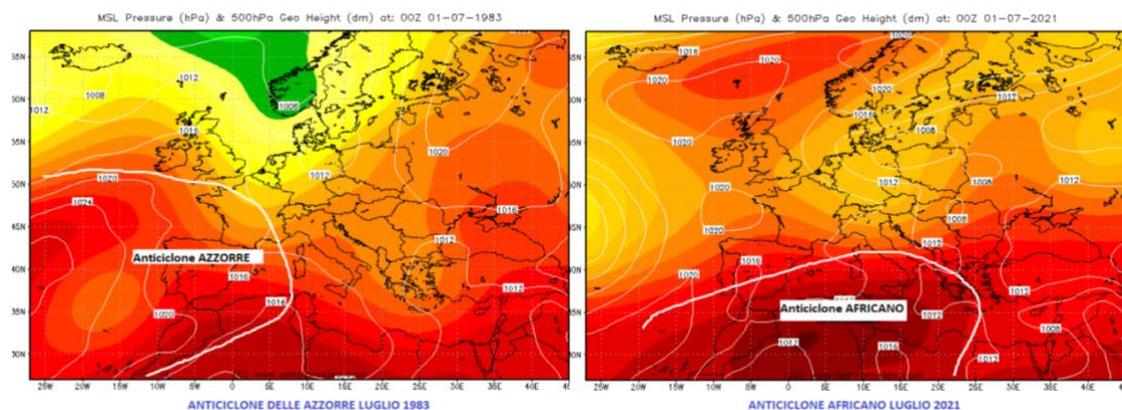


Figura 5 Confronto tra Anticiclone delle Azzorre e Anticiclone Africano. Mappe a 500 Hpa di pressione. Elaborazione Rete Clima su mappe NCEP/NCAR Reanalysis

³ “CCL/CLIVAR Working Group on Climate Change Detection” per l’analisi dei valori estremi di temperatura, identifica un evento della durata di almeno sei giorni consecutivi nei quali la temperatura massima è superiore al 90° percentile della distribuzione delle temperature massime giornaliere nello stesso periodo dell’anno sul trentennio climatologico 1991-2020.

Gli effetti delle ondate di calore vengono ulteriormente accentuati all'interno delle città a causa delle caratteristiche specifiche dell'ambiente urbano. Le città sono contraddistinte dalla predominanza di superfici impermeabili, come pavimentazione in cemento e asfalto, e dalla limitata presenza di spazi naturali come terreni e vegetazione. Queste superfici hanno la capacità di assorbire l'energia solare, sia diretta che riflessa, accumulando calore durante il giorno e rilasciandolo durante la notte.

Questo fenomeno si aggiunge alle emissioni generate dai veicoli, dall'industria e dai sistemi di climatizzazione, contribuendo così all'innalzamento delle temperature nelle città rispetto all'ambiente rurale circostante. Nel rapporto “Analisi del rischio in sei città italiane” pubblicato dalla fondazione CMCC viene riportato come a Torino, Milano, Venezia, Bologna, Roma e Napoli esiste una tendenza al rialzo delle temperature medie, soprattutto negli ultimi trent'anni (dal 1989 al 2020).

Senza l'attuazione di politiche climatiche, si prevede entro il 2100 un aumento delle temperature medie che potrebbe arrivare fino a +5/6°C. Inoltre, è aumentato anche il numero di giorni caratterizzati da temperature molto elevate durante l'anno, per esempio, la città di Napoli ha già registrato un aumento di 50 giorni all'anno con temperature estremamente calde rispetto all'inizio del secolo scorso. Tuttavia, questo fenomeno interessa in modo significativo anche città come Milano (+30 giorni), Torino (+29 giorni) e Roma (+28 giorni) (CMCC 2021).

Altre criticità nell'ambiente urbano correlate all'incremento termico includono la generazione di composti attraverso reazioni fotochimiche, come l'ozono troposferico⁴. Nel contesto italiano del 2022, soltanto l'11,6% delle stazioni di monitoraggio rispettava i limiti stabiliti per l'ozono troposferico, mentre il 57% superava tali limiti per più di 25 giorni (SNPA 2023). Nella troposfera, l'ozono agisce come un gas a effetto serra, contribuendo al riscaldamento globale indotto dall'attività umana. Attualmente, è stato stimato che il riscaldamento globale di origine antropica sia causato per il 16% dall'ozono troposferico (European Environment Agency 2016).

Anche in Italia tra le conseguenze più tangibili del surriscaldamento globale in atto c'è lo scioglimento dei ghiacciai, poiché, a causa della loro reattività ai cambiamenti climatici, stanno adeguando la loro massa e morfologia in risposta alle dinamiche climatiche in atto.

⁴ L'esposizione all'ozono troposferico può causare problemi all'apparato respiratorio soprattutto a soggetti con problemi di salute preesistenti, come l'asma.

Tale adattamento si manifesta principalmente attraverso il costante ritiro delle fronti glaciali. Inoltre, tra gli indicatori che denotano l'aumento delle temperature, si evidenzia un aumento dei crepacci e delle depressioni presenti sui ghiacciai, accompagnato dalla formazione di pozze d'acqua liquida sia in superficie che all'interno delle cavità glaciali. Tra gli anni 2000-2014 i ghiacciai alpini si sono ritirati ad un ritmo di $39 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ in parallelo ad una riduzione dello spessore che varia da $-0,5$ a $-0,9 \text{ m a}^{-1}$ (Sommer, et al. 2020). Tra le cause della riduzione non c'è solo il maggiore scioglimento dovuto alle temperature più elevate ma anche da una diminuzione delle precipitazioni nevose.

Le misurazioni degli accumuli di neve in varie aree alpine dal 1971 al 2019 hanno evidenziato come durante il periodo da novembre a maggio, la profondità media del manto nevoso tra 1000 e 2000 m si è generalmente ridotta ma con valori differenti a seconda dell'area geografica: nella parte nord della catena montuosa gli accumuli medi si sono ridotti di 2,8 cm per decennio, mentre la regione meridionale, corrispondente alla parte italiana, il trend è ancora più negativo, circa $-4,1 \text{ cm}$ per decennio corrispondente ad una riduzione dell'8,9 % (Matiu, et al. 2021).

Negli ultimi 50 anni è diminuita anche la durata del manto nevoso che attualmente ha il punto più basso degli ultimi 600 anni, con una durata media del manto nevoso di 215 giorni, 36 giorni in meno rispetto alla media pluriennale (Carrer, et al. 2023). La perdita dei ghiacciai e delle nevi perenni è un problema che non riguarda esclusivamente le aree montane, ma le conseguenze hanno un impatto su tutta la società: essi, infatti, fungono da riserva idrica per i flussi fluviali durante la stagione estiva fondamentale per l'agricoltura, l'approvvigionamento idrico e le attività industriali.

1.2.2 I costi economici del cambiamento climatico in Italia

Il cambiamento climatico potrebbe avere ripercussioni anche sull'economia italiana, influenzando settori chiave come l'agricoltura, il turismo, l'energia e l'industria.

Nella tabella 1 vengono riassunte due proiezioni del Prodotto Interno Lordo italiano in funzione dell'aumento delle temperature previsto dai modelli climatici RCP2.6 e RCP8.5, quindi rispettivamente scenario di mitigazione (riduzione emissioni molto elevate) e scenario ad alte emissioni (“business as usual”).

		2030	2050	2080	2100
Fondo Monetario Internazionale (Kahn, et al. 2019)	RCP2.6	-0,01%	-0,02%	-	-0,05%
	RCP8.5	-0,9%	-2,56%	-	-7,1%
Fondazione sviluppo sostenibile (Modesti, et al. 2019)	RCP8.5	-	-3,7%	-8,5%	-

Tabella 1 Perdita di PIL in Italia secondo due previsioni

Nonostante la discrepanza nei risultati, dovuto anche al diverso approccio usato, si può dedurre come in uno scenario in cui l'aumento della temperatura rimanesse ben al di sotto dei 2°C (RCP2.6) le perdite di PIL sarebbero contenute, mentre entrambe le previsioni basate sul modello RCP8.5 mostrano come la riduzione aumenterebbe in modo esponenziale per livelli di temperatura più elevati.

Lo studio “Relazione Green Economy” (Modesti, et al. 2019) riporta anche come l'aumento delle temperature avrebbe un effetto non omogeneo sul territorio italiano, le regioni del centro-sud risulterebbero maggiormente vulnerabili, il che verrebbe tradotto in una maggiore perdita di PIL e un incremento della disuguaglianza territoriale dei redditi del 16% nel 2050 e del 61% entro il 2080, quindi il divario economico con le regioni del nord potrebbe amplificarsi ulteriormente.

Bisogna considerare anche che gli studi sopracitati considerano tutte le altre variabili di contesto immutate, per esempio non possono prevedere un eventuale futuro progresso tecnologico che potrebbe migliorare l'adattamento ai cambiamenti climatici dell'economia e l'approccio valutativo considera solo parzialmente gli eventi estremi e catastrofici, considerando che l'incremento delle temperature globali ha un impatto significativo sulla frequenza e l'intensità di tali eventi.

I costi legati al cambiamento climatico non si limiteranno alla perdita di PIL soprattutto in un territorio come quello italiano dove 7.423 comuni (93,9% del totale) è a rischio per frane, alluvioni e/o erosione costiera (Trigila, et al. 2021).

Quindi il tema del dissesto idrogeologico in Italia è di grande rilevanza e complessità, dato che il Paese ha una geografia variegata costituita da ampie superfici montuose e collinari e una vasta rete idrografica che lo rendono particolarmente esposto a fenomeni di questo tipo. La maggiore probabilità di assistere a eventi meteorologici estremi a causa

dal cambiamento climatico antropico (IPCC 2021) e l'aumento del consumo di suolo netto, (che nel 2022 è risultato pari a 70,8 km², +10,2% rispetto al 2021) (SNPA 2023), stanno rendendo più ancora vulnerabile il territorio italiano.

In base ai dati della European Environmental Agency (EEA), nel periodo compreso tra il 1980 e il 2019, i paesi europei hanno subito una perdita collettiva di circa 446 miliardi di euro a causa degli eventi climatici estremi, quali elevate temperature, piogge torrenziali e siccità. In termini assoluti tra i paesi UE l'Italia è al secondo posto, con una perdita economica di 72,5 miliardi nel periodo di riferimento (EEA 2023).

Secondo Legambiente nel periodo 2010-2021 sono stati documentati 1.118 eventi meteorologici estremi che hanno prodotto danni sul territorio italiano. Questi eventi comprendono 486 episodi di allagamenti derivanti da precipitazioni intense, 308 eventi con danni dovuti a trombe d'aria e 134 episodi di esondazioni fluviali (Legambiente 2021).

Attualmente l'Italia è il Paese europeo che affronta il più alto rischio economico dovuto alle inondazioni e in uno scenario in cui si verifichi un aumento della temperatura simile a quello previsto dall'RCP8.5, con un superamento dei 2°C prima del 2050 e di 3°C entro il 2070, i costi diretti previsti in termini di perdita di valore delle infrastrutture si stima che possano variare da 1 a 2,3 miliardi di euro all'anno nel periodo 2021-2050, e da 1,5 a 15,2 miliardi di euro all'anno nel periodo 2071-2100, quest'ultimo valore sarebbe 7 volte inferiore in condizioni di clima inalterato (Spano, et al. 2020).

Con i suoi circa 6400 km di costa (Zanchini e Manigrasso 2017), l'Italia risulta uno dei Paesi a più elevata rischiosità da innalzamento del livello del mare in Europa in termini di danni e di popolazione esposta. Tra il 1872 e il 2019 il tasso medio di innalzamento del livello del mare nell'Alto Adriatico è stato di $1,23 \pm 0,13$ mm/anno, in alcuni casi aggravato da fenomeni di subsidenza come nel caso della città di Venezia dove il valore ha raggiunto i $2,53 \pm 0,14$ mm/anno (Zanchettin, et al. 2021).

Secondo (Ciscar Martinez, et al. 2018) i costi attesi entro il 2050 dovuti all'innalzamento del livello del mare si aggirano tra i 650 e 900 milioni di euro corrispettivamente agli scenari climatici RCP4.5 e RCP8.5, mentre per la fine del secolo raggiungerebbero i 3,1-5,7 miliardi di euro. Vanno considerati anche le spese che dovranno essere sostenute per l'adattamento ai cambiamenti climatici e per sostenere le misure di prevenzione, come previsto dal Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (MASE 2022).

1.2.3 L'impatto del cambiamento climatico sull'agricoltura italiana

Il settore agroalimentare italiano vanta numerose produzioni di eccellenza, è primo in Europa per denominazioni di origine e a indicazione geografica riconosciuti dall'Unione europea con 325 prodotti DOP, IGP, STG e 527 vini DOCG, DOC, IGT (MASAF s.d.). Il valore dell'export del settore alimentare negli ultimi anni è in costante crescita: + 4,1% nel 2020 rispetto all'anno precedente e + 12,5% nel 2021 (ISTAT 2023). Nel 2022 il valore aggiunto dato dalla filiera agroalimentare è stato di 64 miliardi di euro, di cui 37,4 miliardi provenienti dal settore agricolo e 26,7 dall'industria alimentare. Sul totale del PIL italiano rappresenta il 3,7% ma la percentuale sale al 15,2% se vengono considerate tutte le fasi inerenti alla distribuzione e alla ristorazione nonché i servizi presenti all'interno delle filiere (Cappellini 2023).

La valutazione economica dei cambiamenti climatici in agricoltura può avvenire attraverso approcci metodologici diversi, alcuni studi si limitano a determinare i costi diretti, stimando od osservando una variazione della quantità prodotta, mentre altri utilizzano metodi più dettagliati provando ad analizzare, per esempio, i potenziali costi indiretti, gli aggiustamenti dei mercati, gli impatti sul Pil nazionale e sul benessere.

Tuttavia, le previsioni delle rese future e delle relative quantificazioni economiche in funzione delle variazioni climatiche operano nell'incertezza in quanto si rende difficile prevedere gli eventi estremi e gli effetti della variazione delle concentrazioni di CO₂ nel suolo con il suo potenziale effetto di fertilizzazione (Modesti, et al. 2019).

(COPA-COGEA 2004) ha valutato gli effetti dell'ondata di calore anomala e della siccità durante l'estate del 2003 sul settore agricolo e la riduzione media osservata nella produzione nazionale di foraggio, grano, mais, patate è stata rispettivamente del 40%, 8%, 24%, 18%, per un totale di 4-5 miliardi di euro.

L'analisi degli eventi passati è utile al fine di indicare gli ordini di grandezza coinvolti durante eventi climatici estremi analoghi, in questo caso il confronto con l'estate 2022 che con il valore di +2,18°C sopra la media si colloca al secondo posto della serie dal 1961, proprio dopo il 2003 (ISPRA 2023).

(EEA 2012) nella seguente mappa (Fig. 6) fornisce un quadro aggregato dei cambiamenti attesi nei rendimenti di frumento mais e soia in Europa nel 2050 rispetto al periodo 1961-1990 attraverso le simulazioni del modello ClimateCrop includendo gli effetti dei cambiamenti di temperatura, precipitazioni e concentrazione di CO₂ sui rendimenti delle

tre colture. L'elaborazione è avvenuta considerando lo scenario A1B, uno scenario intermedio comparabile in parte con RCP6.0 (IPCC 2013).

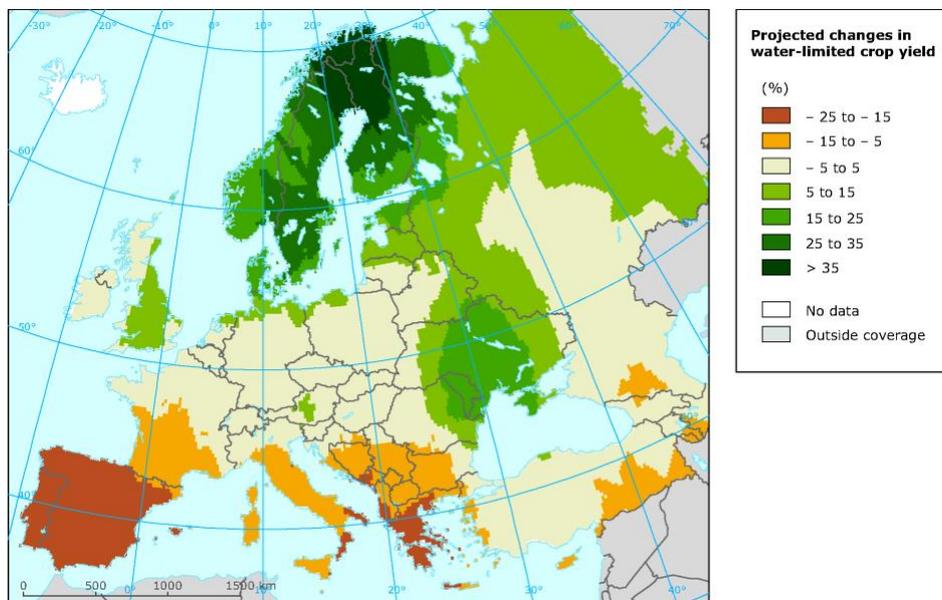


Figura 6 Variazione percentuale media delle rese di frumento, mais e soia nel 2050 rispetto al periodo 1961-1990 (EEA 2012)

Come si può notare viene prevista una dicotomia produttiva tra l'Europa settentrionale e quella meridionale e gli impatti negativi prevarranno in quest'ultima, che in Italia variano tra il 5% e il 25%, contrariamente alle regioni del nord Europa dove è previsto un aumento generale delle rese (Iglesias, et al. 2012).

Quindi, i cambiamenti climatici stanno modificando anche la vocazione agricola del territorio italiano, alcune colture diffuse nell'Europa meridionale potrebbero diventare meno adatte alle condizioni climatiche future a causa dell'innalzamento delle temperature, delle variazioni nei regimi di precipitazioni e di altri fattori climatici (CDC EUROPEE 2009). Allo stesso tempo alcune colture come le produzioni esotiche si stanno diffondendo in latitudini un tempo inadatte come nel sud Italia dove le superfici per la coltivazione dei frutti tropicali come banane, avocado, mango, litchi e avocado in cinque anni hanno triplicato le superfici arrivando a sfiorare i 1200 ettari fra Puglia, Sicilia e Calabria (Coldiretti 2022).

All'interno del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (MASE 2022) viene citato lo studio (Lobell e Gourdji 2012) dove viene affermato che l'aumento delle temperature comporterà anche una riduzione della lunghezza del ciclo di crescita delle

colture, causando minore accumulo di biomassa e con conseguente riduzione della resa soprattutto per le colture a ciclo primaverile-estivo come mais, girasole e soia.

Come si può notare dalla figura 7 le rese delle colture a ciclo primaverile-estivo, specialmente se in regime non irriguo, saranno soggette a riduzioni, soprattutto per mais, girasole e barbabietola da zucchero, mentre leggeri incrementi sono attesi per il frumento, soprattutto nelle aree del centro-nord (Ciscar Martinez, et al. 2018).

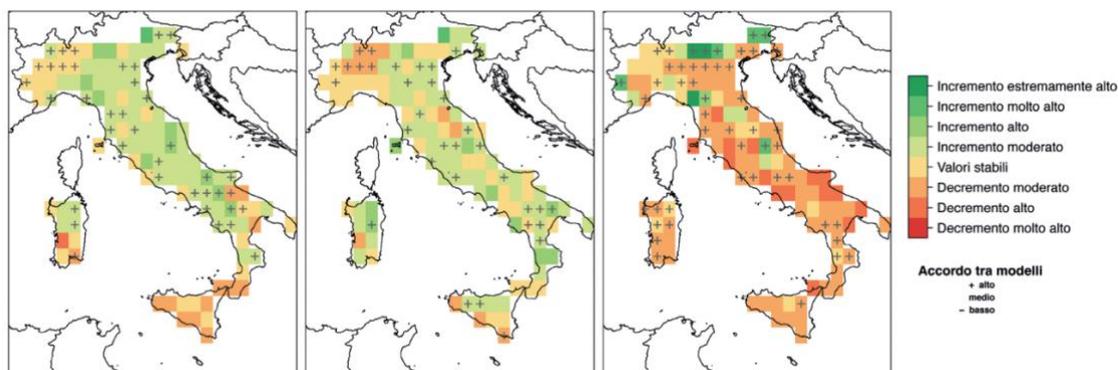


Figura 7 Proiezioni di variazione (%) di resa per frumento duro (sinistra), frumento tenero (centro) e mais (destra) in Italia per il 2036-2065 con lo scenario RCP8.5 (Spano, et al. 2020)

Le maggiori concentrazioni di anidride carbonica possono però compensare gli impatti negativi delle mutate condizioni climatiche attraverso il fenomeno del “global greening”. Il "global greening" è causato dall'aumento dei livelli atmosferici di CO₂ e comporta una maggiore crescita delle piante, rendendole allo stesso tempo anche meno vulnerabili alla siccità. Questo avviene perché, grazie all'aumento della CO₂ nell'atmosfera, le piante riescono a trovare più facilmente questa sostanza e quindi possono ridurre il numero di stomi presenti sulla superficie delle foglie (misurato dall'indice stomatico). Ciò comporta una minore perdita di acqua attraverso la traspirazione (Mariani 2021).

Tuttavia, le colture C₃⁵ come frumento, riso e orzo, trarranno beneficio dal fatto che possono rispondere in modo più efficiente agli effetti diretti dell'incremento dei livelli atmosferici di CO₂ rispetto alle specie C₄⁷ come il mais e il sorgo (Qian, et al. 2010).

Anche i parametri qualitativi possono variare con la concentrazione di anidride carbonica, ne è un esempio il caso del grano duro, materia prima impiegata per la produzione della pasta. (Fares, et al. 2016) hanno esposto 12 varietà di *Triticum durum* a livelli elevati di CO₂ con un target di 570 ppm e hanno confrontato gli aspetti qualitativi con le medesime

⁵ Nel contesto delle piante C₃, la molecola organica primaria risultante dal processo fotosintetico è la gliceraldeide 3-fosfato, una sostanza a tre atomi di carbonio. D'altra parte, per le piante C₄, il composto iniziale prodotto durante la fotosintesi è l'ossalacetato, una molecola contenente quattro atomi di carbonio

varietà coltivate alla concentrazione atmosferica (circa 400 ppm). È emerso esiste una significativa interazione CO₂ x genotipo che ha comportato una riduzione del contenuto proteico fino all'11% e contemporaneamente è stata osservata un generale aumento del contenuto di glutine. Tutte le varietà, seppure in misura diversa, hanno mostrato valori di consistenza della pasta inferiori rispetto alle condizioni ambientali, ma la diversità genetica osservata può essere sfruttata mediante selezione per progettare nuovi genotipi con minore sensibilità all'aumento di CO₂.

Un aspetto di notevole significato in termini economici riguarda gli effetti sulle coltivazioni arboree principali, come la vite e l'olivo. Queste coltivazioni subiranno riduzioni sia in termini di qualità che di quantità della produzione e potrebbe verificarsi la necessità di spostare le aree in cui vengono coltivate. La valutazione economica degli impatti sulle rese può variare notevolmente a seconda che si tenga conto dei costi diretti o di quelli indiretti (Modesti, et al. 2019).

Le caratteristiche climatiche influiscono notevolmente sulla crescita delle viti, sulla maturazione e in generale, sulla quantità e sulla qualità del raccolto. La viticoltura è influenzata da vari fenomeni: eventi meteorologici brevi come gelate o grandinate, eventi medi come la siccità o le ondate di calore e tendenze a lungo termine nelle temperature e nelle precipitazioni nel corso di periodi prolungati (Modina 2023).

(Tomasi, et al. 2011) riportano un'analisi della relazione tra le variazioni climatiche e il ciclo vitale di vari vitigni a Conegliano tra il 1964 e il 2009, periodo nel quale la temperatura media durante la stagione di crescita è aumentata di 2,3 °C, causando l'anticipo della data di vendemmia (-8gg per ogni +1 °C). Qualitativamente le uve mostrano un aumento del contenuto zuccherino e una diminuzione dell'acidità. Questa variazione può essere desiderata o meno a seconda degli obiettivi enologici e delle caratteristiche delle diverse zone viticole. Un altro problema crescente riguarda la discrepanza tra la maturità tecnologica⁶ delle uve e la loro maturità fenolica⁶, oltre a fenomeni come l'insolazione dei grappoli, i rendimenti, la variabilità tra le diverse annate e in generale tutte le conseguenze degli stress termici, radiativi e della carenza d'acqua sulla vite.

⁶ Maturazione Tecnologica: è definita in base al livello di zuccheri e di acidità nel succo d'uva; Maturazione Fenolica: riguarda la concentrazione della componente fenolica che contribuisce a rendere il vino più strutturato e ricco di tannini. Il caso ideale è quello nel quale maturità tecnologica e fenolica coincidono, a conferma di un perfetto adattamento del vitigno all'ambiente pedoclimatico e di un ottimo andamento stagionale. (Assovini s.d.)

Secondo (Salinari, et al. 2006) il cambiamento climatico renderà la vite più esposta alla peronospora (*Plasmopara viticola*), a causa delle condizioni climatiche favorevoli che potrebbero aumentare l'impatto della malattia. Se da un lato lo sviluppo e la diffusione dell'oomicete è legato alla presenza d'acqua e verrebbe quindi sfavorito dalla probabile riduzione delle precipitazioni, dall'altro l'aumento delle temperature compenserebbe e surclasserebbe lo svantaggio dato dalla minore umidità. Secondo i risultati della ricerca, in previsione dei cambiamenti climatici futuri, sarebbe consigliabile porre un'enfasi maggiore sulla gestione delle infezioni iniziali come misura di adattamento.

Nel caso dell'olivo l'impatto sulle rese avrà un'alta variabilità geografica e in alcune aree potrebbero verificarsi degli aumenti di produzione, anche con RCP8.5 (Orlandi, et al. 2020). Non bisogna però sottovalutare gli effetti che il clima avrà sulla fenologia e sugli attacchi parassitari, ad esempio in Italia con un aumento di +1,8°C si prevede un aumento del 5,9% degli individui di mosca dell'olivo *Bactrocera oleae* (Ponti, et al. 2014).

(Gullino, et al. 2017) riportano casi di maggiore diffusione di malattie fungine su colture ortofloricole come conseguenza dell'aumento delle temperature, i risultati delle ricerche hanno mostrato un aumento degli attacchi di oidio dello zucchini, di *Alternaria* su rucola, di *Colletotrichum* e peronospora su basilico, di *Phoma* su bietola, di *Allophoma tropica* su lattuga a seguito dell'aumento combinato di CO₂ e temperatura. Di conseguenza, sarà sempre più cruciale monitorare la diffusione dei patogeni e adottare misure preventive tempestive per proteggere le colture dagli effetti nocivi degli agenti patogeni in un contesto di cambiamento climatico.

Anche la zootecnia è stata oggetto di crescente attenzione a causa dei suoi impatti sull'ambiente e sul cambiamento climatico (FAO 2006). La produzione zootecnica italiana vale più di 20 miliardi di euro, oltre un terzo del totale della produzione agricola (ISTAT 2023) ed è caratterizzata da un numero limitato di aziende e di capi che però rappresentano un'economia a elevato valore qualitativo con prodotti di origine animale come formaggi o carni lavorate riconosciuti e ricercati in tutto il globo (Belluzzi 2023). Le conseguenze del cambiamento climatico possono impattare sulla salute e il benessere degli animali, influenzando la produzione e la riproduzione (EEA 2019), soprattutto per le vacche da latte (Berman 2005). L'aumento dello stress termico può quindi tradursi in aumento dell'incidenza di carne DFD (Sgoifo, et al 2017), minore produzione di latte (Coldiretti 2023) e alterazione dei parametri di crescita dei suini (Mayorga, et al. 2019).

1.3 Cambiamenti climatici e precipitazioni

Prevedere e comprendere l'influenza dei cambiamenti climatici sulle precipitazioni è di fondamentale importanza per programmare in modo efficace le risposte e le strategie di adattamento. Questa conoscenza consente di sviluppare politiche pubbliche mirate, di pianificare infrastrutture resistenti al clima e di promuovere pratiche agricole sostenibili.

1.3.1 Precipitazioni totali

Nella pubblicazione di (Caporali, et al. 2020) vengono revisionati 54 studi pubblicati sull'analisi dell'andamento delle precipitazioni sul territorio italiano, nel periodo 1999-2018. In termini di precipitazioni totali (TP) (Fig. 9) vi è una prevalenza di tendenze negative osservate su base annuale principalmente guidata dalle tendenze negative nelle stagioni invernali (NS + N = 83%) in tutta Italia mentre per tutte le altre stagioni si riscontra prevalentemente una rilevazione di trend nullo.

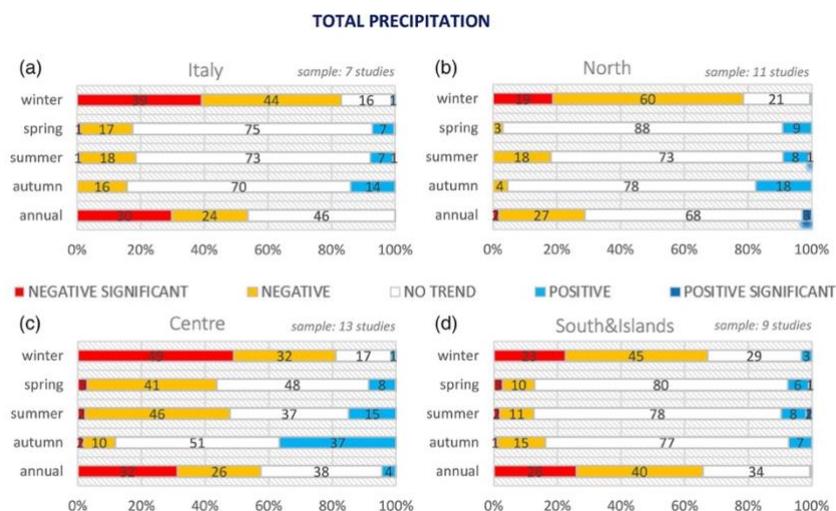


Figura 8 Andamento delle precipitazioni totali sul territorio italiano (Caporali, et al. 2020)

Come si può dedurre esiste una variabilità tra le tre macroregioni italiane; infatti, il Nord mostra una maggiore tendenza negativa per la stagione invernale mentre non c'è evidenza di trend per le altre stagioni, risultato che si riscontra anche nell'analisi annuale.

Le tendenze nel Centro rispetto al Nord sono più negative periodo invernale ma meno significanti durante le altre stagioni, mentre nell'area Sud e Isole il trend annuale risulta potenzialmente il più negativo (NS + N = 66%) ma ancora più determinato dalle proiezioni sul periodo invernale.

Osservando le variazioni sulle medie annuali a livello europeo (Fig. 10) è evidente come non esista una tendenza univoca sulle precipitazioni totali ma le variazioni future saranno fortemente legate alle variabili geografiche, si prevede infatti che la maggior parte delle aree del nord Europa possano avere delle variazioni positive, contrariamente a quanto potrebbe accadere nelle aree più meridionali come la penisola Iberica e la Sicilia (Feyen, et al. 2020).

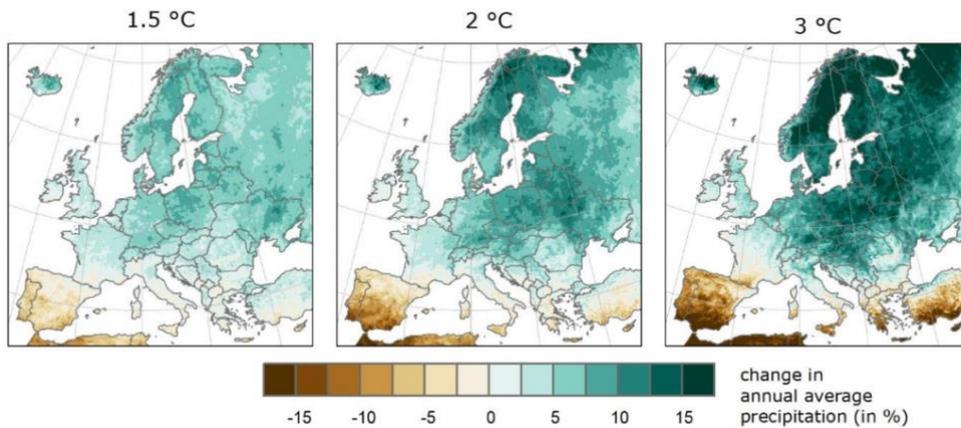


Figura 9 Variazione sulla media annuale delle precipitazioni a livello europeo (Feyen, et al. 2020)

1.3.2 Distribuzione temporale delle precipitazioni ed eventi estremi

I cambiamenti nel regime delle precipitazioni vengono analizzati considerando anche i giorni piovosi *Wet days* (WD). Nel breve termine, i risultati dei WD nel periodo 1999-2018 sull'intero territorio italiano (Fig. 11) mostrano una tendenza decrescente su scala annuale e per la stagione invernale. Per le altre stagioni i risultati sono più eterogenei e sono suddivisi tra trend negativo e assenza di trend (Caporali, et al. 2020).

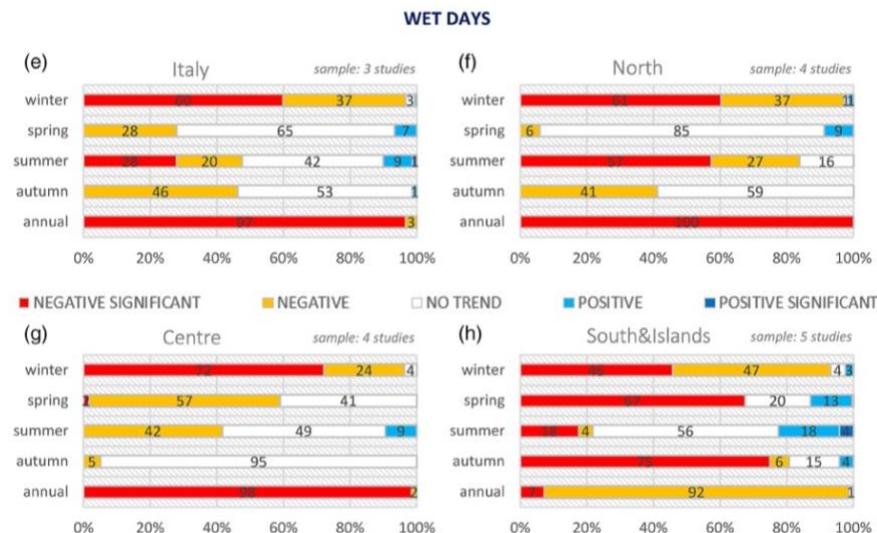


Figura 10 Andamento del numero di giorni con precipitazioni in Italia (Caporali, et al. 2020)

Le conclusioni del precedente studio sono in linea con le tendenze globali attuali. A livello mondiale, si stima che circa il 50% delle precipitazioni annuali si verifichi nei 12 giorni più piovosi di ogni anno. Questo equilibrio potrebbe diventare ancora più sbilanciato a causa degli impatti dei cambiamenti climatici, particolarmente in considerazione del modello climatico RCP8.5 (Pendergrass e Knutti 2018). Poiché la distribuzione temporale e i valori estremi delle precipitazioni sono strettamente correlati al rischio di inondazioni, alcuni studi hanno esaminato anche le tendenze delle precipitazioni estreme.

Il riscaldamento globale produce un aumento di energia atmosferica che può essere dissipata attraverso il verificarsi di eventi atmosferici più forti (temperature estreme e forti precipitazioni) (Noguer, et al. 2001, IPCC 2021) e la letteratura scientifica propone vari studi ma che spesso differiscono proprio nel definire il concetto di evento estremo. Per esempio (Colombo, et al. 2007) selezionando come evento estremo i giorni caratterizzati da una quantità di precipitazione superiore a 30 mm nel periodo 1990-2000 non mostra alcuna tendenza crescente per gli eventi estremi rispetto al periodo 1961-1990, anche se il 25% delle stazioni mostra una tendenza positiva. L'unico aumento significativo delle precipitazioni si rileva nel periodo autunnale, quando è maggiore il verificarsi di eventi estremi.

In un altro studio ricondotto focalizzandosi sul Nordest (Brunetti, Maugeri e Nanni 2001), viene considerato un evento estremo se in un periodo di 5 giorni le precipitazioni superano del 10% la media annuale regionale nel periodo 1951-2000 (Brunetti, Maugeri, et al. 2002). I risultati mostrano una tendenza negativa nel numero di giorni piovosi associato ad un aumento del contributo degli eventi di forti precipitazioni alle precipitazioni totali. Ciò è in accordo con la riduzione del periodo di ritorno per gli eventi estremi. In coerenza con lo studio precedente si citano (Mazzoglio, Ganora e Claps 2022) dove vengono analizzate le precipitazioni in base alla durata (1, 3, 6, 12 e 24 ore) e i risultati denotano una forte variabilità territoriale, tra cui per la durata di un'ora, c'è stato un aumento significativo nel Nordest (soprattutto nell'area dolomitica), in Liguria e nell'Appennino Tosco-Emiliano, ma una decrescita nel Nordovest e nella bassa Toscana. Quindi, nonostante esista una correlazione tra il cambiamento climatico ed eventi meteorologici estremi (Noguer, et al. 2001), non è possibile identificare una tendenza univoca, ma l'incidenza di questi eventi è fortemente legata al territorio e alle caratteristiche locali.

1.3.3 Siccità

La siccità comporta una serie complessa di impatti che coinvolgono numerosi settori economici, in primis l'agricoltura e l'industria energetica e a causa del riscaldamento globale i periodi senza precipitazioni saranno più frequenti, più duraturi e gravi, soprattutto nelle regioni meridionali d'Europa (Fig. 12). Con un aumento globale delle temperature di 3°C entro il 2100, le perdite dovute alla siccità potrebbero essere cinque volte superiori rispetto alla situazione attuale, con il più marcato incremento delle perdite nelle regioni mediterranee e atlantiche d'Europa senza considerare che le conseguenze sugli ecosistemi in generale non possono essere tradotte in termini monetari e quindi non sono riflessi nelle stime delle perdite economiche (Feyen, et al. 2020).

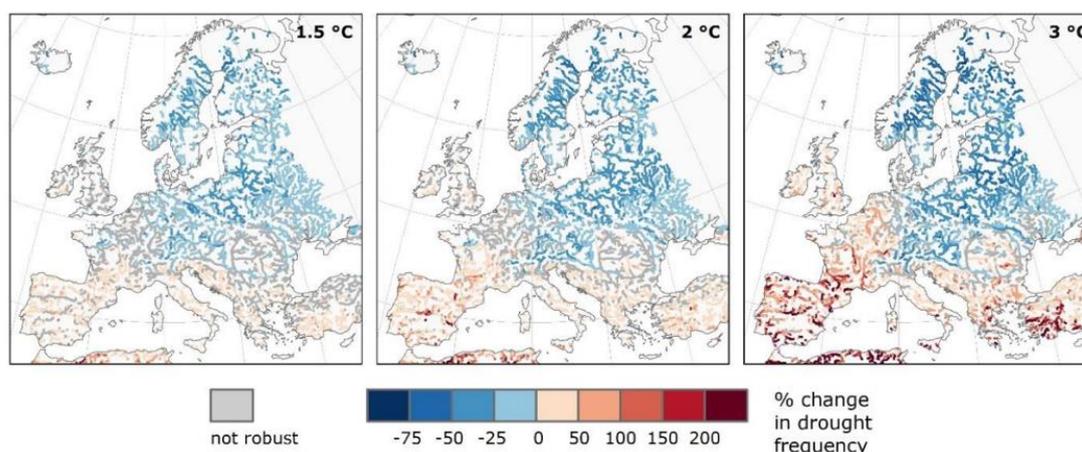


Figura 11 Variazione prevista nella frequenza della siccità tra i livelli di riscaldamento e il clima di riferimento (1981-2010) (Cammalleri, et al. 2020)

(Caloiero, Caroletti e Coscarelli 2021) hanno analizzato gli eventi di siccità che hanno colpito l'Italia tra il 2000 e il 2020 utilizzando l'SPI⁷ valutato dalle stime satellitari delle precipitazioni evidenziando una maggiore concentrazione del numero degli eventi siccitosi nel Nord Italia ma se si valutano l'intensità media, la gravità e la durata l'area che tende ad essere maggiormente colpita è il Centro Italia.

Inoltre, diversi studi concordando sull'andamento positivo della durata dei periodi di siccità sul territorio italiano, (Cislighi, et al. 2005) hanno analizzato la variabilità del periodo secco attraverso media e deviazione standard e ne deriva che entrambi i valori in

⁷ Indice Standardizzato di Precipitazione: indice consente di definire lo stato di siccità in una località e si calcola considerando la deviazione della precipitazione rispetto al suo valore medio su una data scala temporale, divisa per la sua deviazione standard.

alcune città italiane (Milano, Genova e Palermo) sono in crescita già dai primi anni del secolo scorso ma con un'ulteriore crescita a partire dagli anni Ottanta. Secondo (Baronetti, et al. 2022), in riferimento al Nord Italia, nel periodo 1971-2000 la percentuale massima di area colpita in un evento di siccità estrema, varia tra il 32 e il 47%, valore che dovrebbe essere simile con lo scenario RCP 4.5 nel periodo 2021-2050, ma che si aggraverebbe fino al 55% per fine secolo. Questa percentuale è ancora maggiore in RCP 8.5, con il 68% stimato. Lo studio fornisce anche delle previsioni della durata massima dei principali eventi di siccità che passerebbero da 13-25 settimane del periodo 1971-2000 a 15-29 entro metà secolo con RCP 4.5 fino a 21-32 entro la fine del secolo. Risultati simili, con cambiamenti maggiori, si ottengono per RCP 8.5.

Le conseguenze economiche previste dall'aumento degli eventi siccitosi variano se basati sulla società odierna o se si valutano i futuri cambiamenti socioeconomici. Secondo (Cammalleri, et al. 2020) nel primo caso i danni totali nell'UE e nel Regno Unito aumenterebbero leggermente con un riscaldamento globale di 1,5°C (9,7 miliardi di euro/anno), ma poi aumenterebbero più fortemente con un ulteriore riscaldamento per raggiungere 17,3 miliardi di euro/anno a 3°C. Le regioni dell'Europa atlantica e soprattutto mediterranea subiscono già gli impatti più elevati della siccità, pari al 68% delle perdite totali europee nel recente passato e potrebbe raggiungere l'85% con un riscaldamento di 3°C. Le perdite dovute alla siccità aumenteranno anche nei paesi più meridionali dell'Europa continentale (Bulgaria e Romania). Considerando i futuri cambiamenti socioeconomici, a causa della crescita delle economie. Entro la fine di questo secolo, l'aumento di 3°C comporterebbe perdite dovute alla siccità pari a 25, 31 e 45 miliardi di euro/anno rispettivamente per 1,5°C, 2°C e 3°C.

L'analisi dei periodi siccitosi avvenuti in passato costituisce un atto di primaria importanza per la formulazione di strategie di pianificazione e preparazione finalizzate ad affrontare le future incidenze di questo evento climatico estremo. Per esempio, il 2022 è stato caratterizzato dalla persistenza di forti anomalie negative di precipitazione in particolare durante i primi sette mesi, periodo che ha fatto registrare su scala nazionale precipitazioni inferiori del 39% rispetto alla norma (SNPA 2023).

(Coldiretti 2022) ha quantificato perdite all'agricoltura italiana pari a 6 miliardi di euro, equivalenti al 10% della produzione agroalimentare nazionale. I cali produttivi hanno riguardato in primis il mais e i foraggi (-45%), il grano duro e il riso (-30%) e il latte (-

20%). Occorre tener presente che, nonostante l'incremento nella probabilità di ripetizione di eventi analoghi, tali eventi sembrano ancora poco inclini a diventare un fenomeno ordinario in un futuro immediato (Bonaldo, et al. 2023).

1.4 Cambiamenti climatici e irrigazione

I cambiamenti climatici elencati sopra, avranno un notevole impatto sulla gestione dell'irrigazione delle colture, in quanto influenzeranno significativamente sia la distribuzione spaziale che temporale delle precipitazioni, insieme ai tassi di evapotraspirazione.

Lo studio di (Dezsi, et al. 2018) prevede aumenti diffusi e relativamente uniformi dell'evaporazione potenziale di circa 75-125 mm entro il 2050 per la maggior parte dell'Europa rispetto al periodo 1961-1990. Questi valori implicano cambiamenti importanti che possono influenzare il deflusso e la ricarica delle acque sotterranee.

(Fader, et al. 2016) hanno valutato come i cambiamenti climatici e l'aumento delle concentrazioni atmosferiche di CO₂ possano influenzare le esigenze di irrigazione nella regione del Mediterraneo entro il 2080-2090, considerando anche i futuri cambiamenti demografici e i miglioramenti tecnologici nei sistemi di irrigazione.

L'area mediterranea nel suo complesso potrebbe dover affrontare un aumento del fabbisogno lordo di irrigazione (NIR) tra il 4 e il 18%, in particolare per colture arboree come la vite (oltre il 15%) e l'olivo (quasi +10%) con un aumento della temperatura di +3°C. Il secondo gruppo di colture maggiormente colpito è quello delle C4 come il mais e la canna da zucchero, in quanto queste colture hanno già un'elevata efficienza nell'uso dell'acqua, i guadagni dati dalla maggiore concentrazione di CO₂ sono molto limitati a differenza delle piante C3 come il frumento e la barbabietola. Per quest'ultime, infatti, la maggiore concentrazione di anidride carbonica potrebbe mantenere stabile il NIR se non rimanere stabile proprio grazie alla maggiore concentrazione di anidride carbonica che consente alla pianta di ridurre la traspirazione e accorciare il periodo di crescita ma riducendo le rese.

Al contrario, per le colture perenni e le colture annuali C4, sembra che la promozione della fotosintesi (e un aumento nella produzione di biomassa), l'estensione dei periodi di crescita e i cambiamenti favorevoli nell'evapotraspirazione potenziale siano in grado di

controbilanciare la diminuzione della traspirazione causata dalla riduzione del tempo di apertura degli stomi.

Questi cambiamenti richiederanno un adattamento significativo nelle pratiche di irrigazione agricola al fine di ottimizzare l'uso dell'acqua, massimizzare la resa delle colture e garantire la sostenibilità ambientale, tenendo conto dei nuovi parametri climatici e delle sfide idriche in evoluzione (EEA 2012).

1.5 Obiettivo della tesi

L'obiettivo principale di questa tesi consiste nell'esaminare gli impatti dei cambiamenti climatici sui requisiti idrici di colture significative nel contesto veneto, come il mais, la soia e la barbabietola. Tale analisi è stata condotta utilizzando il software AquaCrop e basando i calcoli sulle proiezioni climatiche SSP2-4.5 e SSP4-8.5 fornite dall'IPCC, nonché sulle specifiche caratteristiche del suolo. I dati risultanti sono stati sottoposti a un'analisi comparativa con quelli del passato, allo scopo di identificare le possibili implicazioni dei cambiamenti climatici futuri. Inoltre, nell'ambito di questa analisi, sono state considerate altre variabili aggiuntive, come i deficit idrici durante gli interventi irrigui e la localizzazione geografica dei terreni.

2. Materiali e metodi

2.1 Il comprensorio LEB

La tesi è stata realizzata in collaborazione con il Consorzio LEB (Lessinio Euganeo Berico). Istituito nel 1958, il LEB è un consorzio di secondo grado istituito per “*favorire la valorizzazione e la razionale utilizzazione delle risorse idriche*” (Statuto Consorzio LEB s.d.) dei tre Consorzi di primo grado che lo costituiscono:

1. Consorzio di Bonifica Adige – Euganeo con sede a Este (PD);
2. Consorzio di Bonifica Alta Pianura Veneta con sede a San Bonifacio (VR);
3. Consorzio di Bonifica Bacchiglione con sede a Padova.

Il comprensorio del Consorzio LEB è ricompreso nel distretto idrografico “Alpi Orientali” e comprende un totale di 102 comuni situati nelle province di Verona, Vicenza, Padova e Venezia, per un totale di circa 350.000 ettari.

In aggiunta, il Consorzio è responsabile della gestione del canale omonimo, che si estende per circa 44 chilometri. Tale canale fornisce servizio a oltre 137.000 ettari di cui circa 82.000 ettari sono attualmente soggetti a pratiche irrigue. Il progetto iniziale che ha portato alla creazione del Consorzio LEB è stato sviluppato nel 1962 e ha ottenuto l'approvazione da parte del Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste nel 1971, con l'avvio dei lavori di costruzione nel medesimo anno. Questo progetto prevedeva la possibilità di incrementare il flusso d'acqua mediante un prelievo di 27 metri cubi al secondo (mc/s) dall'Adige, al fine di irrigare le aree caratterizzate da scarsità di apporto idrico nei fiumi Guà e in altri corsi d'acqua ad esso collegati. In contemporanea, è stata analizzata la fattibilità di superare il fiume Guà con un flusso di 13 mc/s, con l'obiettivo di fornire servizi alle aree pedecollinari nella regione del basso vicentino, compresa tra i colli Berici e i colli Euganei.

Attualmente, l'infrastruttura principale consta di due segmenti distinti: la prima sezione è costituita da un canale aperto denominato "Adige-Guà," che preleva le acque dell'Adige dal canale di scarico della centrale ENEL (ex SAVA) di Zevio, a Belfiore d'Adige e termina nel fiume Guà a Cologna Veneta dopo aver percorso 16,25 km. Il secondo tratto è costituito da un condotto sotterraneo di 27,71 km in pressione noto come “canale

Pedemontano” che collega il fiume Guà a Cologna Veneta con il Bacchiglione a Cervarese Santa Croce (Consorzio LEB 2023).

La prima sezione è stata recentemente oggetto di rifacimento al fine di contenere le perdite ed ottimizzare la distribuzione irrigua (ANBI Veneto 2022).

2.1.1 Irrigazione nel LEB

Il Consorzio attualmente riceve un flusso d'acqua medio di 26,5 metri cubi al secondo dal fiume Adige, tramite l'opera di presa del canale Adige Guà, la quale può essere regolata durante la stagione irrigua in base alle necessità. Tuttavia, nel periodo invernale, la portata si riduce a 10 metri cubi al secondo. La quantità d'acqua prelevabile dal fiume Adige è strettamente correlata al flusso del fiume misurato presso la sezione idraulica di Boara Pisani ed è regolamentata al fine di garantire il rispetto del flusso minimo vitale del fiume stesso, il quale è fissato a 80 metri cubi al secondo.

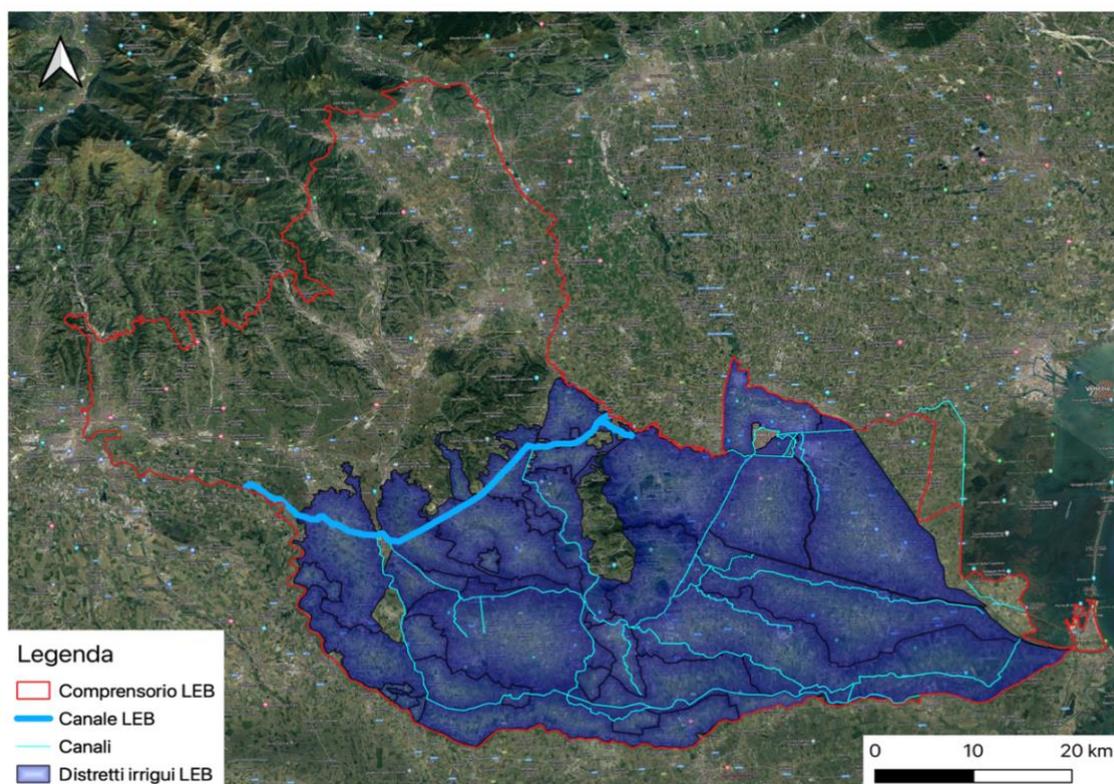


Figura 12 Comprensorio LEB e i distretti irrigui (Elaborazione dati Consorzio LEB con QGis)

Il flusso derivato viene suddiviso tra i 24 distretti irrigui che compongono il territorio del comprensorio LEB, come rappresentato nella figura 12. I dettagli relativi all'utilizzo irriguo vengono riportati nella tabella seguente (Tab. 2).

ID distretto	Denominazione distretto	Superficie lorda del distretto (ha)	Superficie irrigabile distretto (ha)	Superficie irrigata distretto (ha)	Volume complessivo prelevato alle fonti (mc)	Fabbisogno idrico (mc)	Efficienza del sistema di irrigazione
7639	LEB - Zerpano	9.511,00	9.035,00	7.631,33	30.196.860,88	13.516.714,00	44,8%
7656	Bisatto Nord	6.060,00	2.464,00	2.464,00	13.238.983,33	2.392.435,56	18,1%
7657	Pedemontano L.E.B.	8.863,00	4.163,67	4.163,67	13.039.553,56	6.488.750,00	49,8%
7658	Guà	2.455,00	1.872,00	1.872,00	26.105.034,37	3.188.383,33	12,2%
7659	Frassine	16.634,00	12.909,67	12.909,67	92.364.074,93	18.921.350,00	20,5%
7660	Monastero	1.765,00	1.504,33	1.504,33	13.063.790,63	2.213.150,00	16,9%
7661	Bisatto Sud	2.560,00	1.895,33	1.895,33	12.288.150,41	2.291.833,33	18,7%
7663	Fratta	3.804,00	3.160,00	3.160,00	27.393.247,67	5.308.666,67	19,4%
7666	Santa Caterina	913,00	513,33	513,33	879.486,15	527.870,35	60,0%
7667	Gorzone	7.428,00	3.997,33	3.997,33	10.610.689,01	5.133.702,63	48,4%
7668	Monforesto	26.926,00	14.755,33	14.755,33	117.022.317,48	25.956.317,07	22,2%
7669	Fossa Paltana	15.938,00	7.119,67	7.119,67	20.643.715,15	6.256.012,50	30,3%
7670	Colli Euganei	6.888,00	1.300,00	1.300,00	5.865.591,17	1.687.467,80	28,8%
7671	Settima Presa	2.337,00	1.438,00	1.438,00	7.983.802,24	3.353.927,62	42,0%
7672	Sinistra Brenta	4.871,00	1.537,00	1.537,00	7.160.389,24	4.200.450,00	58,7%
7673	Destra Brenta	18.557,00	5.455,00	5.455,00	33.156.827,69	19.136.066,66	57,7%
7674	Delta Brenta	2.364,00	1.825,00	1.825,00	15.625.303,76	3.028.966,67	19,4%
7675	Due Carrare	1.165,00	874,00	874,00	10.948.792,80	1.235.600,00	11,3%
7676	Pratiarcati	9.859,00	3.747,00	3.747,00	36.677.582,43	8.284.877,78	22,6%
7677	Colli Euganei	11.556,00	1.684,00	1.684,00	12.727.948,27	5.875.088,88	46,2%
7678	Montà Portello	5.111,00	442,00	442,00	5.043.925,73	1.575.533,33	31,2%
7679	Derivazione n. 11, 12, 13, 14 e 15-B	6.504,00	4.753,00	4.466,00	22.935.301,46	7.702.216,00	33,6%
7680	Derivazione n. 15-A	7.334,00	6.033,00	5.266,67	20.245.622,63	7.109.133,33	35,1%
7688	Derivazione n. 2, 3, 4	3.000,00	2.421,00	2.125,67	11.679.077,22	2.470.663,33	21,2%
TOTALE		182.403,00	94.898,67	92.146,33	566.896.068,19	157.855.176,85	32,0%

Tabella 2 Dati irrigui medi (2020-2022) nei distretti del Consorzio LEB (Elaborazione dati Consorzio LEB)

Le zone irrigue nel territorio, come rappresentate nella figura 13, possono essere distinte in due categorie: alcune rientrano entro i confini dei distretti irrigui indicati nella figura 13, mentre altre si trovano al di fuori di questi limiti. È da notare che il consorzio LEB gestisce esclusivamente le aree interne a tali distretti.

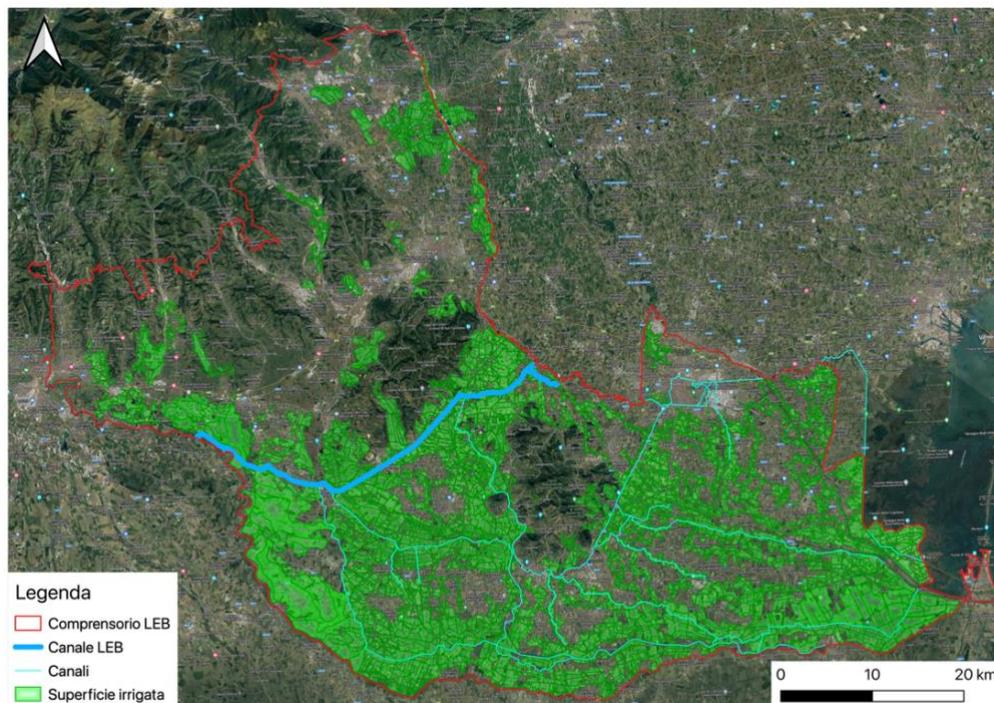


Figura 13 Superficie irrigata all'interno del Consorzio LEB (Elaborazione dati Consorzio LEB con QGIS)

2.1.2 Colture principali

In riferimento al diagramma illustrato nella figura 14, si osserva che nel contesto territoriale considerato, le coltivazioni preminenti consistono principalmente in mais e cereali destinati alla produzione di granella. Altri impieghi agricoli di rilievo includono la coltivazione di soia, identificata nella categoria delle "piante oleifere", e la coltivazione di barbabietole da zucchero, classificata tra le "piante industriali", oltre a vigneti ed ortaggi compresi nella sezione denominata "altro". Date le funzioni chiave svolte da queste tre colture specifiche (Mais - *Zea mais*, Barbabietola - *Beta vulgaris*, Soia - *Glycine max*), l'analisi degli impatti dei cambiamenti climatici, oggetto di studio di questa tesi, è focalizzata su tali produzioni.

Inoltre, emerge che le estensioni dedicate alla coltivazione di mais hanno registrato un aumento del 20% rispetto al 2017, mentre la coltivazione di soia ha sperimentato un significativo incremento del 14% nello stesso periodo temporale. La coltivazione di barbabietole è stata influenzata dalle politiche di sviluppo della Regione Veneto, che hanno introdotto una misura sperimentale di contributo agli agricoltori per ogni ettaro destinato a questa coltivazione a partire dal 2017 (Elaborazioni Unità Tecnico Scientifica - Consorzio LEB 2023).

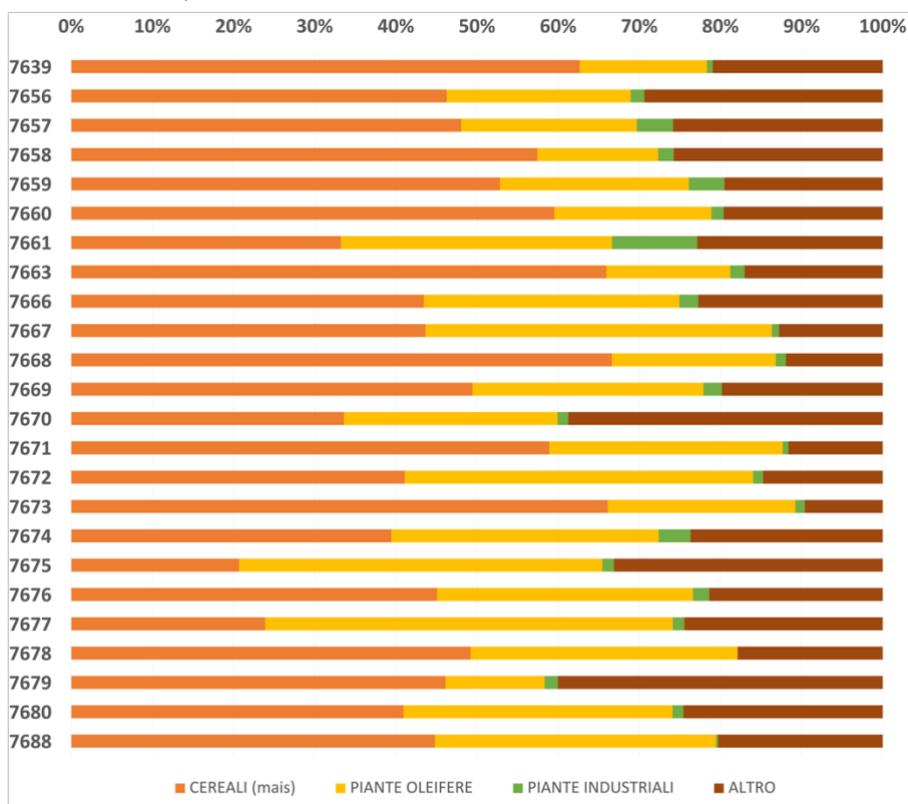


Figura 14 Colture nei distretti irrigui LEB (Rielaborazione dati Consorzio LEB)

2.1.3 Suoli

La suddivisione territoriale nella carta dei suoli della Regione Veneto (ARPAV 2019) si articola attraverso una gerarchia di quattro livelli distinti:

- Regioni di suoli (L1): vengono definite a livello nazionale, in base al materiale parentale e alle caratteristiche climatiche;
- Province di suoli (L2): individuate attraverso i caratteri morfologici, litologici e bioclimatici per le aree montane e collinari, mentre le superfici pianeggianti vengono distinte attraverso la morfologia, granulometria dei sedimenti ed età delle superfici. Sono 21 e vengono identificate da due lettere maiuscole (es. AA) (Fig. 15).

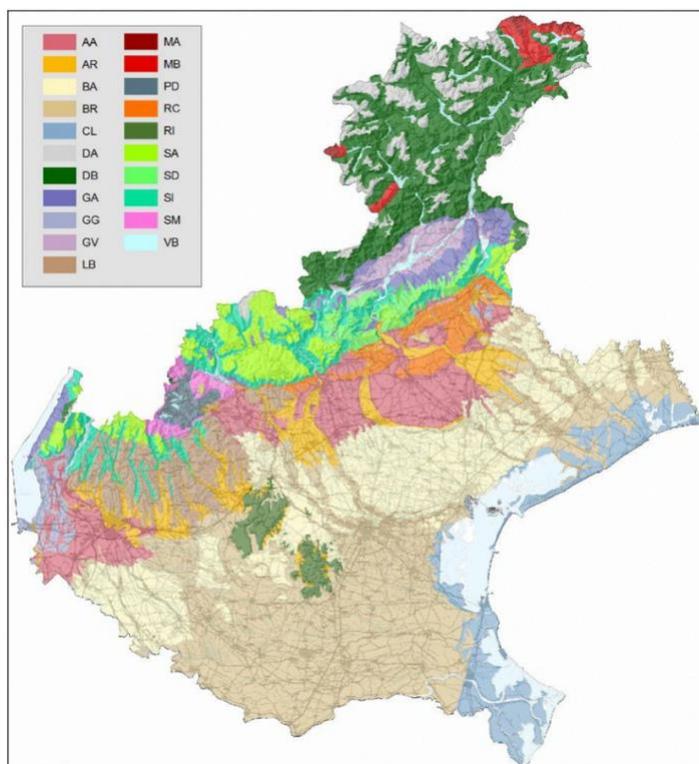


Figura 15 Province di suoli della regione Veneto (ARPAV 2019)

- Sistemi di Suoli (L3): riportano i fattori ambientali che presentano rilevanza discriminante nella caratterizzazione dei suoli, fornendo una breve sintesi delle caratteristiche morfologiche, litologiche e pedologiche, includendo informazioni sulla profondità, composizione del profilo e sui principali processi pedogenetici operanti in tali aree. In totale, queste unità ammontano a 56 e sono identificate mediante una coppia di lettere maiuscole, che corrispondono alla Provincia di Suoli, seguite da un numero progressivo che permette di distinguere le diverse unità all'interno di ciascuna provincia (Es. AA1).

- Unità cartografiche (L4): riportano la vegetazione presente, l'uso del suolo, la presenza di non suolo (urbano o rocce e detriti) e il regime idrico oltre a descrivere con un maggiore livello di dettaglio la morfologia, il materiale parentale e le quote. Sono 217 e vengono identificate attraverso il codice del sistema di suoli seguito da un numero progressivo (es. AA1.1).

In ogni unità cartografica vengono riportate le Unità tipologiche fornite ciascuna di una sigla caratterizzata da tre lettere e un numero (con riferimento all'archivio regionale, es. BON1) e la frequenza (suolo dominante >75%; molto frequente 50-75%; frequente 25-50 %; subordinato 10-25% e raro).

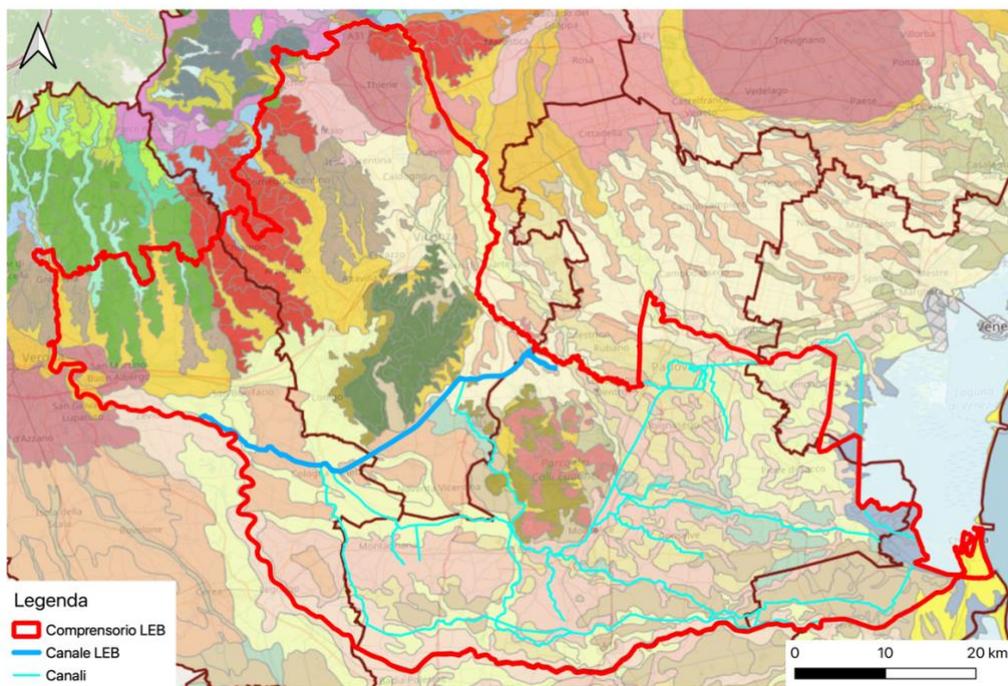


Figura 16 Unità cartografiche all'interno del comprensorio LEB (Elaborazione dati Consorzio LEB e ARPAV)

Nel presente elaborato si è proceduto all'individuazione di quattro specifiche unità tipologiche che si configurano come rappresentative del contesto territoriale di riferimento. Tale selezione si fonda sull'analisi della suddivisione territoriale definita nei quattro livelli della carta dei suoli della Regione Veneto, secondo quanto delineato nella relazione tecnica di ARPAV del 2019. Le quattro unità tipologiche individuate, CPE1 ("Suolo Camperiano"), AGL1 ("Suolo Agugliaro"), CNT1 ("Suolo Cinta del Pettine") e SNP1 ("Suolo San Pietro di Cinto Euganeo"), presentano caratteristiche specifiche (illustrate nella Tab. 3), che vengono impiegate nel modello Aquacrop al fine di valutare il contributo che tali attributi del terreno possono apportare ai futuri fabbisogni idrici.

BR4.3	Pianura modale dei torrenti prealpini (Agno e Guà), con depositi fini derivanti da rocce di origine vulcanica (basalti), non o scarsamente calcarei, poggianti su depositi sabbioso-limosi dell'Adige, pianeggiante (<0,02% pendenza) Materiale parentale: argille moderatamente calcaree su sabbie molto calcaree. Quote: 2-60 m. Uso del suolo: seminativi (mais, frumento) e vigneti. Non suolo: 5% (urbano). Regime idrico: udico.	
	CPE1	suolo Camperiano frequente (25-50%) USDA: Udifluventic Haplustepts fine-loamy, mixed, mesic WRB: Fluvis Cambisols (Calcaric, Hypereutric) Capacità d'uso: IIIc
BA1.2	Porzione inferiore della media pianura antica dell'apparato gardesano, di origine fluvio-glaciale, con dossi, pianeggiante (0,05-0,1% di pendenza). Materiale parentale: sabbie e limi molto calcarei. Quote: 10-30 m. Uso del suolo: seminativi (mais, soia, frumento). Non suolo: 15% (urbano). Regime idrico: ustico.	
	AGL1	suolo Agugliaro frequente (25-50%) USDA: Udic Calcicustepts fine-silty, mixed, mesic WRB: Endogleyic Hypercalcic Calcisols (Orthosiltic) Capacità d'uso: IIsw
SA1.1	Altipiani carsificati prevalentemente boscati, caratterizzati da moderati dislivelli con forte diffusione di forme carsiche a varia scala (valli secche, doline, rilievi tronco-conici). Materiale parentale: calcareo. Quote: 900-1.900 m. Vegetazione/uso del suolo: faggete e abieteti, subordinati pascoli	
	CNT1	suolo Cinta del pettine subordinato (10-25%) USDA: Typic Eutrudepts fine-loamy, mixed, mesic WRB: Endoleptic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric) Capacità d'uso: VIec
RI2.2	Versanti ondulati su calcari marnosi con pendenze medio-alte, interessati da gradonature antropiche. Materiale parentale: calcareo-marnoso. Quote: 20-200 m. Uso del suolo: vigneti e seminativi.	
	SNP1	suolo San Pietro di Cinto Euganeo frequente (25-50%) USDA: Typic Eutrudepts clayey-skeletal, mixed, mesic WRB: Haplic Cambisols (Calcaric, Hypereutric, Endoskeletal, Endoclayic) Capacità d'uso: IIIec

Tabella 3 Caratteristiche dei suoli individuati (Estratto dalla Carta dei Suoli del Veneto)

2.2 Il modello AquaCrop

Al fine di stimare le future rese agricole, si è fatto ricorso ad AquaCrop, un modello di crescita delle colture concepito dalla Divisione Terra e Acqua dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura (FAO) con l'obiettivo di affrontare le questioni legate alla sicurezza alimentare e analizzare l'effetto delle condizioni ambientali e della gestione agricola sulle rese. Grazie a questo modello è possibile, infatti, simulare la reazione delle colture erbacee alla disponibilità di acqua ed è particolarmente adatto per affrontare le situazioni in cui la limitata disponibilità d'acqua costituisce un elemento cruciale nel contesto della produzione agricola (FAO s.d.).

Gli esiti derivanti dalle simulazioni condotte attraverso il software AquaCrop possono inoltre essere trasformati in direttive pratiche per la gestione dei terreni agricoli con l'obiettivo di incrementare l'efficienza produttiva delle colture e ottimizzare l'impiego delle risorse idriche. Questo modello offre stime relative alla biomassa e alle rese potenziali delle diverse colture in un contesto ambientale definito, caratterizzato da specifiche condizioni climatiche. In aggiunta, fornisce indicazioni utili per valutare le prestazioni complessive del sistema agricolo, concentrandosi in particolare sulla produttività dell'acqua, cioè la quantità di raccolto ottenuta per ogni unità di acqua persa attraverso l'evapotraspirazione.

Per condurre simulazioni di natura realistica, il modello necessita della raccolta di dati rilevanti riguardanti il clima, il profilo del suolo, la gestione del terreno, il sistema di irrigazione e le principali caratteristiche della coltura presa in considerazione. Mediante l'utilizzo di queste informazioni fondamentali, sarà in grado di eseguire calcoli che determineranno la risposta delle colture all'interazione intricata tra i fattori pianta, suolo e clima (Raes, et al. 2013, Foster, et al. 2016).

La versione di AquaCrop utilizzata in questo lavoro è AquaCrop-OSPy, una versione open-source sviluppata in Python. Tale implementazione presenta una notevole flessibilità, consentendo una personalizzazione approfondita dell'applicazione del modello per soddisfare le specifiche esigenze dell'utente (Kelly e Foster 2021).

Questa caratteristica permesso di semplificare ed ottimizzare le simulazioni, automatizzando l'inserimento dei dati richiesti e consentendo l'utilizzo attraverso Google Colab, una piattaforma basata sul cloud che abilita la scrittura e l'esecuzione del codice Python attraverso un browser.

2.2.1 Lo schema di calcolo

AquaCrop costituisce un'evoluzione del modello di calcolo presentato da Doorenbos e Kassam nel 1979. Rispetto a tale modello, le principali innovazioni includono la suddivisione dell'evapotraspirazione (ET) in traspirazione della coltura (Tr) ed evaporazione del suolo (E), insieme allo sviluppo di un modello semplificato per la crescita e la senescenza della chioma. Quest'ultimo fornisce una base per stimare la traspirazione delle colture (Tr) e separarla dall'evaporazione del suolo (E).

Questa suddivisione di ET nelle due componenti assume particolare rilevanza, soprattutto nelle fasi di copertura del suolo incompleta e costituisce la fondamentale equazione di AquaCrop, dove WP è la produttività dell'acqua (biomassa per unità di traspirazione cumulativa) (Steduto, et al. 2009):

$$B = WP \cdot \sum Tr$$

Lo schema di calcolo di AquaCrop simula la crescita delle colture attraverso quattro passaggi, che si susseguono sequenzialmente ad ogni intervallo temporale giornaliero come illustrato nella Figura 17 (FAO 2023):

1. Sviluppo della copertura della chioma (CC): espresso attraverso la copertura della chioma “*canopy cover*” pari alla frazione della superficie del suolo coperta dalla chioma. Il valore varia da 0 alla semina a 1 quando viene raggiunta la copertura completa della chioma. Vengono inoltre previsti eventuali stress che potrebbero svilupparsi nell'apparato radicale per cause legate al quantitativo idrico e per caratteristiche pedologiche del terreno.
2. Traspirazione delle colture (Tr): in condizioni di buona irrigazione, Tr equivale al prodotto tra l'evapotraspirazione di riferimento (ET₀) e il coefficiente della coltura (K_{cTr}). Il coefficiente della coltura è proporzionale al CC e quindi varia durante il ciclo di vita della coltura in funzione alla copertura della chioma simulata.
3. Biomassa epigea (B): è proporzionale alla quantità cumulativa di traspirazione delle colture (ΣTr). Il fattore proporzionale è la produttività idrica della biomassa (WP). In AquaCrop il WP è normalizzato per l'effetto delle condizioni climatiche che rendono la produttività idrica della biomassa normalizzata (WP*) valida per diverse località, stagioni e concentrazioni di CO₂.

4. Resa della coltura (Y): viene calcolata moltiplicando l'Indice di raccolto (HI) della coltura con la Biomassa (B). L' HI reale si ottiene aggiustando, durante la simulazione, l'Harvest Index di riferimento (HI_0) con un fattore di aggiustamento per gli effetti dello stress previsti.

Le condizioni di stress termico e idrico hanno un impatto diretto su uno o più dei processi precedentemente citati (come illustrato nella Figura 17). In aggiunta, AquaCrop tiene conto degli effetti derivanti dalle malerbe, dalla fertilità del suolo e dagli stress causati dalla salinità del terreno. Questi fattori influiscono sullo sviluppo della chioma, sulla traspirazione delle colture e sulla produzione complessiva di biomassa, contribuendo a delineare un quadro più completo e dettagliato delle dinamiche agricole e ambientali gestite dal modello.

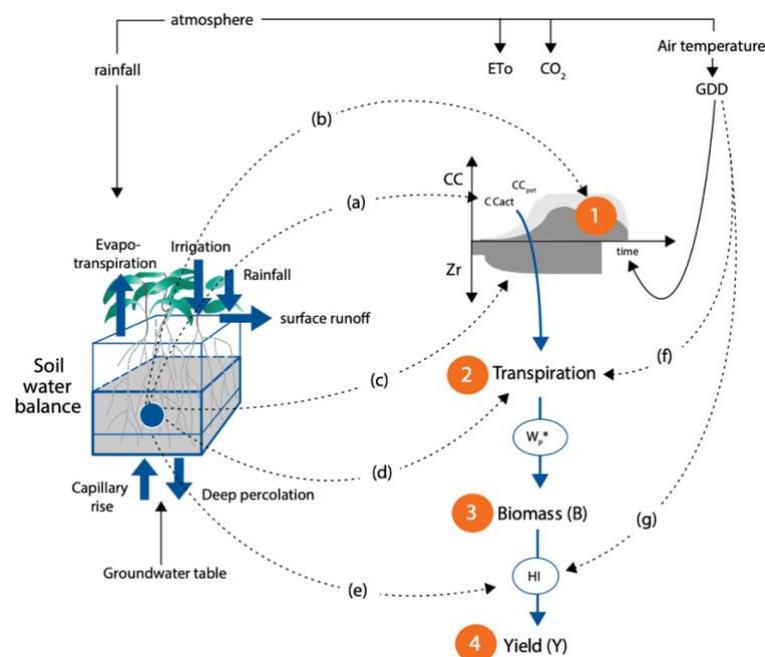


Figura 17 Schema di calcolo di AquaCrop dove CC è la copertura della chioma, Z_r la profondità di radicazione, ET_0 , evapotraspirazione di riferimento, w_p^* la produttività idrica della biomassa normalizzata, HI l'indice di raccolto e GDD i gradi giorno. (Salman, et al. 2021)

In riferimento alla Figura 17 lo stress idrico può rallentare l'espansione della chioma (a), accelerarne la senescenza (b), in casi gravi diminuire l'approfondimento radicale (c), ridurre l'apertura stomatica e influenzando la traspirazione (d) e l'indice di raccolto (e). Vengono riportati anche gli effetti dati da stress da freddo: come la riduzione della traspirazione (f) e gli effetti sull'impollinazione (g), quest'ultimi causati anche dalle alte temperature (Salman, et al. 2021).

2.3 Gli scenari climatici

Gli scenari climatici costituiscono rappresentazioni plausibili delle condizioni climatiche future, fondate su una combinazione di variabili che includono le emissioni di gas serra, le modifiche nei livelli di radiazione solare e altri parametri climatici rilevanti. Queste proiezioni fungono da strumento essenziale nell'ambito della ricerca sul cambiamento climatico, agevolando l'analisi dei potenziali sviluppi del clima in risposta a differenti condizioni in un arco temporale specifico. Inoltre, sono comunemente utilizzati per valutare i possibili andamenti futuri del clima, orientare le politiche di mitigazione e adattamento, nonché orientare la pianificazione a lungo termine in diversi settori, quali l'agricoltura, la gestione delle risorse idriche e l'urbanistica.

Esistono varie categorie di scenari climatici, inclusi i Representative Concentration Pathways (RCP), impiegati per la caratterizzazione delle concentrazioni previste di gas serra nell'atmosfera terrestre in futuro e i Shared Socioeconomic Pathways (SSP), che delineano diverse traiettorie possibili in relazione a fattori socioeconomici.

Questi ultimi, introdotti per la prima volta nel Rapporto di Valutazione dell'IPCC (Masson-Delmotte, et al. 2021), costituiscono cinque distinti "futuri climatici plausibili", ciascuno dei quali esamina varie situazioni caratterizzate da differenti livelli di emissioni di gas serra (Fig. 18). Gli scenari variano da emissioni "estremamente basse" (SSP1-1.9) a emissioni "basse" (SSP1-2.6), "medie" (SSP2-4.5), "alte" (SSP3-7.0), fino a emissioni "estremamente alte" (SSP5-8.5).

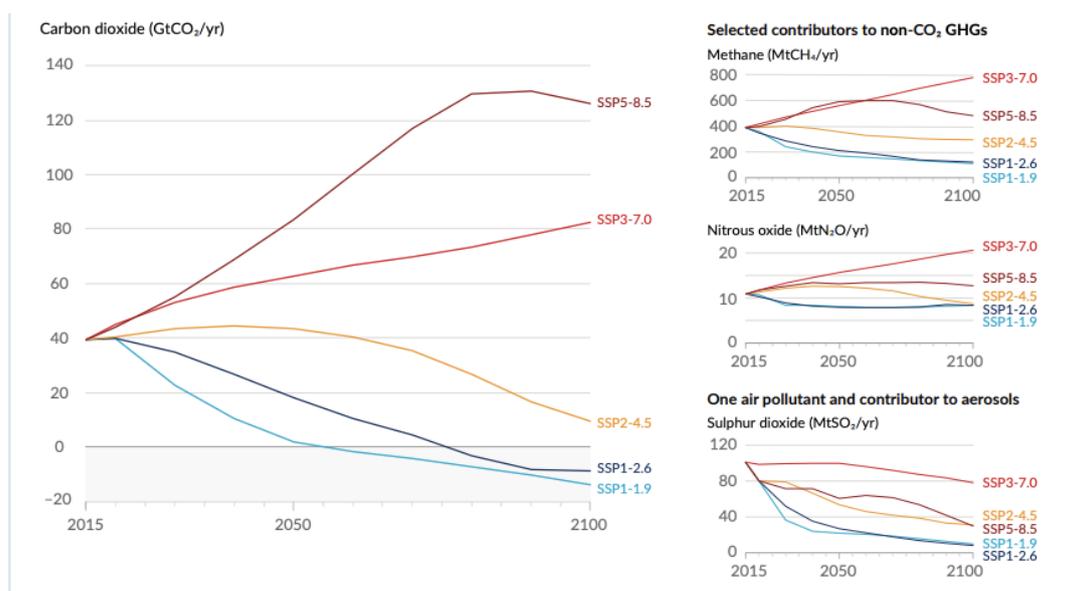


Figura 18 Emissioni annuali future di CO₂ (a sinistra) e di altri gas (a destra), secondo cinque scenari (Masson-Delmotte, et al. 2021)

Ciascun scenario climatico si compone di due elementi: una componente socioeconomica e una componente legata al forzante radiativo complessivo. La componente socioeconomica rappresenta le diverse traiettorie socioeconomiche che possono influenzare le emissioni di gas serra e altre attività antropiche che contribuiscono al cambiamento climatico e vengono così suddivise (Riahi, et al. 2017):

1. SSP1 Sustainability: basato su un modello di società sostenibile, caratterizzato da notevoli investimenti nell'ambito dell'istruzione e della sanità, con un obiettivo di riduzione complessiva delle disuguaglianze e una tendenza verso un consumo orientato da una crescita materiale limitata e una minore intensità nell'uso delle risorse e dell'energia.
2. SSP2 Middle of the Road: l'espansione economica e l'incremento del reddito mostrano una distribuzione eterogenea, con alcune nazioni che registrano un progresso relativamente positivo, mentre altre restano al di sotto delle proiezioni. La crescita demografica a livello globale è tenuta sotto controllo e raggiunge una stabilizzazione nella seconda metà del secolo. Le disuguaglianze sociali ed economiche migliorano solo in modo graduale, e persistono sfide significative nel ridurre la vulnerabilità agli impatti dei cambiamenti sociali ed ambientali.
3. SSP3 Regional rivalry: le preoccupazioni riguardanti la competitività, la sicurezza e i conflitti regionali spingono molte nazioni a concentrare sempre più le loro risorse sulle questioni interne, a scapito degli investimenti nell'istruzione e nello sviluppo tecnologico. Le disuguaglianze sociali ed economiche persistono o addirittura si acuiscono nel corso del tempo, soprattutto in quei paesi in via di sviluppo che presentano elevati tassi di crescita demografica. Inoltre, l'ambiente riceve una bassa priorità a livello internazionale, il che porta a gravi danni ambientali.
4. SSP4 Inequality: questo scenario suggerisce un aumento delle disuguaglianze sociali ed economiche, accompagnato da una crescente instabilità e conflittualità. Si osserva un notevole sviluppo tecnologico, particolarmente nei settori economici ad alta tecnologia. Il settore energetico presenta una diversificazione a livello globale, con investimenti sia in risorse energetiche ad alta intensità di carbonio, come il carbone e il petrolio, ma anche in fonti energetiche sostenibili. Le politiche ambientali si concentrano principalmente su questioni locali e regionali, soprattutto nelle aree a reddito medio e alto.

5. SSP5 Fossil-Fueled Development: in questo scenario il mondo affronta un rapido progresso tecnologico con mercati globali sono sempre più integrati e forti investimenti nella sanità, nell'istruzione e nelle istituzioni. Allo stesso tempo, c'è uno sfruttamento di abbondante di combustibili fossili e dall'adozione di stili di vita consumistici in tutto il mondo. Tutti questi fattori portano a una rapida crescita dell'economia globale, mentre la popolazione globale raggiunge il picco e il declino nel XXI secolo. I problemi ambientali locali come l'inquinamento atmosferico vengono gestiti con successo. C'è fiducia nella capacità di gestire efficacemente i sistemi sociali ed ecologici, anche attraverso la geo ingegneria, se necessario.

D'altra parte, la componente legata al forzante radiativo totale tiene conto del bilancio energetico dell'atmosfera, considerando le variazioni nella radiazione solare incidente e nell'energia termica irradiata.

Il termine forzante radiativo si riferisce all'energia radiativa che attraversa l'atmosfera terrestre. Questo concetto è comunemente impiegato in climatologia per quantificare la differenza tra l'energia solare incidente che penetra nell'atmosfera terrestre e l'energia termica emessa verso lo spazio. Tale forzante radiativo tiene in considerazione numerosi fattori, tra cui i gas serra, le particelle sospese nell'atmosfera, le nubi e altri elementi che influenzano il bilancio energetico nell'atmosfera. Quando si verifica un forzante radiativo positivo, ciò indica un surplus di energia radiativa che entra nell'atmosfera, con il potenziale di contribuire al riscaldamento globale (Myhre, et al. 2013).

Scenario	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

Figura 19 Cambiamenti nella temperatura superficiale globale rispetto alla media mondiale 1850-1900 (Masson-Delmotte, et al. 2021)

Tra gli scenari delineati dall'IPCC, il presente studio ha focalizzato l'attenzione su due prospettive: SSP2 - 4.5 e SSP5 - 8.5. Il primo è stato considerato il più plausibile (Masson-Delmotte, et al. 2021, Climate Action Tracker 2022), mentre il secondo è stato identificato come il più estremo.

2.4 Google Earth Engine

Per l'accesso ai dati meteorologici è stata impiegato Google Earth Engine, un sistema informatico basato su cloud sviluppato da Google. Questa piattaforma fornisce dati satellitari, nonché set di dati vettoriali basati su sistemi di informazione geografica (GIS), sociali, demografici, meteorologici e climatici. Tale integrazione consente agli utenti di condurre analisi e calcoli geospaziali avanzati su una vasta gamma di informazioni geografiche e ambientali (Gorelick 2016, Mutanga e Lumar 2019).

Attraverso l'utilizzo di Google Earth Engine (GEE), sono stati acquisiti i seguenti dataset:

- CHIRPS: acronimo di "Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data", è un dataset creato stato sviluppato e creato dal Climate Hazards Group dell'University of California, Santa Barbara (UCSB), in collaborazione con il CGIAR (Consultative Group for International Agricultural Research) che combina dati satellitari con dati provenienti dalle stazioni meteorologiche. Si focalizza principalmente sulla raccolta e sulla rappresentazione delle informazioni relative alle precipitazioni. Questo dataset è ampiamente utilizzato nell'analisi climatica e nella valutazione delle condizioni meteorologiche, fornendo dati fondamentali per comprendere i modelli di precipitazione e le tendenze climatiche (Funk, et al. 2015). Attraverso CHIRPS sono stati ricavati i dati meteorologici del territorio oggetto di studio dal 2000 al 2022.
- ERA5: è un dataset meteorologico globale elaborato dal Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (ECMWF). Rappresenta una delle analisi più recenti e complete per le condizioni meteorologiche ed offre una vasta gamma di variabili, come temperatura, vento, umidità, radiazione solare e pressione atmosferica su tutta la superficie terrestre e fino a diversi chilometri di altezza. I dati contenuti in questo insieme di informazioni sono stati utilizzati per estrarre le variabili fondamentali necessarie per il calcolo dell'evapotraspirazione.
- NEX-GDDP-CMIP6 rappresenta una raccolta di dati di proiezione climatica globale che deriva dalla sesta fase del Progetto di Intercomparison di Modelli Climatici (CMIP6). Le proiezioni si fondano sui quattro scenari socioeconomici SSP, (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) (NASA 2023). Per il contesto specifico di questa tesi, sono stati utilizzati i dati relativi agli scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

2.5 Evapotraspirazione

Per stimare l'evapotraspirazione in un contesto di studio relativo al ciclo idrologico, è stata utilizzata la metodologia raccomandata dall'ASCE-EWRI (American Society of Civil Engineers - Environmental & Water Resources Institute), che si basa sull'applicazione dell'equazione di Penman-Monteith - FAO 56 (Zotarelli, et al. 2010):

$$ET_{sz} = \frac{(0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s^o - e_a))}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)}$$

dove:

ET_{sz} = evapotraspirazione di riferimento standardizzata (mm d^{-1} o mm h^{-1})

R_n = radiazione netta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G = flusso di calore nel suolo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

C_n = costante del numeratore per il tipo di coltura e la fase temporale di riferimento

C_d = costante del denominatore per il tipo di coltura e la fase temporale di riferimento

T = temperatura media dell'aria ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 = velocità media del vento (m s^{-1}) a 2 metri dal suolo

$e_s - e_a$ = deficit di saturazione (kPa) (stimato da $U_r \text{ max}$, $U_r \text{ min}$, $T \text{ max}$ e $T \text{ min}$)

Δ = pendenza della curva di pressione ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ = costante psicrometrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

0,408 = costante di conversione dalla radiazione all'evaporazione in mm

La variabilità dei valori C_n e C_d è strettamente correlata al tipo specifico di coltura considerato. Nel caso delle colture a bassa statura, associabili all'erba, si osserva che i parametri pertinenti assumono valori inferiori (Tab. 4), con C_n pari a 900 e C_d pari a 0,34. In contrasto, per le colture ad alta statura, rappresentate dalla colza, tali coefficienti presentano valori distinti, assumendo rispettivamente valori di 1600 per C_n e 0,34 per C_d (Allen, et al. 2005).

Calculation time step	Short reference crop $ET_{0.5}$		Tall reference crop, ET_{rs}		Units for $ET_{0.5}$ or ET_{rs}	Units for R_n and G
	C_n	C_d	C_n	C_d		
Daily	900	0.34	1600	0.38	mm d^{-1}	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Hourly, daytime	37	0.24	66	0.25	mm h^{-1}	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Hourly, nighttime	37	0.96	66	1.7	mm h^{-1}	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$

Tabella 4 Valori di C_n e C_d (Allen, et al. 2005)

In questa specifica indagine, i parametri immessi nel modello AquaCrop sono stati calibrati facendo riferimento a colture di bassa statura (Fig. 20).

```
// Adjust coefficients for daytime/nighttime
// ETo (short reference) ASCE Penman-Monteith parameters
var cn_day = 37.0; var cd_day = 0.24; var g_rn_day = 0.1;
var cn_night = 37.0; var cd_night = 0.96; var g_rn_night = 0.5;
// Nighttime is defined as when Rn < 0 (pg 44)
var cn = ee.Image.constant(cn_day);
var cd = ee.Image.constant(cd_day).where(rn.lt(0), cd_night);
var g_rn = ee.Image.constant(g_rn_day).where(rn.lt(0), g_rn_night);

// Soil heat flux (Eqns 65 and 66)
var g = rn.multiply(g_rn);

// Wind speed (Eqn 67)
var u2 = uz.expression(
  'uz * 4.87 / log(67.8 * zw - 5.42)', {'uz':uz, 'zw':zw});

// Hourly ETo (Eqn 1)
var eto_hr = t.expression(
  ('(0.408 * slope * (rn - g) + (psy * cn * u2 * (es-ea) / (t + 273))) / '+
  '(slope + psy * (cd * u2 + 1))'),
  {'slope':es_slope, 'rn':rn, 'g':g, 'psy':psy, 'cn':cn,
  't':t, 'u2':u2, 'es':es, 'ea':ea, 'cd':cd});
```

Figura 20 Estratto dei codici usati nel modello AquaCrop

3. Risultati

3.1 Analisi climatica

Preliminarmente ci si è concentrati sulle statistiche climatiche del comprensorio riferite al periodo compreso tra il 2000 e il 2022, con particolare attenzione all'analisi dell'evapotraspirazione (Et0) e all'accumulo di precipitazioni (pp) annuali (Fig. 21).

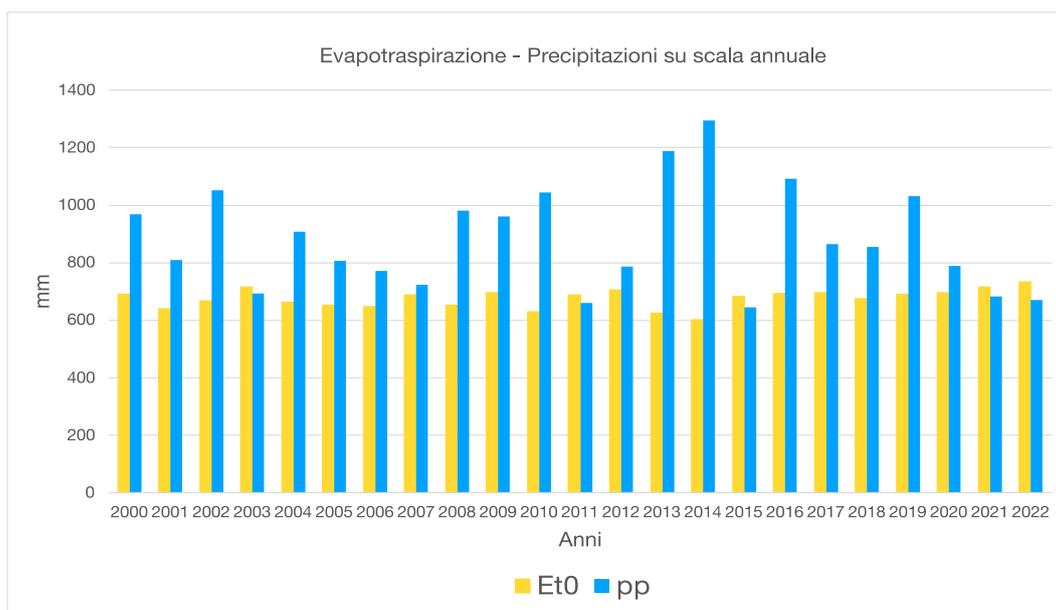


Figura 21 Evapotraspirazione e precipitazioni annue in mm nel periodo 2000-2022

Inoltre, è stata dedicata una particolare attenzione alla variazione mensile durante i mesi di irrigazione, ovvero dal 1° marzo al 30 settembre (Fig. 22).

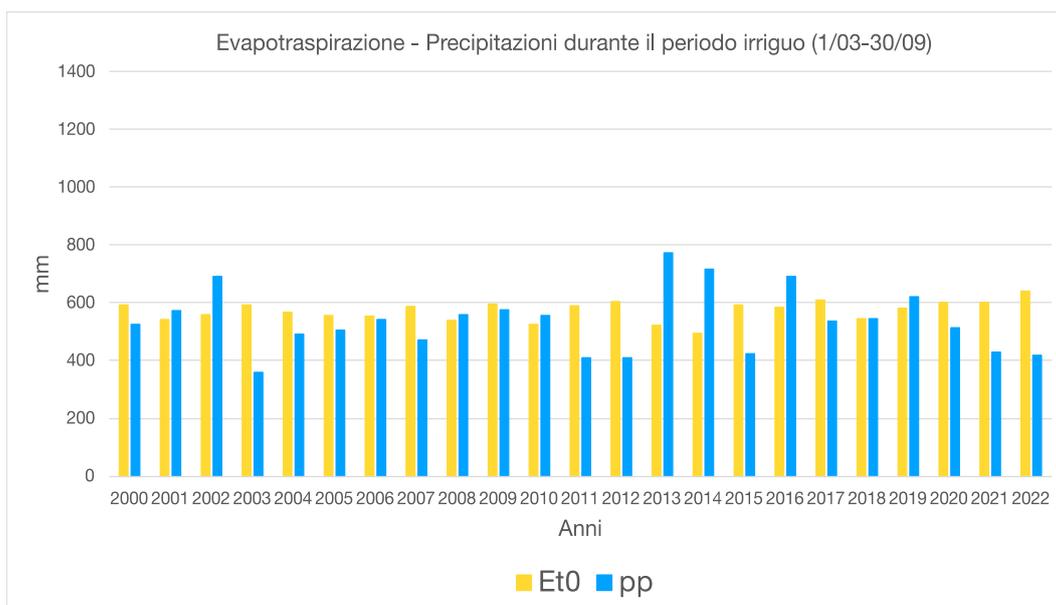


Figura 22 Evapotraspirazione e precipitazioni annue in mm nel periodo 2000-2022

Attraverso l'analisi dei dati CHIRPS, è stata esaminata la distribuzione temporale delle precipitazioni, focalizzandosi sulla frequenza giornaliera delle precipitazioni per ciascun anno. Ponendo come soglia la media delle temperature massime di luglio tra il 1994 e il 2023, ovvero 26.8°C (ARPAV 2023), è stato elaborato un grafico che illustra il numero di giorni con temperature superiori durante il periodo irriguo (Figura 23).

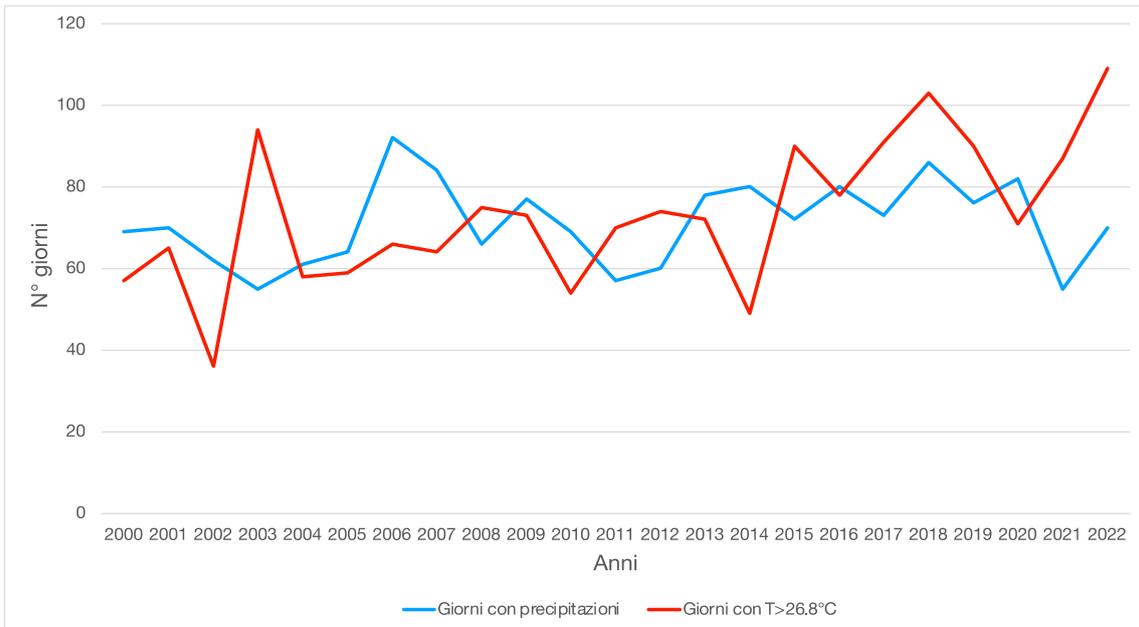


Figura 23 Giorni con precipitazioni e con T > 26,8°C durante il periodo irriguo (1/03-30/09)

Il grafico a box plot sottostante (Fig. 24) illustra l'andamento dell'evapotraspirazione per mese, giugno e luglio risultano mediamente i mesi con i maggiori tassi di Et0.

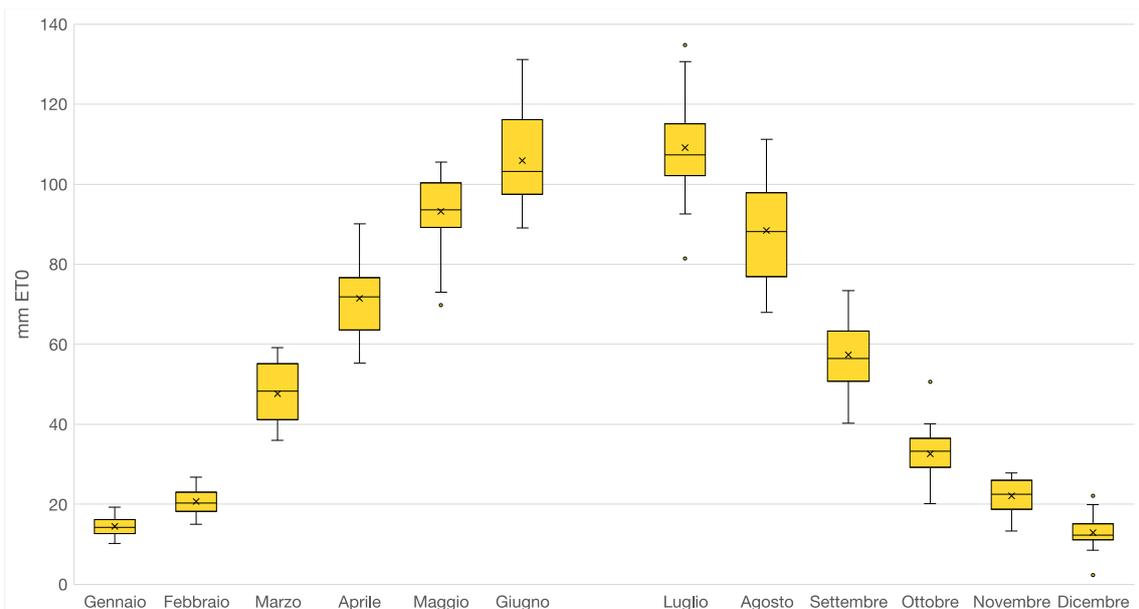


Figura 24 Box plot dell'evapotraspirazione mensile espressa in mm

Con i dati NEX-GDDP-CMIP6 ed ERA5 è stato possibile prevedere l'andamento futuro dell'evapotraspirazione e delle precipitazioni in funzione degli scenari SPP2-4.5 e SPP4-8.5 (Fig. 25 e 26).

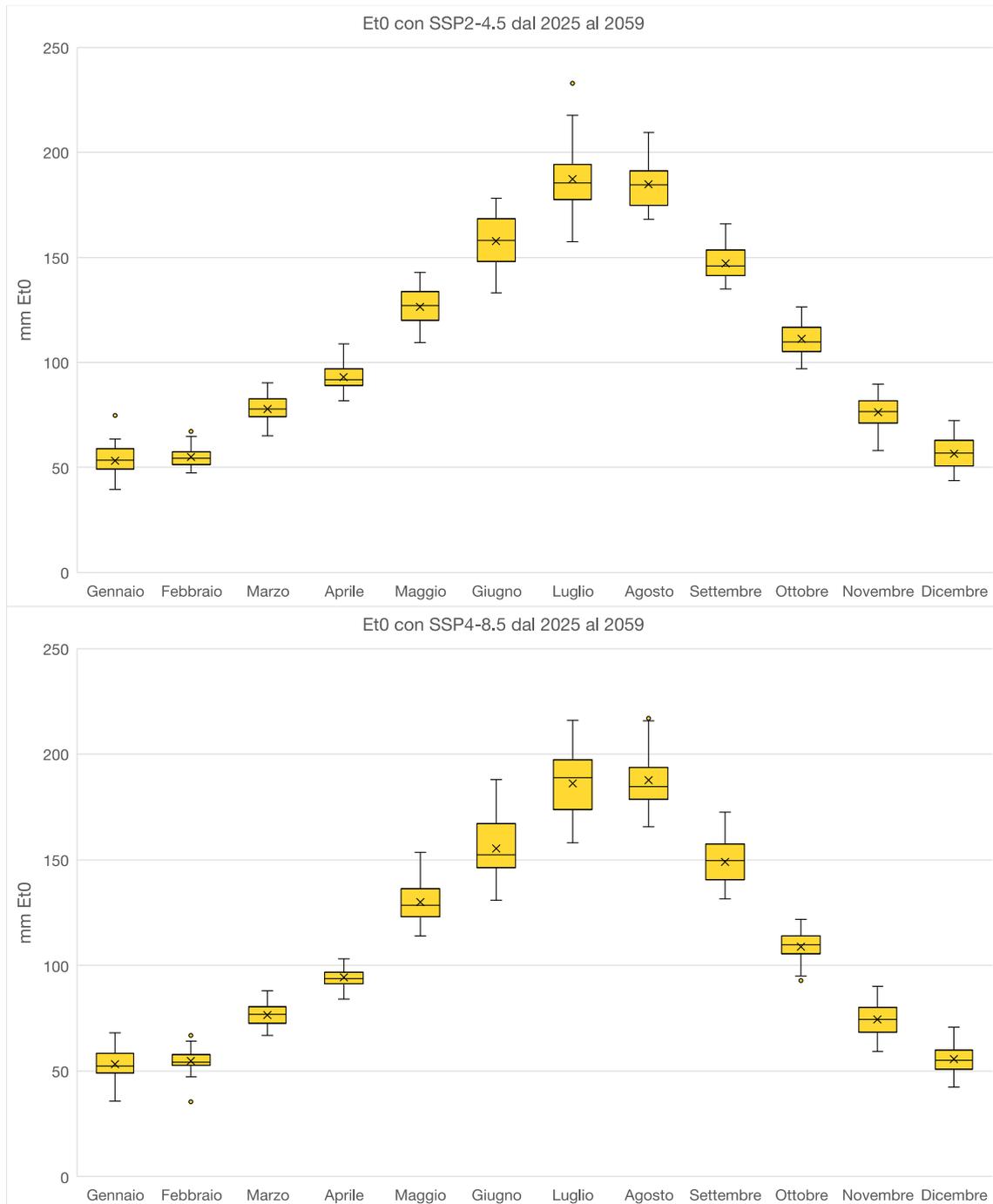


Figura 25 Simulazione dell'Et0 mensile in mm con gli scenari climatici SSP2-4.5 e SSP4-8.5 dal 2025 al 2059

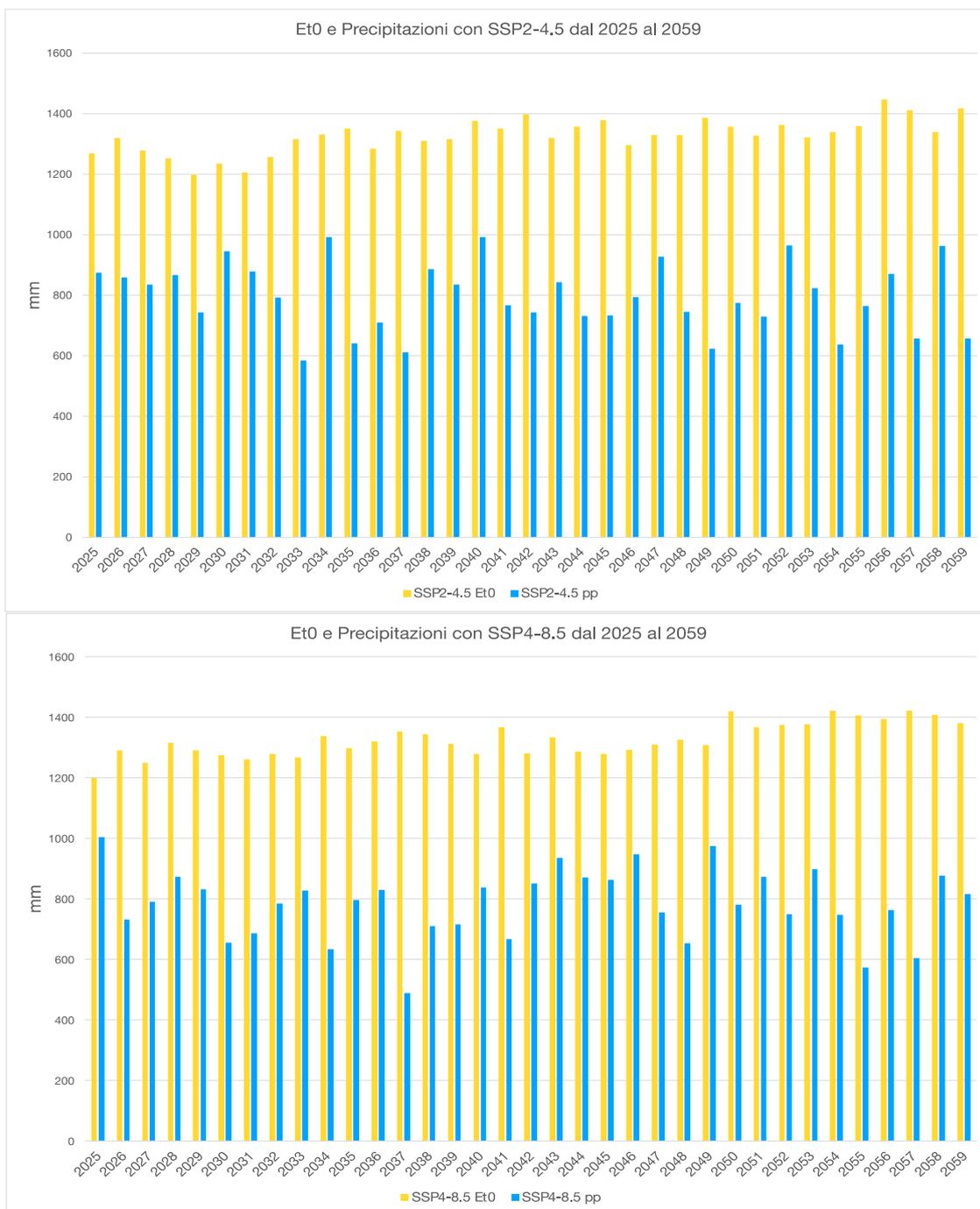


Figura 26 Evapotraspirazione e precipitazioni annuali in mm

La variabilità interannuale non è costante e risulta complessa l'identificazione di una tendenza chiara. Nei due scenari esaminati, si constata che il modello di simulazione del clima futuro genera anni caratterizzati da variazioni interannuali eterogenee. Si evidenzia l'aspettativa di una notevole variabilità dei dati; non emerge necessariamente una tendenza di diminuzione o aumento costante delle precipitazioni, ma si osserva un accresciuto livello di irregolarità nelle annate considerate.

3.1 Analisi delle simulazioni per coltura e suoli diversi

Nel presente paragrafo, vengono presentati i grafici derivanti dai risultati delle simulazioni condotte mediante l'utilizzo di AquaCrop. Le analisi hanno focalizzato l'effettuazione di stime relative al fabbisogno idrico di tre diverse colture (mais, barbabietola, e soia) in contesti climatici diversificati, ossia il periodo 2000-2022, SPP2-4.5 dal 2025 al 2059, e SPP4-8.5 dal 2025 al 2059.

Le simulazioni hanno considerato anche diversi tipi di suoli di riferimento (CPE1, AGL1, CNT1, e SNP1) e sono state ripetute su sei livelli di irrigazione (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%), corrispondenti alla percentuale di deficit dell'acqua disponibile, pari alla frazione compresa tra la capacità di campo⁸ e il punto di appassimento. Importante notare che, tipicamente, l'irrigazione non viene praticata ai valori estremi, ma all'esaurimento dell'acqua facilmente disponibile⁹, pertanto, per il mais si possono considerare attendibili i valori intorno al 60-80%, mentre per barbabietola e soia si attestano tra il 40 e il 60%.

Attraverso il confronto tra i requisiti idrici stagionali registrati tra il 2000 e il 2022 e quelli derivanti dalle proiezioni future, entrambi evidenziati nelle figure 27, 28 e 29, emerge un notevole aumento dei fabbisogni idrici per tutte e tre le colture, con incrementi spesso superiori a 100 mm. È rilevante notare che come previsto, nel contesto dello scenario SSP4-8.5, si riscontrano dati più critici rispetto allo scenario intermedio SSP2-4.5 e allo stesso tempo si manifesta una minore variabilità nei valori ottenuti

In aggiunta, si evidenzia una distribuzione differenziata in relazione al tipo di suolo, considerando anche il livello di deficit idrico del terreno durante l'irrigazione. Ad esempio, sia nel mais che nella barbabietola, con una maggiore rilevanza nella soia, si manifesta una differenza significativa nei fabbisogni idrici a deficit idrico 0% tra il clima passato e gli scenari futuri.

Va notato anche che i box-plot nei contesti degli scenari futuri mostrano un aumento delle ampiezze per tutte le colture considerate, prevedendo in futuro una maggiore variabilità temporale.

⁸ Capacità di Campo (CC) si riferisce alla quantità d'acqua trattenuta nella microporosità del terreno dopo che l'acqua presente nei macropori ha percolato liberamente sotto l'effetto della gravità. Questa acqua, nota come acqua d'imbibizione capillare, viene trattenuta nel terreno a una tensione compresa tra 0,1 e 0,2 bar.

⁹ Acqua facilmente disponibile: frazione di acqua disponibile per la pianta senza che si verifichi uno stato di stress.

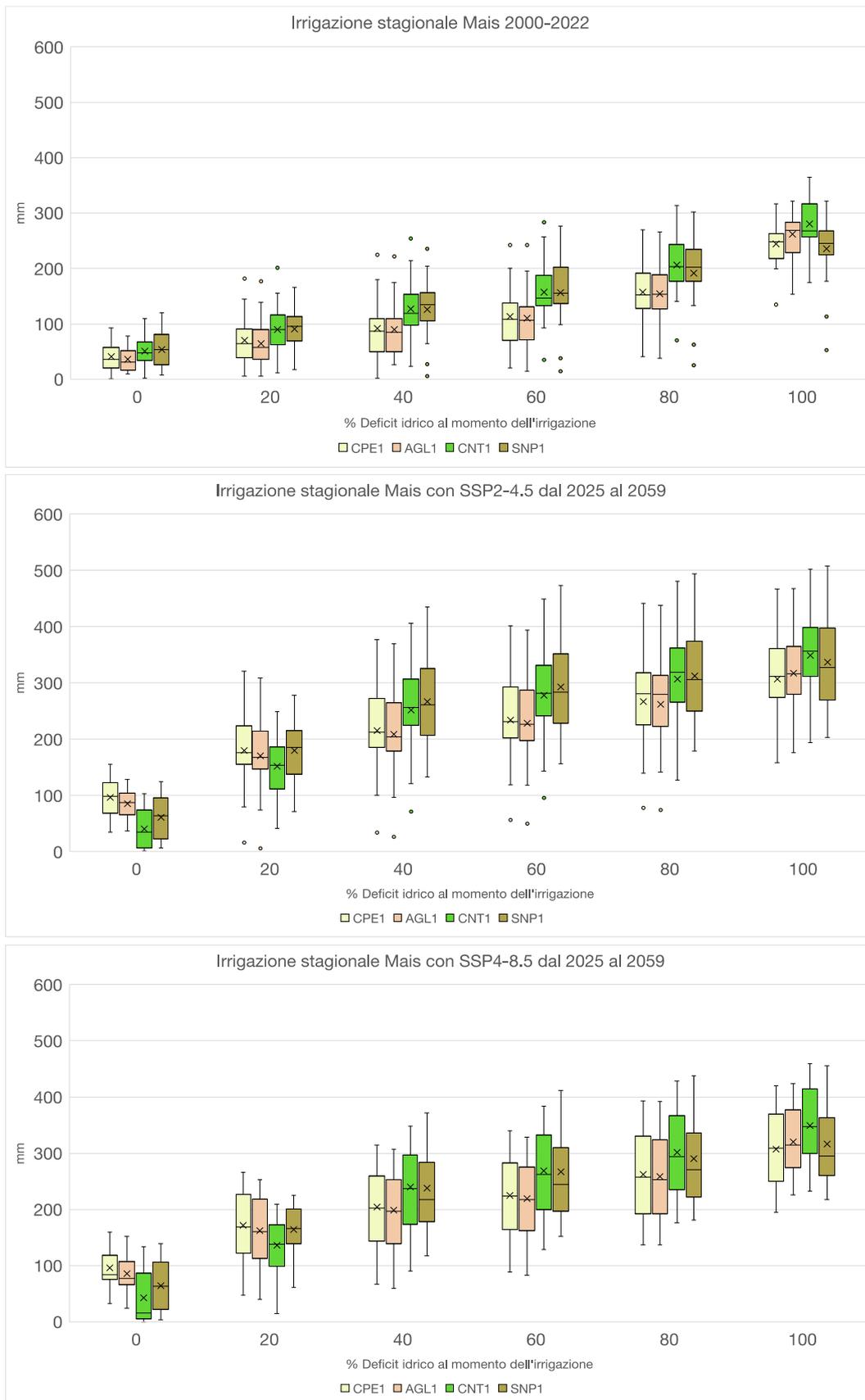


Figura 27 Irrigazione stagionale del mais con i climi 2000-2022, SSP2-4.5 e SSP4-8.5 in funzione dei suoli e della % di deficit idrico al momento degli interventi irrigui

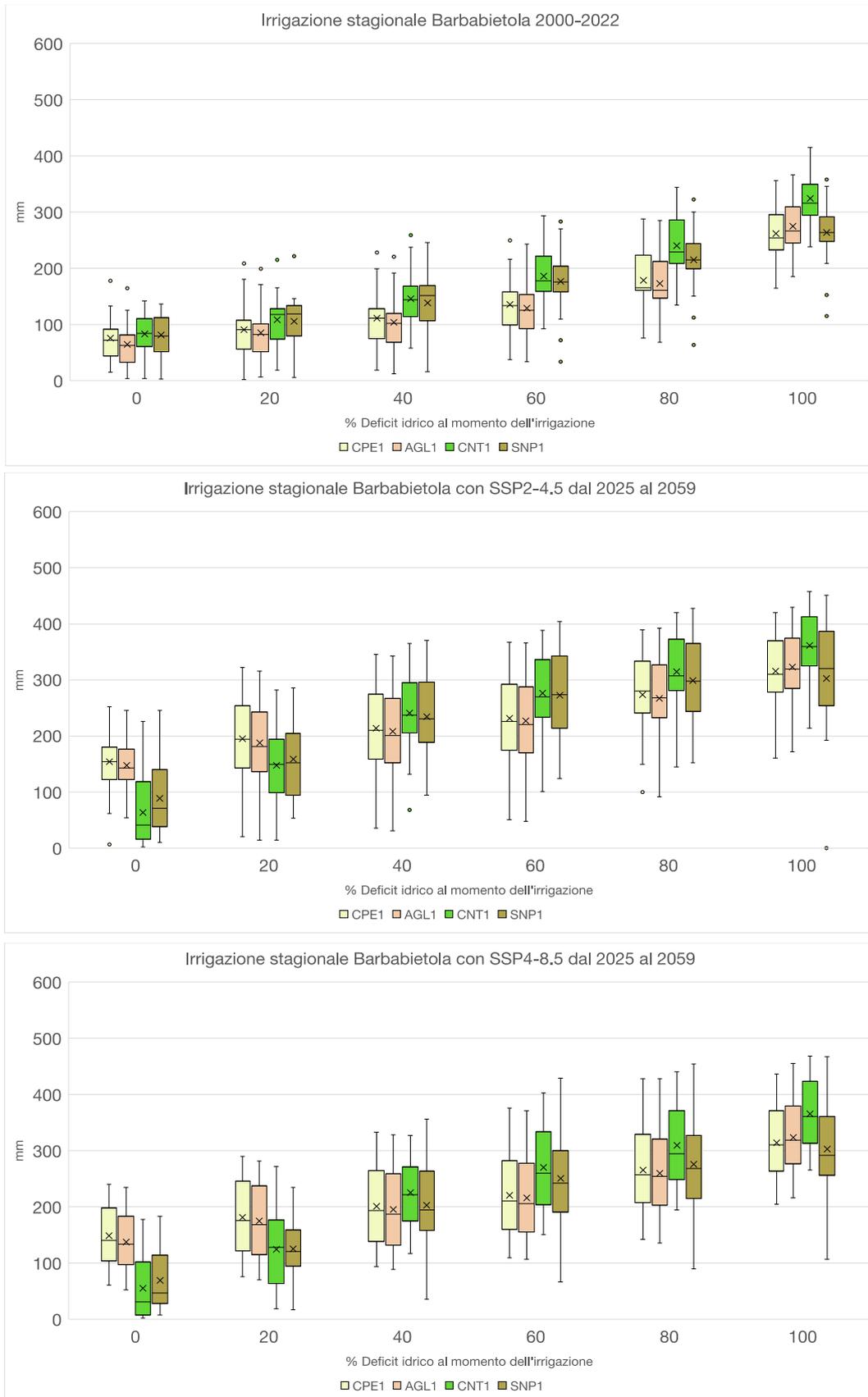


Figura 28 Irrigazione stagionale della barbabetola con i climi 2000-2022, SSP2-4.5 e SSP4-8.5 in funzione dei suoli e della % di deficit idrico al momento degli interventi irrigui

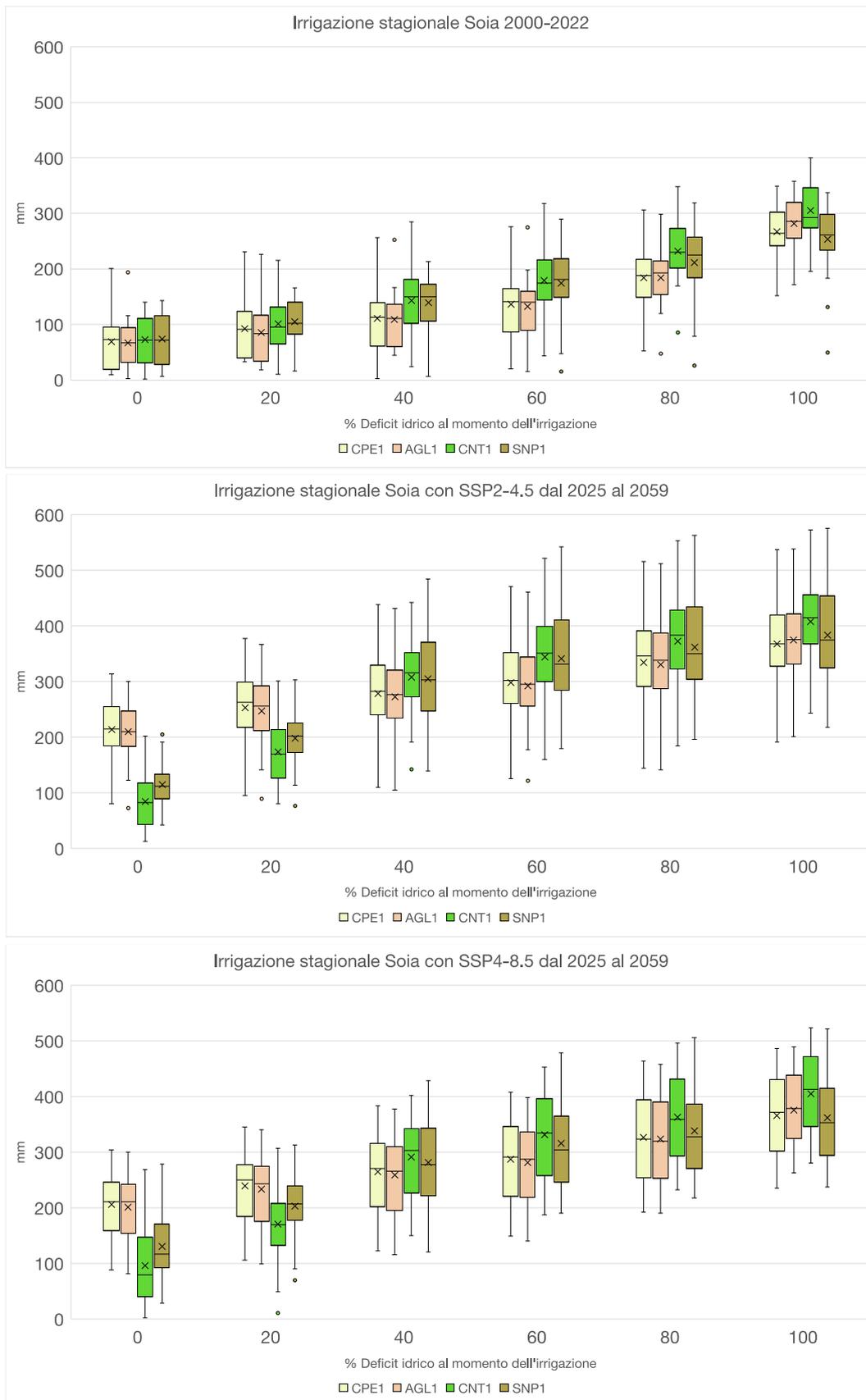


Figura 29 Irrigazione stagionale della soia con i climi 2000-2022, SSP2-4.5 e SSP4-8.5 in funzione dei suoli e della % di deficit idrico al momento degli interventi irrigui

In seguito, è stato eseguito il test di Student (Figura 30) per comparare i fabbisogni irrigui stagionali associati al periodo climatico 2000-2022 (Variabile 1) con quelli correlati agli scenari futuri (Variabile 2), senza discernere tra le colture specifiche coinvolte e ripetendo l'analisi per ciascun tipo di suolo. Mediante l'adozione del test t a doppia coda, i risultati confermano la validità dell'ipotesi H1, ad eccezione dei casi di CPE1 Clima 2000-2022-SPP2-4.5, AGL1 Clima 2000-2022-SPP4-8.5 e SNP1 Clima 2000-2022-SPP2-4.5.

CPE1			
Clima 2000-2022 - SSP2 4.5		Clima 2000-2022 - SSP4 8.5	
Test t: due campioni assumendo varianze diverse			
	Variable 1	Variable 2	
Media	133,7884222	246,4631964	
Varianza	6731,106218	8554,788272	
Osservazioni	414	630	
Differenza ipotizzata per le medie	0		
gdl	954		
Stat t	-20,62736418		
P(T<=t) una coda	9,21563E-79		
t critico una coda	1,646452431		
P(T<=t) due code	1,84313E-78		
t critico due code	1,962453746		
Test t: due campioni assumendo varianze diverse			
	Variable 1	Variable 2	
Media	133,78842	238,362512	
Varianza	6731,1062	8641,140767	
Osservazioni	414	648	
Differenza ipotizzata per le medie	0		
gdl	957		
Stat t	-19,223112		
P(T<=t) una coda	3,414E-70		
t critico una coda	1,6464474		
P(T<=t) due code	6,828E-70		
t critico due code	1,9624459		
AGL1			
Clima 2000-2022 - SSP2 4,5		Clima 2000-2022 - SSP4 8,5	
Test t: due campioni assumendo varianze diverse			
	Variable 1	Variable 2	
Media	131,3692144	242,3696554	
Varianza	7787,661638	9043,025561	
Osservazioni	414	630	
Differenza ipotizzata per le medie	0		
gdl	929		
Stat t	-19,2746325		
P(T<=t) una coda	3,34934E-70		
t critico una coda	1,646495499		
P(T<=t) due code	6,69867E-70		
t critico due code	1,962520833		
Test t: due campioni assumendo varianze diverse			
	Variable 1	Variable 2	
Media	131,36921	234,9661345	
Varianza	7787,6616	9196,302396	
Osservazioni	414	648	
Differenza ipotizzata per le medie	0		
gdl	932		
Stat t	-18,033198		
P(T<=t) una coda	6,829E-63		
t critico una coda	1,6464902		
P(T<=t) due code	1,366E-62		
t critico due code	1,9625126		
CNT1			
Clima 2000-2022 - SSP2 4,5		Clima 2000-2022 - SSP4 8,5	
Test t: due campioni assumendo varianze diverse			
	Variable 1	Variable 2	
Media	167,3347207	245,7525691	
Varianza	8775,447571	17184,79841	
Osservazioni	414	630	
Differenza ipotizzata per le medie	0		
gdl	1035		
Stat t	-11,26314401		
P(T<=t) una coda	3,85253E-28		
t critico una coda	1,646327194		
P(T<=t) due code	7,70506E-28		
t critico due code	1,962258671		
Test t: due campioni assumendo varianze diverse			
	Variable 1	Variable 2	
Media	167,33472	239,941327	
Varianza	8775,4476	16865,99742	
Osservazioni	414	648	
Differenza ipotizzata per le medie	0		
gdl	1045		
Stat t	-10,565558		
P(T<=t) una coda	3,665E-25		
t critico una coda	1,6463131		
P(T<=t) due code	7,331E-25		
t critico due code	1,9622367		
SNP1			
Clima 2000-2022 - SSP2 4,5		Clima 2000-2022 - SSP4 8,5	
Test t: due campioni assumendo varianze diverse			
	Variable 1	Variable 2	
Media	154,2426962	186,8584093	
Varianza	6778,517109	22236,94817	
Osservazioni	414	630	
Differenza ipotizzata per le medie	0		
gdl	1015		
Stat t	-4,537407252		
P(T<=t) una coda	3,18776E-06		
t critico una coda	1,646356257		
P(T<=t) due code	6,37551E-06		
t critico due code	1,96230394		
Test t: due campioni assumendo varianze diverse			
	Variable 1	Variable 2	
Media	154,2427	163,9424646	
Varianza	6778,5171	20392,24597	
Osservazioni	414	648	
Differenza ipotizzata per le medie	0		
gdl	1050		
Stat t	-1,40234		
P(T<=t) una coda	0,0805547		
t critico una coda	1,6463061		
P(T<=t) due code	0,1611093		
t critico due code	1,9622259		

Figura 30 Test T di Student tra Clima 2000-2022 e climi futuri per ogni tipologia di suolo

In aggiunta, il test di Student ha permesso di valutare le differenze nei fabbisogni irrigui tra i suoli caratteristici della pianura (CPE1 e AGL1) e quelli di provenienza montano-collinare (CNT1 e SNP), senza distinguere tra le specifiche colture coinvolte.

I risultati del confronto (Fig. 31), confermano la significatività delle variazioni osservate nei box plot (Figg. 27, 28 e 29), quindi di tendenze differenti in funzione dei suoli.

Tale risultato fornisce ulteriori informazioni sulla diversità delle esigenze idriche nei vari contesti geografici del comprensorio, contribuendo così a una comprensione più approfondita delle dinamiche irrigue.

Test t: due campioni assumendo varianze diverse

	<i>Variabile 1</i>	<i>Variabile 2</i>
Media	132.5788183	160.7887085
Varianza	7252.070865	7810.480582
Osservazioni	828	828
Differenza ipotizzata per le medie	0	
gdl	1652	
Stat t	-6.614047232	
P(T<=t) una coda	2.51768E-11	
t critico una coda	1.645776526	
P(T<=t) due code	5.03536E-11	
t critico due code	1.961401019	

Figura 31 T di Student tra terreni di pianura (*Variabile 1*) e terreni montano collinari (*Variabile 2*)

3.2 Discussione dei risultati

In termini generici (Doorenbos e Kassam 1979) riportano come la diminuzione della soglia di deficit idrico è associata a un incremento significativo nello sviluppo e nella produzione delle colture. Questa propensione è plasmata da una serie di variabili, estendendosi oltre le condizioni climatiche e la specifica specie, coinvolgendo la profondità delle radici e la tipologia di suolo.

Per quanto concerne le radici, in presenza di un sistema radicale poco profondo, la soglia di deficit idrico si colloca tra il 20% e il 30%, mentre in presenza di radici profonde, questa soglia varia mediamente tra il 40% e il 60%. Nel caso di suoli altamente compatti, la soglia è compresa tra il 20% e il 30%, mentre in suoli poco compatti supera il 50%.

Nel contesto territoriale preso in esame, i dati indicano che il mais viene irrigato con un deficit compreso tra il 50% e il 70%, mentre per la soia tale percentuale si attesta intorno al 65-70%. La barbabietola, caratterizzata da un sistema radicale profondo, mostra una tollerabilità accettabile a un deficit idrico del 50%. È tuttavia rilevante sottolineare che l'applicazione dell'irrigazione non solo incide sui volumi produttivi, ma esercita altresì influenze significative sulla qualità del fittone e del suo profilo zuccherino.

All'interno della pubblicazione FAO Irrigation and Drainage Paper, si osserva che tutte e tre le colture in questione rientrano nel Gruppo 4 della classificazione secondo la riduzione di acqua nel terreno, indicando per ciascun gruppo specifiche soglie di deficit idrico in relazione all'evapotraspirazione giornaliera. Pertanto, in scenari caratterizzati da un'elevata evapotraspirazione giornaliera, ad esempio pari a 10 mm al giorno, è possibile che le soglie scendano al di sotto del 40%.

In accordo con le informazioni fornite dall'ISPRA (Braca, et al. 2023), nel periodo compreso tra il 1950 e il 2022, nel Veneto, si è registrato un significativo incremento dell'evapotraspirazione. Nel corso dell'ultimo decennio, tale parametro ha raggiunto valori massimi superiori a 800 mm, con una media estiva fino a 8-10 mm al giorno.

Nel contesto dei dati esaminati all'interno di questo elaborato, considerando altresì gli scenari climatici prospettati per il futuro, si nota un netto incremento dell'ET, soprattutto durante i mesi in cui avviene l'irrigazione. In questo contesto, è plausibile che colture alle quali attualmente potrebbe essere assegnata una soglia di deficit più elevata potrebbero necessitare, in avvenire, di una soglia di deficit inferiore.

In un contesto in cui ci si orienta sempre più verso climi caratterizzati da un elevato tasso di ET, è imprescindibile tenere presente che le soglie di deficit tenderanno a diminuire al fine di preservare una produzione agricola adeguata. Emergono evidenze che in situazioni di deficit, l'influenza delle caratteristiche del suolo risulta notevolmente significativa, contribuendo a una maggiore variabilità nei risultati ottenuti. In aggiunta, con l'evolversi dei cambiamenti climatici, è prevedibile una riduzione del carbonio organico nei suoli, poiché le temperature più elevate potrebbero causare un incremento nei tassi di mineralizzazione della sostanza organica (Riggers, et al. 2021, Poeplau e Dechow 2023). Preservare l'integrità della sostanza organica emerge come una priorità fondamentale, poiché, oltre a fornire micro e macro-elementi attraverso il processo di mineralizzazione, essa svolge un ruolo essenziale nello scambio cationico (Tiessen, Cuevas e Chacon 1994)

e contribuisce fisicamente a ridurre la compattazione del suolo (Ruehlmann e Körschens 2009).

All'interno del contesto delle analisi condotte in questa ricerca, emerge chiaramente che le disparità nei requisiti irrigui nell'intervallo 0-20 mostrano variazioni significative nei tre ambienti climatici considerati, manifestando richieste idriche notevolmente accentuate. Questo si traduce, irrigando al 20% di deficit, in un quasi raddoppio delle esigenze di irrigazione per il mais, mentre si osserva un triplo incremento per la soia.

In aggiunta, si osserva che vi sono differenze sostanziali tra i suoli tipici delle aree pianeggianti (CPE1 e AGL1) e quelli originari delle zone montano-collinari (CNT1 e SNP1). In questa circostanza, CNT1 emerge come il suolo con il più elevato contenuto di carbonio organico tra i tre suoli considerati. Questo terreno sembra esibire una minore sensibilità alle variazioni climatiche, probabilmente a causa della presenza di carbonio organico, il quale sembra svolgere un ruolo mitigante. In contrasto, suoli con un contenuto di carbonio organico più basso sembrano associarsi a una richiesta idrica più elevata rispetto a quanto previsto solamente in base alle condizioni climatiche.

In linea con le deduzioni precedentemente tratte, lo studio di (Sofia, Zaccone e Tarolli 2023), svolto nello stesso contesto territoriale, mette in luce che nel Comprensorio LEB le zone maggiormente vulnerabili agli impatti della siccità sono quelle caratterizzate da suoli con una bassa presenza di sostanza organica e argilla.

È opportuno considerare che oltre alle peculiarità pedologiche, anche le pratiche di lavorazione del suolo possono esercitare un'influenza sui parametri, compresa la profondità e la distribuzione della densità delle radici (Qin, Stamp e Richner 2004).

Inoltre, le lavorazioni possono contribuire a cambiare il contenuto organico nel suolo e aumentarne la disponibilità, per esempio la semina sul sodo e la minima lavorazione aiutano a preservare la sostanza organica negli strati superficiali de terreno (Haddaway, et al. 2017). Tuttavia, è importante notare che rispetto alle pratiche di lavorazione convenzionali, tali approcci rendono la sostanza organica meno disponibile a profondità superiori a 30 cm (VandenBygaart, Gregorich e Angers 2003).

In ogni caso, l'adozione della pratica di non lavorazione del suolo (No Tillage, NT) conferisce il beneficio di migliorare nel corso del tempo le caratteristiche strutturali del suolo, con una marcata diminuzione del grado di compattamento. Le superiori qualità strutturali del suolo non lavorato assicurano, grazie anche alla presenza dei residui

colturali sulla superficie, una maggiore ritenzione di umidità rispetto ai suoli sottoposti a lavorazione minima (Minimum Tillage, MT) (Reicosky e Saxton 2007).

Quindi nei suoli caratterizzati da una notevole compattezza, si evidenzia la richiesta di iniziare l'irrigazione già a deficit idrici piuttosto modesti, cioè inferiori al 30%, mentre in terreni meno compatti è possibile posticipare l'avvio della pratica irrigua, tale vantaggio potrebbe assumere una rilevanza crescente con l'aumentare dei tassi di ET (Doorenbos e Kassam 1979).

Inoltre, per effetto della pratica del NT, si riscontra comunemente un incremento di circa il 15% nella densità della lunghezza delle radici delle colture, particolarmente evidente nei primi 10 centimetri di profondità del terreno (Mondal, et al. 2020), i quali rappresentano la zona in cui l'irrigazione si dimostra più efficace.

Sulla base di queste riflessioni e dei risultati ottenuti, sarà necessario attuare strategie atte a mitigare gli impatti dei cambiamenti climatici sulle richieste idriche.

La promozione della sostanza organica nei suoli e l'adozione delle pratiche agricole basate sulla riduzione delle lavorazioni emergono nuovamente come temi centrali. Tali approcci si configurano come leva strategica per migliorare le caratteristiche strutturali del suolo, riducendo il compattamento e di conseguenza, influenzando positivamente le esigenze idriche delle colture. Inoltre, è essenziale prevedere un adeguamento delle infrastrutture per rispondere alla crescente domanda irrigua causata dal cambiamento climatico. Programmare una maggiore necessità idrica implica quindi il potenziamento delle strutture esistenti, consentendo di fronteggiare in modo efficace l'aumento della richiesta di irrigazione associata alle mutate condizioni climatiche.

4. Conclusioni

Il comparto agricolo è il settore economico maggiormente suscettibile agli esiti derivanti dai mutamenti climatici, manifestando una notevole sensibilità alle oscillazioni termiche, alle variazioni nei modelli di precipitazione e agli eventi meteorologici estremi, i quali esercitano impatti significativi sulla produzione agricola e sulla sicurezza alimentare.

Come delineato nel capitolo introduttivo, emerge la mancanza di una tendenza uniforme negli effetti dell'aumento delle temperature sull'agricoltura, in quanto alcune colture potrebbero beneficiare di un aumento delle rese, attribuibile anche alla maggiore concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera.

Anche la distribuzione delle precipitazioni mostra una marcata variabilità, influenzata da una serie di fattori geografici, topografici e climatici.

I principali fattori di rischio identificati sono strettamente correlati all'incremento dei fenomeni meteorologici estremi e alla crescente richiesta di acqua derivante dall'aumento dell'evapotraspirazione, aspetti approfonditi nella sezione sperimentale di questa tesi.

I risultati emersi evidenziano che, negli scenari climatici futuri, le colture analizzate (mais, barbabietola e soia) potrebbero richiedere, in alcune circostanze, oltre 100 mm di acqua aggiuntiva durante il ciclo colturale, corrispondenti a più di 1000 metri cubi per ettaro.

In questo contesto, emerge la necessità di ottimizzare i cicli colturali, con una possibile anticipazione delle semine, la ricerca mirata a ottenere cultivar più resilienti alle alte temperature e alla siccità e un miglioramento dell'efficienza delle tecniche irrigue.

È essenziale anche considerare l'interazione tra il tipo di terreno e le esigenze idriche, come evidenziato dalla significativa disparità nelle risposte tra i terreni di pianura e quelli tipici delle zone montano-collinari.

Nel contesto attuale in cui è altamente probabile lo scenario climatico SSP2-4.5, acquisire consapevolezza sulle implicazioni future dei cambiamenti climatici diventa imperativo. Di conseguenza, la ricerca e l'attuazione di strategie agricole innovative, improntate sulla sostenibilità e sull'adattamento, si configurano come elementi fondamentali per affrontare con successo le sfide complesse che il settore agricolo moderno deve affrontare in un ambiente caratterizzato da una crescente variabilità climatica.

Riferimenti

- Allen, R. G., L. S. Pereira, M. Smith, D. Raes, e J. L. Wright. 2005. «FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions.» *Journal of irrigation and drainage engineering* 131(1): 2-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2)).
- ANBI Veneto. 2022. «Parte dal Canale Leb il piano “anti siccità” del Veneto.» <https://www.anbiveneto.it/parte-dal-canale-leb-il-piano-anti-siccita-del-veneto/>.
- ANSA. 2022. *La Russia taglia il gas, l'Europa ritorna al carbone*. 23 06. https://www.ansa.it/nuova_europa/it/notizie/rubriche/energia/2022/06/23/la-russia-taglia-il-gas-leuropa-ritorna-al-carbone_29fc6850-29fa-477b-9e10-49020021deba.html.
- ARPAV. 2023. *Agrometeo Mese N° 9 LUGLIO 2023*. <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/agrometeo/file-e-allegati/bollettino-mese/2023/luglio-2023.pdf/@@download/file>.
- . 2019. «Carta dei suoli del Veneto.» <https://www.arpa.veneto.it/>
- Assovini. s.d. «Maturazione dell'Uva.» Consultato il giorno 10 27, 2023. <https://www.assovini.it/vino/maturazione-dell-uva>.
- Bald Mountain Science. 2012. *Com'è nata l'atmosfera terrestre e le sue trasformazioni*. <https://www.bmscience.net/blog/come-nata-latmosfera-terrestre-e-le-sue-trasformazioni/>.
- Baronetti, A., V. Dubreuil, A. Provenzale, e S. Fratianni. 2022. «Future droughts in northern Italy: high-resolution projections using EURO-CORDEX and MED-CORDEX ensembles.» *Climatic Change* (Springer) 172 (3): 1-22.
- Barretta, V. 2023. *La Germania esce dal nucleare, ma riapre le centrali a carbone*. 17 04. <https://www.energiaitalia.news/news/nucleare/la-germania-esce-dal-nucleare-ma-riapre-le-centrali-a-carbone/14790/>.
- Belluzzi, G. 2023. «LA ZOOTECCIA ITALIANA MARCIA A GRANDI PASSI.» *Agriscienza*. 5 11. Consultato il giorno 10 28, 2023. <https://agriscienza.it/la-zootecnia-italiana-marcia-a-grandi-passi/>.
- Berman, A. 2005. «Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows.» *Journal of animal science*. <https://doi.org/10.2527/2005.8361377x>.
- Bonaldo, D., D. Bellafiore, C., Ferrarin, R., Ricchi, A., Sangelantoni, L. Ferretti, e M. L. Vitelletti. 2023. «The summer 2022 drought: a taste of future climate for the Po valley (Italy)?» *Regional Environmental Change* 23 (1).

- Box, E.O. 1999. «Un pianeta in trasformazione.» *Frontiere della Vita*.
https://www.treccani.it/enciclopedia/un-pianeta-in-trasformazione_%28Frontiere-della-Vita%29/.
- Braca, G., M. Bussetini, B. Lastoria, S. Mariani, e F. Piva. 2023. *Elaborazioni modello BIGBANG versione 6.0 - ISPRA*.
https://groupware.sinanet.isprambiente.it/bigbang-data/library/bigbang_60/excel_tables/bigbang60_tables_regions_01.
- Brunetti, M., M. Maugeri, e T. Nanni. 2001. «Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in Northeastern Italy.» 861–871.
- Brunetti, M., M. Maugeri, T. Nanni, e A. Navarra. 2002. «Droughts and extreme events in regional daily Italian precipitation series.» *International Journal of Climatology* 22 (5): 543-558.
- Caloiero, T., G.N. Caroletti, e R. Coscarelli. 2021. «IMERG-Based Meteorological Drought Analysis over Italy.» *Climate* 9 (4): 65.
- Cammalleri, C., G. Naumann, L. Mentaschi, G.(a) Formetta, G. Forzieri, S. Gosling, B. Bisselink, A. De Roo, e L. Feyen. 2020. «Global warming and drought impacts in the EU.» *Publications Office of the European Union*.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118585>
- Caporali, E., M. Lompi, T. Pacetti, e V., Fatichi, S. Chiarello. 2020. «A review of studies on observed precipitation trends in Italy.» *International Journal of Climatology*. 10 07. <https://doi.org/10.1002/joc.6741>.
- Cappellini, Micaela. 2023. «Produzione agricola, l'Italia retrocede al terzo posto nella graduatoria Ue.» *Il Sole 24 Ore*. 17 10.
<https://www.ilsole24ore.com/art/produzione-agricola-l-italia-retrocede-terzo-posto-graduatoria-ue-AFOfIEHB>.
- Carrer, M., R Dibona, A.L. Prendin, e M. Brunetti. 2023. «Recent waning snowpack in the Alps is unprecedented in the last six centuries.» *Nature Climate Change* 155-160. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01575-3>
- CDC EUROPEE. 2009. «Documento di lavoro dei servizi della Commissione - Le problematiche dell'adattamento dell'agricoltura e delle zone rurali europee ai cambiamenti climatici .»
https://agriregionieuropa.univpm.it/sites/are.econ.univpm.it/files/workdoc2009_it.pdf.
- Ciscar Martinez, J.-C., D. Ibarreta Ruiz, A. Soria Ramirez, A. Dosio, A. Toreti, A. Ceglar, D. Fumagalli, et al. 2018. «Climate impacts in Europe: final report of the JRC PESETA III project.» *Publications Office of the European Union*.
<https://doi.org/10.2760/93257>

- Cislaghi, M, C. De Michele, A. Ghezzi, e R. Rosso. 2005. «Statistical assessment of trends and oscillations in rainfall dynamics: Analysis of long daily Italian series.» *Atmospheric Research* 77 (1-4): 188-202.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.12.014>.
- Climate Action Tracker. 2022. *Warming Projections Global Update November 2022*. 11.
https://policycommons.net/artifacts/3153102/cat_2022-11-10_globalupdate_cop27/3950927/.
- CMCC. 2021. «ANALISI DEL RISCHIO - I cambiamenti climatici in sei città italiane.» *cmcc.it*. <https://www.cmcc.it/it/rischio-clima-citta-2021#download>.
- Cocheo, Vincenzo. 2000. «Agenti inquinanti e sorgenti dell'inquinamento atmosferico urbano.» *Annali-Istituto superiore di sanità*.
<https://www.iss.it/documents/20126/955767/vol36-3-0001.1109057816.pdf/c519994e-7c09-5c56-a98c-9dac7259578a?version=1.1&t=1575581291780&download=true#page=13>.
- Codegoni, Alessandro. 2016. «Perché Kyoto è stato un successo, nonostante tutto.» *Qualenergia*. 21 06. [https://www.qualenergia.it/articoli/20160620-perche-kyoto-unsucessononostantetutto/#:~:text=I%20dati%2C%20in%20effetti%2C%20parlano,anno%20\(GtCO2%2Fa\)](https://www.qualenergia.it/articoli/20160620-perche-kyoto-unsucessononostantetutto/#:~:text=I%20dati%2C%20in%20effetti%2C%20parlano,anno%20(GtCO2%2Fa)).
- Coldiretti. 2023. «Caldo: -10% latte in fattorie, sos mucche.» 12 07. Consultato il giorno 10 28, 2023. https://www.coldiretti.it/meteo_clima/caldo-10-latte-in-fattorie-sos-mucche.
- . 2022. «Clima: 6 mld di danni dalla peggiore siccità da 500 anni.» 06 09. Consultato il giorno 11 02, 2023. https://www.coldiretti.it/meteo_clima/clima-6-mld-di-danni-dalla-peggiore-siccita-da-500-anni.
- . 2022. «Clima: nell'anno più caldo triplicano i tropicali italiani.» *coldiretti.it*. 3 12. Consultato il giorno 10 27, 2023. <https://www.coldiretti.it/consumi/clima-nellanno-piu-caldo-triplicano-i-tropicali-italiani>.
- Colombo, T., V. Pelino, S. Vergari, P. Cristofanelli, e P. Bonasoni. 2007. «Study of temperature and precipitation variations in Italy based on surface instrumental observations.» *Global and Planetary Change* 57: 308-318.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.12.003>.
- Commissione Europea. s.d. *Conseguenze dei cambiamenti climatici*.
https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_it.
- Consiglio Europeo. s.d. *Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici*. Consultato il giorno 11 01, 2023. <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/>.
- Consorzio LEB. 2023. Consultato il giorno 11 08, 2023. <https://consorzioleb.it/il-progetto-generale/>.

- COPA-COGECA. 2004. *Assessment of the impact of the heat wave and drought of the summer 2003 on agriculture and forestry*. http://docs.gip-ecofor.org/libre/COPA_COGECA_2004.pdf.
- Copernicus. 2021. *Copernicus: Globally, the seven hottest years on record were the last seven; carbon dioxide and methane concentrations continue to rise*. 10 01. <https://climate.copernicus.eu/copernicus-globally-seven-hottest-years-record-were-last-seven>.
- DeAngelo, B., J. Edmonds, D.W. Fahey, e B.M. Sanderson. 2017. «Perspectives on climate change mitigation.» *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. U.S. Global Change Research Program. 393-410. <https://digitalcommons.unl.edu/usdeptcommercepub/579/>
- Dezsi, S., M. Mîndrescu, D. Petrea, P. Kumar Rai, A. Hamann, e M.M. Nistor. 2018. «High-resolution projections of evapotranspiration and water availability for Europe under climate change.» *International Journal of Climatology* 3832 - 3841 <https://doi.org/10.1002/joc.5537>
- Di Corpo, Ulisse, e Antonella Vannini. 2011. «Le Origini della Vita alla luce della legge della sintropia.» *Sintropia.it*. <http://www.sintropia.it/journal/italiano/2011-it-1-1.pdf>.
- Doorenbos, J., e A. H. Kassam. 1979. «Yield response to water.» *FAO Irrigation and drainage paper* 33, 257
- EEA. 2012. «Acqua e agricoltura, prospettive ed esigenze.» Consultato il giorno 11 02, 2023. <https://www.eea.europa.eu/it/articles/acqua-e-agricoltura-prospettive-ed-esigenze>.
- . 2019. «Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe.» <https://www.eea.europa.eu/publications/cc-adaptation-agriculture>.
- . 2023. *Economic losses from weather- and climate-related extremes in Europe*. 06 10. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related>.
- . 2012. *Projected changes in water-limited crop yield*. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-changes-in-water-limited>.
- Eur-Lex. 2016. «TRADUZIONE ACCORDO DI PARIGI.» *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*. 19 10. <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/>
- European Environment Agency. 2016. «L'ambiente in Europa: Seconda valutazione - Capitolo 5. Ozono troposferico.» <https://www.eea.europa.eu/it/publications/92-828-33518/page005.html#:~:text=L'ozono%20nella%20troposfera%20riveste,paragrafo%202.3>).
- Fader, M., S. Shi, W. Von Bloh, A. Bondeau, e W. Cramer. 2016. «Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate

for increases in irrigation water requirements.» *Hydrology and earth system sciences* (GOTTINGEN: Copernicus Gesellschaft Mbh) 20 (2): 953-973.
<https://doi.org/10.5194/hess-20-953-2016>

FAO. s.d. «Aquacrop.» *FAO*. Consultato il giorno 11 05, 2023.

<https://www.fao.org/aquacrop>.

—. 2023. «AquaCrop training handbooks.»

<https://www.fao.org/3/cc2380en/cc2380en.pdf>.

—. 2006. «Livestock's long shadow. Environmental issues and options.»

https://meteo.lcd.lu/globalwarming/FAO/livestocks_long_shadow.pdf.

Fares, C., V. Menga, F. Badeck, F. Rizza, F. Miglietta, A. Zaldei, P. Codianni, A. Iannucci, e L. Cattivelli. 2016. «Increasing atmospheric CO2 modifies durum wheat grain quality and pasta cooking quality.» *Journal of Cereal Science*.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.03.016>.

Feyen, L., J.C. Ciscar, S. Gosling, D. Ibarreta, e A., Soria. 2020. «Climate change impacts and adaptation in Europe - JRC PESETA IV final report.» *Joint Research Centre*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119178>

Fondazione CMCC. 2020. *Analisi del rischio I cambiamenti climatici in Italia* . 25 11.
https://cittaclima.it/wp-content/uploads/2020/11/Presentazione_Spano-25.11.2020.pdf.

Foster, T., N. Brozovic, A. P. Butler, M. C. Neale, D. Raes, P. Steduto, E. Fereres, e T.C. Hsiao. 2016. «AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model.» *Agricultural Water Management*.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015> .

Funk, C., P. Peterson, M. Landsfeld, D. Pedreros, J. Verdin, S. Shukla, G. Husak, et al. 2015. «The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes.» *Scientific Data*.
<https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.

Guidetti, R. 2023. «"Carbon neutrality" in Asia: quali difficoltà e opportunità (anche per le aziende italiane).» *Sole 24 Ore*, 30 06.

Gullino, M.L., G. Gilardi, M. Pugliese, e A. Garibaldi. 2017. «Effetto dei cambiamenti climatici sulla gravità di alcune malattie.» *Protezione delle Colture*.
<https://iris.unito.it/bitstream/2318/1680415/1/Cambiamenti%20climatici%20Gullino%20Emphasis.pdf>.

Haddaway, N. R., K. Hedlund, L. E. Jackson, T. Kätterer, E. Lugato, I. K. Thomsen, H.B. Jørgensen, e P. E. Isberg. 2017. «How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review.» *Environmental Evidence* 6 (1): 1-48.
<https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>.

- Iglesias, A., L. Garrote, S. Quiroga, e M. Moneo. 2012. «A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe.» *Climatic Change*. 112, 29–46 <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0338-8>
- IPCC. 2013. «Annex II: Climate System Scenario Tables.» https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_AnnexII_FINAL.pdf.
- . 2021. «Cambiamento Climatico 2021: sintesi per tutti.» *ipcc.ch*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Italian.pdf.
- . s.d. *GLOSSARIO MINIMO dell'IPCC*. https://www.cmcc.it/wp-content/uploads/2014/04/IPCC_AR5_Glossario_IT.pdf.
- IPCC. 2019. *IPCC WGII Sixth Assessment Report*. IPCC.
- ISPI. 2020. «Orizzonte 2050: le prospettive di sviluppo dell'Africa.» *ispionline.it*. 22 05. <https://www.ispionline.it/it/pubblicazione/orizzonte-2050-le-prospettive-di-sviluppo-dellafrica-25861>.
- . 2022. «Siccità: di male in peggio.» *ispionline.it*. 17 06. <https://www.ispionline.it/it/pubblicazione/ispitel-siccita-di-male-peggio-35481>.
- ISPRA. 2022. *Ambiente in Italia: uno sguardo d'insieme Annuario dei dati ambientali 2022*. <https://www.isprambiente.gov.it/files2023/pubblicazioni/stato-ambiente/ambiente-in-italia-annuario-2022.pdf>.
- ISTAT. 2023. «Contributi alla ripresa del Made in Italy e segnali di vulnerabilità dei Sistemi Locali del Lavoro: i dati sull'export.» *istat.it*. 06 03. <https://www.istat.it/it/files//2023/03/DossierSLL-Commissione-Attivita-produttive-6-marzo2023.pdf>.
- . 2023. «Stima preliminare dei conti economici dell'agricoltura.» 20 01. https://www.istat.it/it/files//2023/01/Report_Stima_prelim_andamento_economia_agricola_2022_30012023.pdf.
- Kahn, M.E., K. Mohaddes, R.N.C. Ng, M.H. Pesaran, M. Raissi, e J.C. Yang. 2019. «IMF Working Paper - Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis.» *International Monetary Found*. 11 10. <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2019/10/11/Long-Term-Macroeconomic-Effects-of-Climate-Change-A-Cross-Country-Analysis-48691>.
- Kelly, T.D., e T. Foster. 2021. «AquaCrop-OSPy: Bridging the gap between research and practice in crop-water modeling.» *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106976>.
- Legambiente. 2021. *Report-OsservatorioCittaClima2021*. <https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/11/Report-OsservatorioCittaClima2021.pdf>.
- Lobell, D.B., e S. M. Gourdj. 2012. «The Influence of Climate Change on GlobalCrop Productivity.» *Plant Physiology* (American Society of Plant Biologists) 160 (4) 1686–1697. <https://doi.org/10.1104/pp.112.208298>

- Lynas, M., B. Houlton, e S. Perry. 2021. «Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature.» *Environmental Research Letters* 4.
- Mariani, L. 2021. «Anidride carbonica, fotosintesi e global greening.» *agrariansciences.it*. 27 05. Consultato il giorno 10 27, 2023. <https://www.agrariansciences.it/2021/05/anidride-carbonica-fotosintesi-e-global.html>.
- MASAF. s.d. *Ministero dell'agricoltura e della sovranità alimentare e delle foreste*. <https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/396>
- MASE. 2022. «Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici.» https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/clima/PNACC_versione_dicembre2022.pdf.
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al. 2021. «Climate Change 2021 - The Physical Science Basis Summary for Policymakers.» *IPCC*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.
- Matiu, M., A. Crespi, G. Bertoldi, C. M. Carmagnola, C. Marty, S. Morin, W. Schöner, et al. 2021. «Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019.» *The Cryosphere*. <https://tc.copernicus.org/articles/15/1343/2021/>.
- Mayorga, E. J, D Renaudeau, B. C Ramirez, J. W Ross, e L. H. Baumgard. 2019. «Heat stress adaptations in pigs.» *Animal Frontiers*. <https://doi.org/10.1093/af/vfy035>.
- Mazzoglio, P., D. Ganora, e P. Claps. 2022. «Long-Term Spatial and Temporal Rainfall Trends over Italy.» *Environ. Sci. Proc.* 20 10. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022021028>.
- Modesti, A., A.Barbabella, C. Cesaretti, M. Ciuffini, G. Dodaro, T. Federico, S. Leoni, et al. 2019. «Relazione sullo stato della green economy 2019.» *Fondazione Sviluppo Sostenibile*. https://www.fondazionevilupposostenibile.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/Relazione-Green-Economy-2019-1.pdf.
- Modina, D. 2023. «Mitigare l'influenza del clima: le soluzioni in vigneto.» *L'Informatore Agrario*. 11. <https://www.informatoreagrario.it/filiere-produttive/vitevino/mitigare-linfluenza-del-cambiamento-climatico-in-vigneto/>.
- Mondal, S., D. Chakraborty, K. Bandyopadhyay, P. Aggarwal, e D. S Rana. 2020. «A global analysis of the impact of zero-tillage on soil physical condition, organic carbon content, and plant root response.» *Land Degradation & Development* 31 (5): 557-567. <https://doi.org/10.1002/ldr.3470>

- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, et al. 2013. «Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.» *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf.
- NASA. 2023. «NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6).» https://www.nccs.nasa.gov/sites/default/files/NEX-GDDP-CMIP6-Tech_Note.pdf.
- Nazioni Unite. 2022. «DROUGHT IN NUMBERS 2022.» *unccd.int*.
<https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-05/Drought%20in%20Numbers.pdf>.
- . 2021. *La COP26 segna il futuro dell'azione per il clima.* 25 10. <https://unric.org/it/la-cop26-segna-il-futuro-dellazione-per-il-clima/>.
- . s.d. «Nationally Determined Contributions (NDCs).» <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs#eq-5>.
- Noguer, M., P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, e C. A. Johnson. 2001. *Climate change 2001: the scientific basis.* Vol. 881. No. 9 Cambridge: Cambridge university press.
- Nunez, S., E. Arets, R. Alkemade, C. Verwer, e R. Leemans. 2019. «Assessing the Impacts of Climate Change on Biodiversity: Is Below 2 °C Enough?» *Climatic Change* 154: 351–65. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02420-x>
- Orlandi, F., J. Rojo, A. Picornell, J. Oteros, R. Pérez-Badia, e M Fornaciari. 2020. «Impact of Climate Change on Olive Crop Production in Italy.» *Atmosphere.*
<https://doi.org/10.3390/atmos11060595> .
- Parlamento Europeo. 2023. «Emissioni di gas serra nell'UE per paese e settore: Infografica.»
https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180301STO98928/20180301STO98928_it.pdf.
- Pasini, Antonello, intervista di Simone Valeri. 2021. *Le prove scientifiche sull'origine antropica dei cambiamenti climatici* L'indipendente, (3 11).
- Pendergrass, A.G., e R. Knutti. 2018. «The Uneven Nature of Daily Precipitation and Its Change.» *Geophysical Research Letters.* <https://doi.org/10.1029/2018GL080298>.
- Poeplau, C., e R. Dechow. 2023. «The legacy of one hundred years of climate change for organic carbon stocks in global agricultural topsoils.» *Scientific Reports* 13 (1): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34753-0>
- Ponti, L., A.P. Gutierrez, P.M. Ruti, e A. Dell'Aquila. 2014. «Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers.» *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 111 (15): 5598-5603. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314437111>.

- Qian, B., X Zhang, K. Chen, Y. Feng, e T. O'Brien. 2010. «Observed Long-Term Trends for Agroclimatic Conditions in Canada.» *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 49: 604–618. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2275.1>
- Qin, R., P. Stamp, e W. Richner. 2004. «Impact of Tillage on Root Systems of Winter Wheat.» *Agronomy Journal*. 96(6): 1523-1530
<https://doi.org/10.2134/agronj2004.1523>.
- Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, e E. Fereres. 2013. «AquaCrop Section 2.21 Input files (Chapter 2 – Users guide).» *FAO*. <https://www.fao.org/3/bc122e/bc122e.pdf>.
- Regione Veneto. 2016. *BUR Regione Veneto*.
https://bur.regione.veneto.it/BurVServices/pubblica/Download.aspx?name=2240_AllegatoB_337069.pdf&type=9&storico=False.
- Reicosky, D. C., e K. E Saxton. 2007. «The benefits of no-tillage.» *No-tillage seeding in conservation agriculture 2*: 11-20.
- Rete Clima. 2018. <https://www.reteclima.it/cause-e-conseguenze-dei-cambiamenti-climatici/>.
—. 2022. *Anticiclone africano: il clima in Italia è cambiato*. 17 06.
<https://www.reteclima.it/anticiclone-africano-il-clima-in-italia-e-cambiato/>.
- Riahi, K., D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B. C. O'Neill, S. Fujimori, N. Bauer, et al. 2017. «The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview.» *Global environmental change*. 42: 153-168
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Riggers, C., C. Poeplau, A. Don, C. Frühauf, e R. Dechow. 2021. «How much carbon input is required to preserve or increase projected soil organic carbon stocks in German croplands under climate change?» *Plant and Soil* 460: 417-433.
<https://doi.org/10.1007/s11104-020-04806-8>
- Ruehlmann, J., e M. Körschens. 2009. «Calculating the effect of soil organic matter concentration on soil bulk density.» *Soil Science Society of America Journal* 73 (3): 876-885. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0149>
- Salinari, F., S. Giosue, F.N. Tubiello, A. Rettori, V. Rossi, F. Spanna, C. Rosenzweig, e M.L. Gullino. 2006. «Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change.» *Glob. Change Biol.* 1299-1307.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01175.x>
- Salman, M., M. García-Vila, E. Fereres, D. Raes, e P Steduto. 2021. «The AquaCrop model – Enhancing crop water productivity. Ten years of development, dissemination and implementation 2009–2019.» *FAO Water Report No. 47*.
<https://doi.org/10.4060/cb7392en>.

- Santini, Davide. s.d. «Il riscaldamento degli ultimi anni in Italia.» *Centrometeo.com*.
<http://www.centrometeo.com/articoli-reportage-approfondimenti/climatologia/5362-riscaldamento-ultimi-anni-italia>.
- Seinfeld, John H. 2007. «Treccani - Enciclopedia della Scienza e della Tecnica.»
https://www.treccani.it/enciclopedia/chimica-dell-atmosfera_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/#:~:text=Si%20ritiene%20che%20inizialmente%20, a%20quella%20 emessa%20dai%20vulcani.
- Sgoifo Rossi, C. A., e R. Compiani. 2017. «Benessere compromesso se c'è stress da caldo.» *Informatore Zootecnico* (Edagricole - Edizioni Agricole) (9): 42-46.
- SNPA. 2023. «Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici.» *snpambiente.it/*. <https://www.snpambiente.it/2023/10/25/consumo-di-suolo-dinamiche-territoriali-e-servizi-ecosistemici-edizione-2023/>.
- . 2023. *Il clima in Italia nel 2022*. 20 07. <https://www.snpambiente.it/2023/07/20/il-clima-in-italia-nel-2022/>.
- . 2023. «Ozono: la situazione nel 2022.» *snpambiente.it*.
<https://www.snpambiente.it/ozono-la-situazione-nel-2022/>.
- Sofia, G., C. Zaccone, e P Tarolli. 2023. «Agricultural drought severity in NE Italy: Variability, bias, and future scenarios.» *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.003>.
- Sommer, C., P. Malz, T. C. Seehaus, S. Lippl, M. Zemp, e M. H. Braun. 2020. «Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century.» *Nature communications*. 11(1): 3209 <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16818-0>
- Spano, D., V. Mereu, V. Bacciu, S Marras, A. Trabucco, M. Adinolfi, G. Barbato, et al. 2020. «Analisi del rischio - I cambiamenti climatici in Italia.» *Fondazione CMCC - Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici*.
https://files.cmcc.it/200916_REPORT_CMCC_RISCHIO_Clima_in_Italia.pdf.
- Statista. 2023. *Global carbon dioxide emissions from 1970 to 2022, by sector*. 18 09.
<https://www.statista.com/statistics/276480/world-carbon-dioxide-emissions-by-sector/>.
- Statuto Consorzio LEB. <https://consorzioleb.it/wp-content/uploads/2020/01/Statuto.pdf>.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, e E. Fereres. 2009. «AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles.» *Agronomy Journal* 101: 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.
- Tamma, P., E. Schaart, e A. Gurzu. 2019. *Politico*. 11 12. Consultato il giorno 11 01, 2023. <https://www.politico.eu/article/the-commissions-green-deal-plan-unveiled/>.

- The IMBIE Team. 2020. «Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018.» *Nature* 579: 233–239.
- Thrasher, B., W. Wang, A. Michaelis, F. Melton, T. Lee, e R. Nemani. 2022. «NASA global daily downscaled projections, CMIP6.» *Scientific data* 9 (1): 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
- Tiessen, H., E. Cuevas, e P. Chacon. 1994. «The role of soil organic matter in sustaining soil fertility.» *Nature* 371: 783–785. <https://doi.org/10.1038/371783a0>
- TMDN. 2023. <https://www.tmdn.org/giview/gi/search>.
- Tomasi, D., G. V. Jones, M. Giust, L. Lovat, e F. Gaiotti. 2011. «Grapevine Phenology and Climate Change: Relationships and Trends in the Veneto Region of Italy for 1964–2009.» *AJEV*. 62(3): 329-339 <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.10108>.
- Trigila, A., C. Iadanza, B. Lastoria, M. Bussettini, e A. Barbano. 2021. «Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2021.» *ISPRA*. https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/rapporto_dissesto_idrogeologico_italia_ispra_356_2021_finale_web.pdf.
- U.S. Global Change Research Program. 2017. «Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I.» 399. <https://www.nrc.gov/docs/ML1900/ML19008A410.pdf>.
- VandenBygaart, A. J., E. G. Gregorich, e D. A. Angers. 2003. «Influence of agricultural management on soil organic carbon: A compendium and assessment of Canadian studies.» *Canadian Journal of Soil Science*, 83 (4): 363-380. <https://doi.org/10.4141/S03-009>
- Zahnle, K., L. Schaefer, e B. Fegley. 2010. «Earth's Earliest Atmospheres.» *Cold Spring Harbor - Perspective in Biology*. 2(10): a004895 <https://cshperspectives.cshlp.org/content/2/10/a004895.full>.
- Zanchettin, D., S. Bruni, F. Raicich, P. Lionello, F. Adloff, A. Androsov, F. Antonioli, et al. 2021. «Sea-level rise in Venice: historic and future trends (review article).» *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* <https://nhess.copernicus.org/articles/21/2643/2021/>.
- Zanchini, E., e M. Manigrasso. 2017. *VISTA MARE. La trasformazione dei paesaggi costieri italiani*. Milano: Edizioni Ambiente.
- Zotarelli, L., M.D Dukes, C. C. Romero, K. W. Migliaccio, e K. T. Morgan. 2010. «Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)1.» *Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida*. https://www.agraria.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1462_2016_412_24509.pdf.

Ringraziamenti

Desidero esprimere il mio sincero ringraziamento al Prof. Paolo Tarolli e alla Dott.ssa Giulia Sofia per la preziosa disponibilità e per il supporto durante la stesura di questa tesi.

Un caloroso grazie va alla mia famiglia per il sostegno durante il mio percorso universitario. L'incoraggiamento che mi è stato offerto è stato di importanza fondamentale per raggiungere questo traguardo.

Ai miei amici e ai compagni di corso, desidero esprimere la mia gratitudine per aver condiviso con me momenti indimenticabili durante questi anni.

Dedico questa tesi ai miei cari nipotini Giacomo, Leonardo, Emma, Edoardo ed Eleonora e a tutti coloro che attraverso la ricerca o mediante gesti apparentemente semplici, si impegnano nella costruzione di un futuro migliore per le generazioni future.