

ALLEGATO 2

Rapporto sugli indici e le proiezioni climatiche per la rappresentazione dei cambiamenti climatici attesi

*Supporto alla pianificazione regionale
in ambito PREAC*

ARPA Lombardia

30.11.2021

Rapporto sugli indici e le proiezioni climatiche per la rappresentazione dei cambiamenti climatici attesi

INFORMAZIONI SUL DOCUMENTO

Nome Documento	Rapporto sugli indici e le proiezioni climatiche per la rappresentazione dei cambiamenti climatici attesi
Nome File	PRS-2.1-2.2_Documento conclusivo
Versione	1.3
Data	30.11.2021

Versione	Data	Commenti
1.0	20.10.2021	Mauro Mussin - stesura iniziale
1.1	08.11.2021	Mario Piuri, Gabriele Greco - ampliamento stesura
1.2	19.11.2021	Matteo Zanetti – inserimento parte A; Mauro Mussin – ampliamento parte B e Messaggi chiave; Mario Piuri – ampliamento parte B
1.3	30.11.2021	Revisione finale - Mauro Mussin – Orietta Cazzuli

Sommario

Messaggi chiave.....	3
A. Lo stato attuale del clima in Lombardia	3
B. Futuri climatici possibili	3
C. Cambiamento climatico e valutazione del rischio.....	3
Inquadramento del contesto.....	4
Articolazione delle fasi di lavoro	4
Definizione degli indicatori.....	5
Confronto con il Gruppo di Lavoro sul PREAC.....	5
A. Lo stato attuale del clima in Lombardia	7
Temperature medie.....	7
Notti tropicali.....	9
Giorni estivi.....	10
Giorni di gelo	11
Precipitazioni	12
R20 – Giorni di pioggia intensa.....	13
Clima e impatto sui consumi energetici	15
B. Futuri climatici possibili	17
Temperatura.....	18
Precipitazione	21
Radiazione Solare	23
Vento	25

C. Cambiamento climatico e valutazione del rischio.....	26
Indici climatici per la valutazione dell'impatto (hazard)	26
Temperatura.....	29
Precipitazione	32
Radiazione Solare	35
Vento	37
Scenari di impatto: IPCC AR6.....	37
Scenari di impatto: Impact2C	43
Scenari di impatto: Peseta IV.....	45
Appendice.....	49
Scelta dei modelli GCM e RCM	49
Implementazione dell'ecosistema di calcolo.....	50
Definizioni degli indici di cambiamento climatico.....	51

Approfondimento Tecnico

Messaggi chiave

A. Lo stato attuale del clima in Lombardia

- **Le temperature medie annue** sono progressivamente aumentate in tutte le stazioni di monitoraggio del clima con un incremento medio di 0,5°C ogni 10 anni;
- **Gli indici climatici** relativi alle notti tropicali (TR), giorni estivi (SU) e giorni di gelo (FD) mostrano andamenti uniformi coerenti con un complessivo riscaldamento del clima e una differenza pianura-montagna (maggior riscaldamento invernale in montagna, maggior riscaldamento estivo in pianura);
- **Le precipitazioni** non mostrano una chiara tendenza, né lo fanno **gli indici climatici** relativi alle precipitazioni intense (R20).

B. Futuri climatici possibili

- **la temperatura** nel periodo vicino (2021-2040) **aumenta** di almeno 1°C in entrambi gli scenari RCP4.5 e RCP8.5, interessando di più le aree montane rispetto a quelle di pianura. L'incremento arriva fino a 2-3°C nel periodo medio (2041-2060), con estremi più significativi nelle aree alpine e prealpine di SO, BG e BS; la tendenza è chiara in tutti i modelli considerati.
- **la precipitazione diminuisce** prevalentemente nelle aree della pianura occidentale e nel periodo estivo, mentre **aumenta** sia nei valori assoluti sia relativamente alla coda della distribuzione in montagna, soprattutto nel medio periodo (2041-2060) e nello scenario RCP 8.5 (+ 40%). Inoltre, si riscontra un segnale di spostamento della distribuzione statistica delle precipitazioni verso valori più elevati, soprattutto in inverno (DGF).
- **L'insolazione mostra variazioni deboli**. Per quanto riguarda l'intensità del flusso radiativo a corta lunghezza d'onda, l'aumento nei periodi di proiezione è compreso tra il 2% ed il 5%, con picchi previsti nella zona centrale del territorio regionale. In termini di durata giornaliera dell'insolazione, si rileva un incremento medio, soprattutto nelle stagioni estiva ed autunnale dell'ordine di 10-20 minuti.
- La **velocità del vento mostra deboli variazioni** in termini assoluti (1-2 m/s di media giornaliera), mentre la velocità media si mantiene complessivamente sotto la soglia dei 10 m/s.

C. Cambiamento climatico e valutazione del rischio

- L'aumento di temperatura è causa della **diminuzione del fabbisogno di riscaldamento**, più nella parte montana rispetto a quella di pianura (in rapporto circa 2:1), in modo molto significativo nello scenario RCP8.5 (-500 gradi giorno) per il medio termine (2041-2060).
- Per contro, **l'aumento del fabbisogno di raffrescamento** influisce in modo maggiore nelle aree di pianura rispetto a quelle di montagna, con un buon accordo tra scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 nel periodo vicino (2021-2040); gli scenari si differenziano in modo molto accentuato per il periodo medio (2041-2060), per quanto riguarda la pianura, con un raddoppio del fabbisogno di raffrescamento (da circa 100 a 200 gradi giorno di raffrescamento); circa la metà di questo incremento è dovuta al solo mese di luglio. Questo comporterà un sensibile aumento dei giorni di raffrescamento (+22 al 2060)
- **Le precipitazioni intense** assumono un carattere fortemente differenziato in base allo scenario considerato e alla zona di interesse: lo scenario RCP4.5 mostra una anomalia negativa (più asciutto) nella parte occidentale della regione (ma non sull'intero bacino del Ticino), mentre lo scenario RCP 8.5 mostra un aumento dei giorni con precipitazione intensa soprattutto nel periodo medio (2041-2060).
- **L'efficienza produttiva degli impianti fotovoltaici**, valutata tramite lo specifico indice PVpot, **si conferma sostanzialmente inalterata**, con un lieve incremento del 1-3% previsto dallo scenario RCP 4.5 nel periodo vicino e mantenuto nel medio periodo, tende a svanire nella proiezione a medio termine nello scenario RCP8.5.

Inquadramento del contesto

L'obiettivo di ARPA Lombardia definito nella DGR 4247 del 01.02.2021 comprende le attività di Supporto alla Programmazione e Pianificazione regionale per la sostenibilità e l'ambiente declinate in:

PUNTO 2: individuazione di un set di indicatori climatici e di impatto per la nuova programmazione PREAC da realizzare entro novembre (leader: UO Servizio IdroMeteoNivo e Clima Regionale)

PUNTO 3: individuazione delle proiezioni climatiche dei parametri e degli indicatori da utilizzare per la costruzione di scenari di impatto sul sistema energetico regionale da realizzare entro dicembre (leader: UO Tematiche Emergenti)

Il presente documento costituisce il rapporto conclusivo sull'attività svolta e sui risultati ottenuti.

Le conclusioni più significative sono state riassunte nel capitolo Messaggi chiave, mentre nel resto del documento sono riportate in modo più dettagliato e argomentato; infine, in uno specifico Allegato tecnico sono riportate tutte le elaborazioni condotte e ulteriori informazioni di carattere specialistico.

Articolazione delle fasi di lavoro

Il programma di lavoro condiviso con Regione Lombardia ha previsto le seguenti fasi:

Fase 0: identificazione e successivo popolamento degli indicatori climatici e di impatto: sono stati identificati come significativi gli indici già contenuti nel documento di indirizzi del PREAC (Delibera del Consiglio regionale 1445 del 24 novembre 2020);

Fase 1: identificazione del dataset CMCC ed "Ensemble CORDEX" per la costruzione degli indicatori attesi: sono stati identificati 4 modelli (intesi come combinazione di General Circulation Model e Regional Circulation Model) oltre a quello COSMO messo a disposizione dal CMCC;

Fase 2: calcolo del "bias" sulla base dei dataset storici disponibili (ERA5, OI ARPA) per il periodo climatico di riferimento (proposta: 1981-2000 e 2001-2020); tale fase è stata successivamente integrata nell'elaborazione della Fase 3 dal momento che sono stati reperiti i dati relativi alle applicazioni modellistiche già "bias-adjusted". I periodi climatici scelti sono stati 1986-2005 (riferimento), 2021-2040 (periodo vicino) e 2041-2060 (medio periodo) per rispecchiare le scelte del AR6 IPCC e le sue conclusioni, oltre a individuare tali periodi climatici come significativi per il PREAC stesso (con obiettivi al 2030 e al 2050) dopo un incontro informale tenutosi a luglio 2021 con il gruppo incaricato della produzione della documentazione per la VAS.

Fase 3: identificazione dello/degli scenario/i IPCC di riferimento (es. RCP 4.5) e degli indicatori di impatto climatico (definiti nel precedente paragrafo) nei periodi climatici futuri di interesse, da definire congiuntamente con RL: sono stati identificati gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 corrispondenti agli SSP2 (medio impegno) e SSP5 (sviluppo con fonti fossili)¹;

Fase 4: rappresentazione degli indicatori e della loro variabilità (*probability density function, PDF*) per CMCC ed Ensemble CORDEX; discussione dei risultati: i risultati sono stati illustrati in via preliminare in un incontro c/o Regione Lombardia in data 22.11.2021.

¹ Per una definizione esaustiva dei Shared Socioeconomic Pathways (SSP) si veda il paragrafo Scenari di impatto: IPCC AR6

Fase	Mese									
	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Fase 0										
Fase 1										
Fase 2										
Fase 3					Revisione					
Fase 4										Revisione Discussioni

Tabella 1: diagramma di Gantt del lavoro

Definizione degli indicatori

Come sopra menzionato, per la Fase 2 (calcolo del bias) si è valutato di utilizzare i dati resi disponibili da CORDEX che presentano già per la temperatura la correzione del bias con le osservazioni E-OBS² ver. 10: tali osservazioni non contengono ancora le misure della rete di monitoraggio di ARPA (presenti dalla versione 18 in poi di E-OBS) ma rappresentano comunque una significativa elaborazione dell'area di interesse, in particolare quella alpina (versante nord).

I dati delle proiezioni climatiche sono stati scaricati direttamente da ESGF³ e sono stati archiviati localmente in una struttura dati dedicata e accessibile; per ogni modello identificato e per ogni ECV⁴ si sono create le directory dei due scenari IPCC di riferimento (RCP4.5 e RCP8.5) dove sono stati conservati i file in formato NETCDF4 contenenti i dati di una mappa 0,11°x0,11° con griglia regolare ricampionata con il software CDO⁵ in modo bilineare partendo dal punto di coordinate 44,65°N 7,84°E con estensione di 34x19 (long,lat) celle. Tale griglia comprende l'intera Lombardia e il bacino idrografico del Ticino, che riveste una particolare importanza per la valutazione della siccità e della piovosità.

Confronto con il Gruppo di Lavoro sul PREAC

In data 21.07 si è proposto un incontro informale con il gruppo del Politecnico (Fondazione Politecnico) che sta elaborando gli scenari energetici per il PREAC in collaborazione con ARIA.

All'incontro erano presenti rappresentanti del gruppo Energy & Strategy, guidati da Antonio Lobosco, di ARIA e di ARPA con l'intenzione di inquadrare gli indici climatici utilizzabili nella successiva valutazione degli aspetti energetici, sia in termini di contesto (come il cambiamento climatico impatta sulla richiesta di energia) sia in termini di produzione (come il cambiamento climatico impatta sulla produzione di energia).

A tale scopo la discussione si è concretizzata sui seguenti punti:

1. La scelta dei periodi di riferimento: si è valutato di scegliere un periodo storico recente dove fosse possibile disporre di dati energetici significativi (1986-2005) e di due periodi futuri che scavallassero il breve termine 2030 (2021-2040) e il medio termine 2050 (2041-2060); tali periodi climatici corrispondono alle più recenti elaborazioni disponibili in ambito IPCC-CMIP6 e consentono quindi un facile confronto.
2. Le variabili climatiche essenziali (ECV): si è valutato di considerare la temperatura a 2 metri dal suolo (*tas*), la precipitazione (*pr*), la velocità del vento a 2 metri dal suolo (*sfcWind*) e un indice sintetico che rappresentasse il potenziale di produzione delle fonti fotovoltaiche ("potenziale fotovoltaico")

² <https://www.ecad.eu/download/ensembles/ensembles.php>

³ <https://esgf.llnl.gov/>, nodo utilizzato: DKRZ ESGF-CoG Node

⁴ Essential climate variables (es. temperature, precipitazione, ecc.)

⁵ Climate data operator, programma che raccoglie numerosi operatori per per il calcolo e la manipolazione di dati climatici e di modelli di simulazione climatica.

tramite una combinazione delle variabili di intensità di radiazione solare, temperatura e vento, ricavata dalla letteratura scientifica di settore;

3. Aspetti legati alle biomasse: si è suggerito di prendere in considerazione un indice che rappresentasse la disponibilità di biomassa legnosa, cosa di interesse per la valutazione della resilienza delle filiere in ambito alpino e sub-alpino; un successivo approfondimento bibliografico non ha consentito di individuare indici specifici e si è quindi scelto di utilizzare il GSL – Growing Season Length che in qualche misura tiene conto della possibilità dello sviluppo vegetativo nell’ambito degli indici climatici ECA&D⁶.

In esito all’incontro si sono quindi definiti i periodi di riferimento e gli indici da calcolare.

⁶ European Climate Assessment & Database Project, KNMI

A. Lo stato attuale del clima in Lombardia

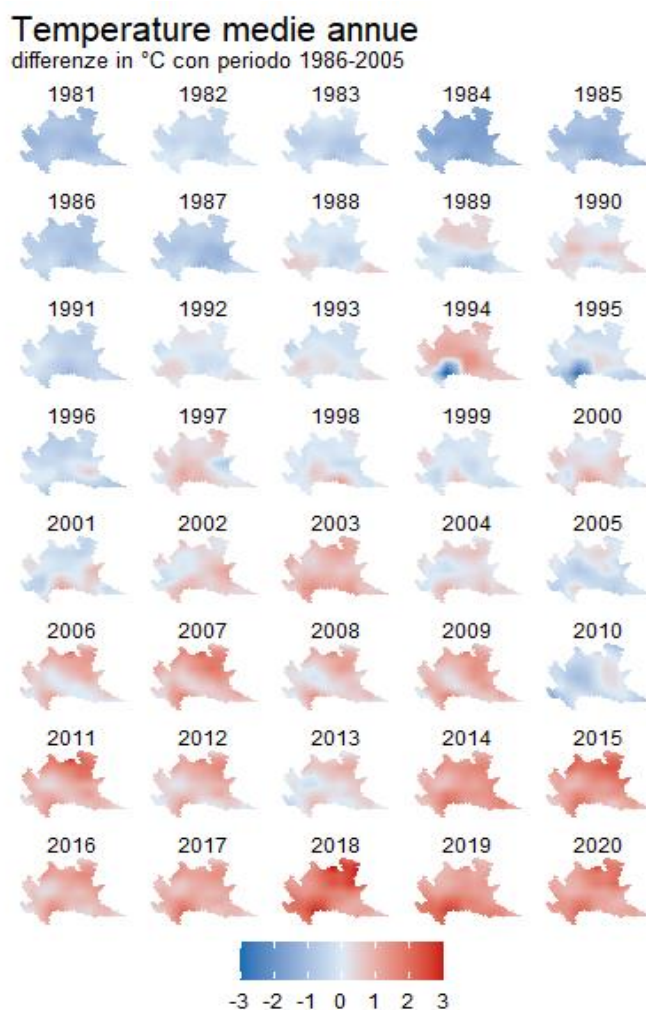
Il presente capitolo ha l'obiettivo di definire gli aspetti principali del cambiamento climatico in Lombardia negli ultimi decenni. Tutti i dati che verranno presentati provengono dalla rete di stazioni meteorologiche di Arpa Lombardia, i quali confluiscono inoltre in datasets più grandi per una copertura territoriale nazionale ed europea. È questo il caso del dataset E-OBS, utilizzato in questo lavoro per la produzione delle mappe interpolate di temperatura e precipitazione.

Riguardo gli indicatori climatici proposti, si è proceduto utilizzando i dataset di Arpa Lombardia concernenti 13 stazioni meteorologiche di valore storico, con almeno 30 anni di dati (dal 1991) e che avessero una buona rappresentatività all'interno del territorio regionale.

Temperature medie

In questo paragrafo sono riportati i valori medi di temperatura ottenuti da interpolazioni a partire da dati misurati su tutta la regione. Lo scopo è quello di individuare una possibile tendenza di lungo periodo nel corso degli ultimi decenni.

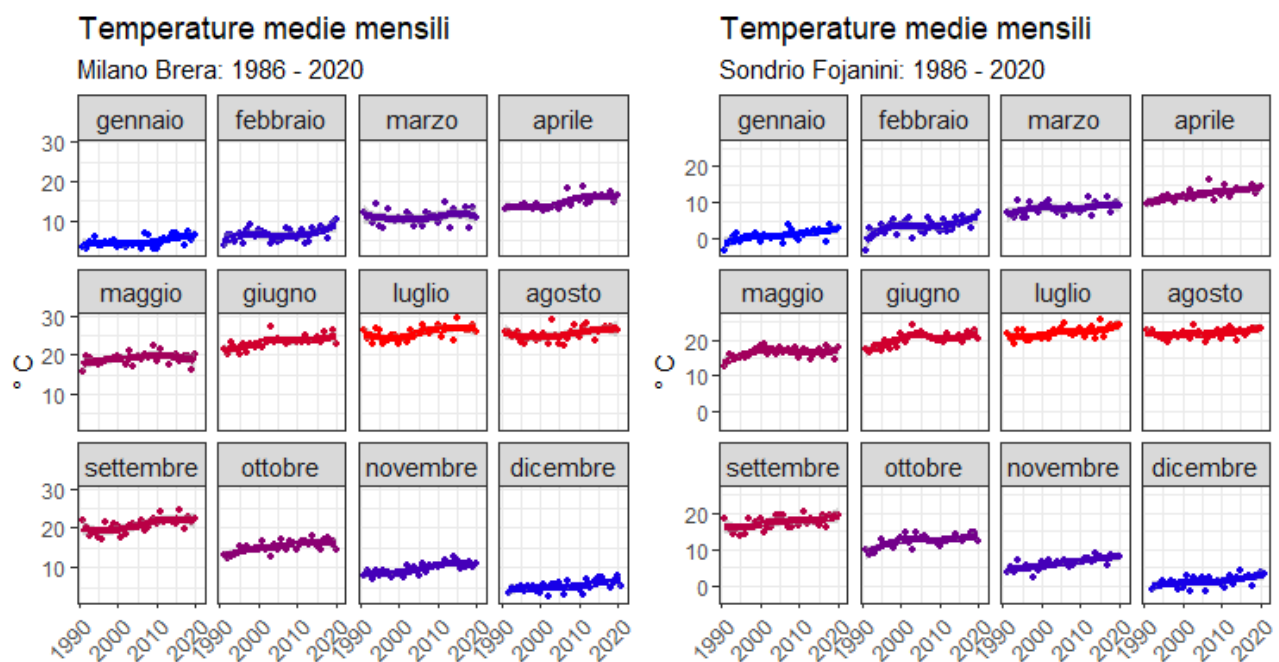
Si graficano di seguito le temperature medie annue su tutta la regione per il periodo 1981-2020, riportate in termini di differenza con la media del periodo 1986-2005.



1 Le interpolazioni sono ottenute a partire dal Dataset E-OBS e da una risoluzione nativa di 0.25°. Post elaborazioni consentono di ridurre il passo di griglia e calcolare le differenze di ogni anno rispetto al periodo medio di riferimento 1986-2005.

La visualizzazione come successione di anni, insieme con il cambiamento delle gradazioni di colore da valori di differenza negativi a positivi, aiutano ad individuare la tendenza al progressivo riscaldamento in atto. Più nel dettaglio, il 2010 risulta essere l'ultimo anno con differenze complessivamente negative, mentre il 2018 è ad oggi l'anno con la differenza media positiva più elevata dell'intero periodo di rilevazione. La tendenza lineare di aumento media sulla regione è di **circa +0.5 °C/10 anni**.

In un contesto di generale aumento delle temperature medie annue, si approfondisce la questione riducendo a risoluzione temporale mensile le rilevazioni per il periodo 1986-2020 su due città lombarde, scelte appositamente per rappresentare il clima della pianura (Milano) e il clima delle valli alpine (Sondrio).



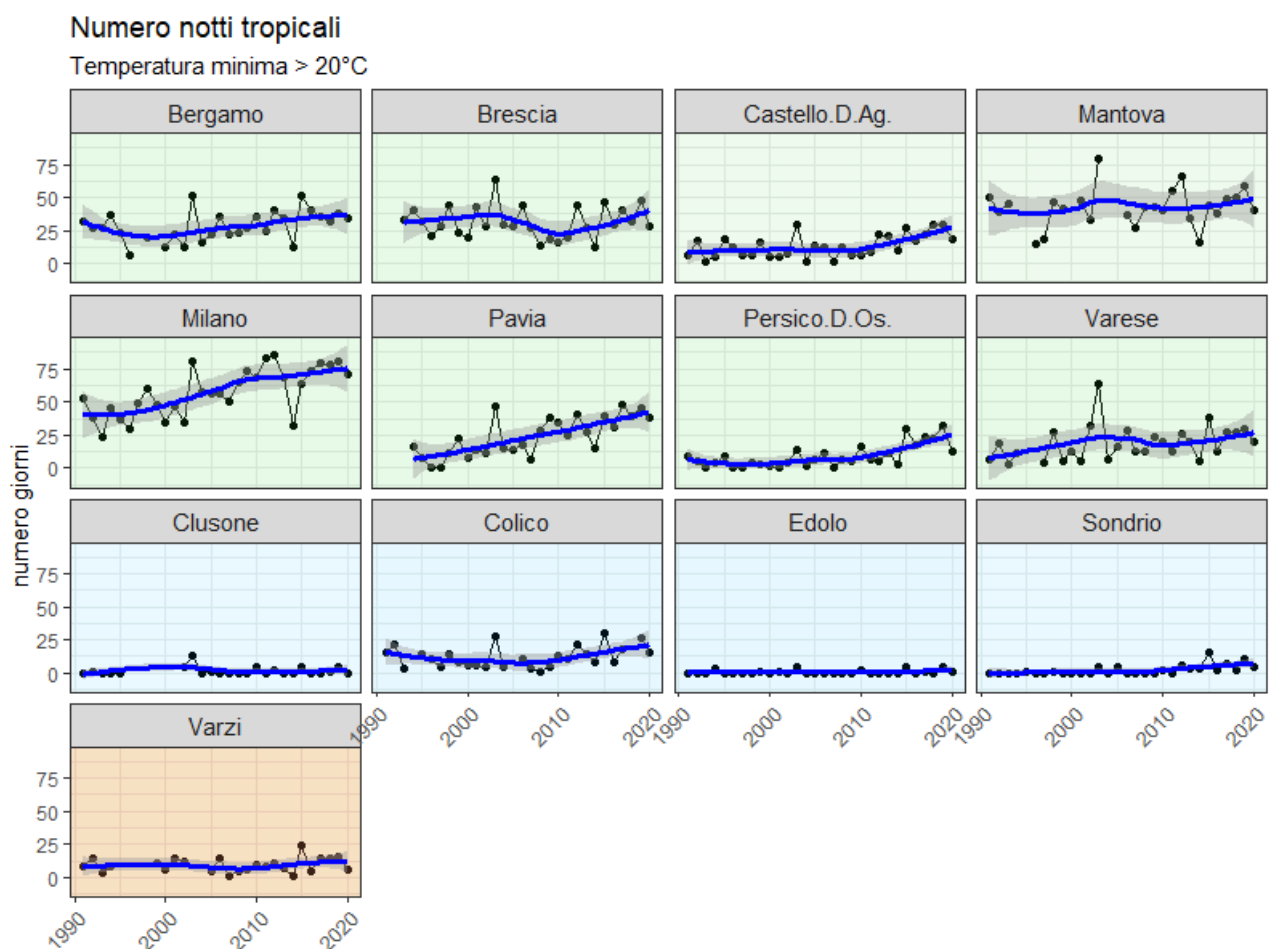
2 Temperature medie mensili dal 1991 per Milano e Sondrio. La media mensile è calcolata a partire da rilevazioni di temperatura minima e massima giornaliera provenienti da stazioni meteorologiche in loco, sulla base di dati medi orari.

Da una veloce analisi è possibile apprezzare come alcuni mesi abbiano una maggiore tendenza all'aumento rispetto ad altri. Ad esempio, sono ben evidenti gli aumenti negli ultimi anni per quando riguarda i mesi invernali, specie febbraio per Milano e gennaio per Sondrio, ma tendenze di aumento per entrambe le località sono inoltre ben visibili per aprile e giugno. Tra i mesi che invece evidenziano una maggiore variabilità, quindi una stazionarietà nella tendenza di lungo termine, ci sono maggio per Milano e agosto per Sondrio.

Con i successivi paragrafi vengono analizzati alcuni dei più utili e semplici indicatori climatici basati su rilevazioni di temperatura minima e massima giornaliera. Gli indicatori sono calcolati sulla base dei dataset delle 13 stazioni lombarde già menzionate, che hanno quindi al loro interno un periodo di dati almeno trentennale (dal 1991), ossia abbastanza lungo da poter rilevare una tendenza di lungo periodo.

Notti tropicali

Il numero di notti tropicali rientra nella categoria di indicatori climatici orientati al conteggio del numero annuale di superamenti di una determinata soglia. Nel caso in questione viene fissata una soglia di temperatura minima giornaliera di 20 °C, al fine di caratterizzare severità e lunghezza della stagione estiva dell'anno per cui l'indicatore è calcolato. La visualizzazione della tendenza temporale dello stesso permette di valutare eventuali variazioni di lungo periodo che possono emergere dalla normale variabilità interannuale.



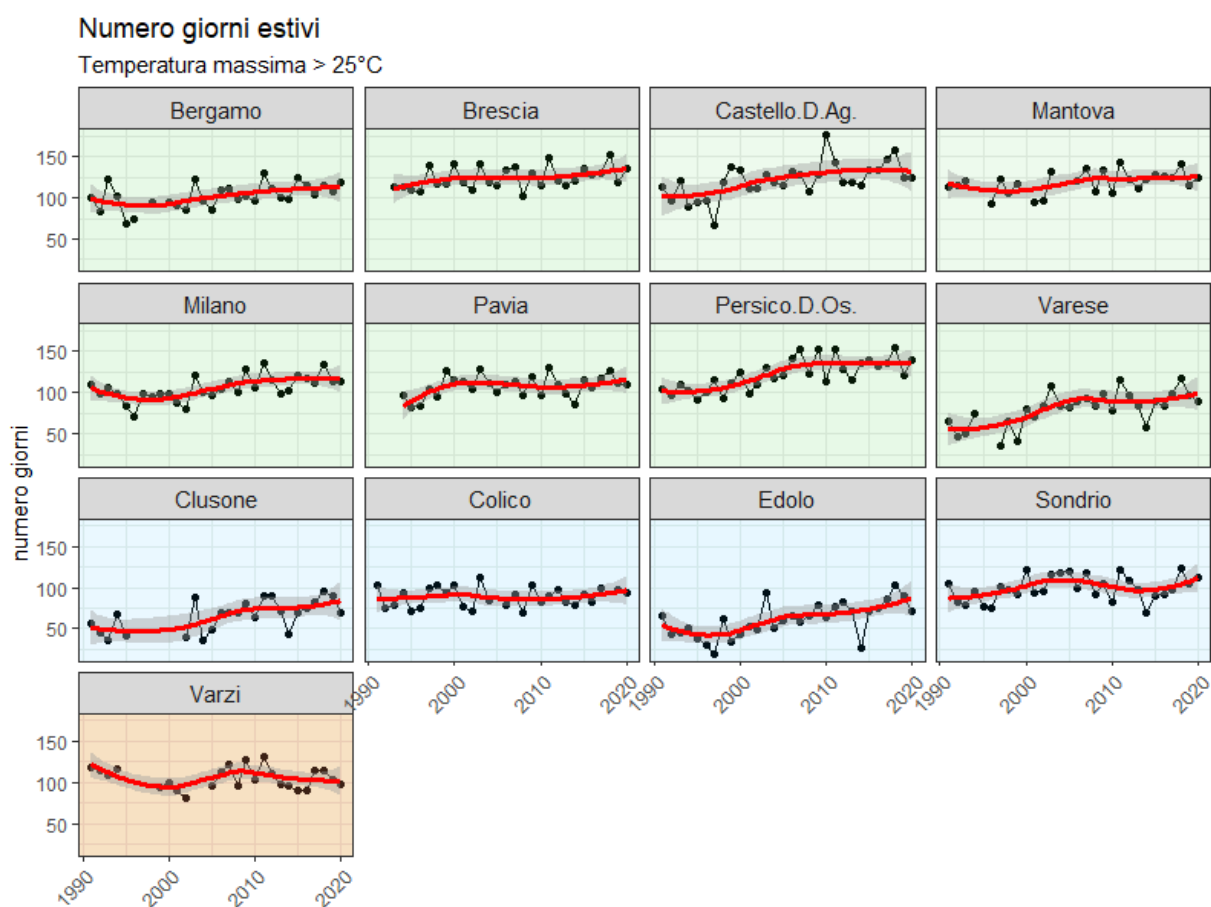
3 Numero di notti tropicali. Dati provenienti da rilevazioni di temperatura minima giornaliera.
Con sfondo verde le stazioni di pianura, in azzurro quelle alpine e in giallo le appenniniche.

Dai grafici delle stazioni prese in esame risulta evidente una tendenza all'aumento del numero di notti tropicali su tutte le località di pianura, mentre in numero assoluto spiccano i dati di Milano, dove negli ultimi anni il centro città ha fatto registrare frequentemente oltre 70 superamenti, in molti casi dovuti al determinante contributo dell'isola di calore urbana. Come considerazione generale, la temperatura minima giornaliera risulta molto influenzata dal contesto ambientale in cui viene misurata, e si differenzia molto nel caso la stessa venga rilevata in ambito urbano o rurale. Diversi i risultati in senso assoluto, per ovvi motivi, delle località poste tra le vallate alpine e prealpine; anche in queste aree, tuttavia, si evidenzia una tendenza

positiva dell'indicatore, che passa da valori prossimi allo zero degli anni '90 a pochi ma significativi giorni con temperatura minima giornaliera non inferiore a 20 °C (Es. Sondrio).

Giorni estivi

Il numero di giorni estivi viene ottenuto valutando il superamento di soglia di temperatura massima giornaliera posto a 25 °C. L'indicatore caratterizza la lunghezza della stagione estiva dell'anno per cui è calcolato e non necessariamente la sua severità. Si propone anche in questo caso la visualizzazione di lungo periodo per l'individuazione di una tendenza derivante dal cambiamento climatico in corso.

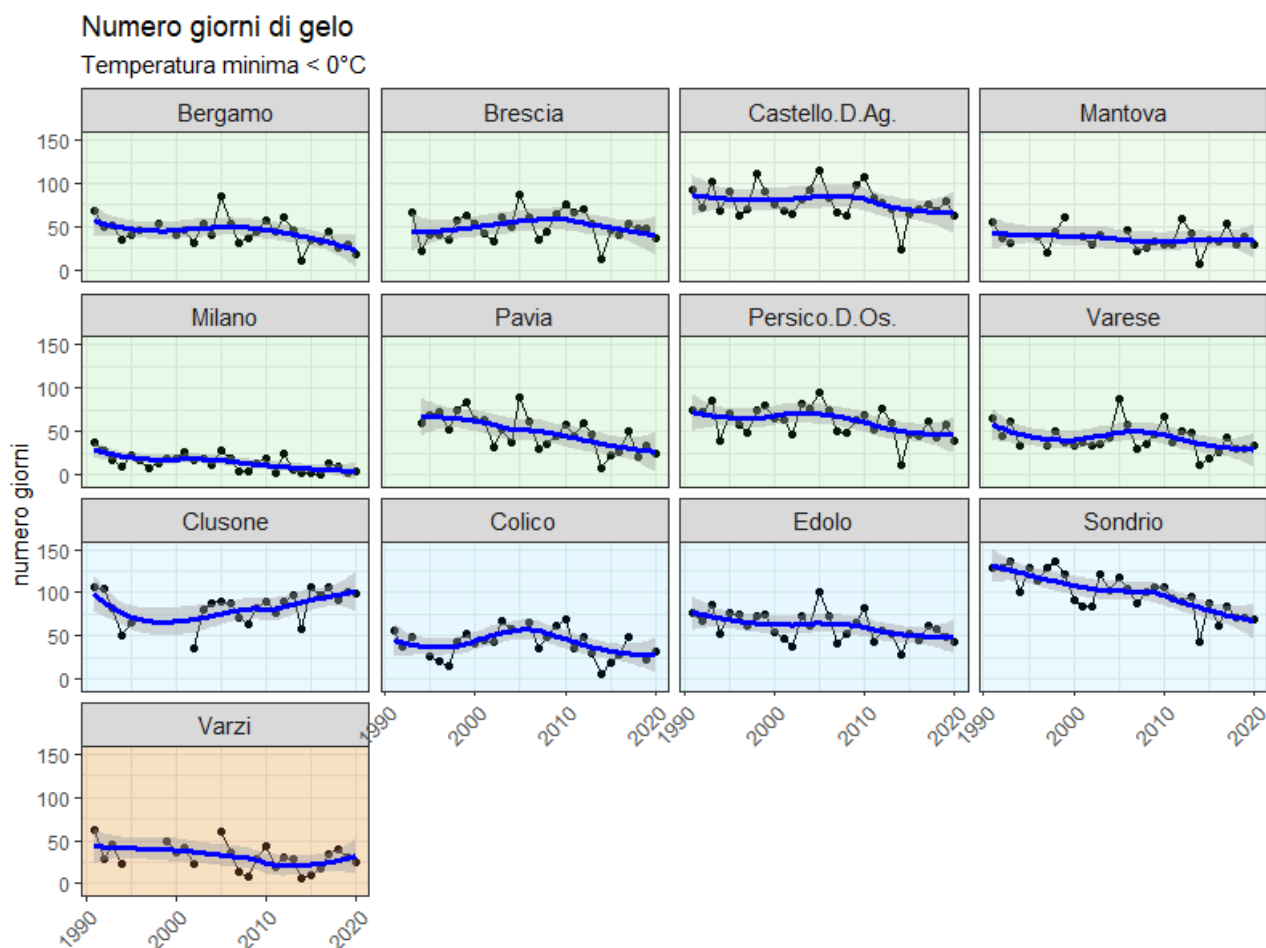


4 Numero di giorni estivi. Dati provenienti da rilevazioni di temperatura massima giornaliera.
Con sfondo verde le stazioni di pianura, in azzurro quelle alpine e in giallo le appenniniche.

I risultati per le località prese in esame evidenziano una generale tendenza di aumento dell'indicatore, con numeri in assoluto più elevati nelle località di bassa pianura come Mantova, Castello D'Agogna (PV) e Persico D'Ossola (CR), che registrano mediamente oltre 130 giorni estivi. Valori più bassi per le stazioni poste in quota come Edolo e Clusone, che tuttavia evidenziano un indicatore con rialzo più sensibile rispetto alle località di pianura: si passa infatti da un valore medio di circa 50 giorni estivi negli anni '90 a oltre 70-80 giorni estivi nell'ultimo decennio.

Giorni di gelo

L'indicatore viene calcolato conteggiando il numero di giorni con temperatura minima inferiore a 0 °C, ed è utilizzato principalmente per la valutazione della lunghezza della stagione invernale dell'anno per cui è calcolato. Ha utili implicazioni riguardo pianificazioni o analisi di attività agricole e/o sportive.



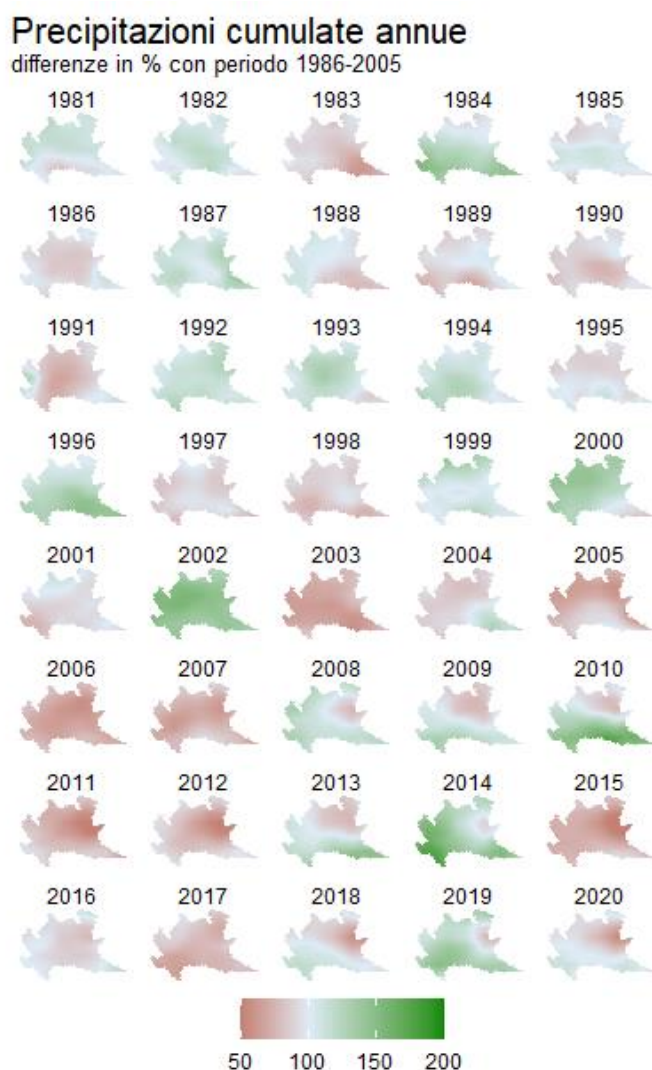
5 Numero di giorni di gelo. Dati provenienti da rilevazioni di temperatura minima giornaliera.
Con sfondo verde le stazioni di pianura, in azzurro quelle alpine e in giallo le appenniniche.

Il cambiamento climatico in corso porta ad un generale aumento delle temperature minime, e sono quindi evidenti le motivazioni che portano tutte le località scelte ad avere una tendenza di generale diminuzione dell'indicatore. Se per le località di pianura la tendenza alla diminuzione è più lieve, dato che temperature sottozero sono frutto spesso di situazioni di alta pressione e inversione termica, per quelle posizionate in quota o nelle valli alpine il calo risulta più netto; si vedano per esempio i dati di Sondrio, passata dall'aver oltre 100 giorni di gelo negli anni '90 a circa 70-80 giorni di gelo nell'ultimo decennio. Significativo il calo di Milano (sui valori assoluti incide molto l'isola di calore urbana), che ha ormai ridotto i propri giorni di gelo a meno di 10 ogni anno.⁷

⁷ I dati di Clusone (BG), in controtendenza rispetto alle altre località, sono fortemente influenzati da un cambiamento di sito del termigrometro dopo il 2010.

Precipitazioni

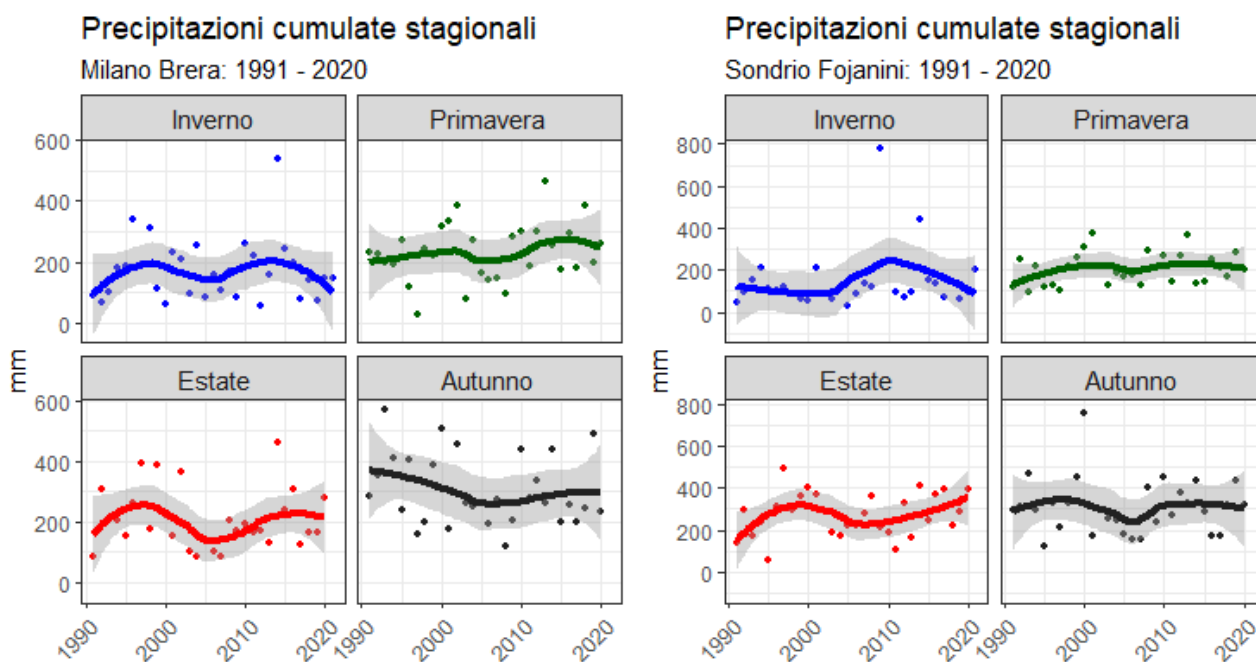
Sulla stessa linea grafica già utilizzata per le temperature, si riportano di seguito alcune elaborazioni per le precipitazioni cumulate. Nel grafico di seguito, vengono evidenziate le differenze in percentuale tra la pioggia cumulata annua dell'anno che si vuole prendere in considerazione e la cumulata media del periodo 1986-2005.



6 Le interpolazioni sono ottenute a partire dal Dataset E-OBS e da una risoluzione nativa di 0.25°. Post elaborazioni consentono di ridurre il passo di griglia e calcolare le differenze di ogni anno rispetto al periodo medio di riferimento 1986-2005.

A differenza di quanto emerso con l'elaborazione sulle temperature medie annue, nel caso delle precipitazioni risulta più complicato individuare una chiara tendenza; è molto ben visibile, infatti, un'importante variabilità di anno in anno, sebbene prevalgano a partire dal 2003 gli anni con percentuali inferiori rispetto alla media (< 100%). Tra gli anni sicuramente più anomali ritroviamo, in termini di scarsità di precipitazioni, il 2015, mentre l'anno precedente era risultato ben più piovoso rispetto al valore medio.

Tuttavia, la precipitazione cumulata annua può nascondere numerosi aspetti interessanti se andiamo ad analizzare le cumulate delle singole stagioni.



7 Precipitazioni cumulate stagionali dal 1991 per Milano e Sondrio. La cumulata mensile è calcolata a partire da rilevazioni di pioggia cumulata giornaliera provenienti da stazioni meteorologiche in loco.

Prendiamo ad esempio le stesse località già analizzate per le temperature, Milano e Sondrio. Il dato più evidente in entrambe le città è la tendenza alla diminuzione delle cumulate stagionali invernali, specie dal 2010. La primavera e l'autunno, oltre ad una importante variabilità interannuale, non mostrano una tendenza chiara, mentre è interessante notare la crescita per Sondrio nei mesi estivi, probabilmente dovuta ad un incremento dell'attività temporalesca.

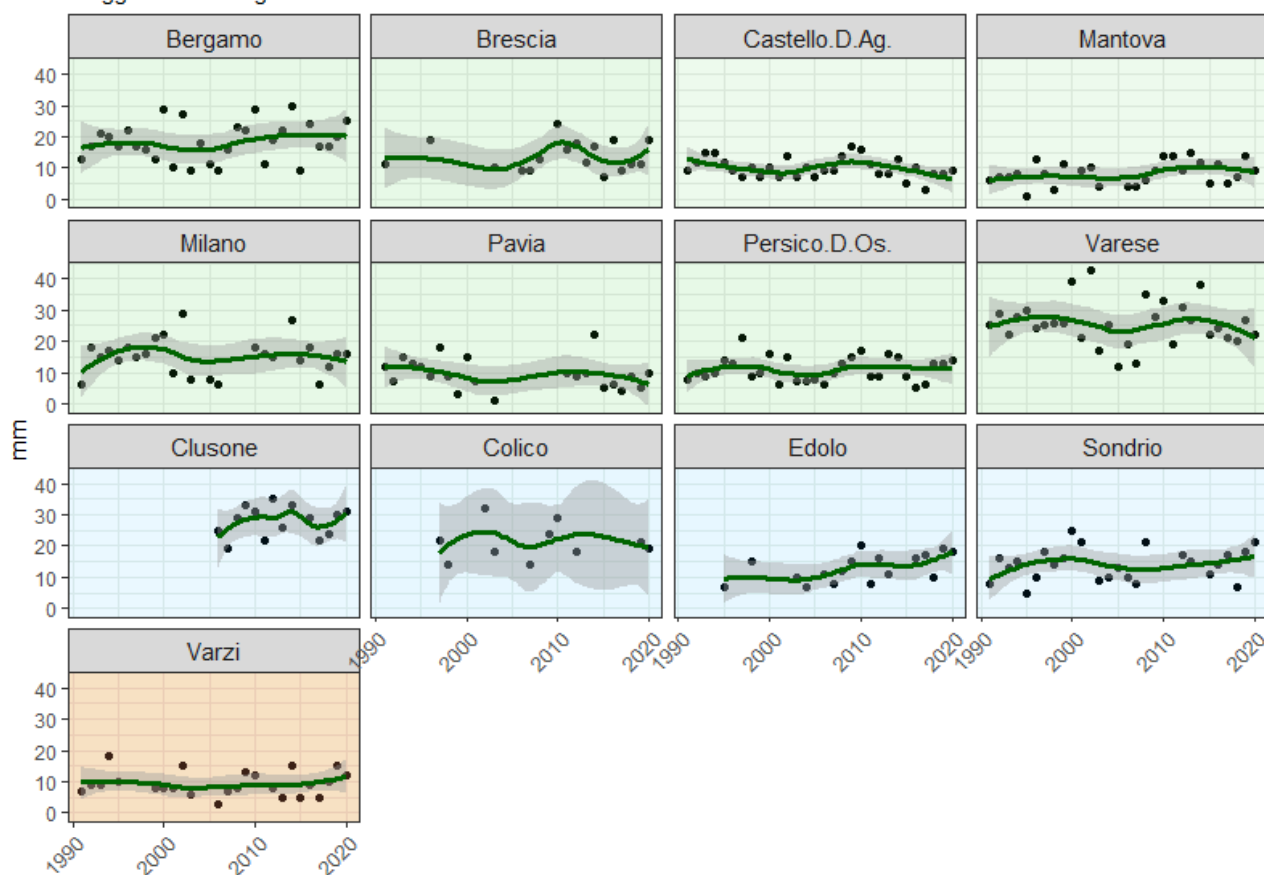
R20 – Giorni di pioggia intensa

Restando in tema di precipitazioni, viene qui presentato un indicatore utile all'individuazione di una possibile tendenza riguardo gli eventi di pioggia intensa, raccolti annualmente come numero di giorni in cui la cumulata giornaliera ha superato i 20 mm.

Le evidenze più significative riguardano le località di montagna, tra le quali spiccano Edolo e Sondrio con una tendenza in lento ma progressivo aumento. Tra le località di pianura la tendenza è stazionaria, eccetto Castello D'Agogna (PV) che segnala una diminuzione. In termini di valori assoluti le località con il più alto numero di giorni con pioggia intensa risultano essere Bergamo e Varese, dove incidono in maniera più significativa gli eventi temporaleschi.

Numero giorni di pioggia intensa

Pioggia cumulata giornaliera > 20 mm

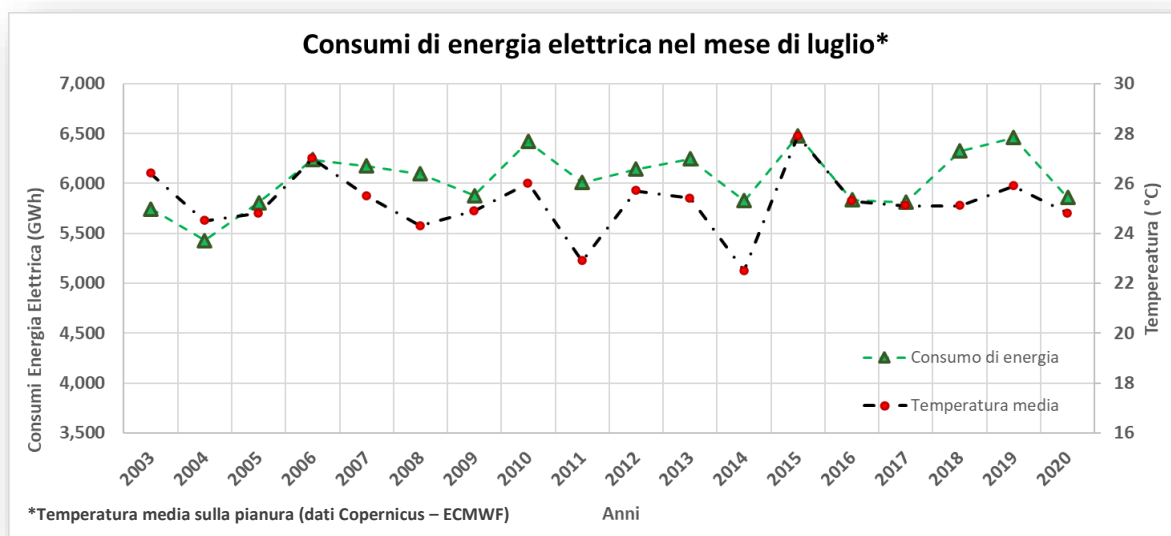


8 Numero di giorni di pioggia intensa. Dati provenienti da rilevazioni di precipitazione cumulata giornaliera. Con sfondo verde le stazioni di pianura, in azzurro quelle alpine e in giallo le appenniniche.

Clima e impatto sui consumi energetici

I cambiamenti del clima incidono inevitabilmente sulle abitudini e sui fabbisogni dei cittadini. Le variazioni di temperatura interannuali determinano un minor o un maggior utilizzo delle risorse energetiche, con particolare riferimento al comfort e al benessere del settore residenziale. Più nel dettaglio, è possibile restringere l'analisi a due aspetti: una minor richiesta di energia termica per il riscaldamento domestico nel periodo invernale porta ad una contrazione dei consumi; una maggiore richiesta di raffrescamento nei mesi estivi porta ad un incremento dei consumi, specialmente quelli elettrici.

Tuttavia, spesso non si tratta di un rapporto diretto causa-effetto: è importante considerare altri fattori, come le variazioni demografiche, le tendenze tecnologiche di massa e i progressivi miglioramenti in campo di efficientamento energetico.



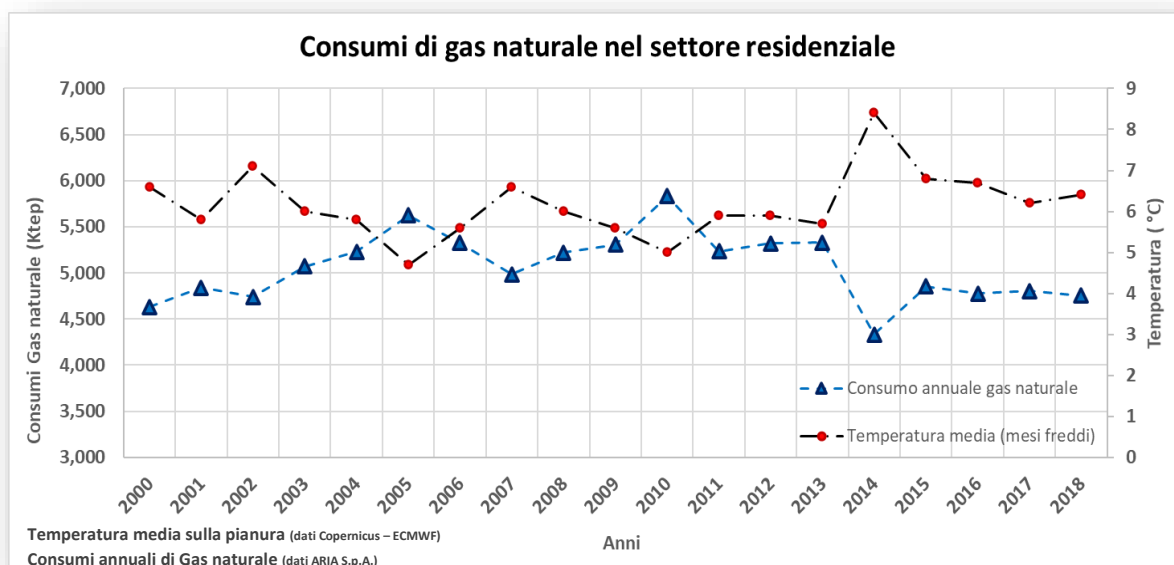
9 Consumi di energia elettrica nel mese di luglio in Lombardia. Dati energia elettrica: TERNA.

In riferimento ai **consumi di elettricità**, si riportano di seguito alcune elaborazioni che tengono in considerazione il mese di luglio e che evidenziano una correlazione con la temperatura media.

L'andamento delle temperature di luglio, statisticamente il mese più caldo in Lombardia, influisce sui consumi energetici, in particolare nei settori residenziale e terziario, sensibili al miglioramento del benessere all'interno degli edifici. In un contesto di crescente consumo energetico, sono evidenti picchi di consumo nei mesi più caldi. Tuttavia, altri fattori non riconducibili al cambiamento climatico influenzano la domanda energetica, tra i più significativi: l'aumento demografico nelle aree urbane, l'efficientamento energetico e la produzione industriale.

Nel complesso, la tendenza del consumo risulta quindi in rialzo, ma gli effetti dell'impatto climatico risultano più evidenti solo in alcuni anni, in particolare in quelli in cui la temperatura media è risultata maggiore di 26 °C.

Analizzando i **consumi di gas nel settore residenziale** emerge l'andamento opposto, ossia una diminuzione dei consumi a fronte di un aumento della temperatura media dell'inverno.



Più nel dettaglio, l'andamento dei consumi mostra chiare ed evidenti oscillazioni annuali, in maggior misura determinate da alternanza tra mesi invernali più freddi e altri più miti. In riferimento a questo, sono evidenti i picchi massimi di consumo del 2005 e del 2010, così come quello minimo del 2014. Nel complesso, risulta altresì evidente la decrescita negli ultimi cinque anni, valutabile all'incirca del 10% rispetto alla media degli anni intorno al 2010. È probabile che questa tendenza negativa sia influenzata anche da un graduale miglioramento dell'efficiamento energetico. Un fattore che al contrario limita la tendenza di calo è la transizione energetica verso un crescente utilizzo di questa risorsa.

B. Futuri climatici possibili

I possibili scenari futuri sono stati valutati attraverso indici climatici di temperatura, precipitazione, radiazione solare e vento. Gli indici climatici sono stati calcolati a partire dalle variabili climatiche essenziali, le cosiddette ECV (*tasmax*, *tasmin*, *pr*, *sund*, *rsds*, *sfcWind*), ottenute dai modelli scelti, precedentemente citati.

Per ogni modello sono stati considerati i dati medi giornalieri (con l'eccezione della variabile *rsds* per cui gli output trionfari dei modelli sono stati preelaborati per ottenere valore medio e massimo giornaliero). Anche per la variabile *pr*, che da convenzione internazionale rappresenta il flusso di precipitazione (espresso in Kg/m²s), è stata eseguita una preelaborazione, in modo da ottenere la precipitazione cumulata giornaliera espressa in millimetri (mm).

Come ambito di studio è stato definito un "box" geografico così delimitato:

- Latitudine tra 44.65°N e 46.74°N (gradi sessadecimali, sistema WGS84)
- Longitudine tra 7.84°E e 11.58°E (gradi sessadecimali, sistema WGS84)

in modo da racchiudere i confini regionali, considerando ad ovest anche il bacino del fiume Ticino.

In questa area i dati dei singoli modelli sono stati integrati nel tempo per costruire, per ciascuna cella di dimensione 0.11°N x 0,11°E, le medie ventennali dei periodi di riferimento scelti, ovvero:

- 1986-2005 – periodo storico climatologico
- 2021-2040 – periodo vicino di proiezione
- 2041-2060 – periodo medio di proiezione

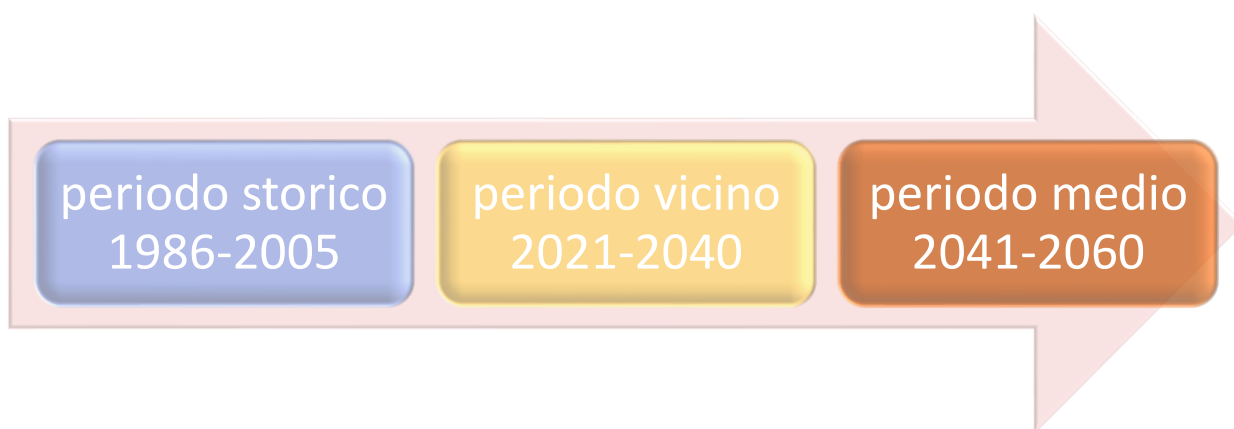


Figura 10: periodi di riferimento per il calcolo delle medie ventennali dei dati dei modelli di simulazione climatica.

Un'ulteriore elaborazione è consistita nell'agglomerare i dati a livello spaziale, per ricavare le curve di distribuzione delle ECV *tasmax*, *tasmin* e *pr* in tutto il dominio di calcolo oltre

che in due sottoinsiemi, rappresentativi della zona alpina/prealpina e della pianura (v. Figura 11)

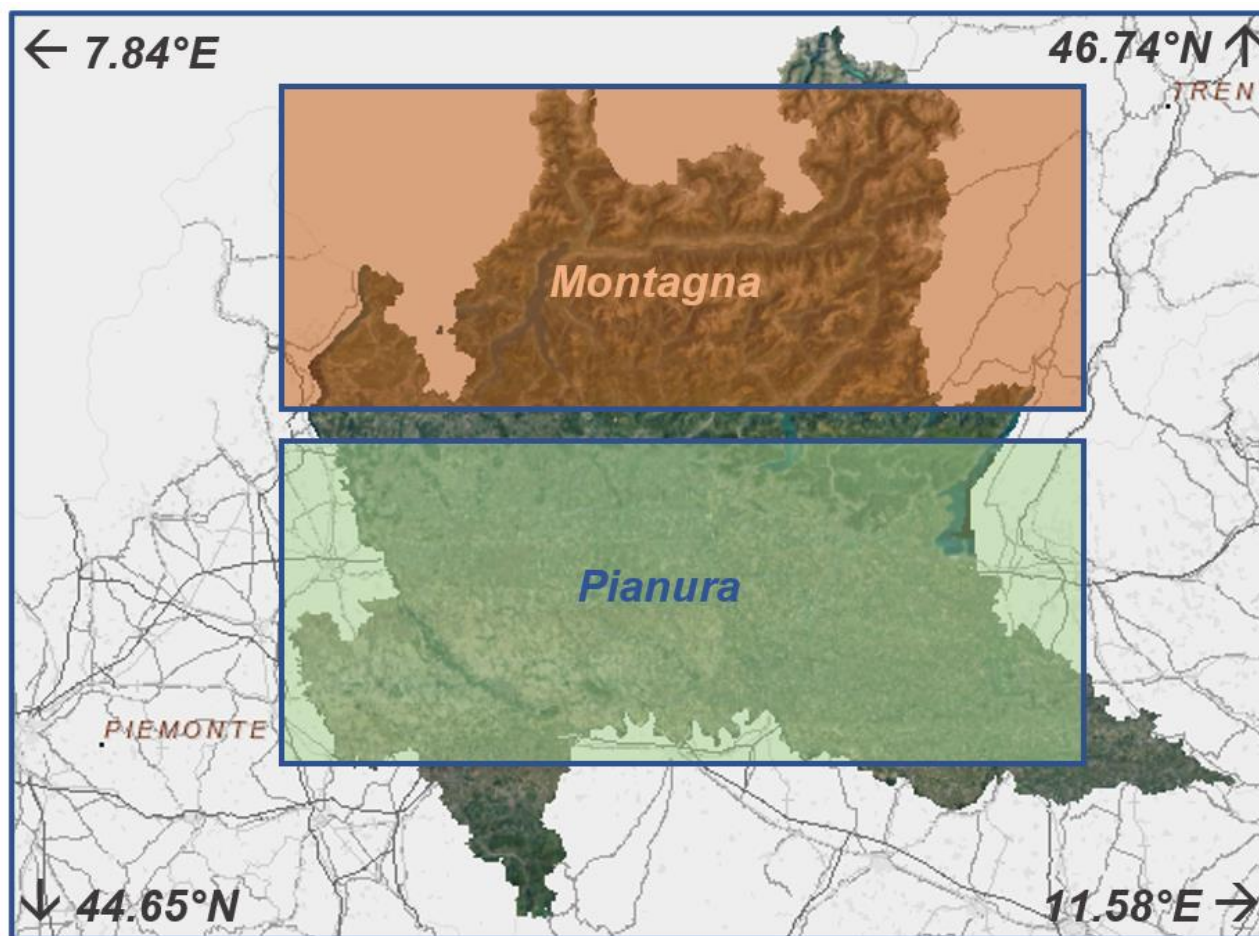


Figura 11: dominio di calcolo per le elaborazioni di ECV e indici climatici e sottodomini per la determinazione delle curve di distribuzione statistica.

Nel seguito si riportano le mappe delle variabili climatiche essenziali e delle loro variazioni in base agli scenari RCP4.5 e RCP8.5 (o, nella nuova nomenclatura dell'AR6, SCP2-4.5 e SCP5-8.5).

Temperatura

La variabile climatica essenziale temperatura (ECV *tas*) consente di identificare la tendenza climatica più evidente legata alle modifiche attese in futuro in relazione all'aumento della concentrazione dei GHG. Di tale variabile, sono disponibili le massime e le minime giornaliere, che sono state analizzate e raggruppate nei periodi climatici scelti identificando la media climatologica di riferimento. Nell'approfondimento tecnico sono riportate tutte le mappe complete, mentre nel presente paragrafo vengono riportate solo quelle che consentono una migliore identificazione dei fenomeni più rilevanti.

Oltre alla rappresentazione delle variabili climatiche, è opportuno riferirsi alle anomalie, definite come la differenza algebrica tra lo scenario e il periodo climatico di interesse rispetto allo scenario climatico di riferimento (1986-2005).

Se non specificato, tutte le rappresentazioni si riferiscono all'ensemble dei modelli considerati.

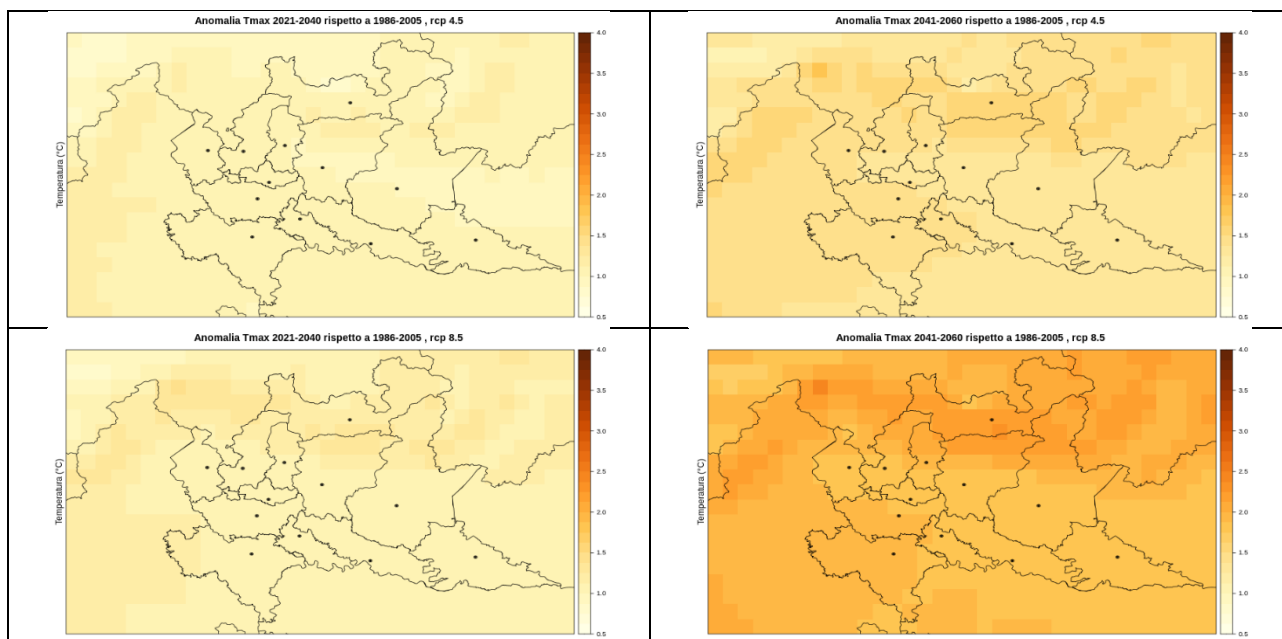


Figura 12: anomalia della temperatura massima giornaliera per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040) e medio (2041-2060).

Per considerare la modifica nella statistica delle temperature si può anche fare riferimento alle funzioni di distribuzione della probabilità (PDF), che consentono di rappresentare in modo immediato come vari la statistica del periodo e dello scenario in esame rispetto alla statistica del periodo climatico di riferimento. Queste rappresentazioni consentono di meglio apprezzare anche la probabilità di accadimento degli “eventi estremi”, che si trovano, cioè, nella parte destra della distribuzione verso valori di temperatura o di anomalia di temperatura più elevati.

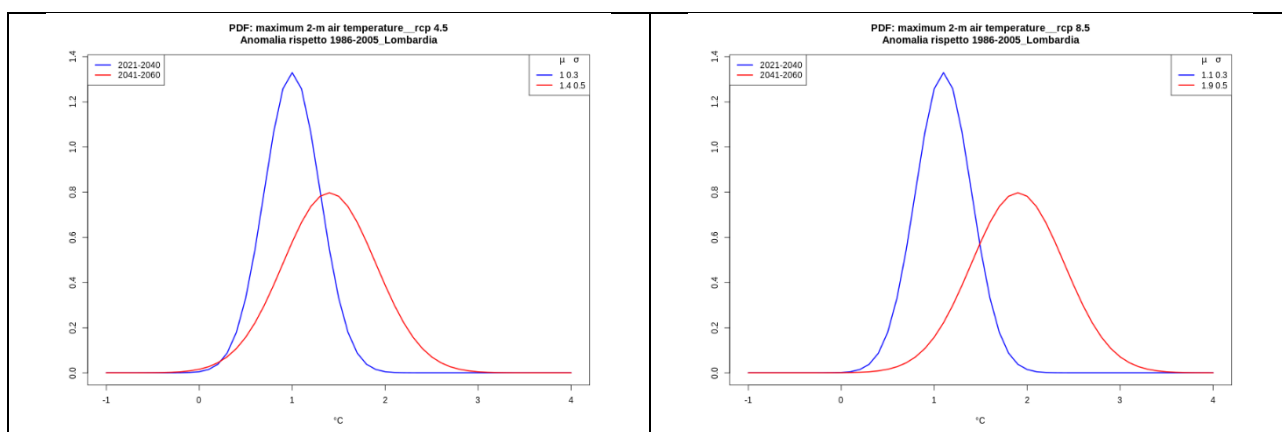


Figura 13: distribuzione statistica dell'anomalia della temperatura massima giornaliera sul territorio regionale per gli scenari RCP4.5 (sinistra) e RCP8.5 (destra).

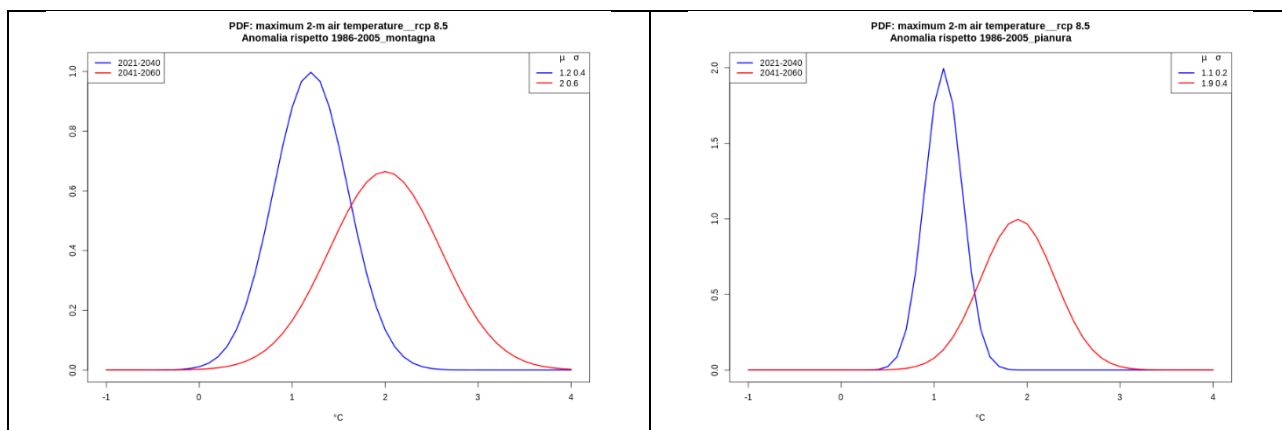


Figura 14: confronto tra le distribuzioni statistiche dell'anomalia della temperatura massima giornaliera nell'area di pianura (sinistra) e nell'area montana (destra) per lo scenario RCP8.5.

La temperatura massima giornaliera, nello scenario RCP4.5, mostra un incremento generalizzato su tutto il territorio regionale intorno 1°C nel periodo vicino, tendente a 1,5°C nel periodo medio. Nello scenario RCP8.5 si conferma l'entità dell'incremento nel periodo vicino, mentre nel periodo medio la previsione è di circa + 2°C. Gli aumenti più significativi coinvolgono l'area orobica e la Valcamonica, con un incremento delle zone montane mediamente superiore di 0,2 °C rispetto all'incremento previsto per le aree pianeggianti (Figura 13).

Considerando la temperatura minima giornaliera (rappresentativa del periodo notturno), il segnale climatico è simile nello scenario RCP4.5:

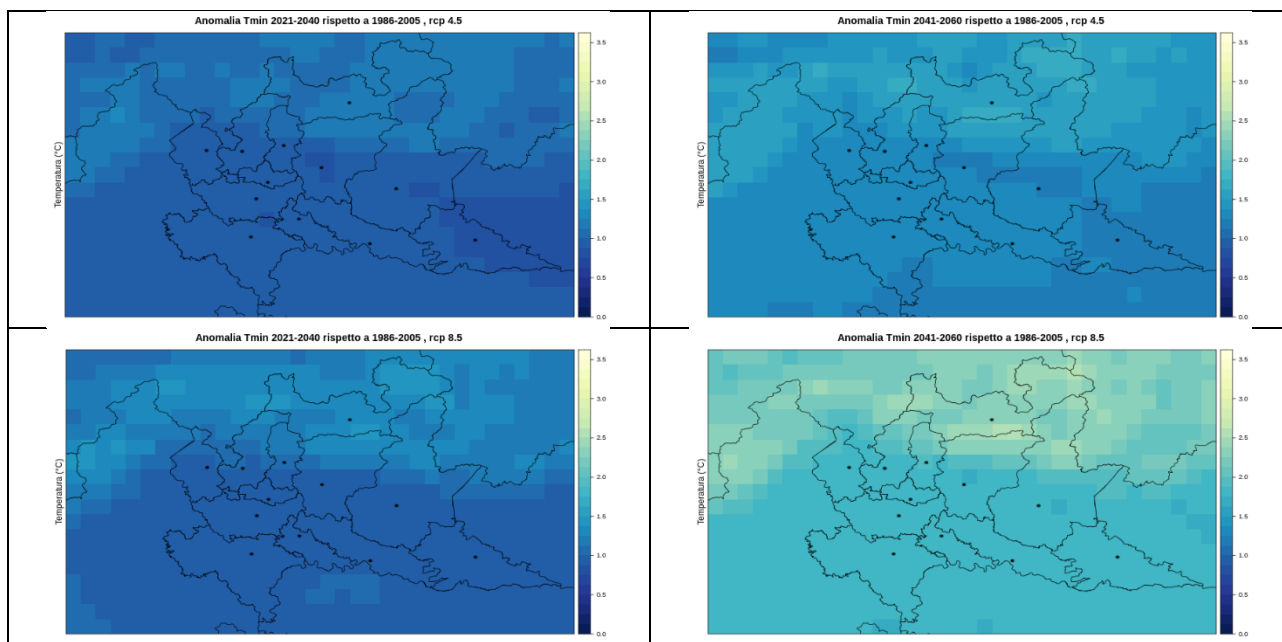


Figura 15: anomalia della temperatura minima giornaliera per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040) e medio (2041-2060).

si passa da un incremento tra 0,5°C e 1°C nel periodo vicino ad un incremento tra 1°C e 1,5°C nel periodo medio. Nello scenario RCP8.5, invece, l'incremento previsto nel periodo vicino è di circa 1°C, per passare a +2/3°C nel periodo medio, delineando un incremento maggiore per le zone montane delle province di Sondrio, Bergamo e Brescia.

Anche il modello COSMO del CMCC sembra in linea con tali proiezioni, sebbene con valori leggermente inferiori.

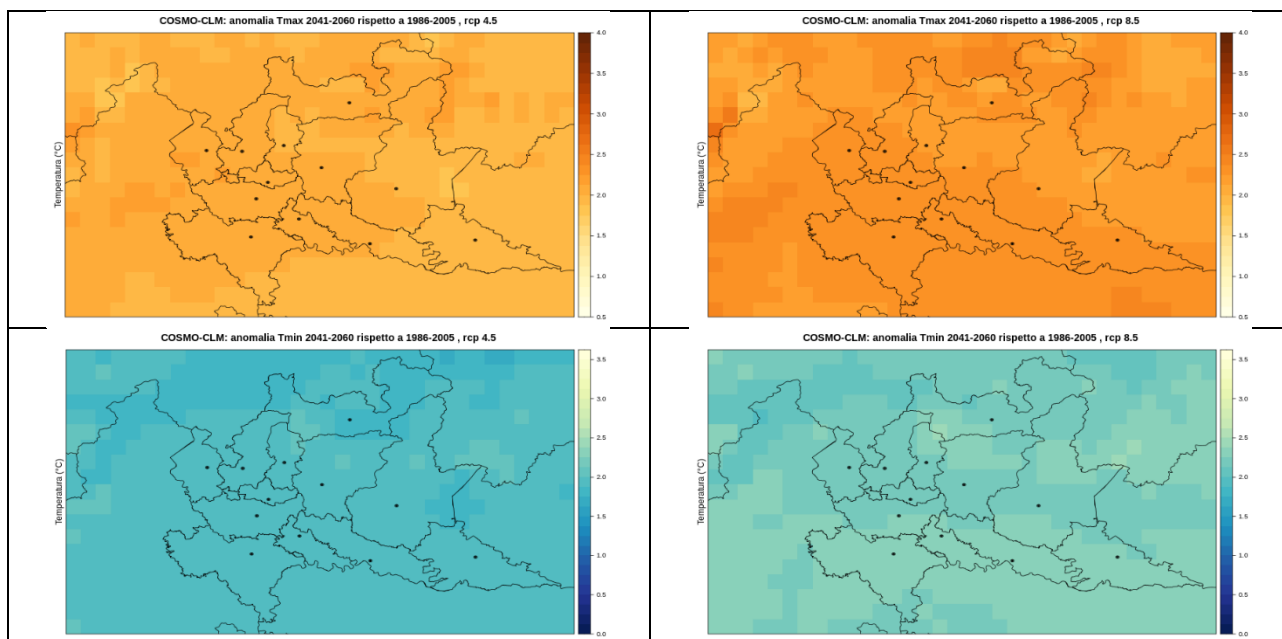


Figura 16: anomalia della temperatura massima giornaliera (sopra) e minima giornaliera (sotto) per gli scenari RCP4.5 (sinistra) e RCP8.5 (destra) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo medio (2041-2060). Proiezioni del modello COSMO-CLM (CMCC).

Rispetto alle medie dell'ensemble, le proiezioni fornite dal modello COSMO-CLM (CMCC) sono allineate (o leggermente inferiori) per il periodo vicino, mentre per il periodo medio indicano incrementi più marcati per entrambi gli scenari di riferimento su tutto il territorio regionale, con i massimi previsti nella zona pianeggiante. L'aumento previsto sia per la temperatura massima giornaliera sia per quella minima è compreso tra 2 e 2,5 °C.

Precipitazione

Per la precipitazione si sono evidenziate le anomalie percentuali, andando quindi a rappresentare la variazione di precipitazione cumulata in mm rispetto a quanto riportato per il periodo di riferimento (1986-2005).

Le proiezioni climatiche della precipitazione cumulata nell'arco dell'anno solare non mostrano significative variazioni in nessun senso in entrambi i periodi (vicino e medio). Modifiche rispetto ai valori medi del periodo di riferimento 1986-2005, invece si riscontrano a livello stagionale.

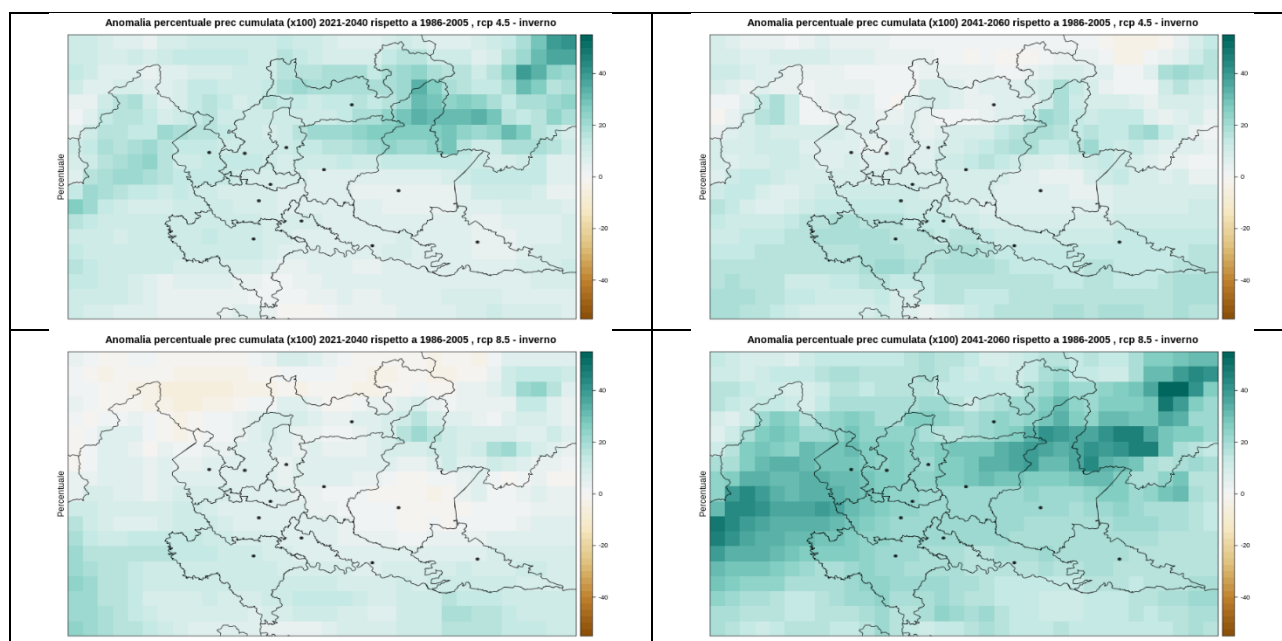


Figura 17: anomalia percentuale della precipitazione cumulata durante la stagione invernale (DGF) per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040) e medio (2041-2060).

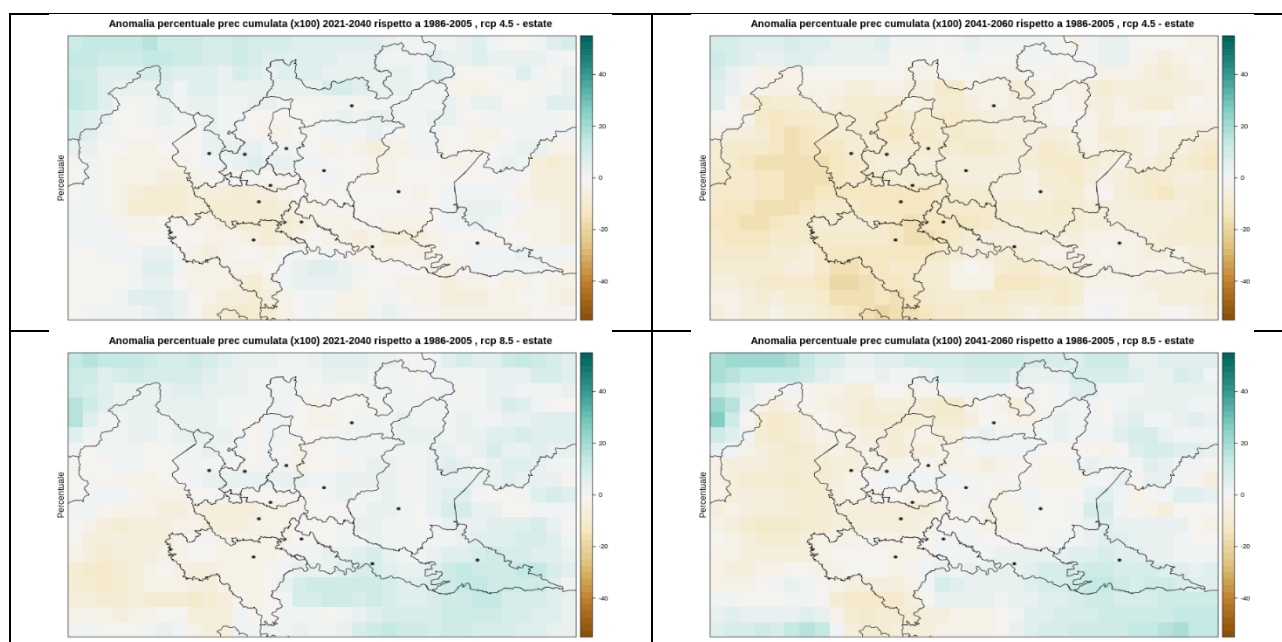


Figura 18: anomalia percentuale della precipitazione cumulata durante la stagione estiva (GLA) per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040) e medio (2041-2060).

In inverno si delinea un aumento della precipitazione cumulata con punte, stimate per il periodo medio nello scenario RCP8.5, fino a +40% (avendo come riferimento una base climatologica 1986-2005 di circa 300mm), con prevalenza nel quadrante nordorientale: si può supporre che parte di tale precipitazione sia di carattere nevoso, sebbene una valutazione più dettagliata non sia stata condotta. La distribuzione spaziale di tale fenomeno interessa principalmente i bacini del Serio, dell'Oglio, del Chiese e degli affluenti del Lago di Garda. La tendenza all'aumento è confermata anche nella stagione primaverile, ma con valori assoluti inferiori. La stagione estiva, invece, mostra tendenza alla diminuzione della precipitazione cumulata, con riduzioni previste, per il periodo medio nello scenario RCP4.5 fino a -20% (avendo come riferimento una base

climatologica 1986-2005 di circa 200mm) e con una prevalenza nel quadrante sudoccidentale. Infine, la stagione autunnale non mostra tendenze marcate.

Considerando le distribuzioni di probabilità, il segnale presente è più debole, osservandosi una maggiore frequenza nel periodo vicino (2021-2040) e quindi una diminuzione e uno spostamento verso valori più elevati nel caso RCP 8.5 nel medio periodo (2041-2060): questo potrebbe avere una significativa influenza per gli eventi precipitativi estremi invernali (DGF).

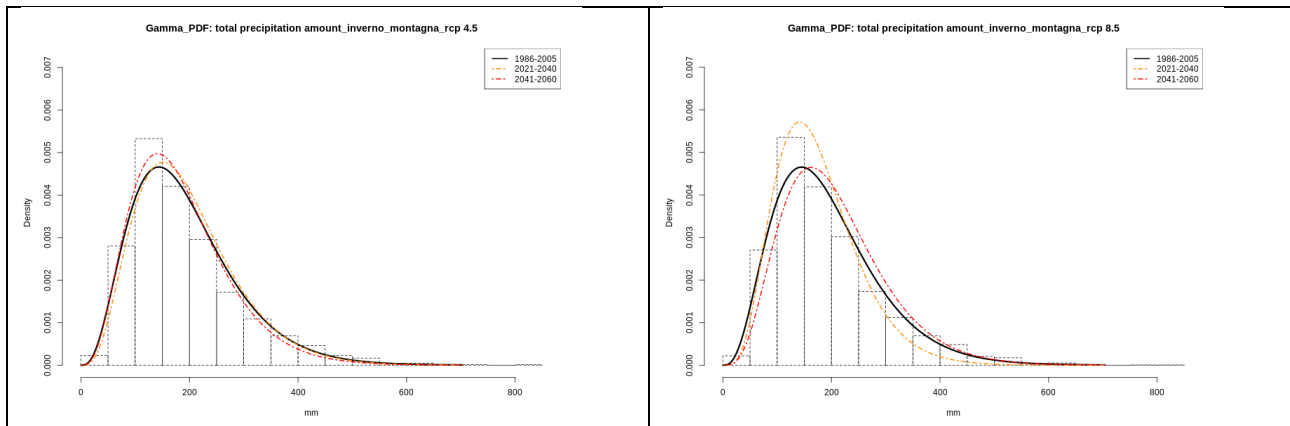


Figura 19: distribuzione di probabilità della precipitazione in inverno e in montagna nello scenario RCP4.5 (sinistra) e RCP 8.5 (destra); gli istogrammi rappresentano il periodo di riferimento (1986-2005)

Radiazione Solare

La radiazione solare è stata esaminata in termini di flusso radiativo superficiale e di ore di insolazione (rispettivamente con riferimento alle variabili climatiche essenziali complementari *rsds* e *sund*).

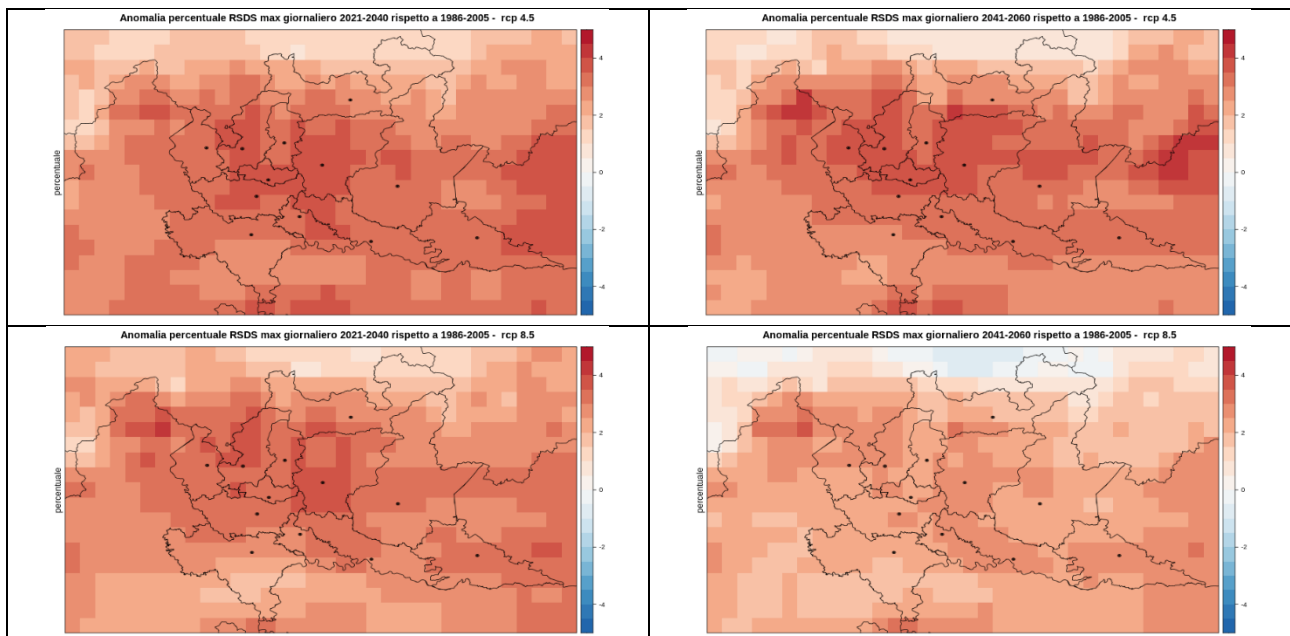


Figura 20: anomalia percentuale del valore di flusso radiativo *rsds* massimo giornaliero per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040) e medio (2041-2060).

L'intensità del flusso radiativo superficiale a corta lunghezza d'onda (*rsds*) è prevista in aumento sia nel periodo vicino sia in quello medio, con i massimi attesi nella zona centrale del territorio regionale. Questo dato può certamente influire sulla produttività degli impianti fotovoltaici, ma non essendo l'unico fattore in gioco, occorrerà a riguardo studiare la questione più in dettaglio, tramite un indice specifico.

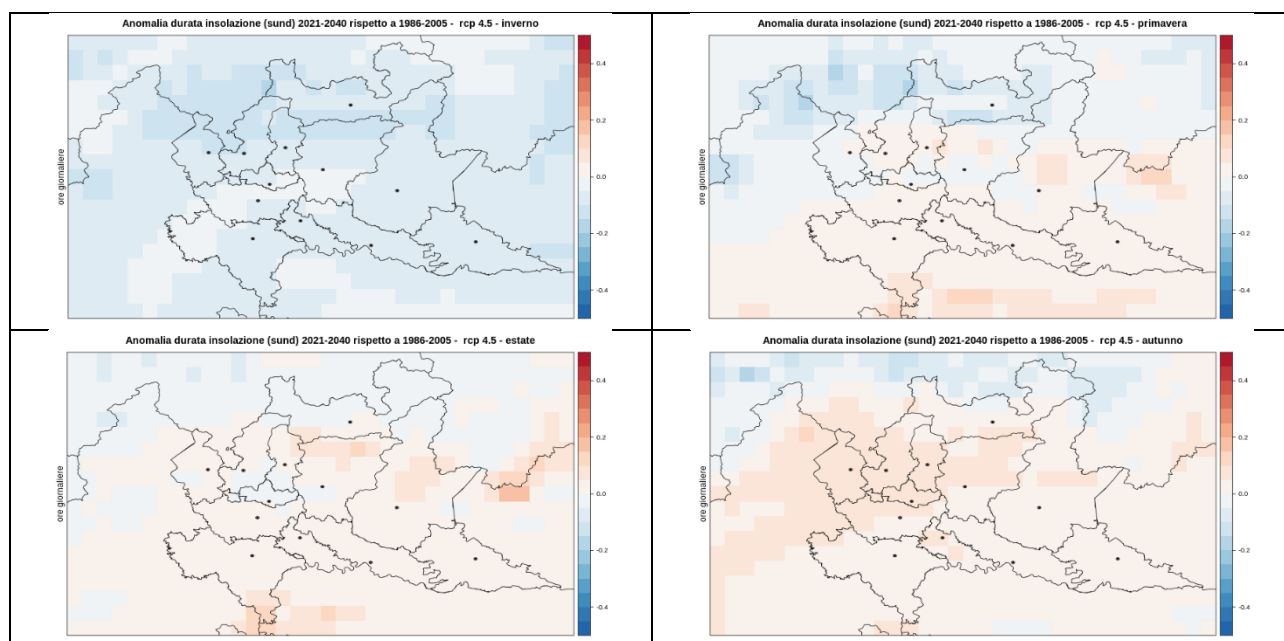


Figura 21: anomalia percentuale delle ore di insolazione giornaliera nelle varie stagioni per lo scenario RCP4.5 rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040).

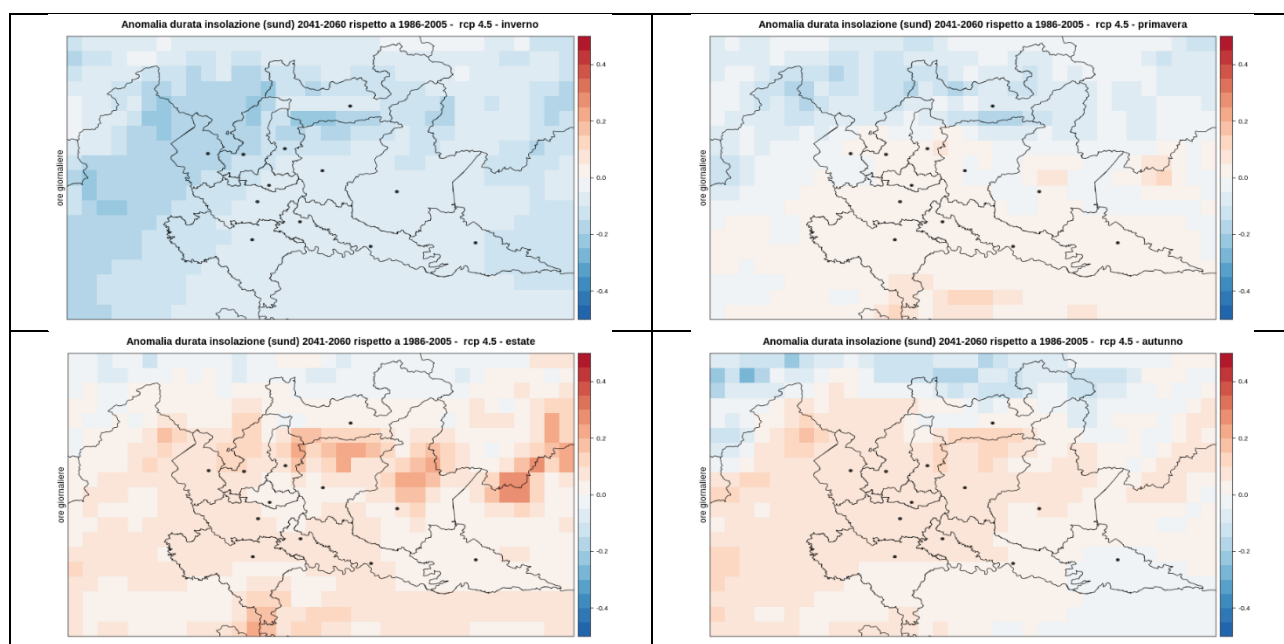


Figura 22: anomalia percentuale delle ore di insolazione giornaliera nelle varie stagioni per lo scenario RCP4.5 rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo medio (2041-2060).

L'andamento del flusso radiativo si accompagna ad una sostanziale invarianza della durata media delle ore di insolazione durante il giorno nel corso dell'anno. Questo stesso dato però mostra andamenti differenti passando da una stagione all'altra. Sia nel periodo vicino sia in quello medio, infatti, si rileva un aumento dell'insolazione nella stagione estiva e in misura minore in quelle primaverile ed autunnale. Questo esito può essere posto a confronto con l'andamento stagionale della precipitazione cumulata, osservando che per l'estate l'aumento della insolazione si allinea con una riduzione della precipitazione complessiva, mentre in autunno aumenta l'insolazione (quindi riduzione di presenza nuvolosa) a fronte di una stabilità della

precipitazione cumulata. Questo potrebbe essere un indizio di un incremento autunnale di eventi precipitativi intensi che potrà essere investigato nel prosieguo tramite gli indici climatici specifici.

Vento

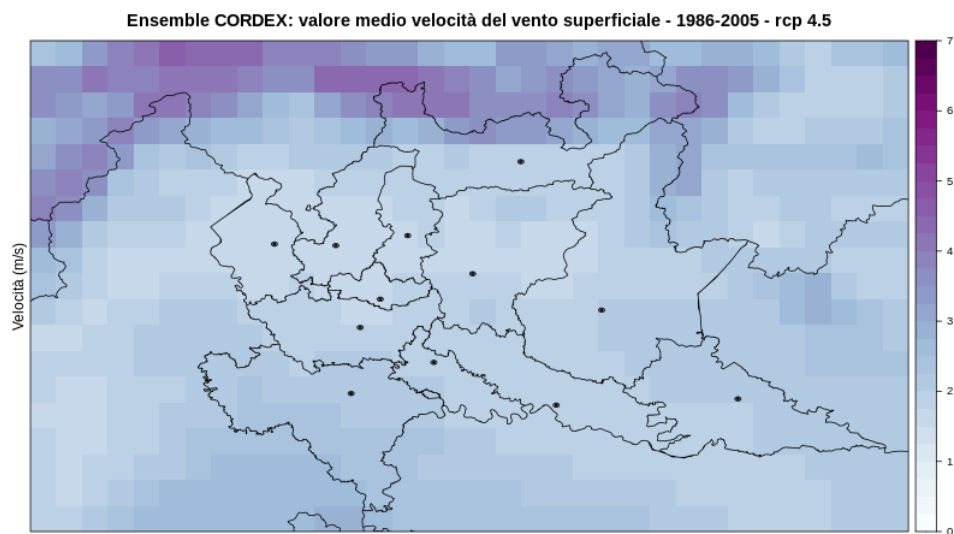


Figura 23: velocità media giornaliera del vento superficiale (2m) nel periodo climatico di riferimento (1986-2005).

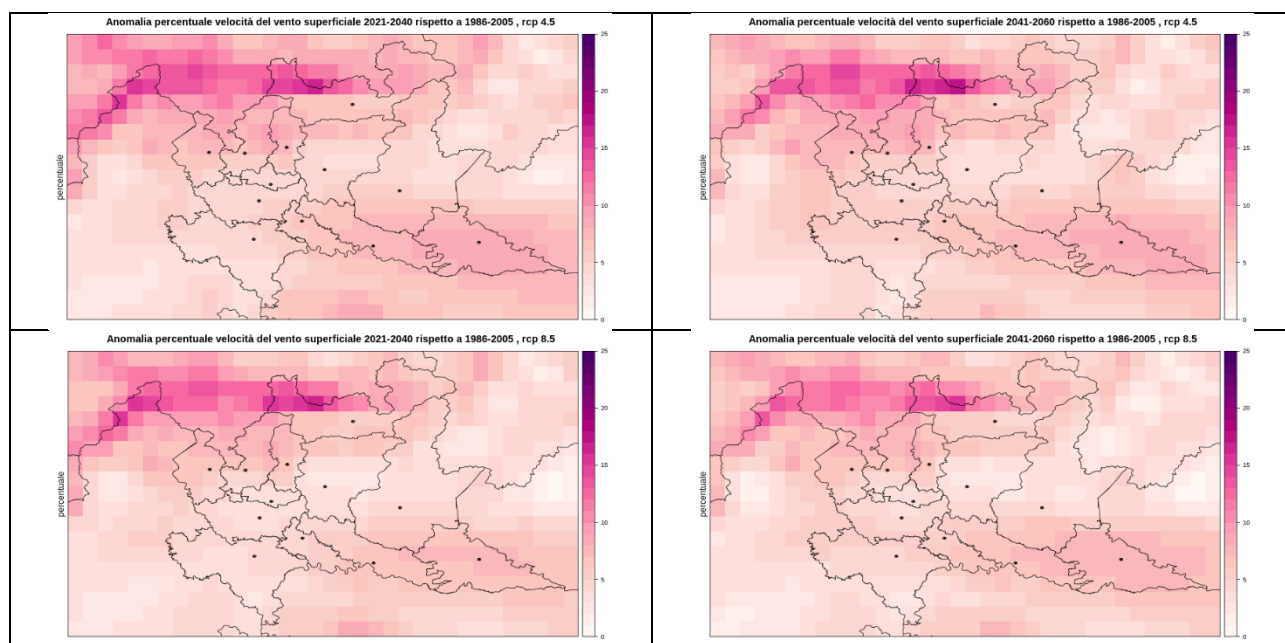


Figura 24: anomalia percentuale della velocità media giornaliera del vento superficiale per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per i periodi vicino (2021-2040) e medio (2041-2060).

La velocità del vento a 2 metri di quota è molto bassa nella nostra regione e solo sulle più alte vette alpine acquista valori significativi. Per questo, le variazioni previste nei due scenari e periodi di riferimento, per quanto a livello percentuale possano risultare significative, in termini assoluti non inducono ad ipotizzare condizioni diverse da quelle attuali.

C. Cambiamento climatico e valutazione del rischio

Indici climatici per la valutazione dell'impatto (hazard)

Il clima varia in funzione delle variazioni naturali (cicli solari, eruzioni vulcaniche, ecc.) e delle variazioni indotte dall'antropizzazione, in particolare l'emissione di GHG che modificano le caratteristiche radiative dell'atmosfera (effetto serra). Com'è noto, le variazioni indotte dall'uomo hanno superato quelle dovute al ciclo naturale, e rappresentano la maggior forzante fisica del bilancio del calore terrestre. L'aumento di temperatura conseguente all'aumento della concentrazione in atmosfera dei GHG rappresenta, quindi, la principale forzante climatica che, agendo su tutto il complesso sistema di circolazione atmosferica ed oceanica, attraverso l'instaurarsi di altre forzanti determina gli impatti fisici, quelli sugli ecosistemi e sulla società.

Per un approccio corretto al tema del cambiamento climatico e alla valutazione del suo impatto, occorre ben definire il concetto di rischio. Il punto di partenza è l'insieme delle incertezze associate ad un certo evento o complesso di eventi. Compito dell'analisi del rischio è trasformare le incertezze in probabilità, definendo tramite strumenti statistici l'entità del rischio. Il rischio associato ad un evento avverso è quantificabile tramite il prodotto tra la *pericolosità* (P), ovvero la probabilità che un evento si verifichi in un certo periodo di tempo e il *danno* (D) causato da quell'evento. In base a questa definizione, ne deriva che, ad esempio, due eventi uno più probabile ed uno meno, potrebbero determinare un rischio analogo, se il danno cagionato dal secondo è valutato maggiore del danno del primo.

La pericolosità di un evento è determinata dall'esposizione ad una situazione di pericolo (*hazard*), che può generare danno e, come già detto, può essere di origine naturale o antropica. Essa si distingue dal concetto di rischio, che invece quantifica l'entità della minaccia, tenendo conto sia della probabilità di accadimento sia della gravità dell'accadimento (talvolta indicata anche come *magnitudo*).

In alcuni casi stimare il danno può risultare difficile, soprattutto se - e questo è emblematico per i cambiamenti climatici - le relazioni causa-effetto sono affette da elevata incertezza, a partire dall'estensione nel tempo e nello spazio dei fenomeni in studio e delle loro interazioni. Anche per questo, le Nazioni Unite hanno proposto per le calamità naturali uno schema assunto a partire dal report AR5 IPCC, che definisce l'*entità del rischio* in maniera più dettagliata come prodotto di tre fattori:

$$\text{Rischio} = \text{Pericolosità (hazard)} \times \text{Vulnerabilità} \times \text{Esposizione}$$

Riassumendo, l'*hazard* è la probabilità che, in una certa area e in un definito intervallo di tempo, si verifichi un evento di specifica intensità. La *vulnerabilità* indica la predisposizione degli elementi esposti al pericolo a subire un danno. Infine, l'*esposizione* stima il valore degli elementi esposti al pericolo, sia in termini economici sia in termini di vite umane. L'entità del danno è quindi compiutamente determinata dal prodotto tra vulnerabilità e valore esposto⁸.

Tutto ciò premesso, il presente documento si focalizza specificamente sulla definizione dell'*hazard*. Seguendo letteralmente la definizione appena espressa, l'area è quella contenente la regione Lombardia con una estensione a comprendere il bacino idrografico del Ticino; sono stati individuati due intervalli di tempo, uno vicino, tra il 2021 e il 2040, ed uno medio, tra il 2041 ed il 2060. Infine, tutti gli indici proposti quantificano all'interno di questo recinto spazio-temporale, le proiezioni di accadimento di specifici fenomeni legati alle variabili climatiche essenziali selezionate.

⁸ G. Sturloni 2018, La comunicazione del rischio per la salute e per l'ambiente

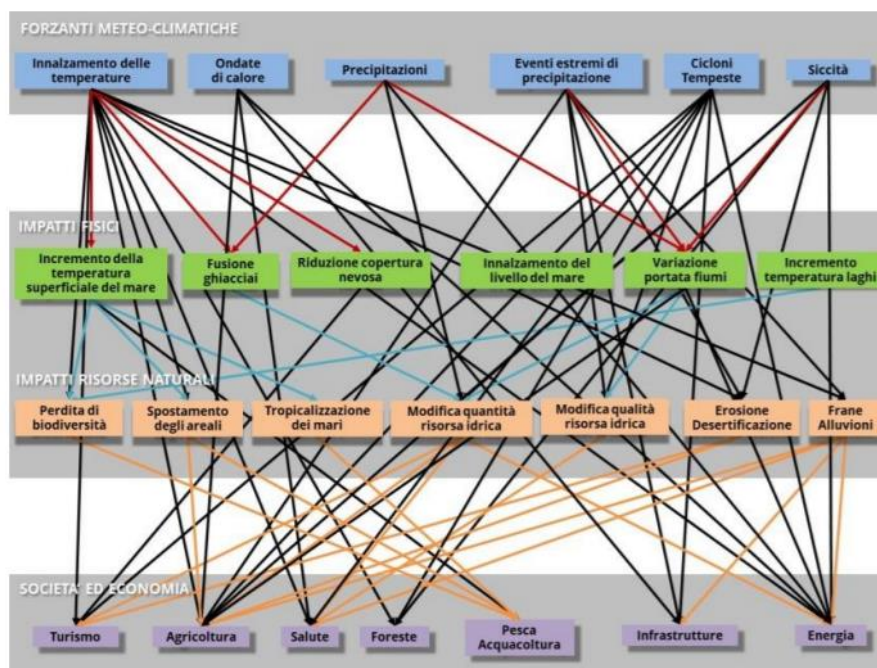


Figura 25: rappresentazione schematica del legame tra fenomeni climatici e settori sociali ed economici impattati (SNPA, Doc. 112/21)

Sarà compito di una successiva analisi del rischio occuparsi di integrare il fattore di pericolosità con quelli di vulnerabilità ed esposizione. Ad esempio, nella valutazione della salute della popolazione, il pericolo rappresentato dall'aumento delle notti tropicali o dei giorni estivi andrà commisurato alla vulnerabilità della popolazione (es. popolazione di bambini ed anziani) e all'esposizione (abitazioni prive di sistemi di raffrescamento, luoghi di aggregazione all'aperto) in modo da avere una valutazione complessiva del rischio risultante.

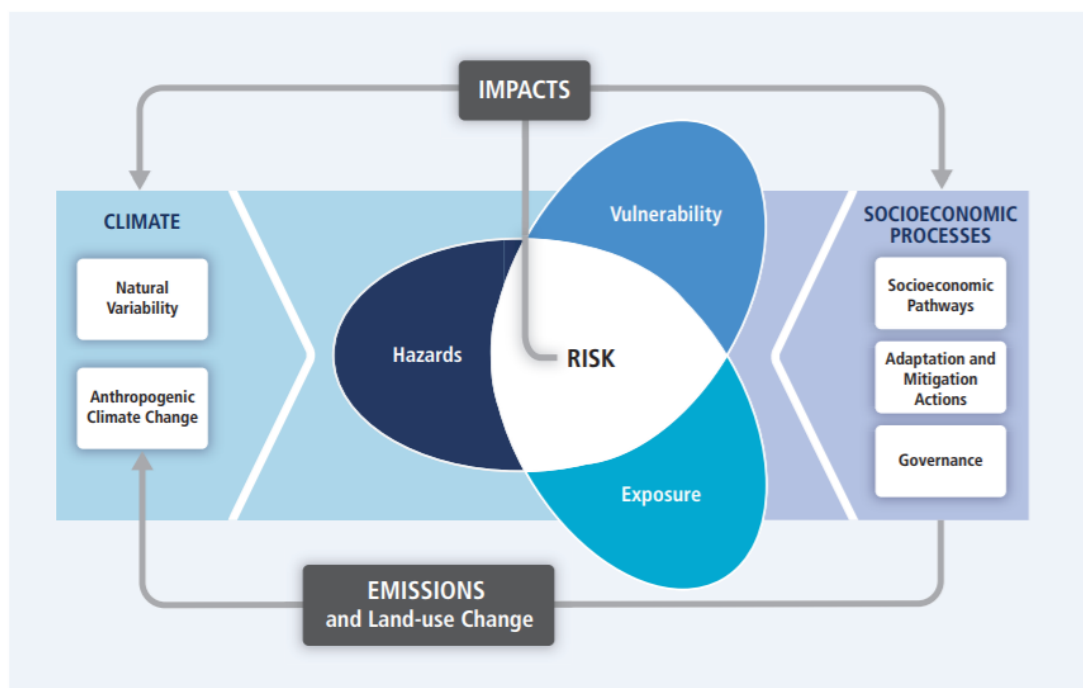


Figura 26: modello concettuale del rischio climatico (IPCC, AR5-WGII 2014): il rischio è dato dalla combinazione di pericolo climatico (hazard), esposizione e vulnerabilità (fattori esogeni rispetto al clima e caratteristici di un territorio, settore economico, ecc.)

Le definizioni di rischio e di pericolosità danno ragione della distinzione degli ambiti di “mitigazione” e di “adattamento” che afferiscono al tema dei cambiamenti climatici. La mitigazione, infatti, agisce sul sistema delle emissioni in modo da diminuire il pericolo climatico, mentre l’adattamento agisce sulla vulnerabilità e/o sull’esposizione del settore impattato; ad esempio, per ridurre il rischio sul sistema agricolo, a parità di *hazard* parametro secondo gli scenari RCP, è necessario prevedere una diminuzione della vulnerabilità adottando sistemi di ritenzione idrica ovvero specie coltivate più resistenti alla siccità.

A partire dalle variabili climatiche (ECV) è possibile costruire un vasto insieme di indici climatici di riferimento (*hazard*) che aiutino a comprendere le variazioni del clima e il pericolo climatico nei periodi di interesse (breve termine e lungo termine), secondo la definizione data nel capitolo B. Futuri climatici possibili.

L’elenco completo degli indici climatici disponibili si trova nel documento “European Climate Assessment and Dataset” prodotto per Eumetnet dal Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)⁹; altri indici di riferimento sono contenuti nel rapporto IPCC AR6¹⁰, e nella maggior parte dei casi i due gruppi di indici coincidono.

Inoltre, il “Rapporto sugli indicatori di impatto dei cambiamenti climatici”¹¹ riporta un buon numero di indicatori che il sistema delle Agenzie di Protezione Ambientale ritiene utile per la quantificazione e qualificazione del cambiamento climatico, anche nel settore energetico. Alcuni di essi sono computabili attraverso i dati delle proiezioni climatiche, consentendo quindi di valutare le modifiche portate dal cambiamento climatico: dal momento che alcuni indici sono più rappresentativi di altri, è possibile apprezzare i fenomeni principali e il loro possibile impatto anche nel sistema energetico.

Con specifico riferimento alle nostre elaborazioni, il software Climate4R implementa i 27 indici climatici approvati dall’accordo CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) a cui sono stati aggiunti due indici ideati ed implementati per le finalità del presente documento (indici PVpot e W10). La lista completa degli indici ETCCDI è disponibile a questo collegamento: http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml. Nell’approfondimento tecnico allegato al documento, invece, si può trovare la lista di tutti gli indici qui elaborati, con l’esatta definizione di ciascuno.

Tra tutti gli indici disponibili e calcolati per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 si sono ritenuti particolarmente interessanti i seguenti.

Indice	Descrizione	Fenomeni
TR	<i>Tropical nights</i> – notti tropicali, giorni	discomfort termico notturno
SU	<i>Summer days</i> – giorni estivi, giorni	discomfort termico diurno
FD	<i>Frost days</i> – giorni di gelo, giorni	temperature minime invernali
HDD	<i>Heating Degree Days</i> – gradi giorno riscaldamento, numerico	Fabbisogno riscaldamento invernale
CDD	<i>Cooling Degree Days</i> – gradi giorno raffrescamento, numerico	Fabbisogno raffrescamento estivo
WSDI	<i>Warm Spell Duration Index</i> , giorni	Giorni consecutivi con temperatura elevata
R20mm	Giorni con precipitazione ≥ 20 mm, giorni	Precipitazioni intense
R95pTOT	Precipitazione cumulata annuale nei giorni superiori al 95°pct, mm	Precipitazione dei giorni perturbati
PRCPTOT	Precipitazione cumulata annuale, mm	Precipitazione totale
Rx1day	Precipitazione massima giornaliera, mm	Precipitazioni molto intense
Rx5day	Precipitazione massima in un periodo di 5 giorni, mm	Precipitazioni molto intense
CWD	Giorni di precipitazione continua (>1 mm), giorni	Regime delle precipitazioni
W10	Giorni con velocità del vento ≥ 10 m/s, giorni	Regime anemologico
FG	Velocità media del vento, m/s	Regime anemologico
GSL	<i>Growing season length</i> , lunghezza della stagione vegetativa, giorni	Ecosistema vegetale
PVpot	Potenziale fotovoltaico, numerico	Potenziale di produzione fotovoltaica

⁹ <https://www.ecad.eu/documents/atbd.pdf>

¹⁰ Annex VI: Climatic Impact-Driver and Extreme Indices

¹¹ Doc. n.112/21, SNPA

Per rappresentare il cambiamento sono stati calcolate le anomalie assolute (relativamente all'unità di misura dell'indice) e relative, riportando in percentuale la variazione ottenuta rispetto al periodo climatico di riferimento.

Temperatura

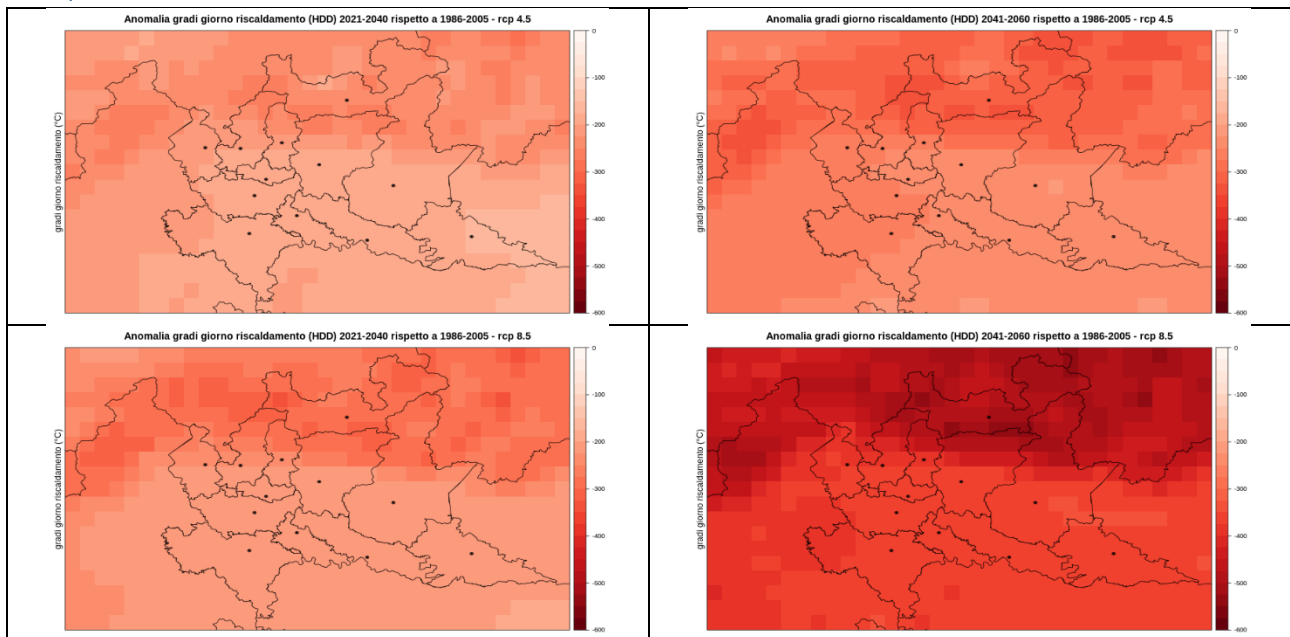


Figura 27: anomalia dei Gradi Giorno di riscaldamento per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040) e medio (2041-2060).

L'aumento di temperatura è destinato a far diminuire il fabbisogno di riscaldamento, in modo più accentuato sulla parte montana della regione rispetto a quella di pianura, in modo molto significativo nello scenario RCP8.5 per il medio termine.

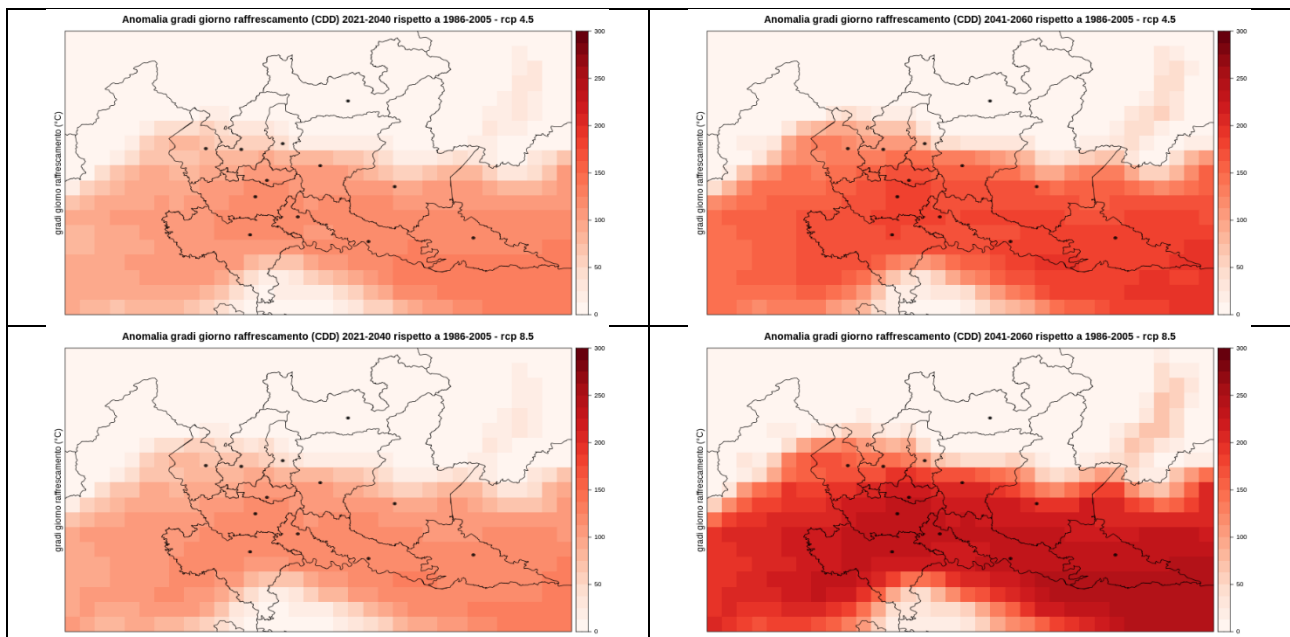


Figura 28: anomalia dei Gradi Giorno di raffreddamento per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra).

In tema di raffreddamento estivo si osserva una situazione opposta a quella invernale: la richiesta di raffreddamento è maggiore nella pianura ed è praticamente uguale sia nello scenario RCP4.5 che in quello

RCP8.5 nel breve periodo, mentre la differenza tra i due scenari emissivi diventa profondamente significativa nel medio termine. A giudicare dalla distribuzione spaziale, che vede interessate le aree più popolate della Lombardia, l'aumento di richiesta energetica per l'alimentazione dei sistemi di condizionamento potrebbe essere particolarmente significativo.

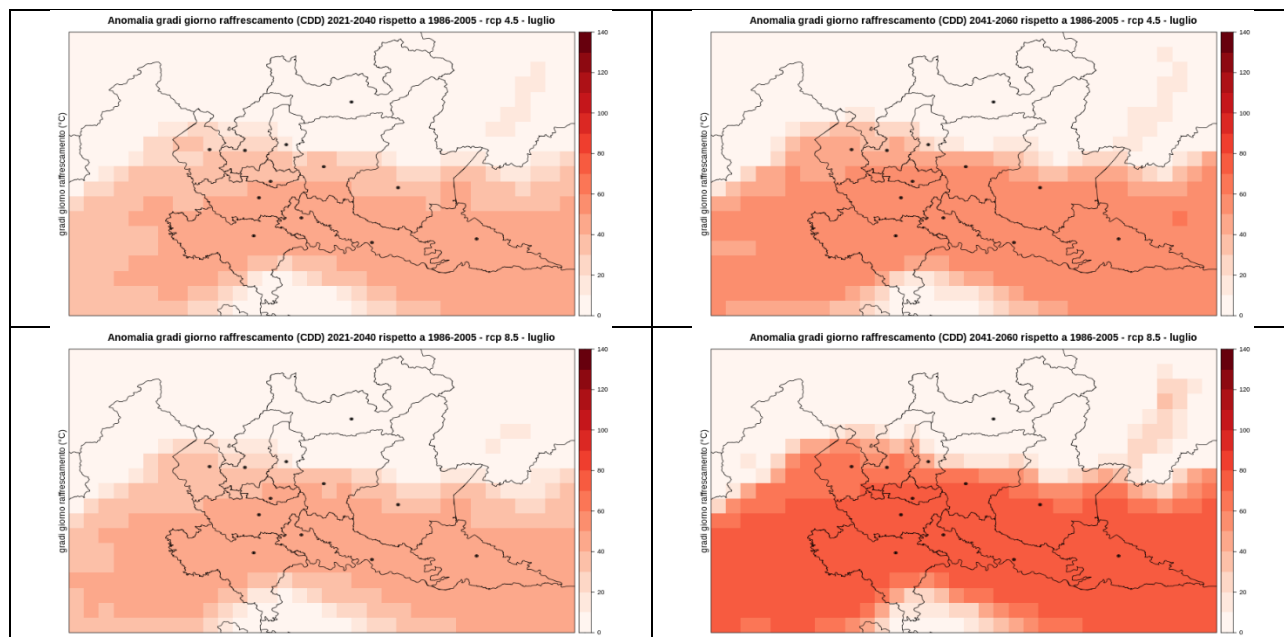
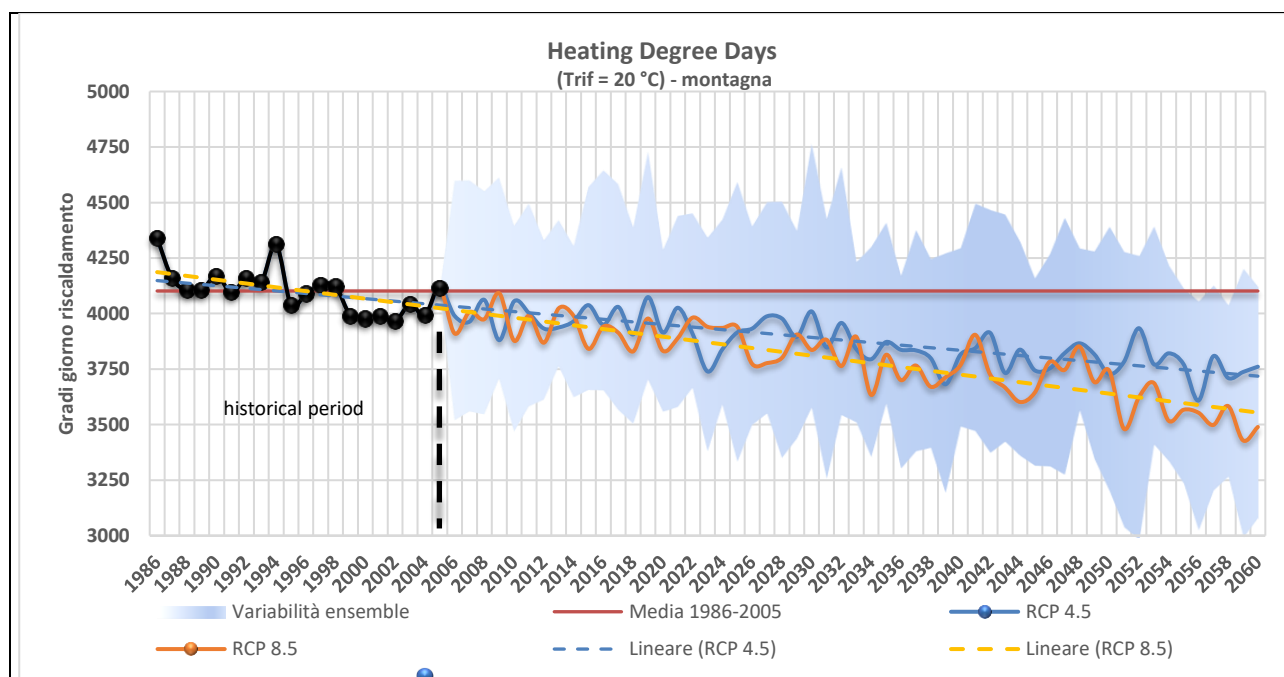


Figura 29: anomalia dei Gradi Giorno di riscaldamento per gli scenari RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) rispetto al periodo climatico di riferimento (1986-2005) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra) - mese di luglio.

Focalizzandosi sul contributo del solo mese di luglio al computo dei gradi giorno di riscaldamento, che contribuisce all'incirca alla metà del valore annuale, si osserva che quanto emerso dai dati annuali risulta confermato, con un incremento di circa +100 gradi giorno a luglio nel periodo medio (2021-2040) per lo scenario RCP 8.5 previsti mediamente in pianura.



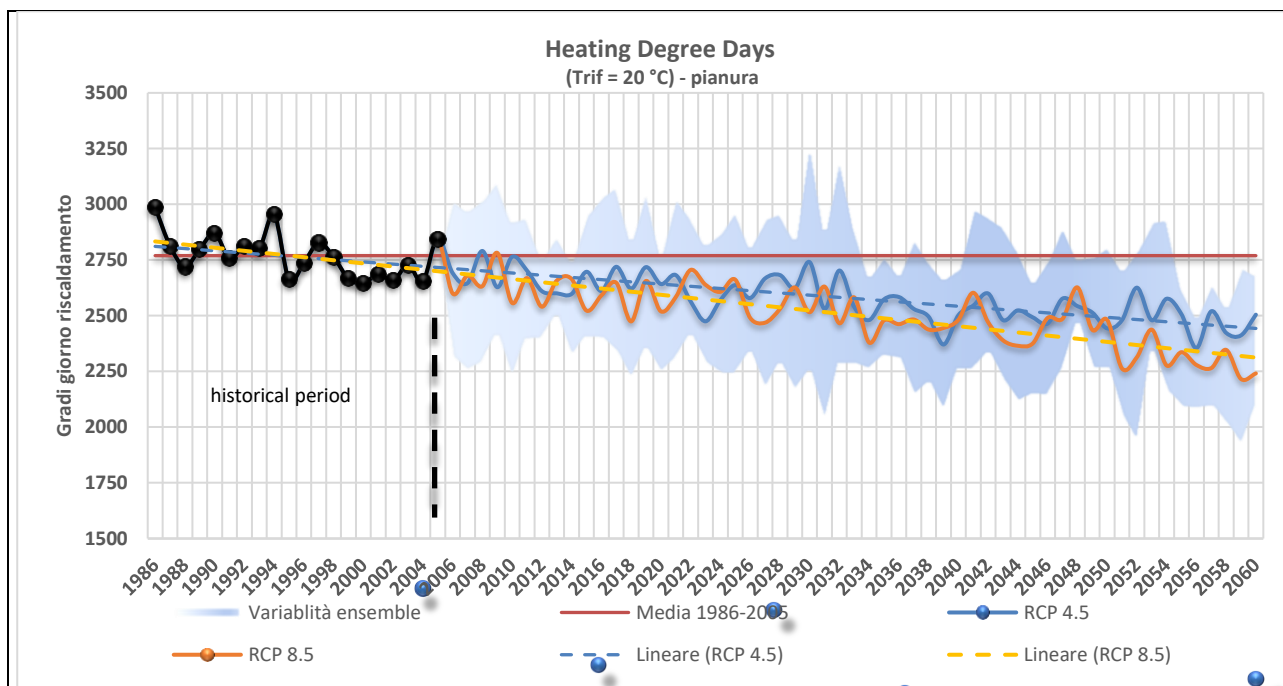
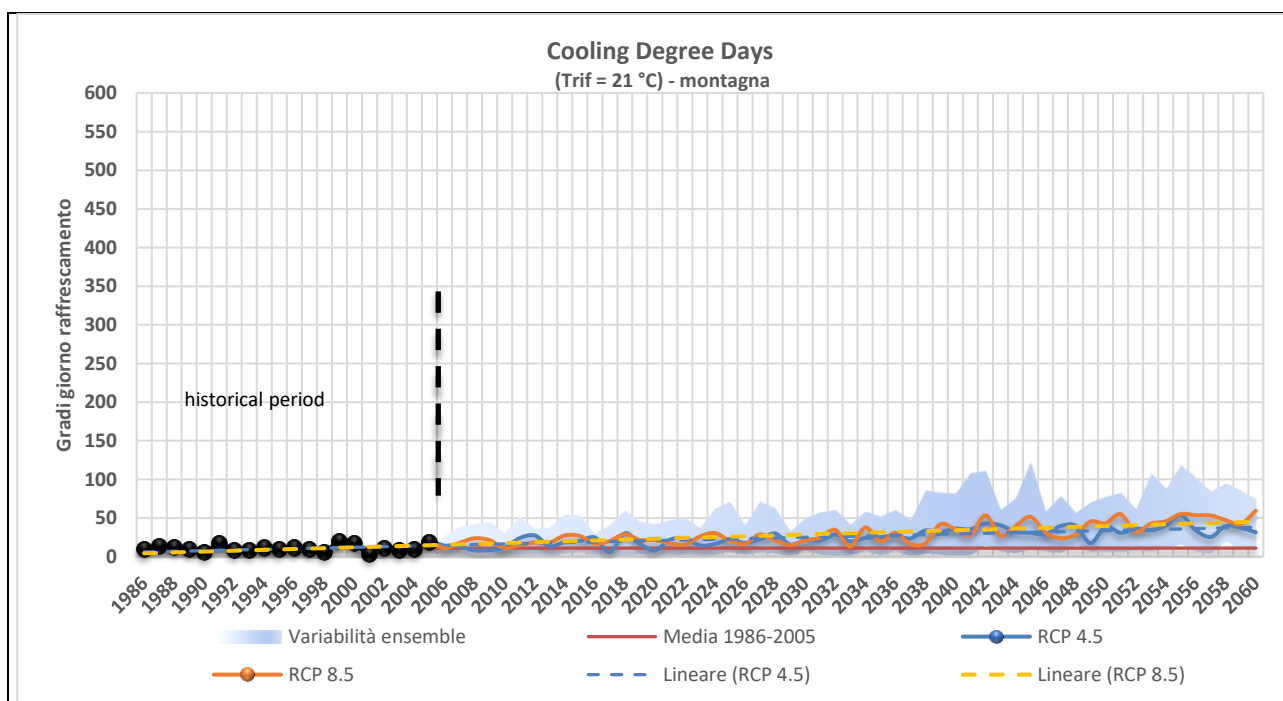


Figura 30: Numero medio di gradi giorno di riscaldamento sulle aree di montagna e pianura. Nel grafico sono riportate le medie degli ensemble per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. L'area sfumata rappresenta la variabilità dovuta ai singoli modelli di proiezione.

Dai grafici precedenti si ricava che dal 2006 al 2060, seguendo una tendenza lineare, si registrerà una riduzione media di HDD (gradi giorno di riscaldamento) pari a 325°C e 375°C rispettivamente in pianura ed in montagna.

Da un'analisi più approfondita, emerge che a fronte di una evidente riduzione dell'indice HDD, la durata complessiva del periodo di riscaldamento non cambia in modo significativo sul territorio regionale. A conferma di questa affermazione, si osserva che il numero di giorni nei mesi di ottobre ed aprile che contribuiscono con almeno 3°C al computo annuale di HDD rimangono sostanzialmente inalterati dal 2006 al 2060 in montagna, mentre diminuiscono non più di 5 giorni in pianura.



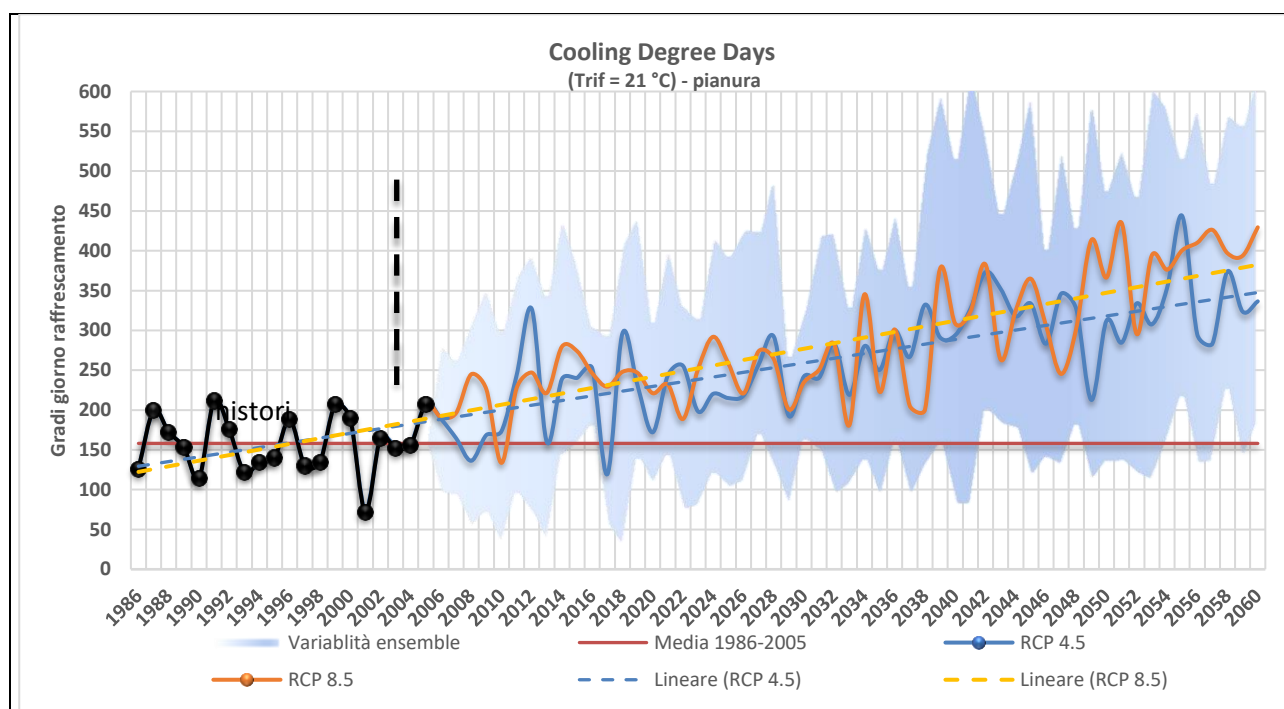


Figura 31: Numero medio di gradi giorno di raffrescamento sulle aree di montagna e pianura. Nel grafico sono riportate le medie degli ensemble per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. L'area sfumata rappresenta la variabilità dovuta ai singoli modelli di proiezione.

Il fabbisogno di raffrescamento estivo (dal mese di giugno a mese di settembre) risulta decisamente soggetto ad incremento nella zona di pianura, mentre in montagna l'incremento al 2060 è sostanzialmente irrilevante.

Ripercorrendo l'analisi eseguita per HDD, calcolando il numero di giorni annui che contribuiscono al computo totale di CDD (gradi giorno di raffrescamento) per più di 6°C, osserviamo che in montagna si passa dalla media storica (1986-2005) di zero al valore di 1,5 al 2060. In pianura, invece la situazione è decisamente più significativa: la media storica (1986-2005) è pari a 7 giorni, mentre il valore medio al 2060 sale a 22 giorni.

Precipitazione

La climatologia media del periodo di riferimento (1986-2005) per i giorni consecutivi caratterizzati da precipitazione (CWD) è rappresentata nella figura seguente.

Ensemble CORDEX: climatologia media numero massimo giorni consecutivi con pioggia (CWD) - 1986-2005 - rcp 4.5

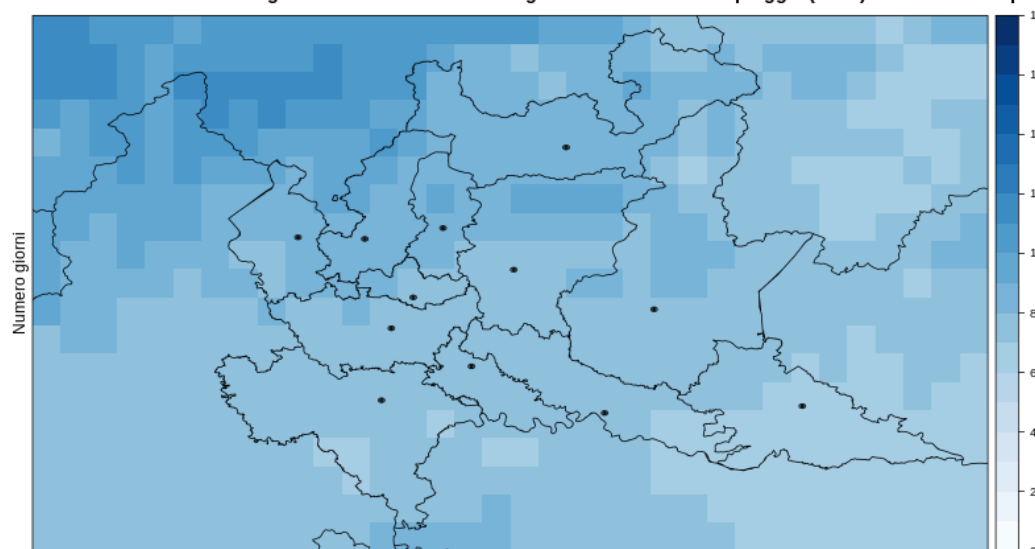


Figura 32: climatologia media del massimo numero di giorni consecutivi con pioggia, periodo di riferimento (1986-2005)

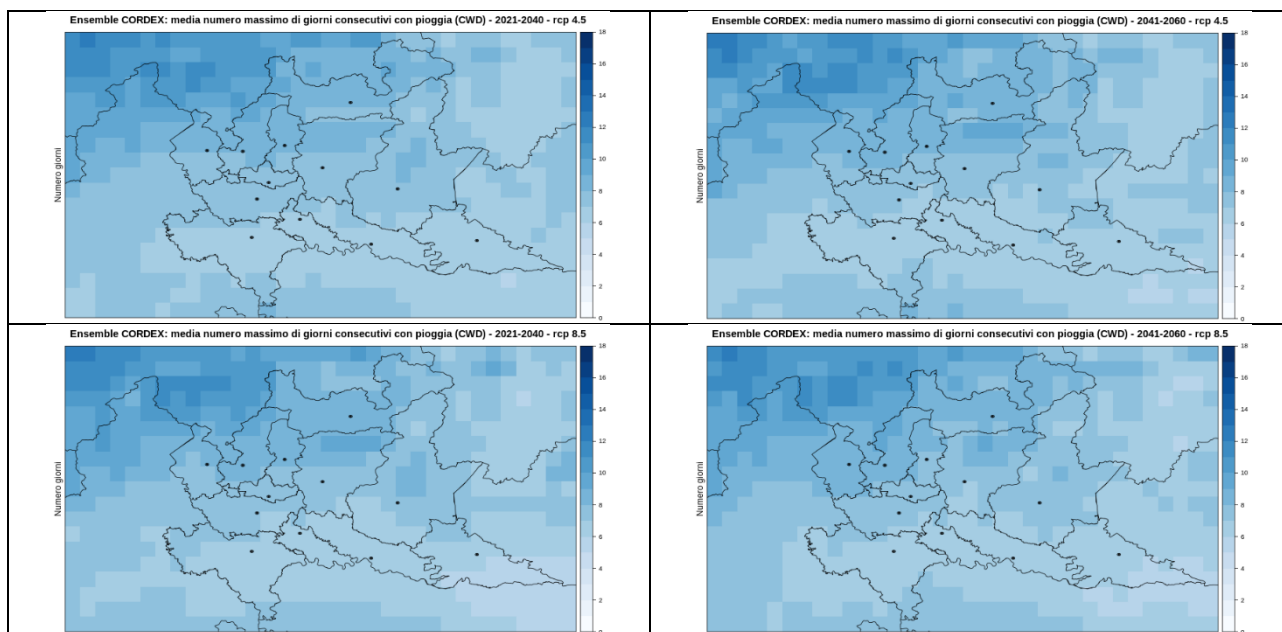


Figura 33: climatologia media del massimo numero di giorni consecutivi con precipitazione, scenario RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra).

Le variazioni riscontrabili nei periodi di proiezione per i giorni consecutivi di precipitazione sono limitate a 1-2 giorni, il che lascia presumere che la quantità complessiva di precipitazione non vari. Tuttavia, osservando le anomalie delle precipitazioni intense (superiori a 20mm, R20) si osserva una certa tendenza ad un incremento nella fascia prealpina-orobica e nell'alto bacino del Ticino soprattutto nello scenario RCP8.5, mentre lo scenario emissivo RCP4.5 denota un minor numero di giorni con precipitazione intensa nella parte ovest e meridionale della regione.

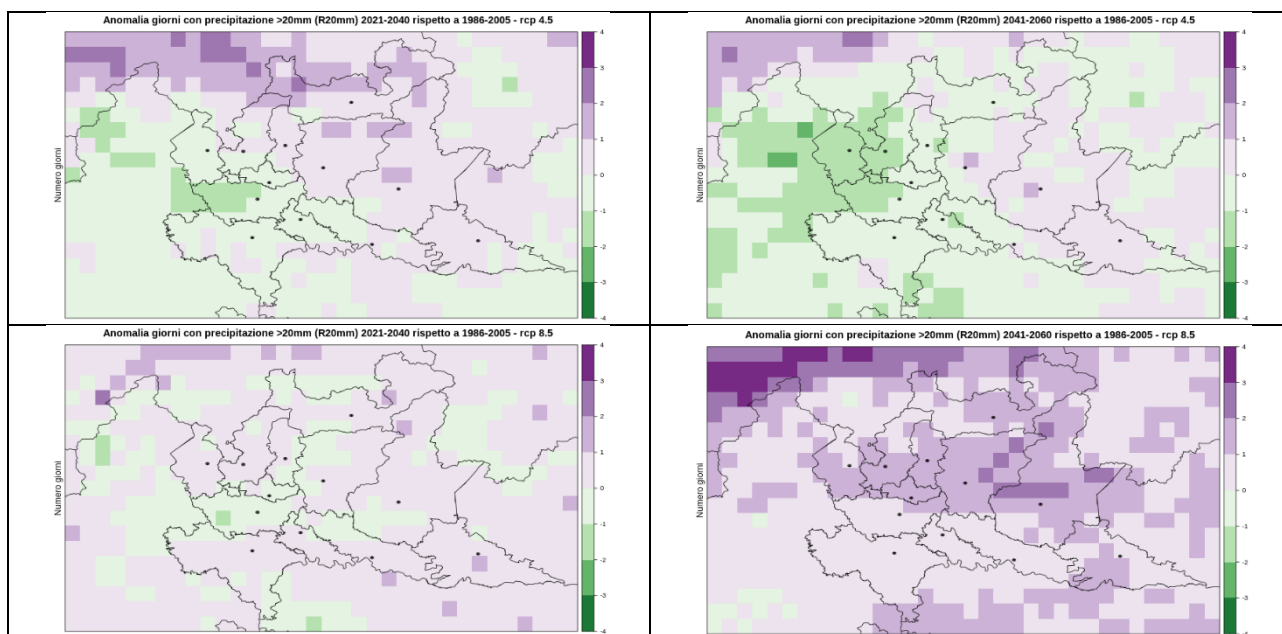


Figura 34: anomalia dei giorni con precipitazione intensa rispetto al periodo di riferimento (1986-2005), scenario RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra).

Il segnale più evidente, tuttavia, sembra essere fornito dall'indice Rx1day, che esprime su base mensile il valore più alto di precipitazione cumulata giornaliera. Infatti, se si esamina il 90° percentile del massimo valore assunto da Rx1day durante l'anno nel corso del ventennio considerato, emerge che nel periodo vicino

e medio si prevede un incremento generalizzato del quantitativo massimo giornaliero di precipitazione su tutto il territorio regionale, con valori all'incirca tra il 50% ed il 150%.

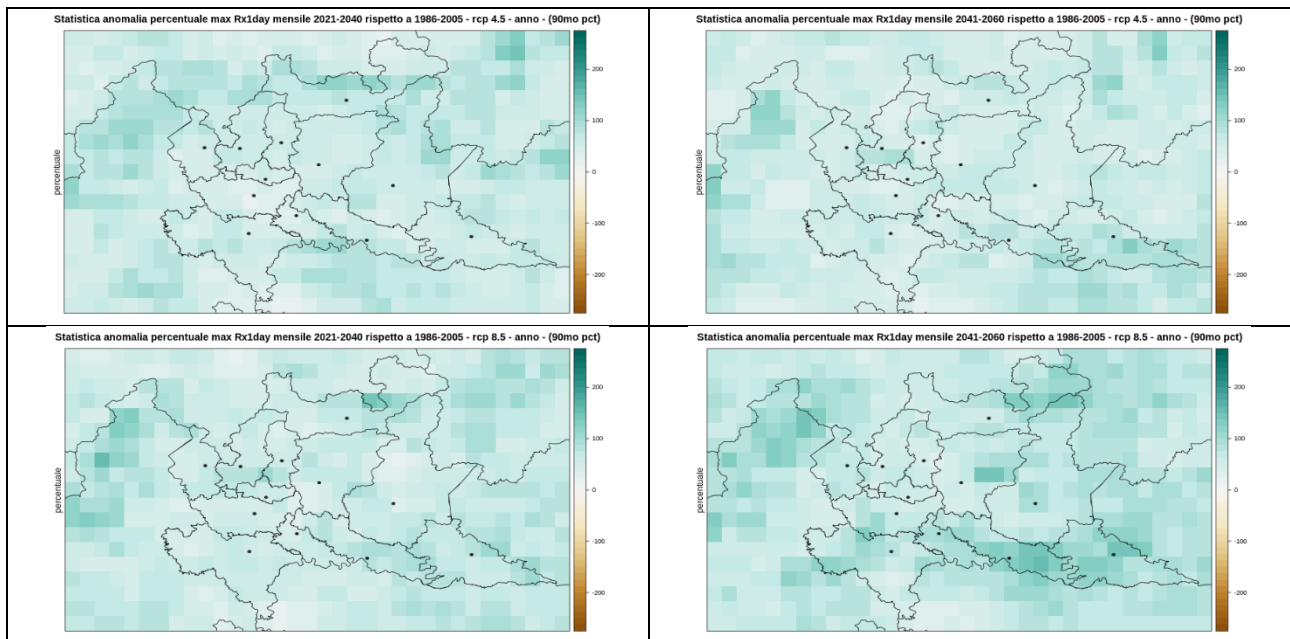


Figura 35: anomalia percentuale del 90° percentile del massimo annuale dell'indice Rx1day rispetto al periodo di riferimento (1986-2005), scenario RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra).

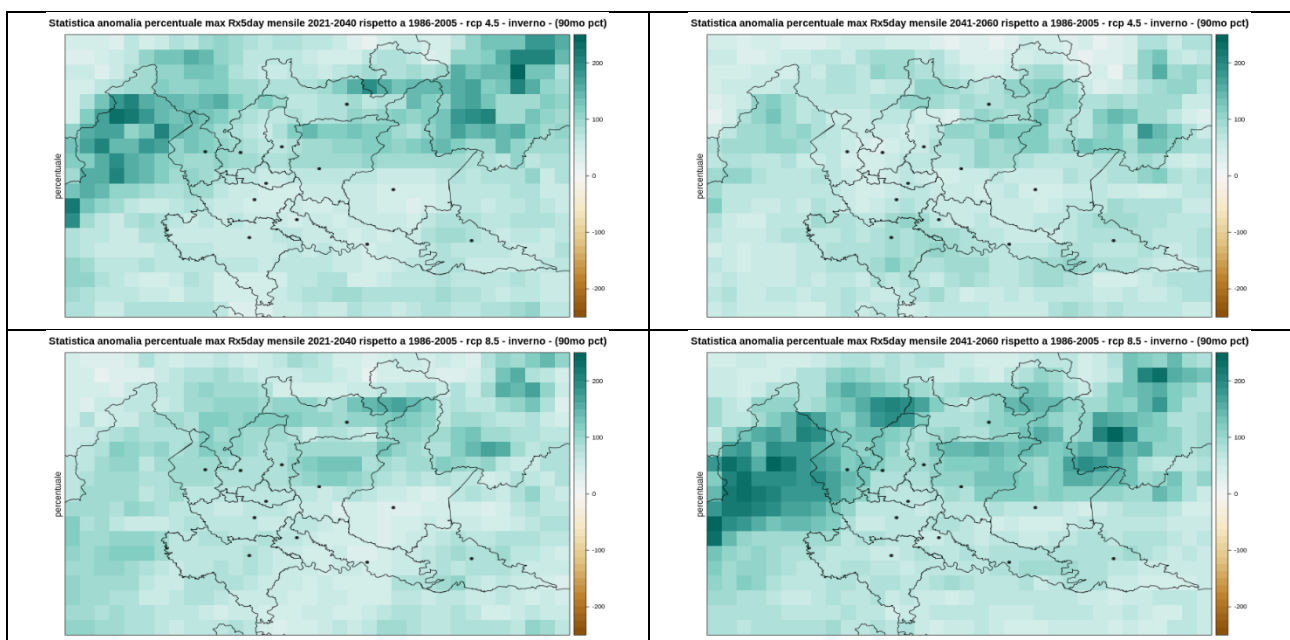


Figura 36: anomalia percentuale del 90° percentile del massimo invernale (DGF) dell'indice Rx5day rispetto al periodo di riferimento (1986-2005), scenario RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra).

La maggiore frequenza di fenomeni di precipitazione intensa è una tendenza che si conferma anche considerando l'analogo indice Rx5day ed anche a livello di singole stagioni. Il fenomeno, tuttavia, assume entità più rilevante in inverno e coinvolge soprattutto il quadrante nordorientale (province di Bergamo, Brescia, Sondrio).

Le valutazioni inerenti alla precipitazione non consentono di identificare tendenze particolarmente marcate per i quantitativi complessivi. Si può in ogni caso desumere una certa invarianza per il settore alpino per il quale, però, il modello non distingue tra precipitazione nevosa e liquida, rendendo difficile una valutazione

sull'impatto nel sistema di produzione idroelettrica. L'effetto combinato di una minore disponibilità idrica in pianura e una relativa invarianza in montagna sembra comunque acuire le difficoltà gestionali della risorsa soprattutto in periodi di siccità prolungata in corrispondenza della stagione vegetativa più critica delle colture.

L'incremento di eventi intensi, invece, sebbene non faccia dedurre impatti diretti sui sistemi energetici, certamente è un fenomeno non trascurabile, che può determinare criticità per i manufatti in generale.

Radiazione Solare

La radiazione solare è il parametro fondamentale per affrontare qualsiasi discussione inerente la produttività fotovoltaica. Essa, tuttavia, dipende anche da altre variabili climatiche, tra cui la temperatura e la ventilazione. Un semplice modello, seppur non attualmente standardizzato, viene proposto per definire un indice di "potenziale fotovoltaico" (PVpot), adattando ai dati in nostro possesso esperienze pregresse¹².

L'indice adimensionale, compreso tra 0 e 1 (ove "0" definisce un potenziale produttivo nullo, mentre "1" indica un potenziale produttivo massimo per un data installazione), è definito su base giornaliera, come segue:

$$PVpot = \alpha_1 rsds + \alpha_2 rsds^2 + \alpha_3 rsds * tasmx + \alpha_4 rsds * vws$$

dove:

rsds = valore massimo giornaliero del flusso superficiale di radiazione solare a corta lunghezza d'onda (W/m²)

tasmx = temperatura massima giornaliera a 2m (°C)

vws = velocità media giornaliera del vento a 2m (m/s)

$\alpha_1 = 1.1035 \times 10^{-3}$, $\alpha_2 = -1.4 \times 10^{-7}$, $\alpha_3 = -4.715 \times 10^{-6}$, $\alpha_4 = 7.64 \times 10^{-6}$ nelle corrispondenti unità di misura, in modo che PVpot risulti adimensionale.

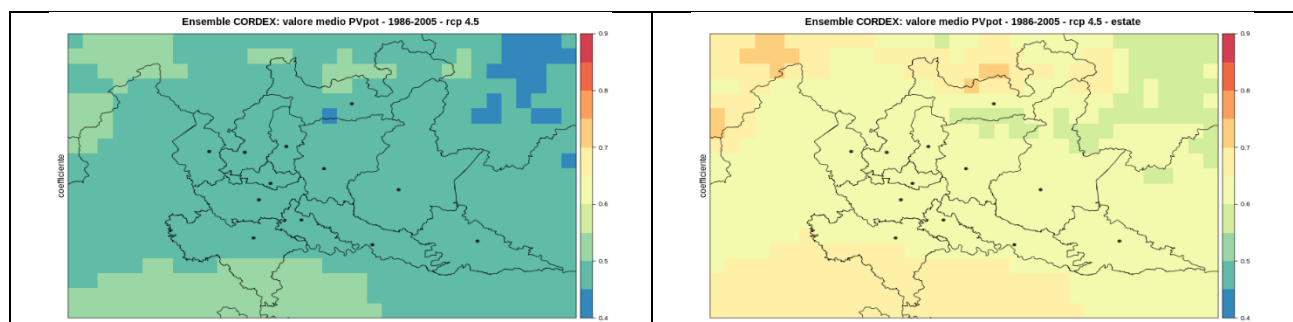


Figura 37: potenziale fotovoltaico (PVpot) nel periodo storico (1986-2005). Andamento medio annuo (sinistra) e media stagionale estiva (destra).

La climatologia restituisce un potenziale fotovoltaico medio annuale su tutto il territorio regionale intorno al 50%. Focalizzandosi sulla stagione di massima produttività, ovvero l'estate, il potenziale aumenta e risulta compreso tra il 60% ed il 70%.

Le proiezioni del potenziale fotovoltaico tengono conto delle proiezioni delle ECV già discusse. Occorre considerare che, a parità di altri parametri, l'incremento della radiazione solare, così come una maggiore ventilazione, determina un aumento del potenziale, mentre un aumento della temperatura agisce in senso opposto. È interessante, pertanto, scoprire quale di queste azioni sia in grado di prevalere sull'altra.

¹² Nature Communications 2015, The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe

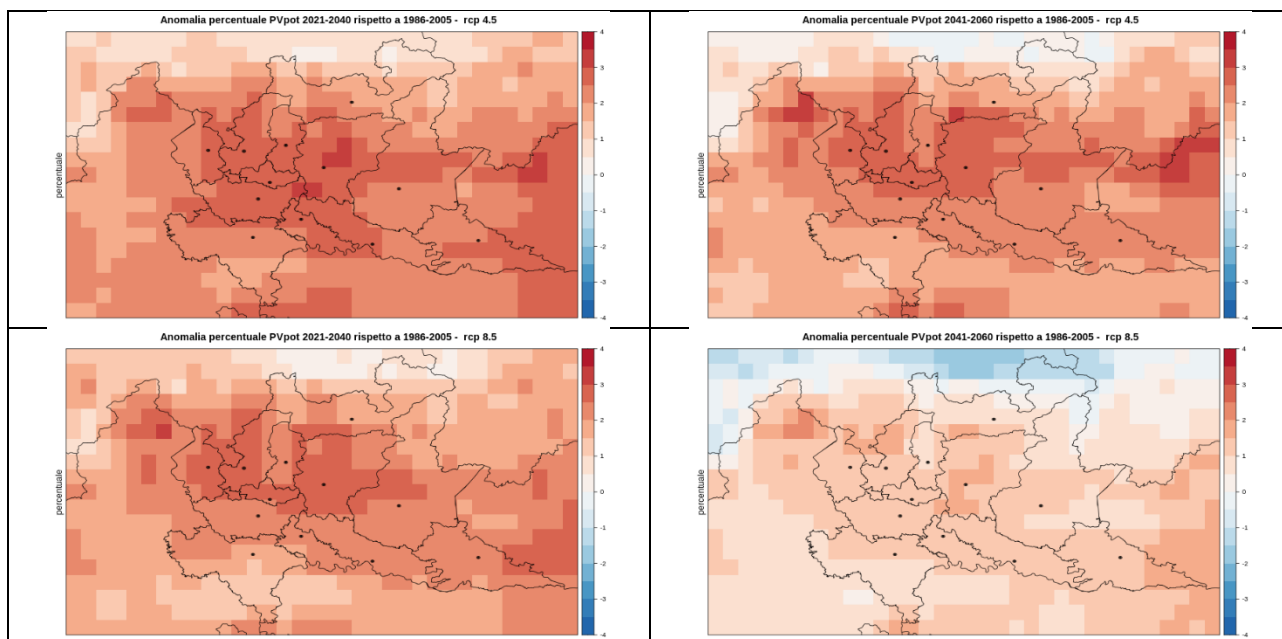


Figura 38: anomalia percentuale del potenziale fotovoltaico (PVpot) annuale rispetto al periodo di riferimento (1986-2005), scenario RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra).

Con una ventilazione in superficie sostanzialmente inalterata, l'effetto contrapposto dell'aumento del flusso solare e della temperatura superficiale si bilanciano, mostrando un potenziale fotovoltaico sostanzialmente inalterato sulla regione Lombardia. Il lieve incremento percentuale medio (1-3%, in linea con studi condotti a livello europeo, cfr. nota 11) nello scenario RCP 4.5, sia nel periodo vicino sia in quello medio, tende a svanire nella proiezione a medio termine nello scenario RCP8.5.

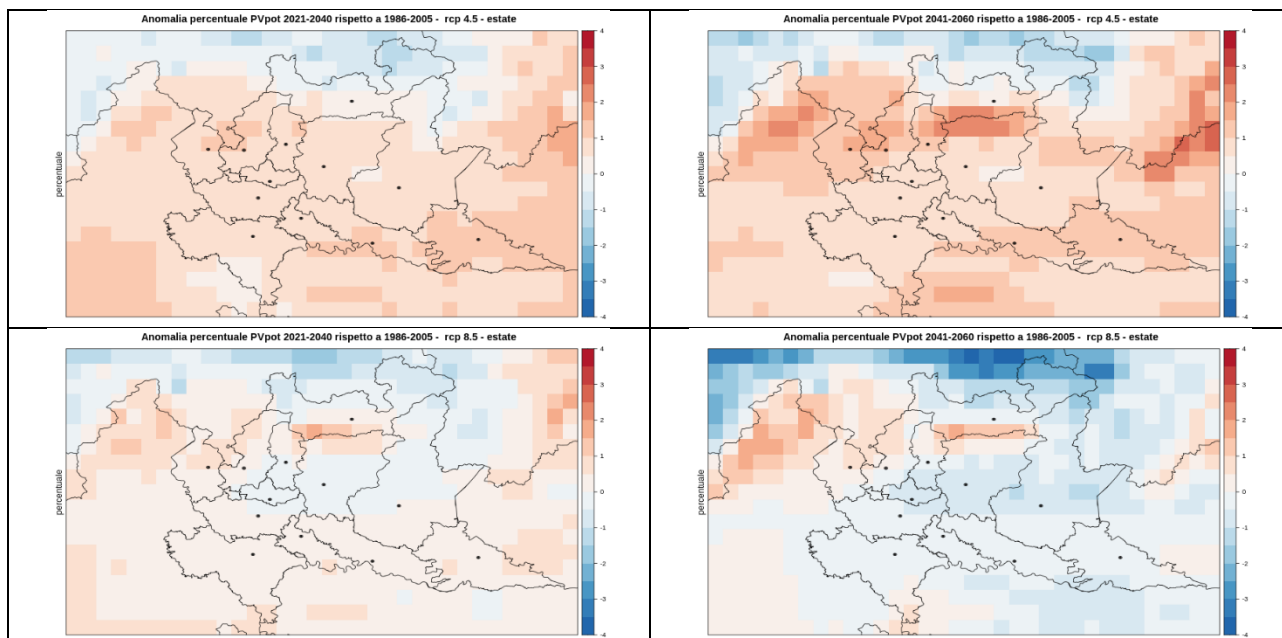


Figura 39: anomalia percentuale del potenziale fotovoltaico (PVpot) estivo rispetto al periodo di riferimento (1986-2005), scenario RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra).

L'esame dello scenario estivo conferma sostanzialmente la stabilità del potenziale fotovoltaico sulla regione, anche se in questo caso non si nota il leggero incremento evidenziato a livello annuale. Dal confronto tra i dati annuali e quelli estivi si può dedurre che in futuro la produttività delle stagioni intermedie aumenterà a

parziale discapito di quella estiva, evidentemente caratterizzata sempre più da temperature oltre i valori di massima efficienza dei pannelli fotovoltaici.

Vento

L'indice W10, ovvero il numero di giorni all'anno con velocità del vento a 2 m di altezza superiore a 10 m/s conferma quanto già emerso a livello di esame della variabile essenziale. La Lombardia non è caratterizzata da vento significativo, tant'è che il numero di giorni all'anno con velocità media del vento superficiale superiore a 10 m/s è sempre inferiore a 5 e non si prevedono modifiche di questa situazione nei decenni a venire.

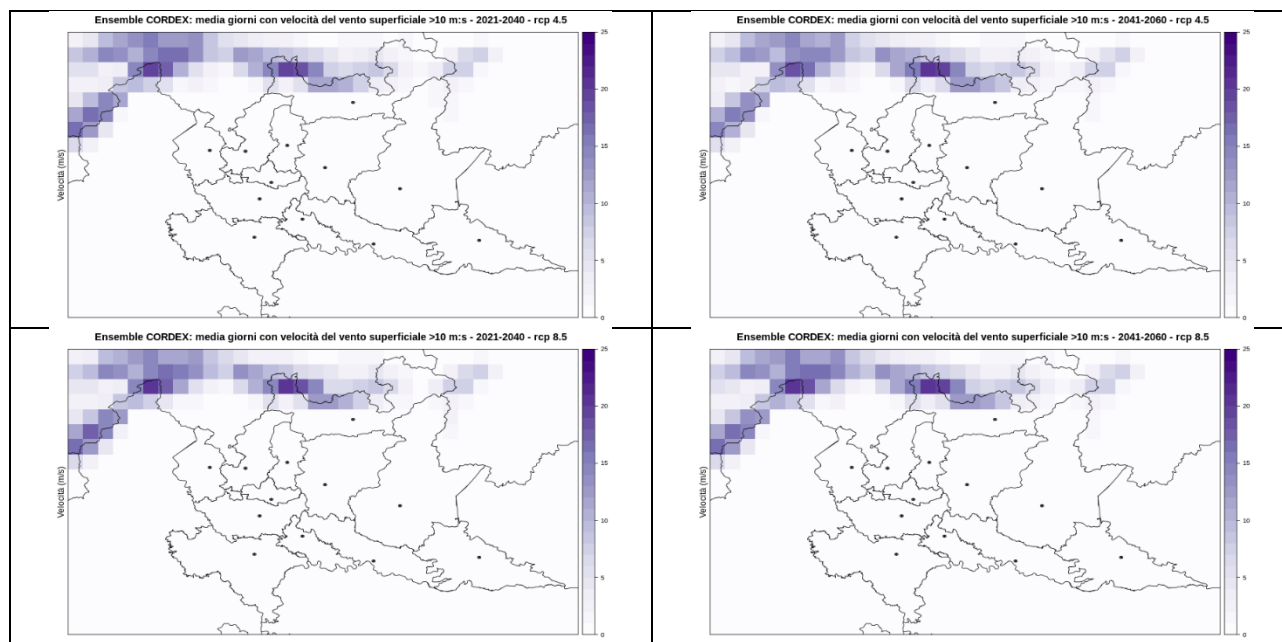


Figura 40: numero medio di giorni nell'anno con velocità media del vento a 2 metri di quota superiore a 10 m/s (W10) rispetto al periodo di riferimento (1986-2005), scenario RCP4.5 (sopra) e RCP8.5 (sotto) per il periodo vicino (2021-2040, sinistra) e medio (2041-2060, destra).

Scenari di impatto: IPCC AR6

Il 6° rapporto dell'IPCC-WG1 (AR6) è stato rilasciato all'inizio di agosto 2021 e riporta le conclusioni a cui l'IPCC è giunto sulle basi fisiche del cambiamento climatico: si tratta quindi dello stato dell'arte delle conoscenze climatologiche disponibili ad oggi.

Nell'impostazione dell'IPCC, gli scenari climatici di riferimento corrispondenti alla valutazione della variazione di forzante radiativa precedentemente noti come RCP4.5 e RCP8.5 (4.5 e 8.5 W/m²) sono stati scomposti in più scenari definiti *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), ciascuno dei quali porta a uno o più scenari climatici con gli stessi valori di forzante climatica. Per il nostro scopo, descriviamo i due SSP di interesse¹³:

SSP2: medio impegno per la mitigazione e l'adattamento ("Middle of the Road"): il cambiamento sociale, economico e tecnologico non cambia molto dal percorso evolutivo attuale. Lo sviluppo prosegue in modo diseguale, con alcuni paesi che raggiungono gli obiettivi di sviluppo sostenibile ed altri no. Le istituzioni internazionali e quelle nazionali lavorano nella prospettiva di maggiore sostenibilità ma il progresso è lento. Gli ecosistemi subiscono un costante degrado, sebbene ci siano alcuni miglioramenti locali e complessivamente il consumo delle risorse diminuisce. L'incremento della popolazione è moderato e si arresta dopo il 2050. La disuguaglianza del reddito persiste o migliora solo lentamente

¹³ Riahi et al. 2017 - <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

e rimangono aperte le questioni relative alla vulnerabilità della società e dell'ambiente al cambiamento climatico.

SSP5: sviluppo con le fonti fossili ("Taking the Highway"): aumenta la fiducia che mercati competitivi, innovazione e rapido progresso tecnologico porti allo sviluppo sostenibile, con mercati fortemente integrati a livello mondiale. Ci sono forti investimenti nella salute, educazione e nelle Istituzioni per rafforzare il capitale umano. Tuttavia, il progresso è associato all'utilizzo massiccio di combustibili fossili e con uno stile di vita che richiede molta energia e risorse in tutto il mondo. Tutti questi fattori portano ad una rapida crescita economica, mentre la popolazione cresce fino ad un picco che viene raggiunto nel XXI secolo. I problemi locali come l'inquinamento atmosferico sono gestiti in modo ottimale. C'è fiducia nell'abilità dell'umanità di gestire il sistema sociale ed ecologico, includendo attività di geoingegneria, se necessario.

Questi due scenari vengono associati allo scenario in cui la forzante radiativa corrisponde a quelli RCP4.5 e RCP 8.5 rispettivamente, diventando quindi SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

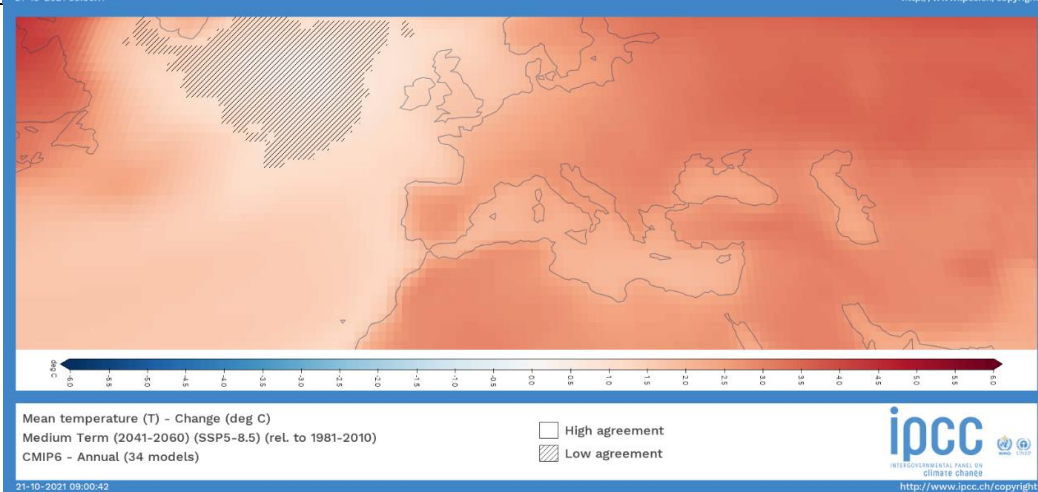
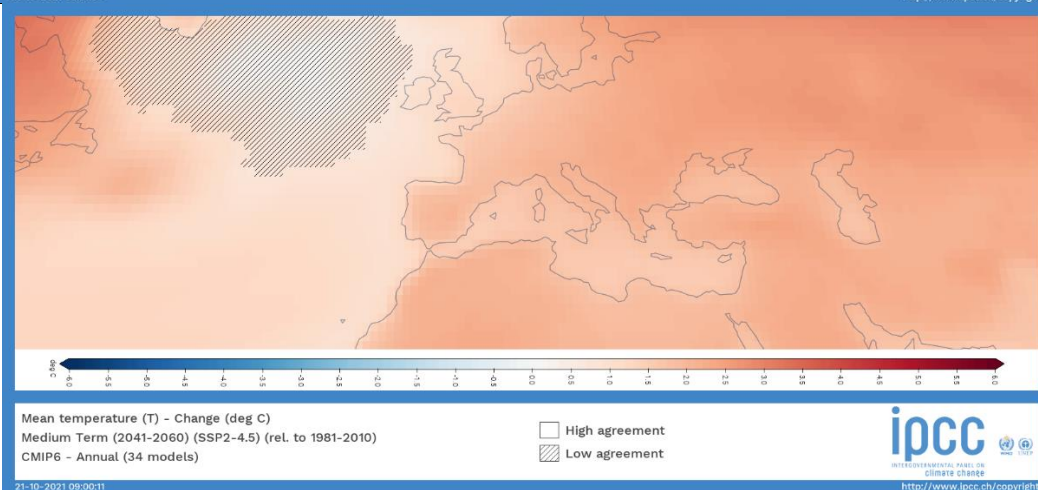
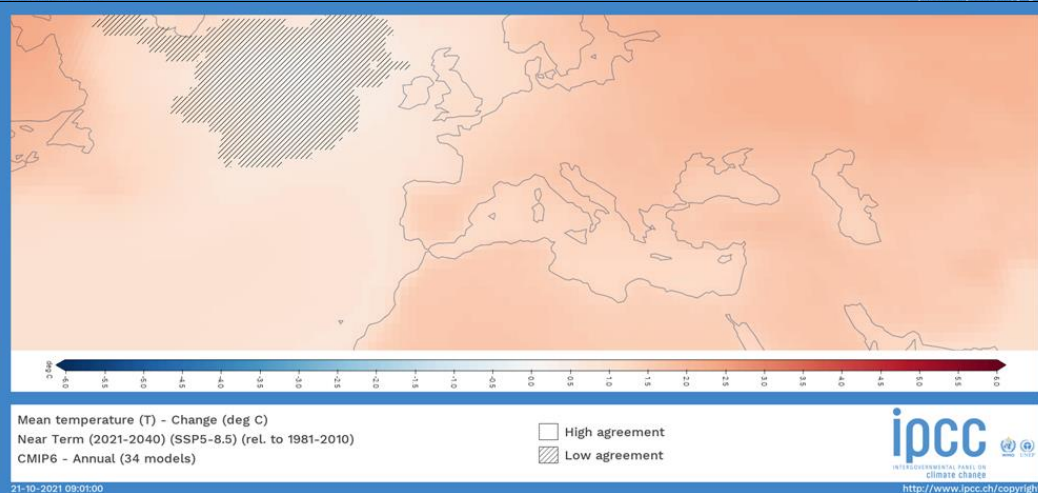
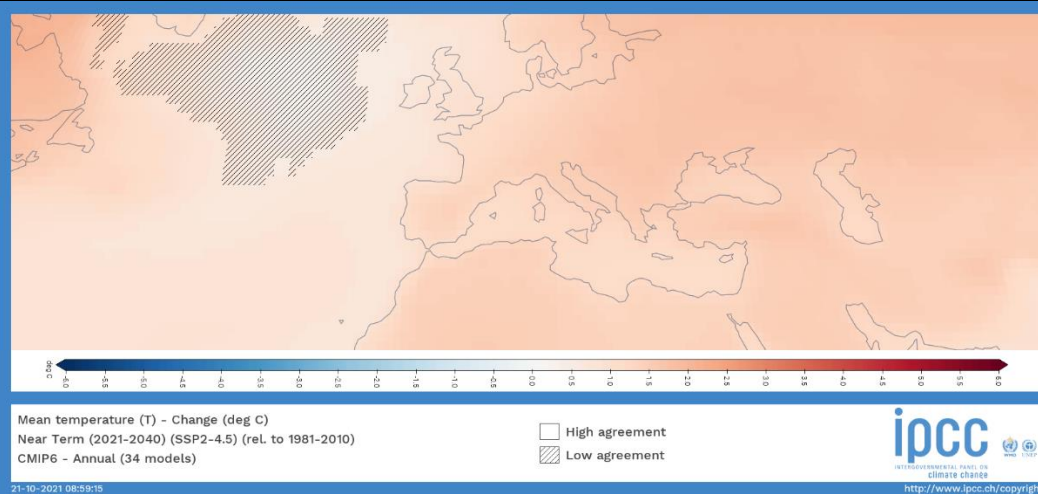
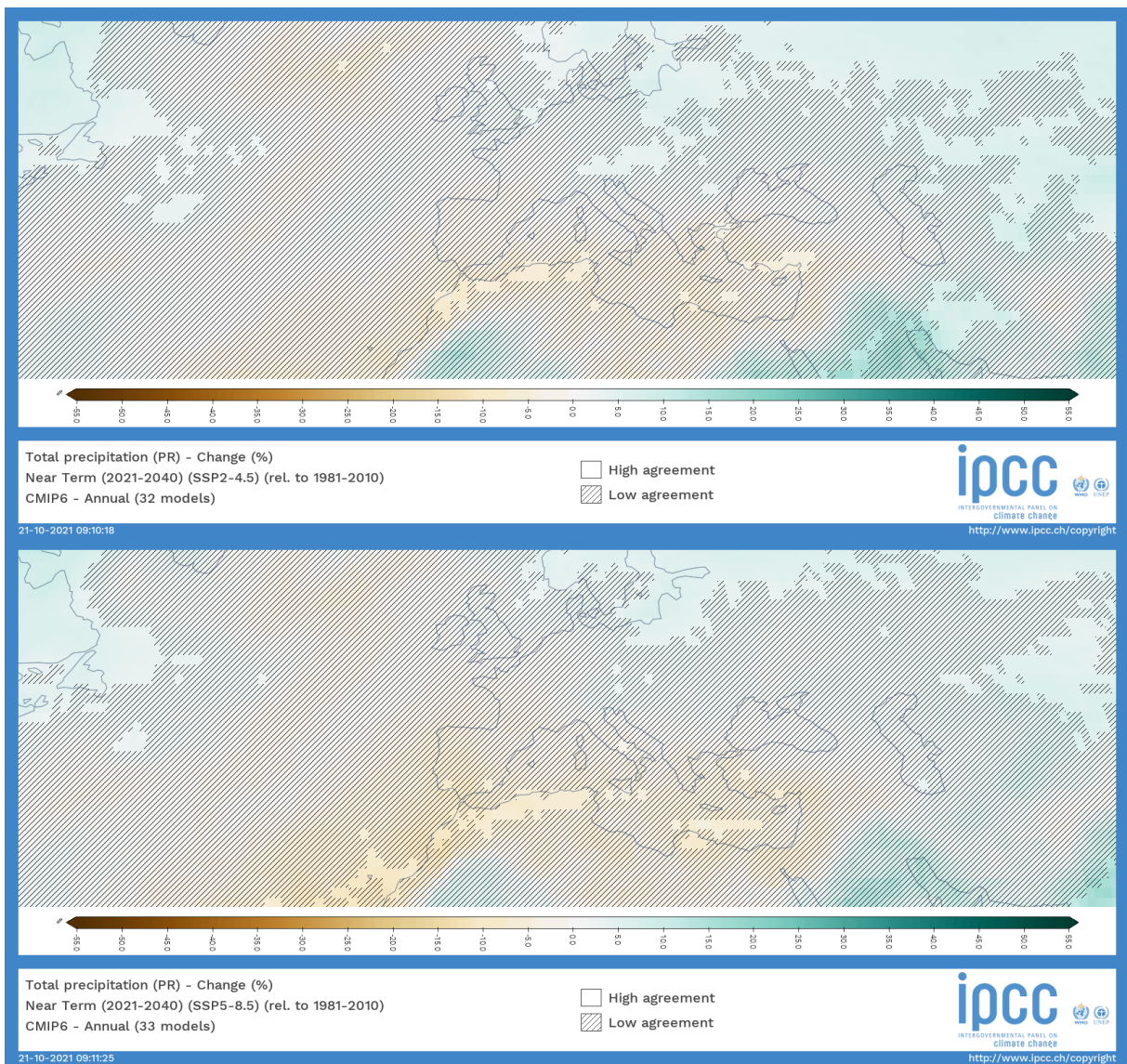


Figura 41: Variazione assoluta (°C) della temperatura tra il periodo vicino (2021-2040, sopra) e medio (2041-2060, in basso) e quello di riferimento (1981-2010) nei due scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5



segue

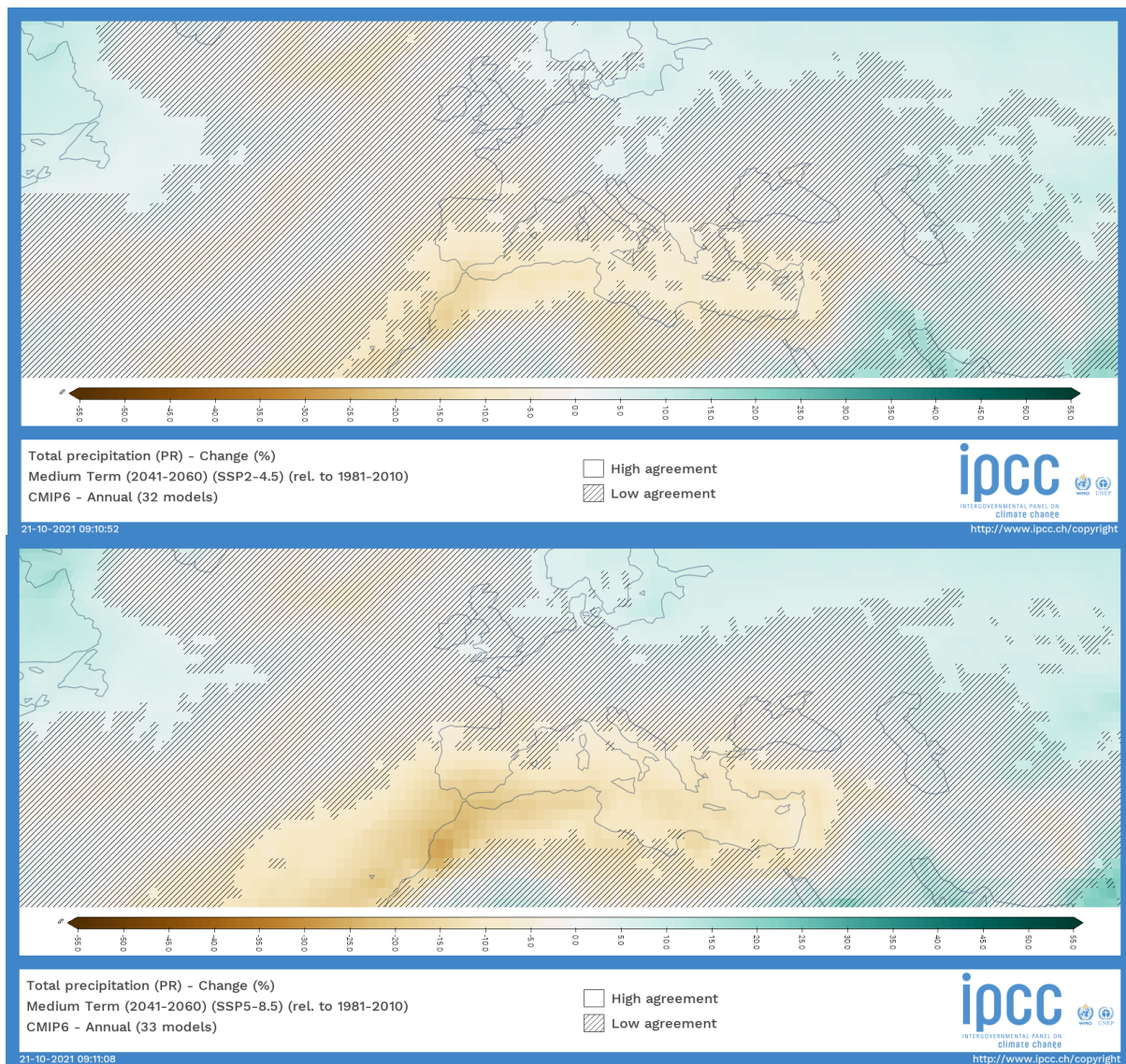


Figura 42: Variazione relativa (%) della precipitazione tra il periodo vicino (2021-2040, pag. prec.) e medio (2041-2060, in basso) e quello di riferimento (1981-2010) nei due scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5

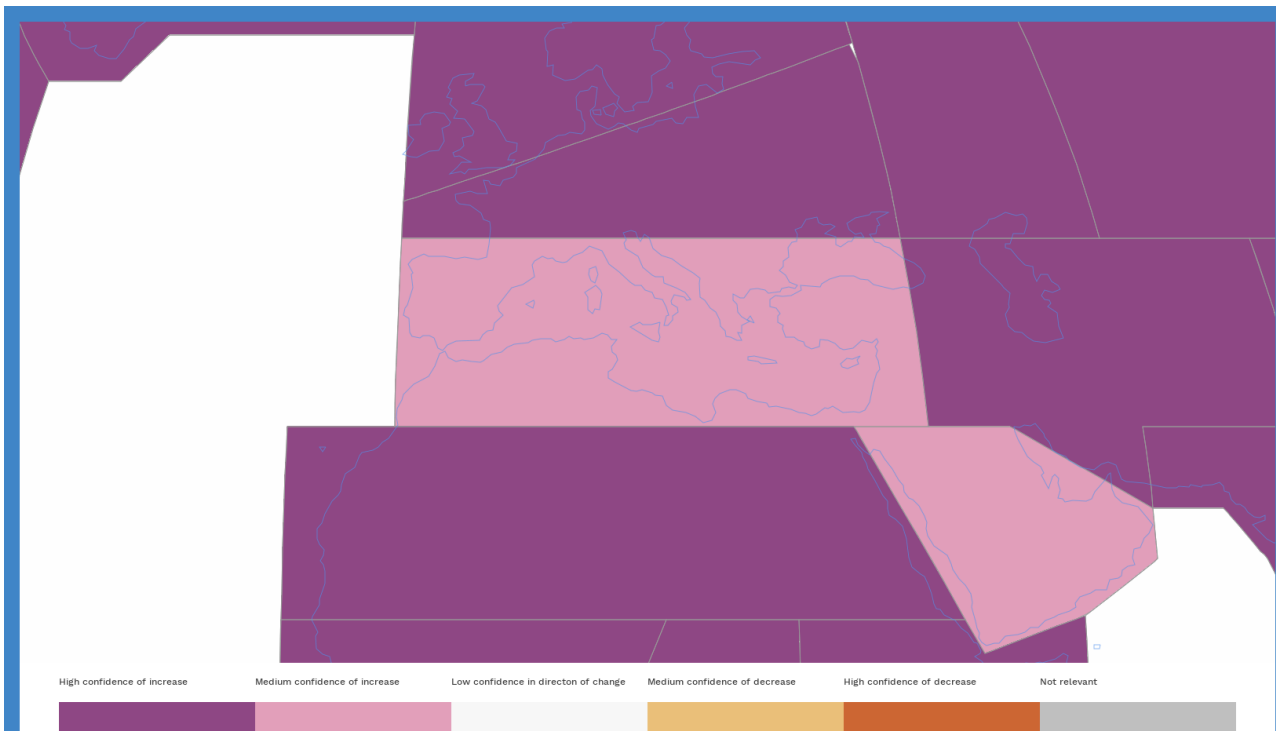
Come si può osservare dalle due figure, la variazione di temperatura attesa nei due scenari per il periodo vicino differisce in modo impercettibile, mentre le variazioni diventano più consistenti nel periodo successivo.

Per quanto riguarda la precipitazione, le incertezze non consentono allo stato attuale di attestare un quadro univoco nella nostra regione, per quanto la tendenza in alcune aree dell'Europa centrale veda un aumento dell'ordine del 5-10% e una corrispondente diminuzione invece per l'Italia centrale e meridionale, più definita nello scenario SSP5-8.5.

Un capitolo del report finale AR6 (Cap.12, corrispondente alla parte C del "Summary for Policymakers") contiene le informazioni per la valutazione degli impatti e del rischio associato al cambiamento climatico, basato sui "climatic impact-driver" (CID), ovvero sui fenomeni climatici rilevanti¹⁴ in grado di colpire elementi della società o ecosistemi la cui protezione è prioritaria. Naturalmente, il AR6 riguarda l'intero Pianeta, ma è stato messo a disposizione un atlante (interactive-atlas.ipcc.ch) che consente di identificare gli impatti specifici della regione di interesse.

L'area della Lombardia è suddivisa in due regioni climatiche: quella del Mediterraneo (per la parte di pianura) e quella dell'Europa Occidentale (per l'arco Alpino), rendendo quindi necessaria una valutazione degli impatti specifica per le due aree.

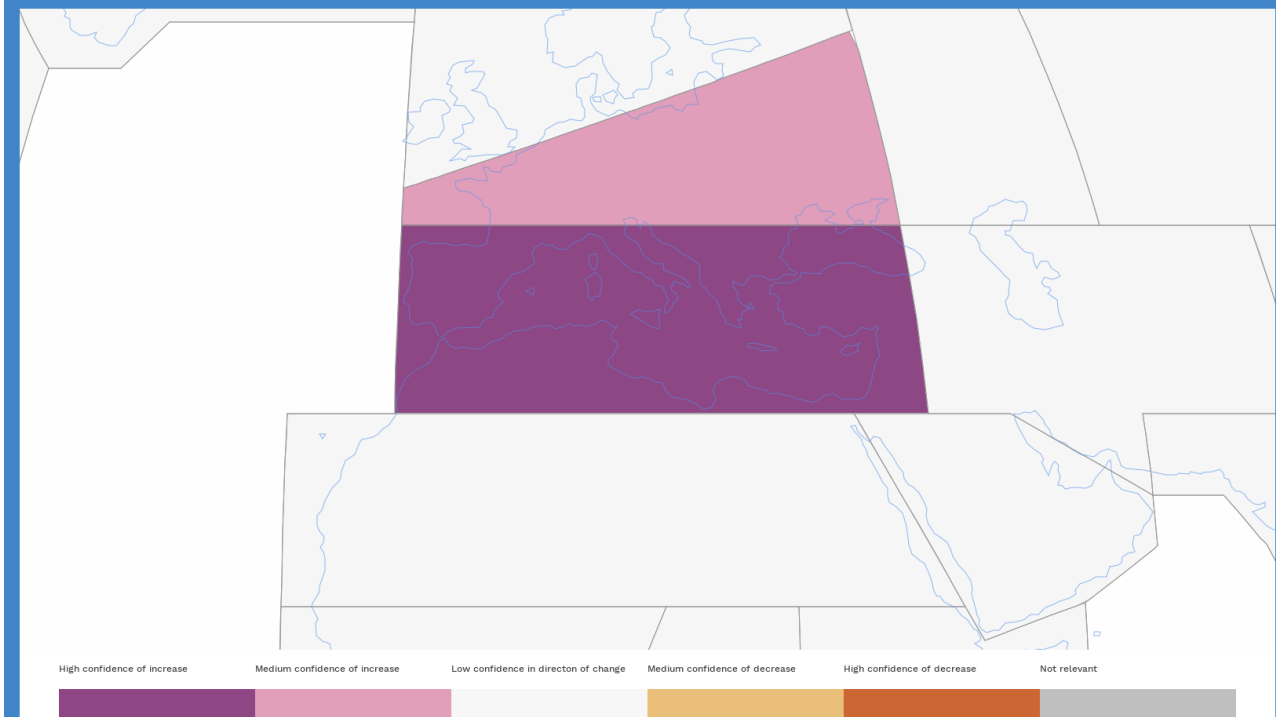
¹⁴ Espresso come medie, eventi o estremi climatici



Heavy precipitation and pluvial flood (Projections)

The Interactive Atlas provides regional synthesis of observed trends and projected changes in climatic impact-drivers (CIDs) from the Technical Summary (Section TS.4 and Table TS.5) and the Summary for Policymakers (Subsection C.2 and Figure SPM.9).

21-10-2021 08:54:55



Hydrological drought (Projections)

The Interactive Atlas provides regional synthesis of observed trends and projected changes in climatic impact-drivers (CIDs) from the Technical Summary (Section TS.4 and Table TS.5) and the Summary for Policymakers (Subsection C.2 and Figure SPM.9).

21-10-2021 08:55:04

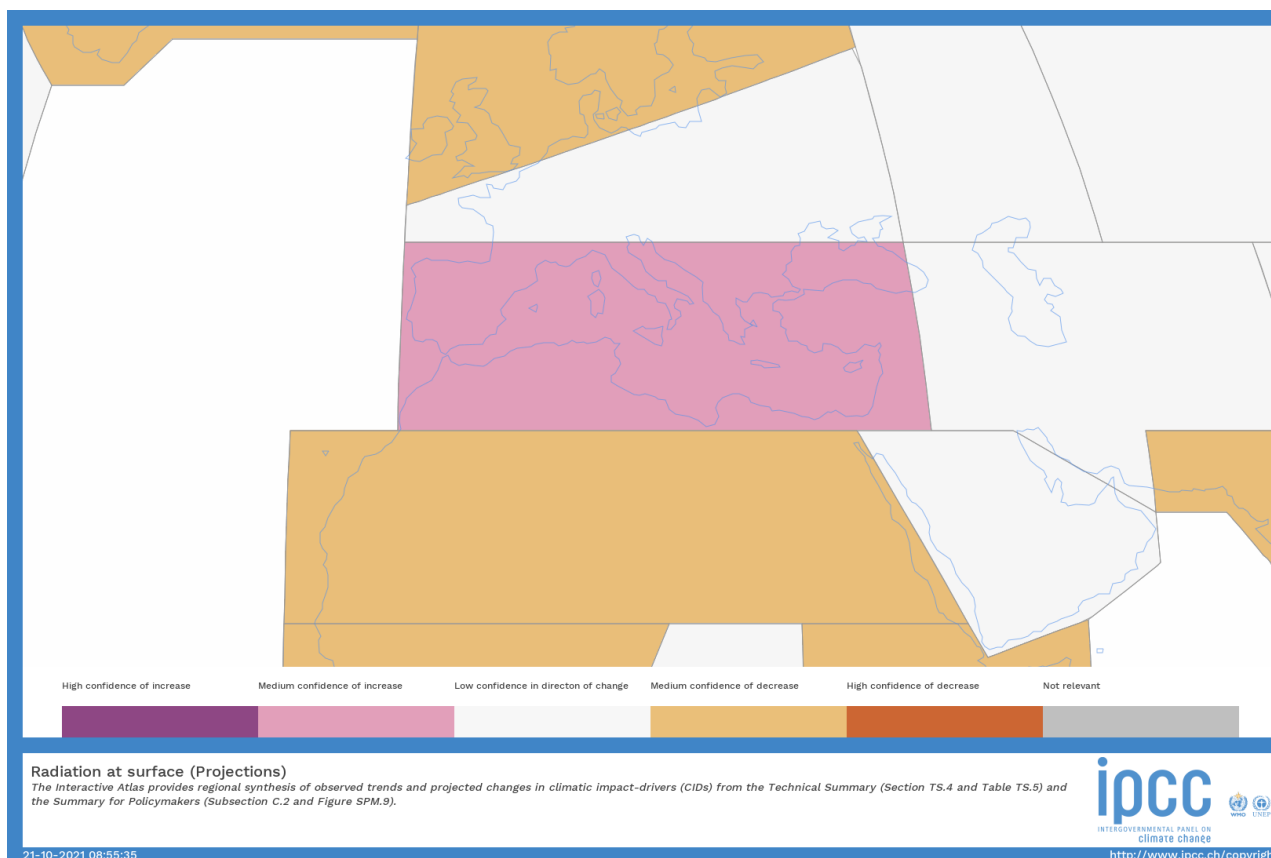


Figura 43: impatti climatici in termini di eventi estremi (pag. prec.: sistema idrologico) e medi (in questa pagina: radiazione solare).

L'analisi delle risultanze derivanti dall'IPCC evidenzia la differenza tra la regione alpina e quella della pianura della Lombardia, cosa che deriva probabilmente dalla spiccata schematizzazione delle regioni climatiche, anche se la tendenza appare complessivamente consistente con le risultanze ottenute da altri (si vedano i paragrafi seguenti).

Scenari di impatto: Impact2C

Il progetto IMPACT2C¹⁵, finanziato dall'UE, è stato realizzato tra il 2011 e il 2015, sulla base dei modelli RCM disponibili: scopo dello studio era definire gli impatti attesi in uno scenario in cui l'incremento di temperatura raggiunge +2°C rispetto al periodo pre-industriale¹⁶, assumendo che tale valore venga raggiunto nel trentennio climatico 2071-2100. Tuttavia, gli impatti previsti sono indipendenti dal momento in cui tale valore viene raggiunto e rappresentano, quindi, un riferimento interessante per la valutazione degli impatti con una situazione compatibile con (il limite superiore) gli accordi di Parigi.

Uno dei vantaggi offerti dallo studio è quello di considerare l'incertezza, intesa come la variabilità dei risultati di diversi modelli con diverse impostazioni sulla fisica del clima o di approccio numerico, portando così ad un ensemble multi modello, considerato generalmente più robusto che non un singolo modello o un ensemble del singolo modello ottenuto con una perturbazione delle condizioni iniziali del sistema climatico.

A valle della modellizzazione e della correzione del bias è stato valutato l'impatto utilizzando una serie di modelli che hanno utilizzato come input l'output dei modelli climatici.

¹⁵ https://impact2c.hereon.de/imperia/md/content/csc/projekte/impact2c_d5.1_fin.pdf

¹⁶ Come periodo pre-industriale è stato considerato il periodo 1971-2000 + 0,43°C.

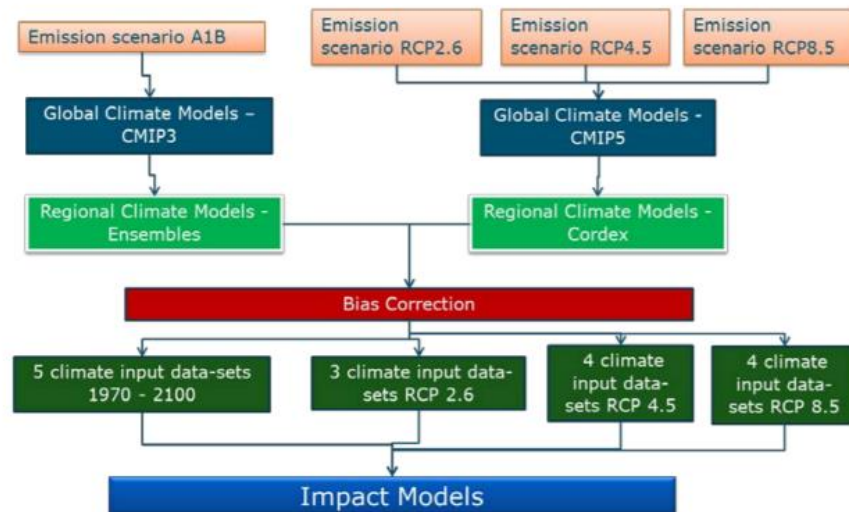


Figura 44: schema della stima degli impatti climatici per IMPACT2C

Gli impatti sono stati valutati per il comparto idrogeologico, per quello agricolo, per il turismo e per il settore energetico.

Nelle figure seguenti sono riportati alcuni dei risultati principali per gli impatti identificati per alcuni parametri del settore energetico.

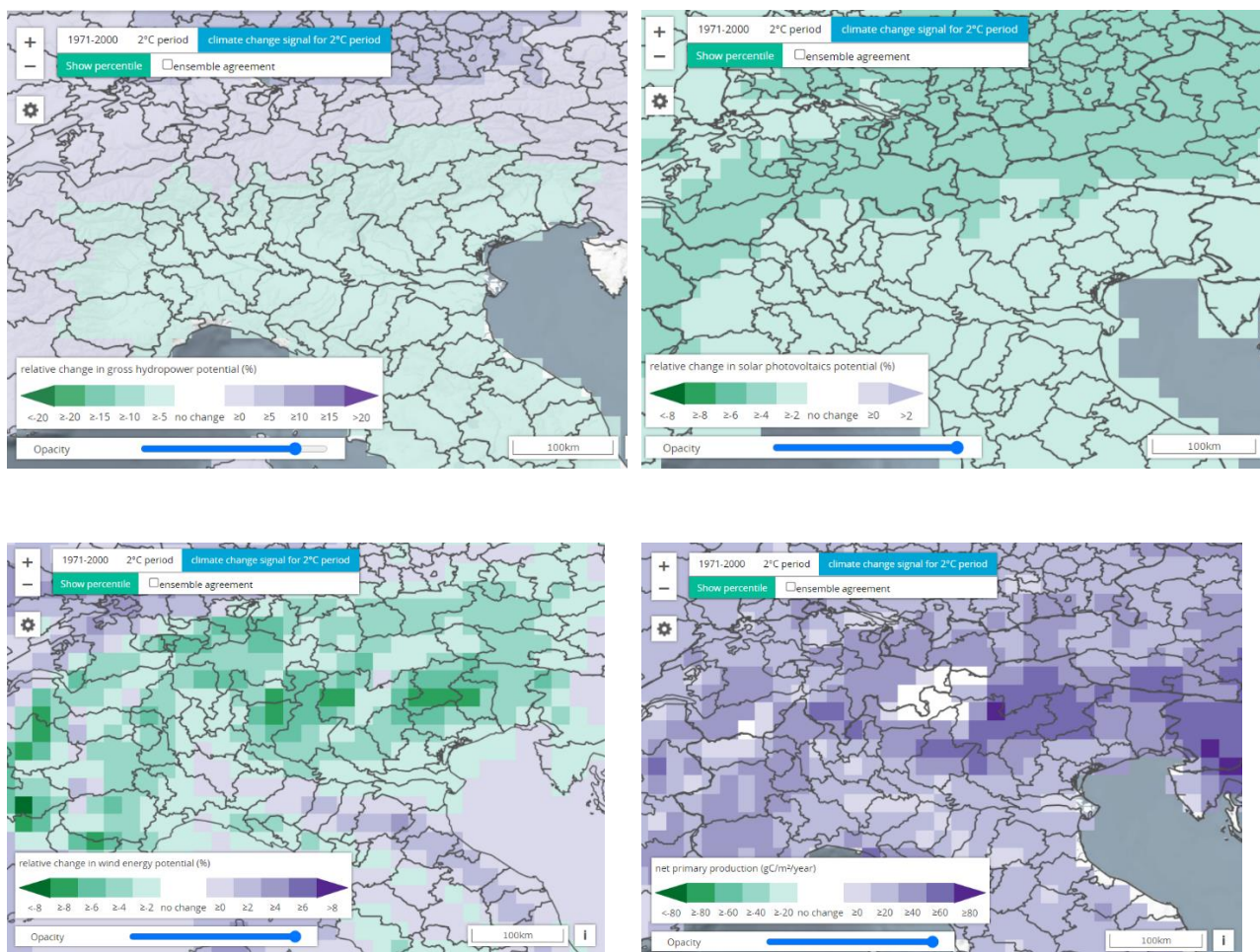


Figura 45: Impatti stimati da IMPACT2C sul settore energetico: variazione relativa lorda attesa nel comparto idroelettrico (in alto a sinistra), variazione relativa attesa nel potenziale fotovoltaico (in alto a destra), variazione relativa attesa nel comparto eolico (in basso a sinistra), variazione assoluta attesa per la produzione di biomassa (in basso a destra).

Nel complesso, nelle ipotesi considerate, il comparto energetico relativo al potenziale idroelettrico e fotovoltaico è previsto in diminuzione del 5-10% con significative variazioni tra la parte alpina e quella della pianura.

Scenari di impatto: Peseta IV

Peseta IV¹⁷ (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the EU based on bottom-up Analysis) è uno studio condotto dal JRC basato sui dati modellistici EURO-CORDEX ottenuti da ESGF con lo scopo di valutare i benefici (impatti negativi evitati) della riduzione di GHG e il potenziale derivante dalle misure di adattamento per i settori economici dell'EU. Lo studio si basa essenzialmente sulla valutazione di uno scenario temporale in cui viene raggiunta una determinata differenza di temperatura rispetto all'epoca climatica di riferimento (1850-1900 oppure 1971-2000).

Gli scenari climatici considerati sono il RCP4.5 e RCP8.5, per i quali si è identificata la situazione corrispondente all'aumento di 1,5°, 2°C e 3°C indipendentemente dal momento in cui questo accade.

Le principali conclusioni che interessano il settore energetico sono le seguenti:

- la disponibilità di acqua calerà fino al 40% nelle regioni meridionali dell'Europa e i periodi siccitosi saranno più frequenti sia nella parte meridionale che in quella occidentale;
- la scarsità d'acqua e la siccità colpiranno in modo sempre maggiore l'agricoltura, la produzione energetica e la disponibilità di risorsa idrica nelle regioni che già ora soffrono di questa problematica;
- il cambiamento climatico colpirà in modo diverso la parte Nord e quella Sud d'Europa, che saranno significativamente più impattate;
- la produzione idroelettrica incrementerà al Nord mentre si ridurrà nel Sud Europa in conseguenza alla minore disponibilità della risorsa utilizzata anche per raffreddamento delle centrali;
- la quantità di biomassa forestale giudicata a rischio (attacco di insetti, incendi, tempeste di vento) è cresciuta negli ultimi anni, ed è probabile che aumenti in futuro a causa dell'insieme dei fenomeni di disturbo climatico (siccità, precipitazione).

Nelle figure seguenti sono riportate alcune mappe corrispondenti agli impatti menzionati per la produzione idroelettrica, fotovoltaica, vento e biomasse.

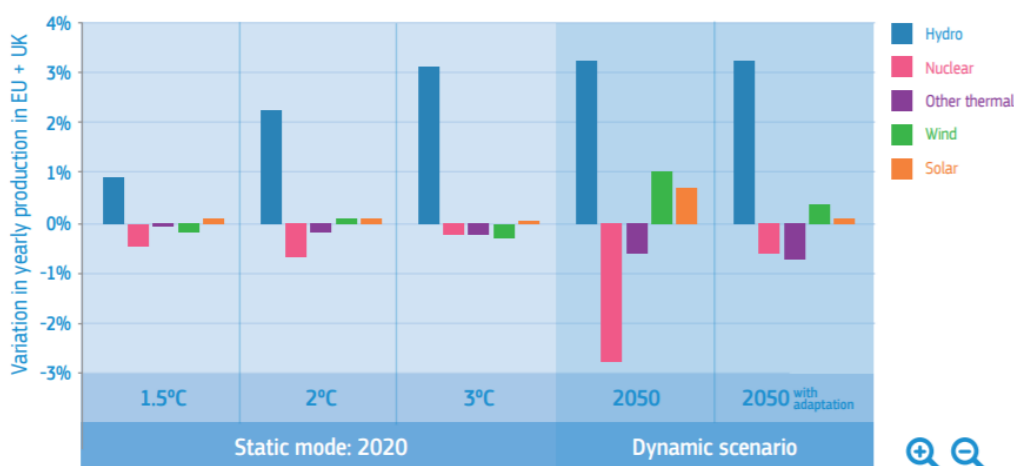


Figura 46: variazione della produzione energetica in EU e UK (da: Peseta IV - final report); lo scenario al 2050 prevede sia la situazione senza l'adozione di misure adattamento che con tali misure.

¹⁷ <https://ec.europa.eu/jrc/en/peseta-iv>;
https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/pesetaiv_summary_final_report.pdf

Il sistema più impattato dall'effetto combinato dell'allungamento dei periodi di siccità e di incremento di temperature è quello idrologico: le stime di PESETAIV non sembrano però incidere in modo diffuso su tutta la Lombardia, anche se l'effetto atteso è comunque di una riduzione della produzione di mais, in funzione delle misure di adattamento messe in campo per garantire una sufficiente irrigazione delle colture (

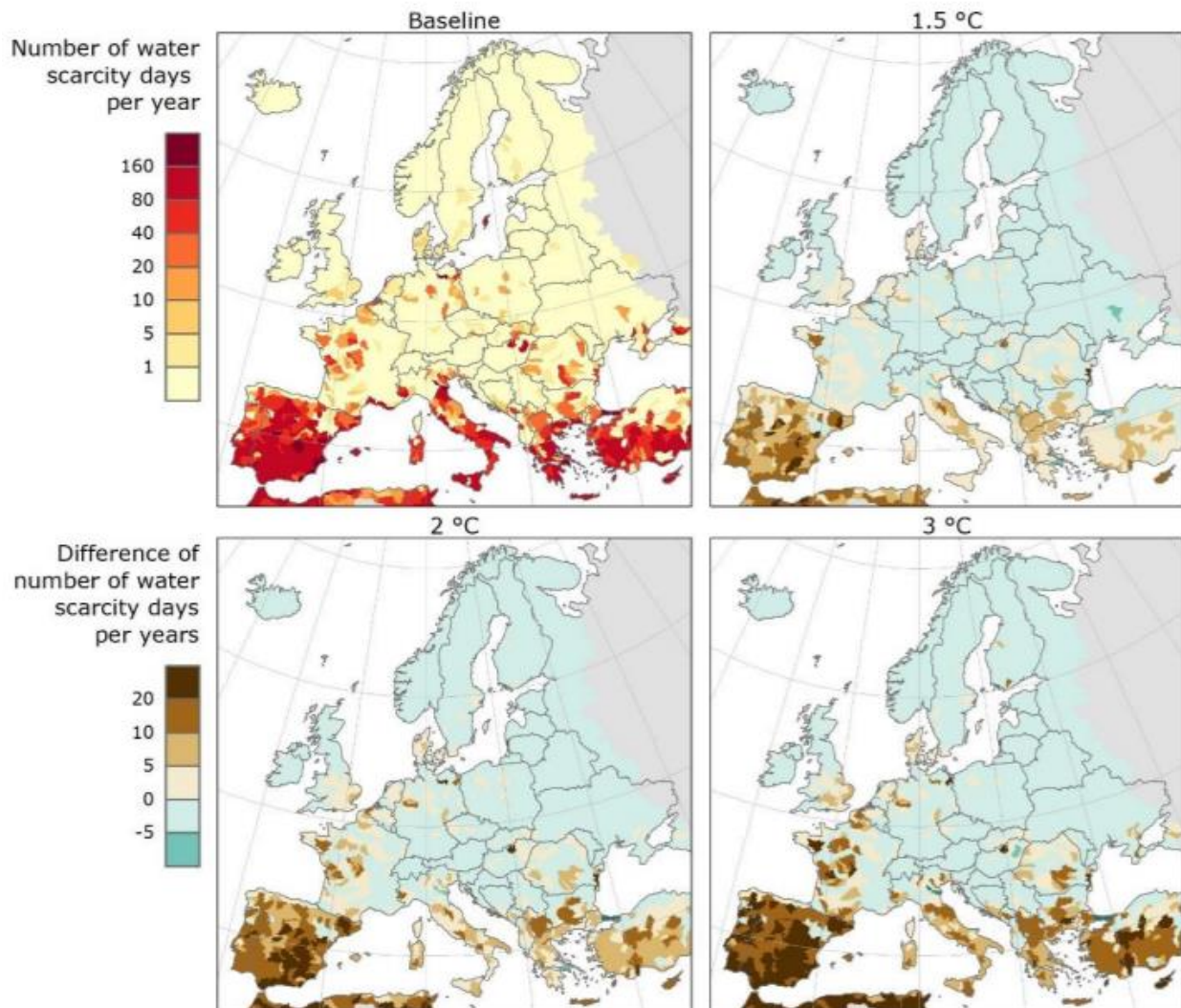


Figura 47 e Figura 48)

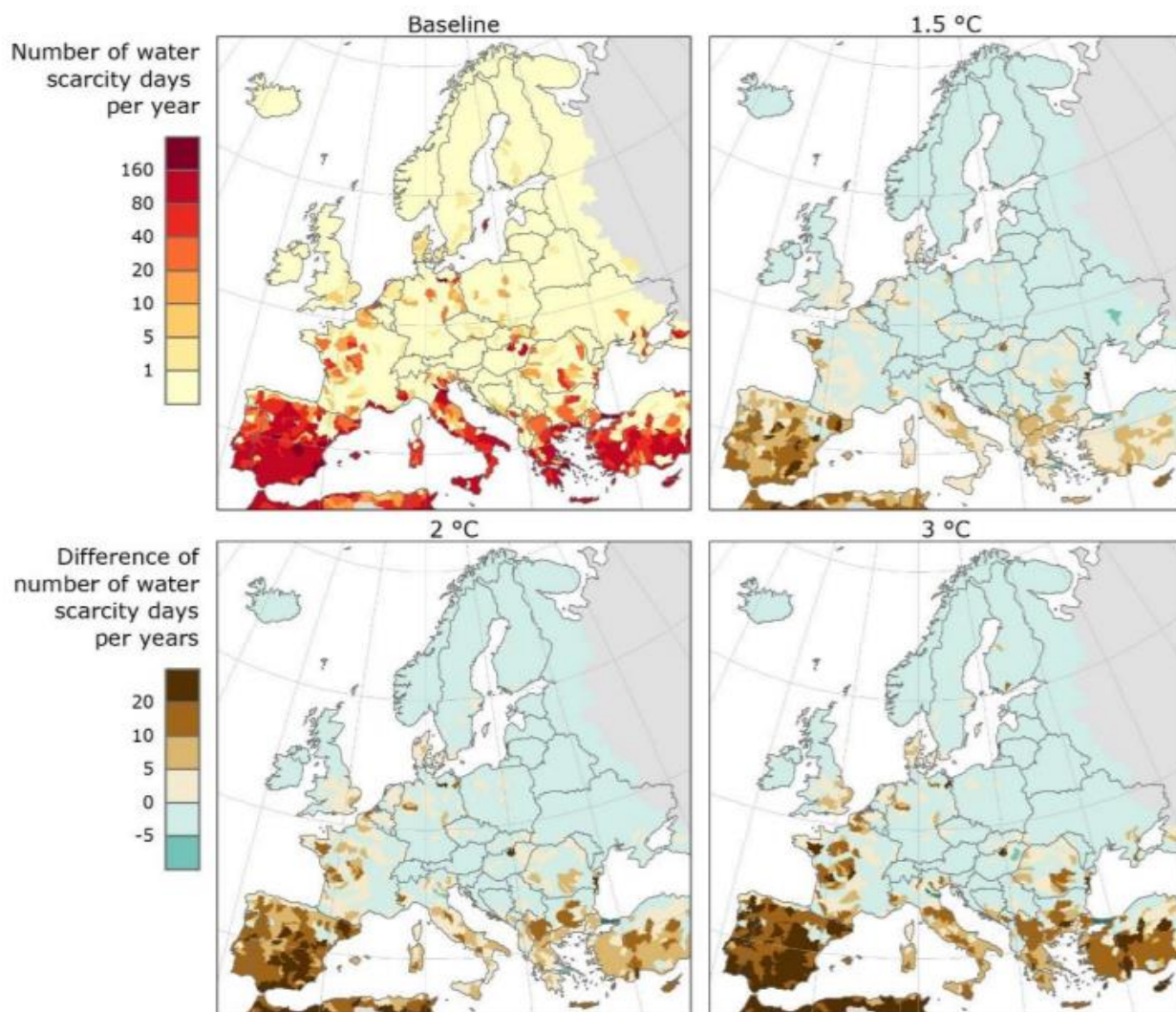


Figura 47: numero di giorni con scarsità d'acqua (WEI+) e cambiamento atteso (variazione assoluta) negli scenari 1.5, 2 e 3 °C

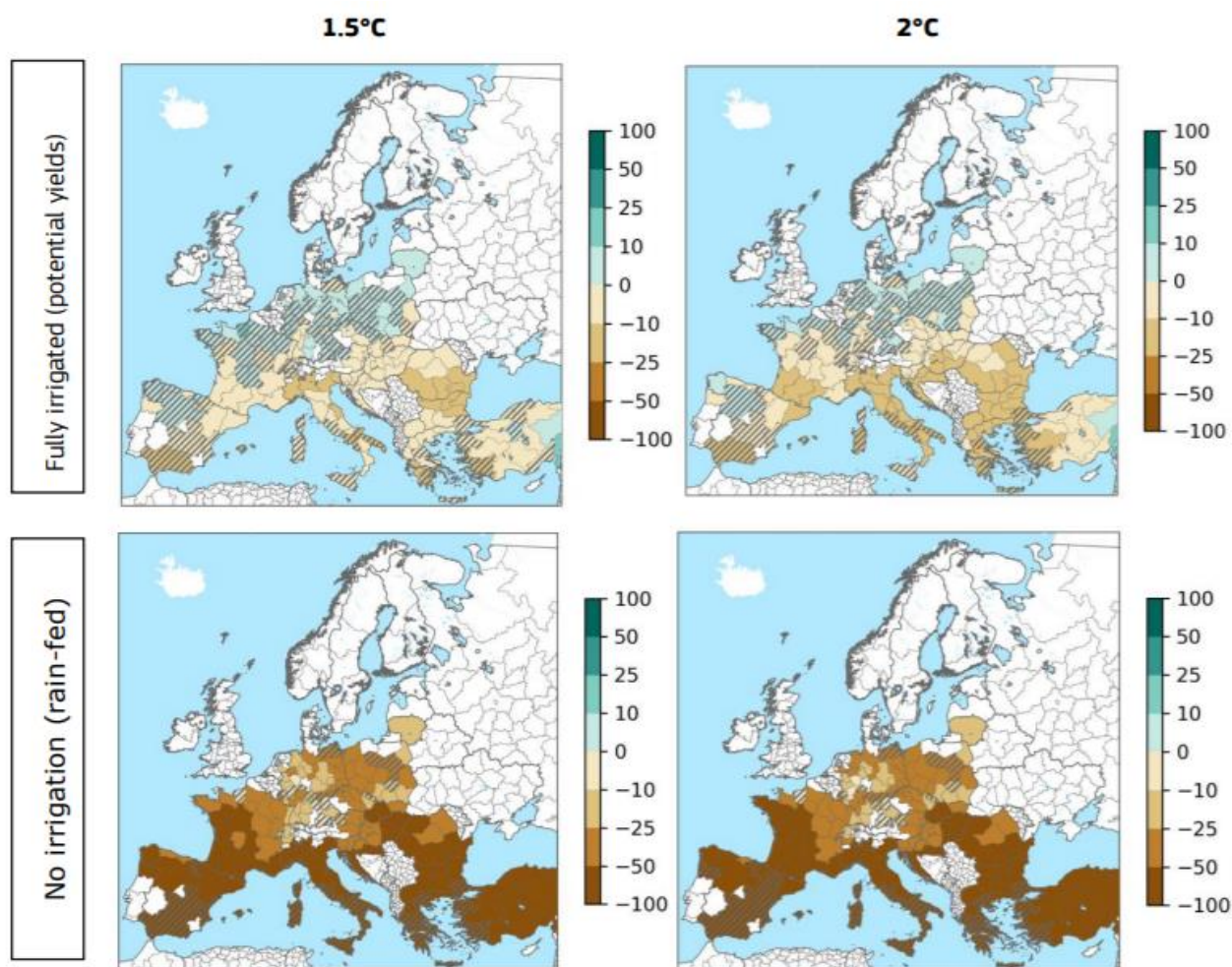


Figura 48: variazione relativa della produzione di mais rispetto allo scenario di riferimento in due scenari climatici (rappresentati da un incremento di 1,5 e 2°C) in condizioni di irrigazione integrata (sopra) o nessuna integrazione del sistema idrico (sotto).

Appendice

Scelta dei modelli GCM e RCM

Per la scelta dei modelli si è fatto riferimento essenzialmente alla disponibilità sulla piattaforma ESGF di modelli a scala 0,11° disponibili per l'Europa (EUR) per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 di tipo *bias adjusted* tramite E-OBS, a cadenza giornaliera, per le ECV *tasmin* e *tasmax* (rispettivamente temperatura minima e massima dell'aria a 2 metri). In seguito, si sono selezionati i modelli analoghi per la variabile *pr* (flusso di precipitazione) ottenuti nel medesimo modo, laddove possibile. Per le altre variabili (*sund*: duration of sunshine; *rsds*: surface downwelling shortwave radiation) sono stati selezionati modelli quanto più simili possibile privilegiando il *bias adjusting* con E-OBS. Infine, anche per la variabile *sfcWind* (velocità del vento a 2 metri) si sono selezionati modelli di tipo *bias adjusted*.

Nome convenzionale	Modello GCM e RCM	Rif. Modello	ECV - essential climate variables
CSC-REMO	MPI-M-MPI-ESM-LR, REMO2009	Max Plank Institut fur Meteorologie	tasmax, tasmin, pr, rsds
IPSL-INERIS-WRF331F	IPSL-IPSL-CM5A-MR, WRF331F	Institut Pierre Simon Laplace, Institute National pour l'Environnement et les RISques industriels	tasmax, tasmin, pr, rsds
KNMI-RACMOE22	ICHEC-EC-EARTH, RACMOE22	Irish Centre for High End Computing, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut	tasmax, tasmin, pr, rsds
SMHI-RCA4	ICHEC-EC-EARTH, RCA4	Irish Centre for High End Computing, Rossby Centre - Swedish Meteorological and Hydrological Institute	tasmax, tasmin, pr, sund*, rsds
SMHI-RCA4-MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-M-MPI-ESM-LR, RCA4	Max Plank Institut fur Meteorologie, Rossby Centre - Swedish Meteorological and Hydrological Institute	sund*
SMHI-RCA4-MOH-HadGEM2-ES	MOHC-HadGEM2-ES, RCA4	Hadley Centre Global Environmental Model, Rossby Centre - Swedish Meteorological and Hydrological Institute	sund*
SMHI-RCA4-IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-IPSL-CM5A-MR, RCA4	Institut Pierre Simon Laplace, Institute National pour l'Environnement et les RISques industriels, Rossby Centre - Swedish Meteorological and Hydrological Institute	sund*
CLMcom-CCLM4	ICHEC-EC-EARTH, CCLM4	Irish Centre for High End Computing, Climate	sfcWind

		Limited-area Modelling Community	
DMI-HIRHAM5	ICHEC-EC-EARTH, HIRHAM5	Irish Centre for High End Computing, Danish Meteorological Institute	sfcWind
SMHI-RCA4- ICHEC-EC-EARTH	ICHEC-EC-EARTH, RCA4	Irish Centre for High End Computing, Rossby Centre - Swedish Meteorological and Hydrological Institute	sfcWind
SMHI-RCA4-MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-M-MPI-ESM-LR, RCA4	Max Plank Institut fur Meteorologie, Rossby Centre - Swedish Meteorological and Hydrological Institute	sfcWind

* indica valori non bias-adjusted

È stato, inoltre, considerato il modello COSMO-CLM, nella versione adottata dal Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), che ha fornito direttamente gli output del modello relativi alla variabile *tas* (*tasmax*, *tasmin*, *tasmed*); non è stato possibile ottenere i dati relativi ad altre ECV per questo modello.

Implementazione dell'ecosistema di calcolo

Buona parte dell'attività è stata dedicata all'implementazione dell'ecosistema di calcolo, che consentisse di ottenere delle elaborazioni ripetibili in funzione della disponibilità dei dati.

A tale scopo, in collaborazione con RISCUS, si è esplorata la libreria di R "climate4R" del Santander Met Group¹⁸ (<https://github.com/SantanderMetGroup/climate4R>).

In una prima fase si è utilizzato l'ambiente di sviluppo "RStudio" e ciascun membro del gruppo ha lavorato in modo indipendente: questa modalità si è rivelata utile nella fase di messa a punto del codice e di studio dello stesso, ma non consentiva di operare in sinergia, dal momento che i risultati conseguiti da ciascuno del gruppo di lavoro dovevano essere esplicitamente condivisi con gli altri. Per ovviare a tale difficoltà si sarebbe potuto utilizzare la piattaforma *Github*, ma la curva di apprendimento di questo strumento avrebbe sottratto parecchio tempo all'attività più focale di sviluppo del codice.

Inoltre, in fase di sviluppo, si è verificato che il calcolo degli indici non era possibile sulle ordinarie PdL in dotazione al personale ARPA, normali a causa dell'intenso utilizzo delle risorse computazionali richieste dal codice.

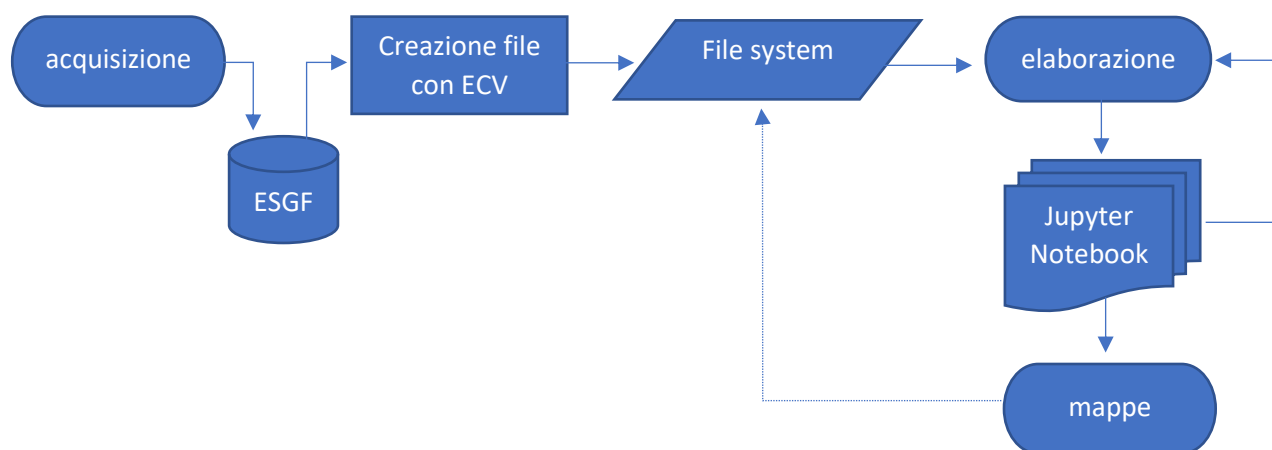
La soluzione è stata trovata nell'utilizzo di una macchina virtuale (s.o. CentOS 7) nell'ambiente di test di ARPA. Questa macchina, messa a disposizione dal settore IT nel 2020, ha garantito sia di condividere rapidamente il codice sviluppato sia di avere prestazioni adeguate per il calcolo, grazie all'architettura *multicore*.

Inoltre, per ovviare ad alcune problematiche relative alla compatibilità delle librerie di R da installare rispetto alle librerie del sistema operativo, si è scelta la soluzione di utilizzare il *container* messo a punto da Santander Met Group tramite *Docker versione CE*. Questo ha consentito di utilizzare come ambiente di sviluppo il software *Jupyter Notebook*, che, consentendo di generare una "scatola" isolata sulla macchina, ha risolto a priori ogni conflitto di installazione delle librerie.

¹⁸ Università della Cantabria e Centro Nazionale delle Ricerche (ES)

Accanto all'immagine *Docker* fornita da Santander Met Group, si è sviluppata una immagine *Docker* specifica con una installazione personalizzata del software CDO, per eseguire delle operazioni preliminari nella preparazione dei file o per verificare gli output delle elaborazioni effettuate con climate4R.

Lo schema logico dell'ecosistema di calcolo degli indici è quindi il seguente.



Tutte le mappe elaborate vengono salvate come immagini ed archiviate nel file system: in seguito, verrà valutata la possibilità di condividerle secondo un modello di libero accesso ai dati da parte del pubblico.

Definizioni degli indici di cambiamento climatico

Nella tabella successiva sono riportati gli indici climatici utilizzati per le elaborazioni presentate nel presente documento, con specifico riferimento alla provenienza e alla definizione matematica.

Nome	Codice	Definizione	Unità di misura	Note
<i>Number of summer days</i> – numero di giorni estivi	SU	Conteggio annuale dei giorni con temperatura massima giornaliera superiore a 25°C	giorni	Calcolabile a partire da <i>tasmax</i> . Rif: ETCCDI
<i>Number of frost days</i> – numero di giorni di gelo	FD	Conteggio annuale dei giorni con temperatura minima giornaliera inferiore a 0°C	giorni	Calcolabile a partire da <i>tasmin</i> . Rif: ETCCDI
<i>Number of Tropical nights</i> – numero di notti tropicali	TR	Conteggio annuale dei giorni con temperatura minima giornaliera superiore a 20°C.	giorni	Calcolabile a partire da <i>tasmin</i> . Rif: ETCCDI
<i>Warm spell duration index</i> – indice della durata dell'ondata di calore	WSDI	Conteggio annuale dei giorni con almeno 6 giorni consecutivi in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al 90° percentile.	giorni	Calcolabile a partire da <i>tasmax</i> . Sia TX_{ij} la temperatura massima giornaliera nel giorno i nel periodo j e sia TX_{90} , per ogni giorno i , il 90°percentile della temperatura massima giornaliera, centrato su una finestra di 5 giorni per il periodo di riferimento 1961-1990. Nel conteggio dei giorni vengono considerati i giorni per cui, in intervalli di almeno 6 giorni, si realizzi $TX_{ij} > TX_{90}$ Rif: ETCCDI

<i>Heating degree days index</i> – gradi giorno di riscaldamento	HDD	Somma estesa a tutti giorni, nel periodo annuale convenzionale di riscaldamento, degli scarti giornalieri positivi tra la temperatura di riferimento (rappresentativa della temperatura di comfort indoor) e la temperatura media giornaliera.	gradi giorno	La temperatura media giornaliera utilizzata per l'elaborazione dell'indice è stata calcolata come media aritmetica dei dati giornalieri <i>tasmax</i> e <i>tasmin</i> . Il periodo annuale convenzionale di riscaldamento è stato considerato da ottobre ad aprile (estremi inclusi), pari all'incirca a quello proprio della zona climatica E, secondo il DPR n.412/93. La temperatura di riferimento è pari a 20°C. Rif. DPR n.412/93, UNI 9019:1987
<i>Cooling degree days index</i> – gradi giorno di raffrescamento	DDC	Somma estesa a tutti giorni, nel periodo annuale convenzionale di raffrescamento, degli scarti giornalieri positivi superiori a 3°C tra la temperatura media giornaliera e la temperatura di riferimento (rappresentativa della temperatura di comfort indoor).	gradi giorno	La temperatura media giornaliera utilizzata per l'elaborazione dell'indice è stata calcolata come media aritmetica dei dati giornalieri <i>tasmax</i> e <i>tasmin</i> . Il periodo annuale convenzionale di raffrescamento è stato considerato da giugno a settembre (estremi inclusi). <i>In aggiunta, il calcolo è stato condotto per il solo mese di luglio.</i> La temperatura di riferimento è pari a 21°C. Rif. EUROSTAT, JRC
<i>Growing season length</i> – durata della stagione vegetativa	GSL	Conteggio annuale dei giorni tra il primo intervallo di almeno 6 giorni con temperatura media giornaliera superiore a 5°C e il primo intervallo dopo metà anno di almeno 6 giorni con temperatura giornaliera inferiore a 5°C	giorni	Calcolabile a partire da <i>tasmax</i> e <i>tasmin</i> . L'anno viene considerato dal 1° gennaio al 31 dicembre nell'emisfero nord e dal 1° luglio al 30 giugno nell'emisfero sud. La data di metà anno è quindi il 1° luglio per l'emisfero nord e il 1° gennaio per l'emisfero sud.
<i>Days when PRCP ≥ 20mm</i> – numero giorni con PRCP ≥ 20mm	R20mm	Conteggio annuale dei giorni con precipitazione cumulata giornaliera maggiore/uguale di 20 mm	giorni	Calcolabile a partire da <i>pr</i> . Rif: ETCCDI
<i>Maximum length of dry spell</i> – numero massimo giorni consecutivi senza precipitazione	CDD	Massima successione di giorni caratterizzati da precipitazione cumulata giornaliera inferiore a 1 mm nel periodo considerato	giorni	Calcolabile a partire da <i>pr</i> . Rif: ETCCDI
<i>Maximum length of wet spell</i> – numero massimo giorni consecutivi con precipitazione	CWD	Massima successione di giorni caratterizzati da precipitazione cumulata giornaliera maggiore/uguale di 1 mm nel periodo considerato	giorni	Calcolabile a partire da <i>pr</i> . Rif: ETCCDI
<i>Annual total PRCP when RR > 95p</i> – Precipitazione cumulata annuale nei	R95pTOT	Somma di tutte le precipitazioni cumulate giornaliere nel corso dell'anno, limitata ai giorni in cui è riscontrato il superamento del 95°	millimetri	Calcolabile a partire da <i>pr</i> . Sia RR_{wj} la precipitazione cumulata giornaliera in un giorno con precipitazione w ($RR \geq 1\text{mm}$) nel periodo i e sia RR_{wn95} il 95°percentile di precipitazione nei giorni con precipitazione nel periodo 1961-1990. Se W rappresenta il

giorni con precipitazione superiore al 95° percentile		percentile di precipitazione cumulata giornaliera nel periodo di riferimento 1961-1990		numero di giorni con precipitazione nel periodo, allora: $R95p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn}95$ Rif: ETCCDI
<i>Annual total precipitation in wet days</i> - Precipitazione cumulata annuale nei giorni piovosi	PRCPTOT	Somma di tutte le precipitazioni cumulate giornaliere	millimetri	Calcolabile a partire da <i>pr</i> . Rif: ETCCDI
<i>Monthly maximum 1-day precipitation</i> – Massima precipitazione cumulata giornaliera nell’arco del mese	Rx1day	Il valore massimo della precipitazione cumulata giornaliera su base mensile	millimetri	Calcolabile a partire da <i>pr</i> . Rif: ETCCDI
<i>Monthly maximum 5-day precipitation</i> – Massima precipitazione cumulata su 5 giorni nell’arco mese	Rx5day	Il valore massimo della precipitazione cumulata giornaliera in 5 giorni consecutivi su base mensile	millimetri	Calcolabile a partire da <i>pr</i> . Rif: ETCCDI
<i>Days when windspeed ≥ 10m/s</i> – numero giorni con velocità del vento ≥ 10m/s	W10	Conteggio annuale dei giorni con velocità media giornaliera del vento a 2 m di quota maggiore/uguale di 10 m/s	giorni	Calcolabile a partire da <i>sfcWind</i> .
<i>Photovoltaic potential</i> – potenziale fotovoltaico	PVpot	Coefficiente di potenziale produttivo di una data installazione fotovoltaica	adimensionale	Calcolabile a partire da <i>tasmax</i> , <i>rsds</i> , <i>sfcWind</i> . Il coefficiente può assumere valori tra 0 e 1, ove il valore 1 rappresenta la massima efficienza nominale dell’installazione fotovoltaica. Esso è calcolato su base giornaliera come: $PVpot = \alpha_1 rsds + \alpha_2 rsds^2 + \alpha_3 rsds * tasmax + \alpha_4 rsds * vws$ dove: <i>rsds</i> = valore massimo giornaliero del flusso superficiale di radiazione solare a corta lunghezza d’onda (W/m²) <i>tasmax</i> = temperatura massima giornaliera a 2m (°C) <i>vws</i> = velocità media giornaliera del vento a 2m (m/s) $\alpha_1 = 1.1035 \times 10^{-3}$, $\alpha_2 = -1.4 \times 10^{-7}$, $\alpha_3 = -4.715 \times 10^{-6}$, $\alpha_4 = 7.64 \times 10^{-6}$ nelle corrispondenti unità di misura, in modo che PVpot risulti adimensionale.

				<p>L'indice è stato quindi aggregato su base annuale e stagionale, con particolare riferimento alla stagione estiva (GLA). Rif: L'indice è stato messo a punto dalla Direzione Tecnica ARPA Lombardia – UOTE sulla base degli studi qui riportati: <i>Nature Communications 2015, The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe</i></p>
--	--	--	--	---