

# SCENARI CLIMATICI E SISTEMA ENERGETICO IN LOMBARDIA

ARPA LOMBARDIA HA CONDOTTO UNO STUDIO SULLE PROIEZIONI CLIMATICHE, A SUPPORTO DEL PROGRAMMA REGIONALE ENERGIA AMBIENTE E CLIMA, CON ANALISI SU TEMPERATURE, PRECIPITAZIONI, FABBISOGNO DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO, POTENZIALE IMPATTO SULLA PRODUZIONE ENERGETICA FOTOVOLTAICA.

**S**u richiesta dell'amministrazione regionale, Arpa Lombardia ha condotto un'elaborazione delle proiezioni climatiche disponibili per le variabili climatiche essenziali (Ecv) sul territorio regionale con la più elevata risoluzione spaziale possibile (0,11°lon × 0,11°lat), con l'obiettivo di definire l'*hazard* determinato dai cambiamenti climatici attesi per il secolo in corso verso il sistema energetico regionale.

Il lavoro si è svolto in 4 fasi:

- identificazione su Esgf [1] dei dataset delle Ecv temperatura dell'aria a 2 metri, precipitazione, velocità del vento, durata dell'insolazione, flusso di radiazione solare per la costruzione degli indicatori attesi. Sono stati identificati 4 modelli (intesi come combinazione di *General circulation model* e *Regional circulation model*) in ambito Cordex [2], con preferenza per i dati relativi alle applicazioni modellistiche già *bias-adjusted*, oltre al modello Cosmo-Clm fornito da Cmcc [3];
- scelta del periodo climatico di riferimento (1986-2005) e di due periodi di elaborazione delle medie climatologiche, uno definito "vicino" (2021-2040) e uno "medio" (2041-2060), in modo da rispecchiare le scelte del AR6 Ipcc e le sue conclusioni, oltre a individuare tali periodi climatici come

significativi per il Programma regionale energia ambiente e clima (Preac) che prevede obiettivi al 2030 e al 2050

- identificazione degli scenari Ipcc Cmp5 di riferimento Rcp4.5 e Rcp8.5, corrispondenti agli Ssp2 (medio impegno) e Ssp5 (sviluppo con fonti fossili) [4]
- rappresentazione degli indicatori e della loro variabilità, tramite mappe e funzioni di probabilità.

Sono stati calcolati, come medie ventennali nei periodi sopra riportati, ben 16 indici climatici (tabella 1). Di questi, la maggior parte rientra nel set approvato dall'accordo Cci/Clivar/Jcomm *Expert team on climate change detection and indices* (Etccli) [5], a cui sono stati affiancati alcuni indici definiti da Jrc, Eurostat (sfumatura verde) e in due casi specificamente messi a punto da Arpa Lombardia (sfumatura grigia).

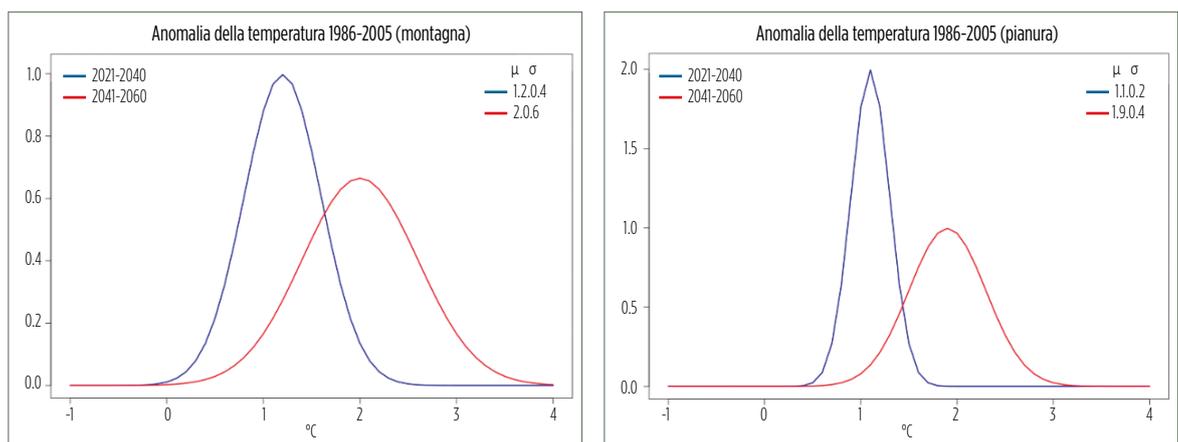
Indice	Descrizione	Fenomeni
TR	Tropical nights – notti tropicali, giorni	Discomfort termico notturno
SU	Summer days – giorni estivi, giorni	Discomfort termico diurno
FD	Frost days – giorni di gelo, giorni	Temperature minime invernali
HDD	Heating Degree Days – gradi giorno riscaldamento, numerico	Fabbisogno riscaldamento invernale
CDD	Cooling Degree Days – gradi giorno raffrescamento, numerico	Fabbisogno raffrescamento estivo
WSDI	Warm Spell Duration Index, giorni	Giorni consecutivi con temperatura elevata
R20mm	Giorni con precipitazione ≥ 20mm, 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	Growing season length, lunghezza della stagione vegetativa, giorni	Ecosistema vegetale
PVpot	Potenziale fotovoltaico, numerico	Potenziale di produzione fotovoltaica

TAB. 1 INDICI CLIMATICI

Indici utilizzati da Arpa Lombardia per l'elaborazione delle proiezioni climatiche sul territorio regionale. In verde gli indici definiti da Jrc e Eurostat, in grigio quelli definiti da Arpa Lombardia.

FIG. 1 PIANURA/MONTAGNA

Confronto tra le distribuzioni statistiche dell'anomalia della temperatura massima giornaliera nell'area di pianura (destra) e nell'area montana (sinistra) per lo scenario Rcp8.5.



Di massima attenzione ai fini del lavoro è stata l'implementazione dell'ecosistema di calcolo. Si è quindi messo a punto un ambiente di sviluppo e un flusso di lavoro in grado di ottenere elaborazioni ripetibili e facilmente aggiornabili, in funzione di variazioni nella disponibilità dei dati. È stato utilizzato il linguaggio R, facendo affidamento prevalentemente sulla libreria di R "climate4R" del Santander Met Group [6]. Una macchina virtuale (s.o. CentOS 7) ha permesso la rapida condivisione delle elaborazioni e l'imprescindibile lavoro in parallelo, grazie all'architettura *multicore*. È stato generato un vero e proprio atlante, contenente più di 1.000 mappe del territorio regionale, relative agli

andamenti delle Ecv e degli indici climatici scelti e delle relative anomalie rispetto al periodo di riferimento storico scelto. L'esame dei dati ottenuti consente di fornire un quadro chiaro e articolato delle proiezioni climatiche in Lombardia, e conseguentemente di indicare l'*hazard* relativo al sistema energetico regionale sotto forma di mappa territoriale. Tra i risultati più interessanti, emerge che la temperatura dell'aria al suolo nel periodo vicino (2021-2040) è destinata ad aumentare di almeno 1 °C in entrambi gli scenari Rcp4.5 e Rcp8.5, interessando di più le aree montane rispetto a quelle di pianura (figura 1). L'incremento arriva fino a 2-3 °C nel periodo medio (2041-2060),

con estremi più significativi nelle aree alpine e prealpine delle province di Sondrio, Bergamo e Brescia; la tendenza è chiara in tutti i modelli considerati. La precipitazione, invece, 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 Rcp8.5 (+40%). Inoltre, si riscontra un segnale di spostamento della distribuzione statistica delle precipitazioni verso valori più elevati, soprattutto in inverno. L'andamento delle Ecv influenza direttamente le tendenze degli indici

FIG. 2  
ANOMALIA  
GRADI GIORNO  
RISCALDAMENTO

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).

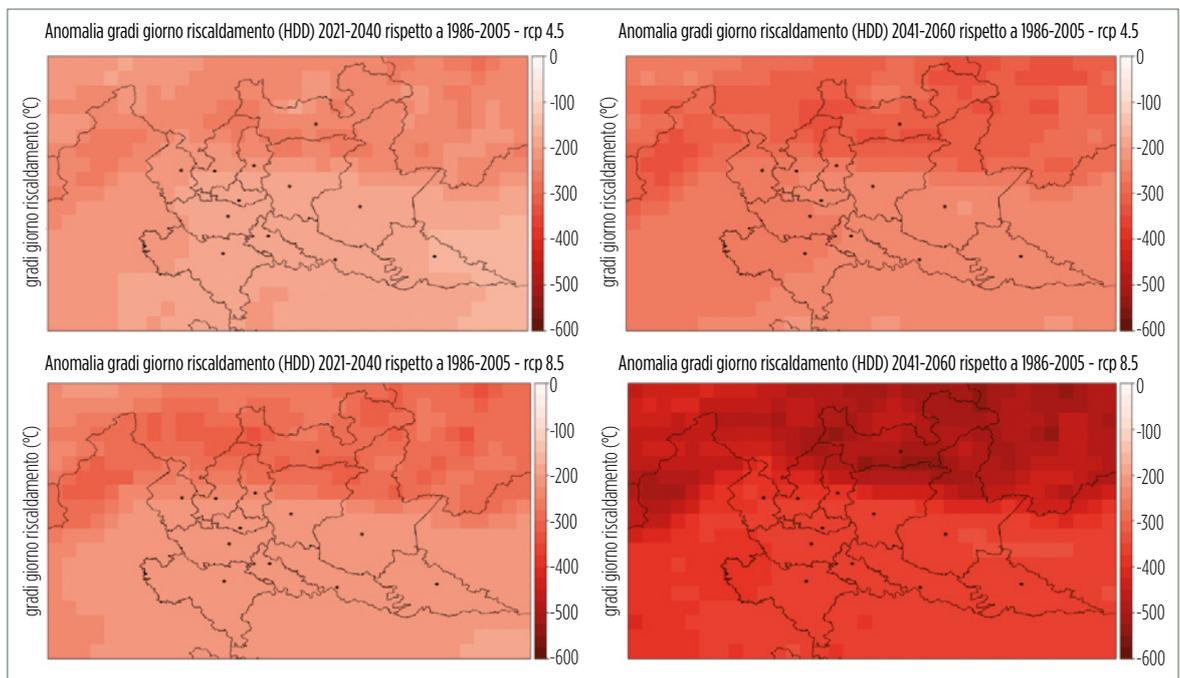
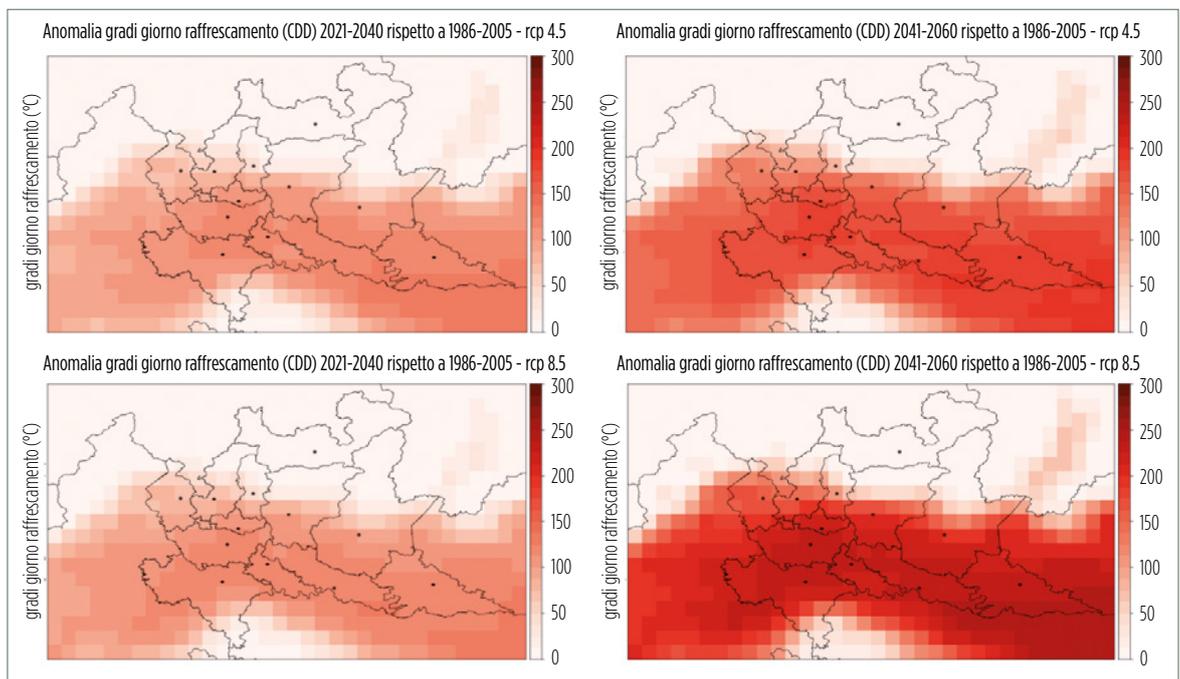


FIG. 3  
ANOMALIA  
GRADI GIORNO  
RAFFRESCAMENTO

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).



climatici, tra cui quelli con maggior *driver* verso il sistema energetico. 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) (figura 2). Dal 2006 al 2060, seguendo una tendenza lineare, si registrerà una riduzione media di 325 gradi giorno di riscaldamento in pianura e 375 in montagna. Questa riduzione evidente dell'indice Hdd, tuttavia, non consente di ipotizzare una riduzione del periodo complessivo con riscaldamento acceso tutto l'anno. Si osserva infatti che il numero di giorni nei mesi di ottobre e 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. Per contro, si identifica l'aumento del fabbisogno di raffreddamento, che influisce in modo maggiore nelle aree di pianura rispetto a quelle di montagna, con un buon accordo tra scenari Rcp4.5 e Rcp8.5 nel periodo vicino (2021-2040); gli scenari si differenziano in modo molto accentuato per il periodo medio (2041-2060) passando, per quanto riguarda la pianura, da circa 100 gradi giorno di raffreddamento in più rispetto al periodo di riferimento (1986-2005), previsti nello scenario Rcp4.5, ai circa 200 gradi giorno di raffreddamento in più nello scenario Rcp 8.5. Circa la metà di questo incremento è dovuta al solo mese di luglio (figura 3). Ripercorrendo l'analisi eseguita per Hdd, calcolando il numero di giorni annui che contribuiscono al computo totale di Cdd (gradi giorno di raffreddamento) per più di 6 °C, osserviamo che in montagna si passa

dalla media storica (1986-2005) di 0 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. Un aspetto interessante che si è voluto mettere in luce in questo lavoro è stato valutare quanto i cambiamenti climatici possano avere impatto sulla produzione energetica fotovoltaica, in fase di ampio sviluppo e per il quale il Piano regionale energia ambiente e clima (Preac) dovrà definire le aree idonee all'installazione. A tale scopo si è valutata la produttività attraverso il calcolo di un indice di "potenziale fotovoltaico" basato sull'irraggiamento solare, sulla temperatura dell'aria e sulla ventilazione, elementi che influenzano il rendimento elettrico dei pannelli. Per il calcolo di tale indice ci si è basati su esperienze già realizzate a livello europeo [7], definendo come "indice di potenziale fotovoltaico" (PVpot) un indice adimensionale compreso tra 0 e 1, che rappresenta l'efficienza di una data installazione fotovoltaica in funzione del flusso d'irraggiamento solare, della

temperatura dell'aria e della velocità media del vento. Il territorio regionale è climatologicamente caratterizzato da un potenziale fotovoltaico non particolarmente elevato, che nel periodo storico di riferimento 1986-2005 è stato mediamente compreso tra 0,5 e 0,6. Le proiezioni climatiche sono tuttavia incoraggianti. Infatti, con una ventilazione in superficie in pratica costante, l'effetto contrapposto dell'aumento del flusso solare e della temperatura superficiale si bilanciano, mostrando un potenziale fotovoltaico sostanzialmente inalterato su tutta la regione. In particolare, il lieve incremento percentuale medio (1-3%, in linea con studi a scala continentale) nello scenario Rcp4.5, sia nel periodo vicino sia in quello medio, tende a svanire nella proiezione a medio termine nello scenario Rcp8.5 (figura 4).

**Mauro Mussin, Mario Gregorio Piuri, Gabriele Greco**  
Arpa Lombardia

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Esgf, Earth System Grid Federation, nodo Dkrz, <https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz>
- [2] Cordex, Coordinated regional climate downscaling experiment, <https://cordex.org>
- [3] Cmcc, Centro euro-mediterraneo sui cambiamenti climatici, [www.cmcc.it/it/models](http://www.cmcc.it/it/models)
- [4] Ippc, Sixth Assessment Report, [www.ipcc.ch/report/ar6/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1)
- [5] Etccdi, Cci/Clivar/Jcomm Expert Team (ET) on climate change detection and indices, [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)
- [6] Università della Cantabria e Centro nazionale delle ricerche, <https://github.com/SantanderMetGroup/climate4R>
- [7] Jerez S., Tobin I., Vautard R. et al., 2015, "The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe", *Nature Communications*, 6, 10014 (2015). <https://doi.org/10.1038/ncomms10014>

FIG. 4 ANOMALIA POTENZIALE FOTOVOLTAICO

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).

