



OGGETTO DEL PROGETTO

**Potenziamento del Comprensorio Sciistico di Bagnolo Piemonte | Rucas
IMPIANTO DI INNEVAMENTO PROGRAMMATO ED OPERE CONNESSE I°
LOTTO FUNZIONALE**

LOCALIZZAZIONE

REGIONE PIEMONTE

PROVINCIA DI CUNEO

UNIONE MONTANA
BARGE-BAGNOLO

COMUNE DI
BAGNOLO PIEMONTE

LIVELLO DELLA PROGETTAZIONE

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

OGGETTO DELL'ELABORATO

AREA DI PROGETTAZIONE AMBIENTALE

ANALISI DELLE TENDENZE CLIMATICHE PASSATE E FUTURE PER LA STAZIONE SCIISTICA
DI BAGNOLO PIEMONTE | RUCAS
RELAZIONE INTEGRATIVA SUGLI ASPETTI CLIMATICI LEGATI ALLA REALIZZAZIONE DELLE OPERE

CODICE GENERALE ELABORATO

CODICE OPERA

CBII

INTERVENTO

0

LIVELLO PROGETTO

PF

AREA PROGETTO

IA

N° ELABORATO

005

VERSIONE

0

versione	data	Oggetto
0	15/04/2026	I° Emissione in attuazione delle richieste in sede del Provvedimento di Esclusione dalla fase di VIA - del 13.10.2025
1		
2		
3		

DATI PROGETTISTI

Lorenzo Minola

Via 10 Febbraio 1947 Vittime delle Foibe n.26
28066 Galliate (NO)
P.IVA: 02839580038
lorenzo.minola@pec.it

TIMBRI – FIRME

COMMITTENZA

Comune Bagnolo Piemonte

Piazza Divisione Alpina Cuneense n. 5, 12031 Bagnolo Piemonte (CN)
Tel: 0175/391121 | Fax: 0175/392790
C.F./ P.Iva: 00486530041 | PEC: comune.bagnolo.cn@legalmail.it

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Geom. Adriano BRUNO FRANCO

S O M M A R I O

1. INTRODUZIONE ALLA METODOLOGIA UTILIZZATA	3
2. TENDENZE CLIMATICHE	5
2.1 Temperatura.....	5
2.2 Precipitazioni liquide e solide	10
2.3 Neve al suolo.....	15
2.4 Velocità del vento	16
2.5 Condizioni favorevoli alla produzione di neve tecnica.....	17
3. RIEPILOGO DEI RISULTATI	19
BIBLIOGRAFIA	20

1. INTRODUZIONE ALLA METODOLOGIA UTILIZZATA

Per valutare come il clima sia cambiato negli scorsi decenni e come verosimilmente cambierà nel prossimo futuro, è necessario disporre di misurazioni in situ per almeno 30 anni (Trewin, 2007), un periodo sufficientemente lungo per individuare cambiamenti rappresentativi e schemi climatici relativamente stabili. Sfortunatamente, nei pressi del sito di intervento è presente solo una stazione meteo privata, a cura del gestore del comprensorio di Rucas, con misure rilevate tra novembre e aprile a partire dal 2020 (<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IBAGNO3>). Pertanto, per sopperire alla mancanza di dati osservati su cui basarsi per l'analisi del cambiamento climatico passato e su cui calcolare gli scenari futuri, si utilizzano gli output di ERA5 (Hersbach e Coautori, 2020), la reanalisi di quinta generazione del Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (ECMWF). Le reanalisi forniscono dati simulati di diverse variabili climatiche a livello globale utilizzando un modello di previsione in cui vengono assimilate informazioni provenienti da osservazioni di vario tipo e da molteplici fonti (Dee e Coautori, 2011). Tali dati sono spazialmente completi (su griglie che coprono l'intera Terra, che viene così discretizzata in diverse celle) e fisicamente coerenti. In particolare, la coerenza fisica è garantita dal fatto che le variabili stimate sono rese conformi alle leggi della fisica del modello di previsione, nonché con le osservazioni; la completezza spaziale è ottenuta utilizzando le equazioni del modello per estrapolare informazioni dalle variabili osservate ai parametri non osservati in località vicine. In particolare, ERA5 fornisce dati orari con una spaziatura orizzontale della griglia di circa 31 km. È possibile accedere e scaricare i dati di ERA5 al seguente link: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>.

Tuttavia, prima che qualsiasi dato di reanalisi possa essere utilizzato per studiare le condizioni climatiche in una determinata area, soprattutto se caratterizzata da una topografia complessa, è necessario dimostrare la capacità del dataset di rappresentare le statistiche osservate (Minola e Coautori, 2024). Pertanto, i dati di ERA5 per la cella della griglia del modello in cui si trova il comprensorio Rucaski sono stati confrontati con le misure disponibili dalla stazione meteo privata del gestore del comprensorio – ed eventuali errori sistematici identificati e corretti. Così, una volta che la prestazione di ERA5 è stata valutata, *gli output di ERA5 sono stati utilizzati per esaminare come diverse variabili climatologiche siano variate a partire dal 1975* (per oltre 50 anni), focalizzandosi sui mesi compresi tra novembre e aprile (periodo che include la stagione sciistica).

Gli stessi dati di ERA5 sono stati ulteriormente utilizzati per valutare gli scenari climatici futuri nei pressi del comprensorio di Rucas. In particolare, si è fatto riferimento agli andamenti riportati sul Portale Clima di ARPA Piemonte, consultabile da pagina web: <https://webgis.arpa.piemonte.it/portale-sul-clima-in-piemonte>. Attraverso il sistema informativo geografico di questo portale è possibile accedere a diversi indicatori climatici sugli scenari futuri per ciascuna cella in cui la regione Piemonte è stata discretizzata (ARPA Piemonte). Per il calcolo degli scenari più probabili in Piemonte, tra le simulazioni relative al clima futuro realizzate nell'ambito del consorzio CORDEX (www.cordex.org) unitamente alle simulazioni del modello COSMO-CLM (www.cmcc.it/models/cosmo-clm-climate-limited-area-modelling-community), sono state selezionate quelle dei modelli in grado di riprodurre alcune caratteristiche macroscopiche del clima attuale, come il ciclo annuale della precipitazione. In aggiunta, tali simulazioni sono state ulteriormente adattate alla realtà regionale piemontese attraverso opportune tecniche statistiche di rimozione degli errori sistematici, grazie ad un confronto con i dati della rete osservativa piemontese nel recente passato. Vengono considerati due scenari di Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (RCP; van Vuuren e Coautori, 2011): RCP 4.5 e RCP 8.5. Gli RCP sono scenari climatici espressi in termini di

concentrazioni di gas serra; indicano quindi l'entità dei cambiamenti climatici antropogenici entro il 2100 rispetto al periodo preindustriale. In particolare:

- lo scenario RCP 4.5 assume la messa in atto di iniziative significative per controllare le emissioni (forte mitigazione), secondo cui entro il 2070 le emissioni di CO₂ scenderanno al di sotto dei livelli attuali e la loro concentrazione atmosferica si stabilizzerà entro la fine del secolo a circa il doppio dei livelli preindustriali;
- lo scenario RCP 8.5 assume un incremento delle emissioni secondo i ritmi attuali (nessuna mitigazione seguendo il "business-as-usual"): entro il 2100 le concentrazioni atmosferiche di CO₂ saranno triplicate o quadruplicate (840-1120 ppm) rispetto ai livelli preindustriali (280 ppm).

Di conseguenza, per quanto riguarda gli scenari futuri, si è proceduto *all'applicazione delle variazioni attese nei periodi trentennali 2011-2040 e 2041-2070 sia secondo lo scenario RCP 4.5 che RCP 8.5 alle condizioni climatiche del periodo di controllo 1976-2005, calcolate queste utilizzando i dati di ERA5* per il comprensorio sciistico di Rucas.

Nella seguente sezione (Sezione 2) **vengono così esplorate per l'impianto sciistico di Rucas le tendenze climatiche passate e future di diversi parametri climatici utilizzando i dati di ERA5 (previa opportuna verifica ed eventuale correzione da errori sistematici) e gli scenari futuri riportati sul Portale Clima di ARPA Piemonte**. In particolare, sono riportati gli andamenti climatici di temperatura (Sezione 2.1), precipitazioni liquide e solide (Sezione 2.2), neve al suolo (Sezione 2.3), velocità del vento (Sezione 2.4) e condizioni favorevoli per la produzione di neve tecnica (Sezione 2.5). A conclusione (Sezione 3) vengono riassunti i risultati ottenuti dall'analisi delle tendenze climatiche per il comprensorio sciistico Rucaski.

2. TENDENZE CLIMATICHE

2.1 Temperatura

Per valutare matematicamente la concordanza tra le serie di temperature simulate da ERA5 e quelle osservate nei pressi del comprensorio sciistico di Rucas, vengono utilizzati i seguenti test statistici: (1) il coefficiente di correlazione di Pearson, a misurare il grado di associazione (ovvero, relazione lineare; Gibbons e Chakraborti, 2003); (2) la radice dell'errore quadratico medio (RMSE), per esprimere matematicamente la vicinanza tra la serie osservata e quella simulata (Von Storch e Zwiers, 1999); (3) l'errore sistematico o bias (calcolato come ERA5 meno dato osservato), che identifica la tendenza a una deviazione costante della simulazione rispetto a quanto osservato.

Il confronto tra le serie di temperatura giornaliera (media, minima e massima) osservata e simulata da ERA5 per ciascun mese nel periodo novembre-aprile è presentato in Tabella 1. I coefficienti di correlazione si avvicinano a +1 (dove +1 corrisponde alla perfetta correlazione lineare positiva), mostrando per tutti i mesi considerati una significatività statistica del 95%. Tuttavia, a questo alto grado di associazione corrisponde anche un RMSE che, soprattutto nei mesi di gennaio e febbraio, può raggiungere differenze medie tra misure osservate e dati simulati intorno ai 3°C. Tale discrepanza è largamente spiegata, soprattutto nei mesi invernali, da un errore sistematico. Di conseguenza, per poter utilizzare i dati di temperatura di ERA5 nelle analisi climatiche di Rucas, viene applicata una *correzione per i bias identificati*. Tale correzione consiste nel sottrarre a ciascun dato di ERA5 il bias individuato per depurarlo dall'errore sistematico noto ed ottenere una più esatta approssimazione del valore osservato.

Nonostante la correzione apportata, *le temperature ottenute da ERA5*, soprattutto le temperature minime, *potrebbero tendere a sovrastimare quelle misurate* per la zona di Rucas dal momento che la discrepanza con le misure osservate non può essere solo espressa in termini di un errore sistematico.

Tabella 1. Statistiche di confronto tra dati osservati e dati di ERA5 per temperatura giornaliera media, minima media e massima media nei mesi da novembre e aprile nel periodo 2020-2025: (a) coefficiente di correlazione di Pearson (coefficienti probabilisticamente significativi al 95% sono riportati in grassetto); (b) radice dell'errore quadratico medio (RMSE); e (c) errore sistematico o bias (calcolato come: ERA5 meno dato osservato).

	Temperatura media			Temperatura minima			Temperatura massima		
	Correlazione	RMSE	Bias	Correlazione	RMSE	Bias	Correlazione	RMSE	Bias
Novembre	0.71	2.3°C	-0.3°C	0.60	2.7°C	-0.1°C	0.89	1.7°C	0.4°C
Dicembre	0.79	2.4°C	0.9°C	0.60	2.6°C	0.4°C	0.90	2.1°C	1.4°C
Gennaio	0.90	2.4°C	2.2°C	0.75	2.2°C	1.4°C	0.88	2.8°C	2.5°C
Febbraio	0.95	2.6°C	2.6°C	0.82	2.3°C	1.7°C	0.91	3.4°C	3.2°C
Marzo	0.79	1.9°C	0.6°C	0.66	2.2°C	0.6°C	0.90	1.9°C	1.3°C
Aprile	0.71	2.5°C	-0.5°C	0.60	2.9°C	-0.7°C	0.86	2.0°C	0.0°C

Negli ultimi 50 anni il territorio del comprensorio sciistico di Rucas è stato caratterizzato da *un generale aumento delle temperature* registrate tra novembre e aprile (Figura 1). Questo andamento è in linea con quanto osservato nel resto delle Alpi (ARPA Piemonte, 2021). In particolare, presso il comprensorio Rucaski, le temperature medie sono aumentate con un tasso di $+0.06^{\circ}\text{C}$ ogni anno (andamento statisticamente significativo al 95%), ovvero $+0.6^{\circ}\text{C}$ ogni 10 anni: le temperature medie della stagione sciistica sono passate da circa 0°C nel 1975/1976 a circa 3.5°C nel 2024/2025. Anche le medie delle temperature minime e massime del periodo novembre-aprile mostrano una simile tendenza all'aumento (rispettivamente $+0.06^{\circ}\text{C}$ e $+0.07^{\circ}\text{C}$ all'anno, entrambe con significatività statistica al 95%).

Di conseguenza, **le giornate sono diventate mediamente più calde nel periodo novembre-aprile**, con un incremento significativo sia nelle temperature medie che in quelle massime e minime.

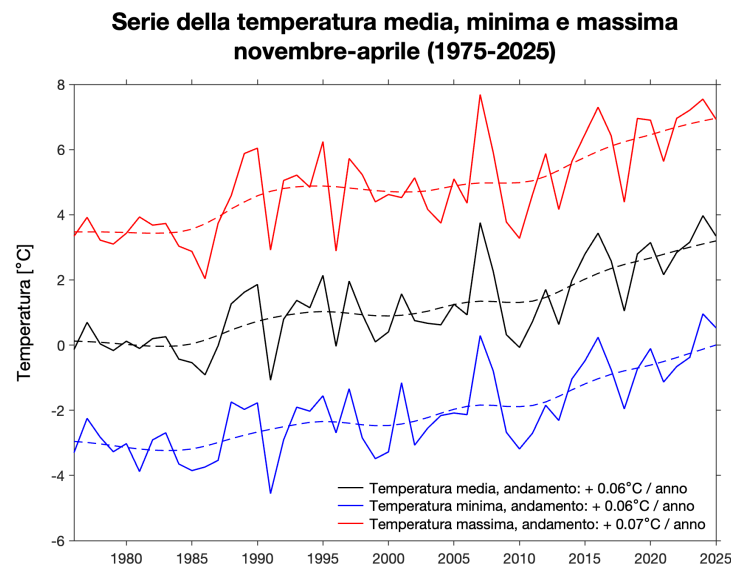


Figura 1. Serie della temperatura media (linea nera), minima (linea blu) e massima (linea rossa) calcolate per il periodo di novembre-aprile di ogni anno dalla stagione sciistica del 1975/1976 al 2024/2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalle linee tratteggiate del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. Gli andamenti riportati sono significativi con una probabilità al 95%.

Gli scenari futuri mostrano *una generale tendenza all'aumento delle temperature massime e minime* sia in inverno che in primavera per la zona di Rucas (Tabella 2). Tale incremento si allinea con l'aumento delle temperature già osservato nei decenni passati ed è più marcato per le temperature invernali e per lo scenario RCP 8.5.

Pertanto, anche per i prossimi decenni, in linea con quanto osservato dal 1975 ad oggi, **le giornate diventeranno mediamente più calde**, con un notevole incremento (anche oltre i 2.5°C) delle temperature sia nello scenario RCP 4.5 che in quello RCP 8.5 per entrambi i trienni 2011-2040 e 2041-2070.

Tabella 2. Probabili evoluzioni future di temperatura massima e minima invernale (dicembre-febbraio) e primaverile (marzo-maggio) a Rucas secondo gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 indicati dal Portale sul clima in Piemonte per i trienni 2011-2040 e 2041-2070. Tra parentesi è riportata la variazione rispetto al clima di riferimento 1976-2005.

	Clima di riferimento	RCP 4.5		RCP 8.5	
	1976-2005	2011-2040	2041-2070	2011-2040	2041-2070
Temperatura minima, inverno (dicembre-febbraio)	-4.4°C	-3.3°C (+1.1°C)	-2.4°C (+2.0°C)	-3.1°C (+1.3°C)	1.7°C (+2.7°C)
Temperatura massima, inverno (dicembre-febbraio)	2.6°C	3.5°C (+0.9°C)	4.3°C (+1.7°C)	3.7°C (+1.1°C)	5.0°C (+2.4°C)
Temperatura minima, primavera (marzo-maggio)	-0.9°C	-0.2°C (+0.7°C)	0.4°C (+1.3°C)	-0.1°C (+0.8°C)	1.2°C (+2.1°C)
Temperatura massima, primavera (marzo-maggio)	5.9°C	6.7°C (+0.8°C)	7.3°C (+1.4°C)	6.8°C (+0.9°C)	8.2°C (+2.3°C)

Il generale riscaldamento osservato per l'aumento delle temperature ha portato a *una forte diminuzione nel numero dei giorni di gelo* (ovvero, giorni con temperatura minima $\leq 0^{\circ}\text{C}$) e *giorni senza disgelo* (ovvero, giorni con temperatura massima $\leq 0^{\circ}\text{C}$ – giorni in cui non si ha la fusione del manto nevoso al suolo) osservati nel periodo novembre-aprile tra il 1975/1976 e il 2024/2025 (Figura 2). In particolare, il numero di giorni di gelo si è ridotto ogni anno di circa un giorno dalla stagione sciistica del 1975/1976 ad oggi, mentre per i giorni senza disgelo l'andamento è stato di -0.6 giorni ogni anno (6 giorni ogni 10 anni).

Da notare come **la generale tendenza alla riduzione nel numero di giorni di gelo e senza disgelo è accompagnata da una variabilità inter-annuale che resta comunque elevata**: le fluttuazioni di tale conteggio da un anno all'altro, che si sovrappongono al trend climatico a lungo termine, sono estremamente larghe (con differenze da un anno all'altro che possono superare i 40 giorni).

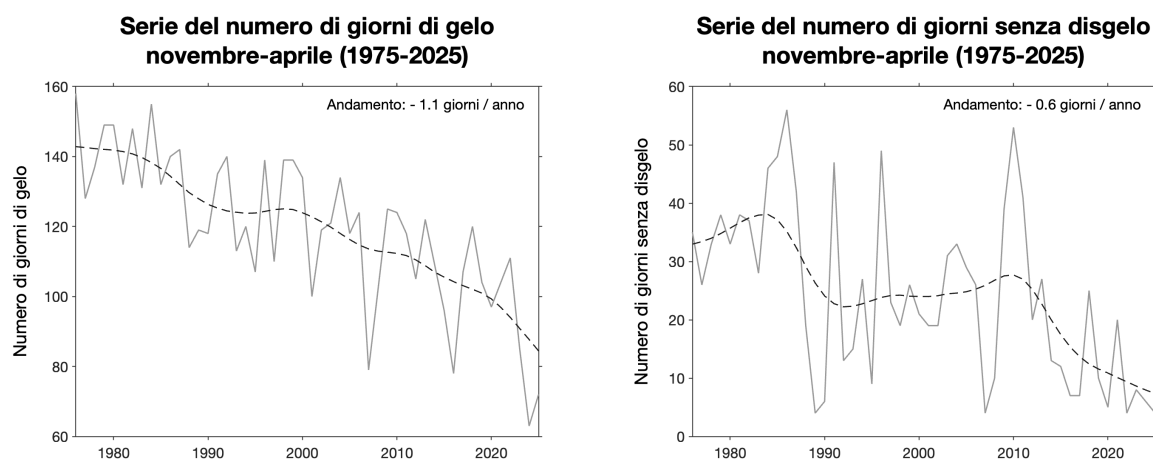


Figura 2. Serie del numero di giorni di gelo (ovvero, giorni con temperatura minima $\leq 0^{\circ}\text{C}$; pannello a sinistra) e di giorni senza disgelo (ovvero, giorni con temperatura massima $\leq 0^{\circ}\text{C}$; a destra) calcolati per il periodo di novembre-aprile di ogni anno dalla stagione sciistica del 1975/1976 al 2024/2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalle linee tratteggiate del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni.

Gli andamenti riportati hanno significatività statistica del 95%.

Secondo le probabili evoluzioni future nel numero medio di giorni di gelo, ogni anno, rispetto al 1976-2005, si avrà una riduzione rispettivamente di 10 e 12 giorni nel triennio 2011-2040 per lo scenario RCP 4.5 e RCP 8.5; 20 e 28 giorni nel triennio 2041-2070 rispettivamente per lo scenario RCP 4.5 e RCP 8.5 (Tabella 3). **Le stagioni sciistiche saranno quindi sempre più calde con sempre meno giorni di gelo** (fino a un mese in meno di giorni di gelo all'anno per lo scenario peggiore).

Tabella 3. Probabili evoluzioni future del numero medio, su base annuale, di giorni di gelo secondo gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 indicati dal Portale sul clima in Piemonte per i trienni 2011-2040 e 2041-2070. Tra parentesi è riportata la variazione rispetto al clima di riferimento 1976-2005.

	Clima di riferimento	RCP 4.5		RCP 8.5	
	1976-2005	2011-2040	2041-2070	2011-2040	2041-2070
Numero di giorni di gelo	130.5	120.5 (-10.0)	110.8 (-19.7)	118.5 (-11.9)	102.6 (-27.9)

Parallelamente alla riduzione nel numero di giorni di gelo, *il periodo con assenza di gelo si è ridotto di anno in anno*, con una tendenza di -0.2 giorni ogni anno (andamento statisticamente significativo al 95%; Figura 3). Infatti, la data del primo giorno dell'anno con temperatura minima > 0°C (e quindi in assenza di gelo) si è sempre più avvicinata in media al 1° gennaio nel corso degli anni – a partire dal 2010 tale data è sempre caduta a gennaio. Nonostante **la data del primo giorno dell'anno in assenza di gelo sia mediamente anticipata**, *la variabilità inter-annuale è molto ampia*.

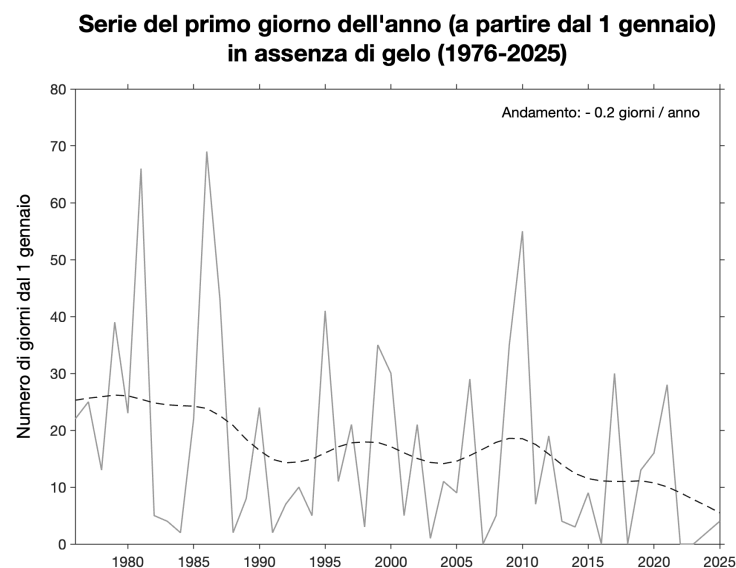


Figura 3. Serie (dal 1976 al 2025) del primo giorno dell'anno a partire dal 1° gennaio di ogni anno con assenza di gelo (ovvero, primo giorno dell'anno con temperatura minima > 0°C). La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalla linea tratteggiata del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. L'andamento riportato è statisticamente significativo al 95%.

Tra le condizioni potenzialmente favorevoli alla fusione del manto nevoso, ARPA Piemonte (2021) suggerisce la data di inizio di un periodo di almeno sei giorni consecutivi con temperatura media superiore a 1°C. Tale indicatore identifica ragionevolmente l'inizio di una risalita delle temperature giornaliere tale da favorire la fusione del manto nevoso naturale.

Negli ultimi 50 anni, tale data si è spostata in media da fine febbraio/inizio marzo a metà gennaio, con un andamento di -1 giorno ogni anno, ma tale trend è *accompagnato da una grande variabilità inter-annuale*. In generale, quindi, negli anni più recenti, **la data di inizio di un periodo di almeno sei giorni consecutivi con temperatura media superiore a 1°C è mediamente anticipata**.

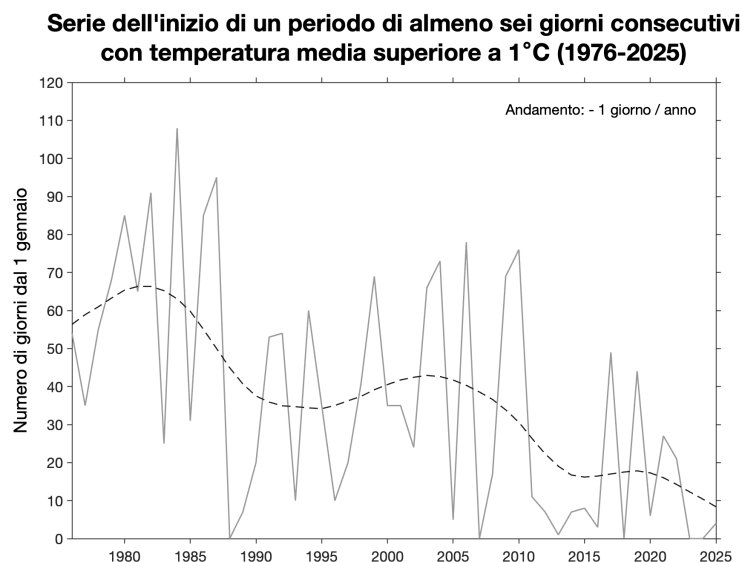


Figura 4. Serie (dal 1976 al 2025) dell'inizio di un periodo di 6 giorni consecutivi (calcolato ogni anno a partire dal 1° gennaio) con temperatura media superiore a 1°C. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalla linea tratteggiata del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. L'andamento riportato è statisticamente significativo al 95%.

2.2 Precipitazioni liquide e solide

Come fatto per la serie delle temperature, si valuta matematicamente la capacità di ERA5 di simulare la precipitazione totale (pioggia e neve fusa) accumulata giornaliera nel territorio del comprensorio di Rucas. Tabella 4 mostra le statistiche di confronto tra i dati osservati e simulati. Si osserva come, ad eccezione del mese di novembre, i coefficienti di correlazione sono statisticamente significativi – con correlazione più alta per febbraio e marzo. Le discrepanze in termini di errore quadratico medio si aggirano tra 1.5 mm e 3.5 mm circa. Ad eccezione di febbraio, le radici quadratiche dell'errore medio si costituiscono di errori sistematici costanti che vengono così corretti secondo la stessa procedura applicata per i dati di temperatura.

I valori di precipitazione di ERA5 così aggiustati dai bias identificati possono essere utilizzati per analizzare le tendenze passate e i probabili scenari futuri. Tuttavia, nonostante la correzione dai bias, *le stime di precipitazione per Rucas utilizzando gli output di ERA5 potrebbero tendere a sovrastimare la precipitazione totale misurata* per le differenze identificate dalle statistiche di confronto tra dati osservati e dati di ERA5 – il modello potrebbe simulare condizioni climatiche “più bagnate” rispetto a quelle reali.

Tabella 4. Statistiche di confronto tra dati osservati e dati di ERA5 per la precipitazione totale giornaliera nei mesi da novembre a aprile nel periodo 2020-2025: (a) coefficiente di correlazione di Pearson (coefficienti probabilisticamente significativi al 95% sono riportati in grassetto); (b) Radice dell'Errore Quadratico Medio (RMSE); e (c) errore sistematico o bias (calcolato come: ERA5 meno dato osservato).

	Precipitazione totale cumulata		
	Correlazione	RMSE	Bias
Novembre	0.10	1.8 mm	1.4 mm
Dicembre	0.40	2.0 mm	1.6 mm
Gennaio	0.40	3.2 mm	1.7 mm
Febbraio	0.80	3.5 mm	-0.5 mm
Marzo	0.84	1.6 mm	1.0 mm
Aprile	0.53	1.8 mm	1.4 mm

L'assenza di una stazione nivometrica a Rucas non permette però di valutare attraverso un confronto con le misure osservate la capacità di ERA5 di simulare parametri come quantità di neve al suolo o precipitazione nevosa. Di conseguenza non è possibile fare una correzione da eventuali errori sistematici per i parametri nivologici, come fatto per le serie delle temperature e delle precipitazioni. Tuttavia, seguendo i risultati di Kouki e Coautori (2023), *è possibile aspettarsi nelle simulazioni di ERA5 una sovrastima dell'equivalente in acqua della neve* – in linea con quanto osservato per la precipitazione totale. I risultati presentati in questa sezione (e in Sezione 2.3) potrebbero essere marcati da una sovrastima negli apporti di precipitazione nevosa e nella copertura nevosa.

Osservando la serie della precipitazione totale cumulata nel periodo novembre-aprile dalla stagione sciistica del 1975/1976 a quella del 2024/2025 (Figura 5), **non si evidenzia alcun andamento statisticamente significativo** (al 95%). Nonostante l'assenza di una tendenza, *l'apporto di pioggia e neve fusa del periodo novembre-aprile si caratterizza per una marcata variabilità inter-annuale*: per esempio, si può osservare che la differenza in precipitazione

totale cumulata tra il 2008 e il 2009 è raddoppiata nel giro di un anno (passando da circa 400 mm di equivalente idrico a oltre 1000 mm).

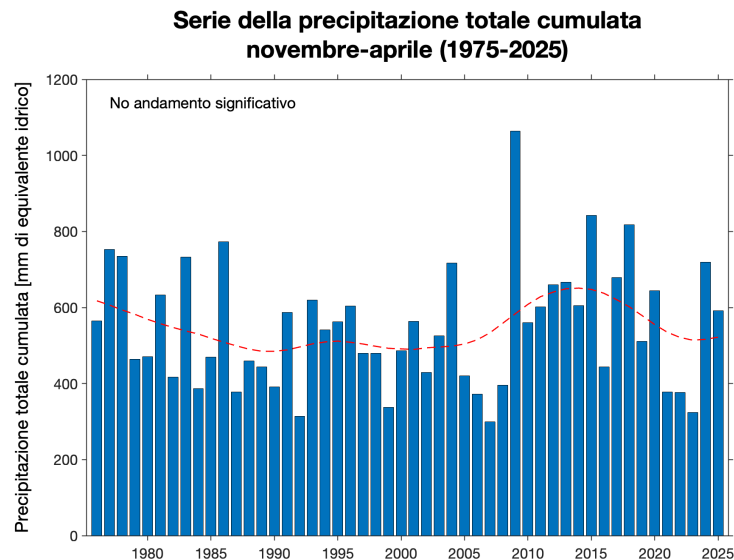


Figura 5. Serie della precipitazione totale cumulata da novembre ad aprile dalla stagione sciistica del 1975/1976 a quella del 2024/2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalla linea tratteggiata rossa del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. La serie non mostra alcun andamento statisticamente significativo al 95%.

L'andamento del numero di giorni tra novembre ed aprile con precipitazione totale cumulata di almeno 1 mm ricalca l'assenza di tendenza osservata per la precipitazione totale cumulata negli ultimi 50 anni (Figura 6). Nessun cambiamento significativo è stato identificato anche nel numero di giorni con pioggia totale cumulata di almeno 5 mm. Entrambe le serie però mostrano larghe fluttuazioni da un anno all'altro.

Dunque, in linea con l'andamento nel regime della precipitazione totale cumulata, **il numero di giorni con precipitazione totale cumulata di almeno 1 mm e di almeno 5 mm per il periodo novembre-aprile non è cambiato significativamente dal 1975 ad oggi**, nonostante *entrambe le serie mostrino un'ampia variabilità inter-annuale*.

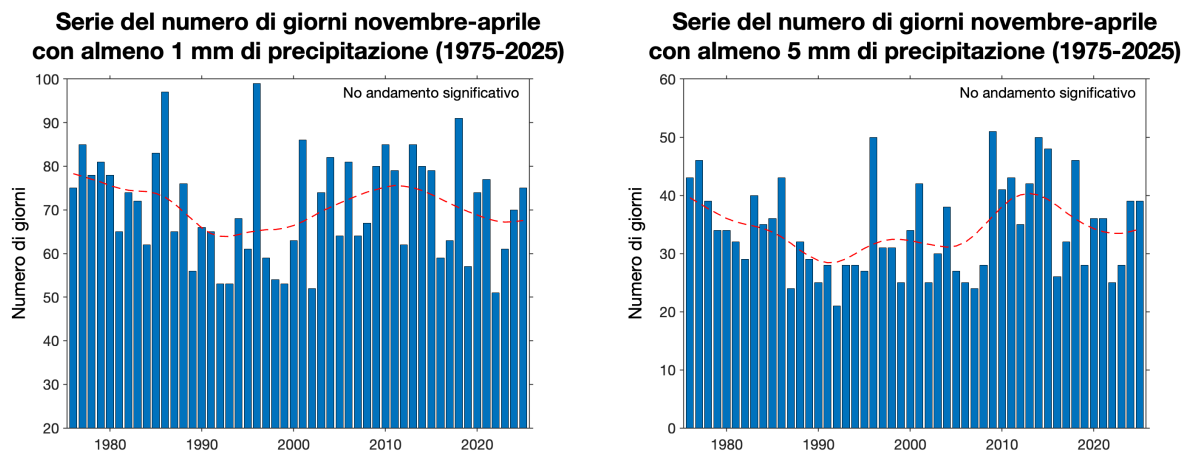


Figura 6. Serie del numero di giorni tra novembre ed aprile con precipitazione totale cumulata di almeno 1 mm (pannello a sinistra) e di almeno 5 mm (pannello a destra) dal 1975 al 2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalle linee tratteggiate del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. Gli andamenti non hanno alcuna significatività statistica al 95%.

In linea con quanto osservato negli ultimi 50 anni, anche **nei trienni futuri** (sia 2011-2040 che 2041-2070) **non si prevede una variazione nel regime della precipitazione totale cumulata sia per lo scenario RCP 4.5 che per lo scenario RCP 8.5** (Tabella 5). Pertanto, dal clima di riferimento del 1976-2005, la precipitazione totale invernale rimarrà molto probabilmente di circa 170 mm di equivalente idrico nei prossimi decenni; mentre per la primavera si dovrebbero continuare a registrare 260 mm circa a prescindere dallo scenario climatico.

Tabella 5. Probabili evoluzioni future della precipitazione totale cumulata (in mm di equivalente idrico) in inverno (dicembre-febbraio) e in primavera (marzo-maggio) secondo gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 indicati dal Portale sul clima in Piemonte per i trienni 2011-2040 e 2041-2070. Tra parentesi è riportata la variazione rispetto al clima di riferimento 1976-2005.

	Clima di riferimento	RCP 4.5		RCP 8.5	
	1976-2005	2011-2040	2041-2070	2011-2040	2041-2070
Precipitazione totale, inverno (dicembre-febbraio)	170.5 mm	170.6 mm (+0.1 mm)	170.6 mm (+0.1 mm)	170.5mm (0.0 mm)	170.6 mm (+0.1 mm)
Precipitazione totale, primavera (marzo-maggio)	262.3 mm	262.2 mm (-0.1mm)	262.3 mm (0.0mm)	262.3 mm (0.0mm)	262.3 mm (0.0mm)

Seguendo quanto fatto da ARPA Piemonte nel suo Portale sul Clima in Piemonte (ARPA Piemonte), si calcola la serie della frazione tra neve e precipitazione totale, ovvero il rapporto (mesi novembre-aprile) tra la componente nevosa (stimata dalla combinazione tra la precipitazione cumulata giornaliera e i valori di temperatura media giornaliera $\leq 2^{\circ}\text{C}$) e la precipitazione cumulata giornaliera.

La frazione della precipitazione nevosa sul totale per novembre-aprile ha subito dal 1975 ad oggi una riduzione con andamento di -0.77% ogni anno (statisticamente significativo al 95%), pur essendo *marcata da un'elevata variabilità inter-annuale* (Figura 7). L'andamento di tale rapporto mostra quindi che, nonostante la precipitazione totale non sia variata negli ultimi 50 anni, l'innalzamento delle temperature ha portato ad un aumento della frazione di precipitazione liquida su quella nevosa.

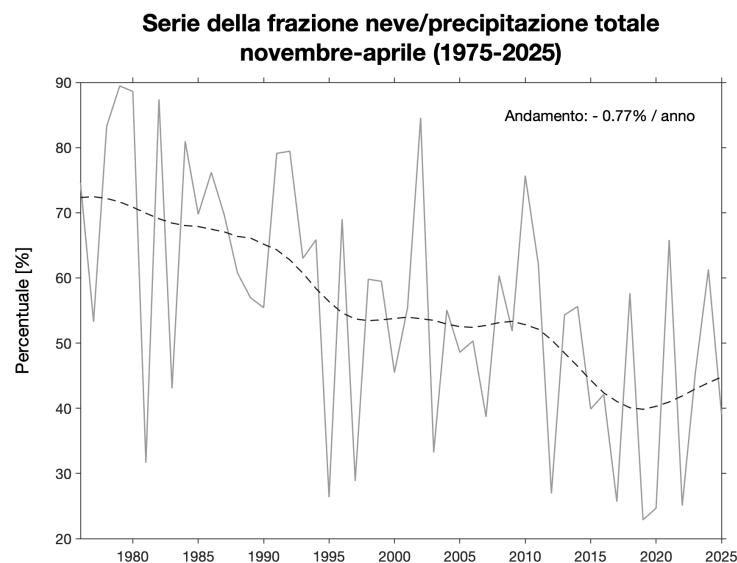


Figura 7. Serie della frazione (in percentuale) tra neve e precipitazione totale da novembre-aprile del 1975/1976 a novembre-aprile del 2024/2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalla linea tratteggiata del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. L'andamento riportato è statisticamente significativo al 95%.

La riduzione della frazione neve/precipitazione registrata nel passato continuerà anche nei trienni 2011-2040 e 2041-2070 secondo gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5, fino a non avere alcuna precipitazione nevosa verso la seconda metà del XXI secolo per il peggiore tra gli scenari (Tabella 6).

Tabella 6. Probabili evoluzioni future della frazione tra neve e precipitazione totale secondo gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 indicati dal Portale sul clima in Piemonte per i trienni 2011-2040 e 2041-2070. Tra parentesi è riportata la variazione rispetto al clima di riferimento 1976-2005.

	Clima di riferimento	RCP 4.5		RCP 8.5	
	1976-2005	2011-2040	2041-2070	2011-2040	2041-2070
Frazione neve/precipitazione totale	73.3%	30.3% (-43.0%)	20.5% (-52.5%)	23.0% (-50.3%)	0.0% (-75.5%)

Come già osservato per l'andamento del rapporto tra precipitazione nevosa e precipitazione totale, **le nevicate tra novembre e aprile hanno subito una riduzione di -2.6 mm di equivalente idrico all'anno dal 1975 ad oggi** (Figura 8), ma tale diminuzione è accompagnata da *marcate fluttuazioni inter-annuali*. Infatti, in un contesto complessivo di diminuzione della quantità di neve sia in termini di frazione neve/precipitazione totale che di precipitazione nevosa, *si osservano anni in cui le nevicate risultano superiori alla media*, a dimostrazione della maggiore variabilità dei processi climatici a grande scala, che quindi accompagna le variazioni graduali medie di lungo periodo con un'accentuazione delle situazioni anomale (ARPA Piemonte, 2021).

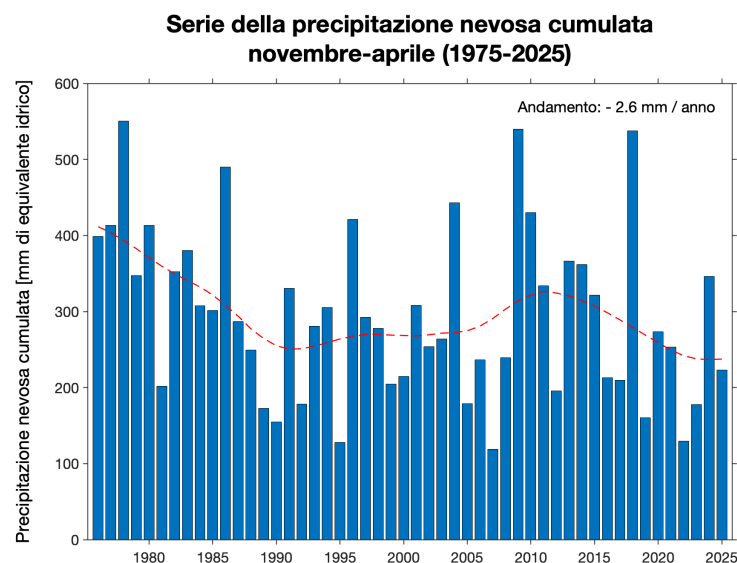


Figura 8. Serie della precipitazione nevosa cumulata da novembre ad aprile dalla stagione sciistica del 1975/1976 a quella del 2024/2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalla linea tratteggiata rossa del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. La serie non mostra alcun andamento statisticamente significativo al 95%.

2.3 Neve al suolo

Per quanto riguarda lo spessore della neve al suolo per il periodo novembre-aprile (Figura 9), **si osserva negli ultimi 50 anni una significativa riduzione** (-0.17 cm ogni anno, andamento probabilisticamente significativo al 95%) **nello spessore medio del manto nevoso**. Come per la serie delle precipitazioni nevose, tale diminuzione è accompagnata da *una marcata variabilità inter-annuale*, passando da un anno con uno spessore medio del manto nevoso di 14 cm di equivalente idrico ad una stagioni sciistica con spessore inferiore a 2 cm.

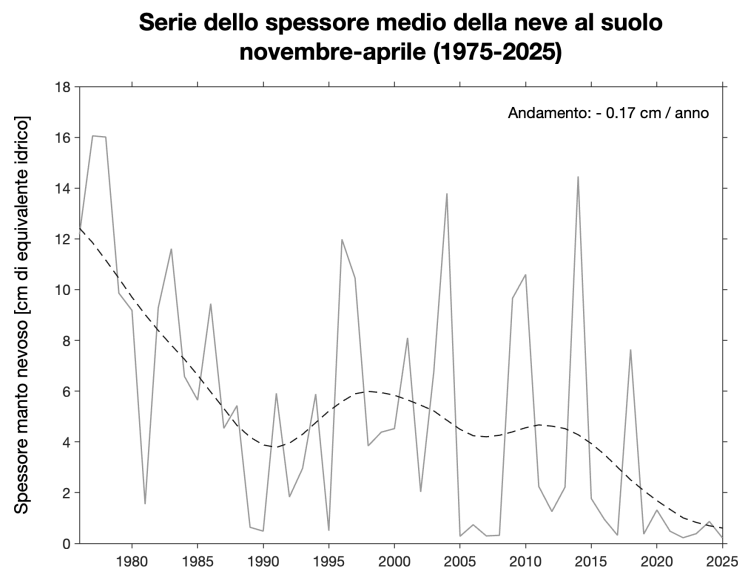


Figura 9. Serie dello spessore medio della neve al suolo da novembre-aprile del 1975/1976 a novembre-aprile del 2024/2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalla linea tratteggiata del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. L'andamento riportato è statisticamente significativo al 95%.

2.4 Velocità del vento

Il confronto tra la velocità media giornaliera di vento osservata e simulata da ERA5 è mostrato in Tabella 7. I coefficienti di correlazione sono sempre maggiori di 0.5 e statisticamente significativi al 95% per tutti i mesi considerati, mostrando quindi una buona associazione tra misure e dati simulati. Si osserva tuttavia un RMSE di circa 1.0 m/s per ogni mese tra novembre e aprile, discrepanza in gran parte dovuta ad un errore sistematico. Si procede quindi, come fatto per le serie delle temperature e della precipitazione totale, ad una *correzione dei bias identificati* al fine di poter usare i dati di vento di ERA5 per esplorare il cambiamento climatico passato nei pressi del comprensorio Rucaski.

Tabella 7. Statistiche di confronto tra dati osservati e dati di ERA5 per la velocità giornaliera media del vento nei mesi da novembre ad aprile nel periodo 2020-2025: (a) coefficiente di correlazione di Pearson (coefficienti probabilisticamente significativi al 95% sono riportati in grassetto); (b) Radice dell'Errore Quadratico Medio (RMSE); e (c) errore sistematico o bias (calcolato come: ERA5 meno dato osservato).

	Velocità media del vento		
	Correlazione	RMSE	Bias
Novembre	0.55	1.0 m/s	0.7 m/s
Dicembre	0.66	1.3 m/s	0.3 m/s
Gennaio	0.71	1.1 m/s	0.7 m/s
Febbraio	0.66	1.0 m/s	0.8 m/s
Marzo	0.54	0.9 m/s	0.5 m/s
Aprile	0.40	1.0 m/s	0.8 m/s

Negli ultimi 50 anni, **la velocità media del vento per il periodo novembre-aprile non ha mostrato alcun andamento statisticamente significativo** (Figura 10), con una velocità media intorno a 0.6 m/s (2.16 km/h) che è rimasta quindi generalmente invariata.

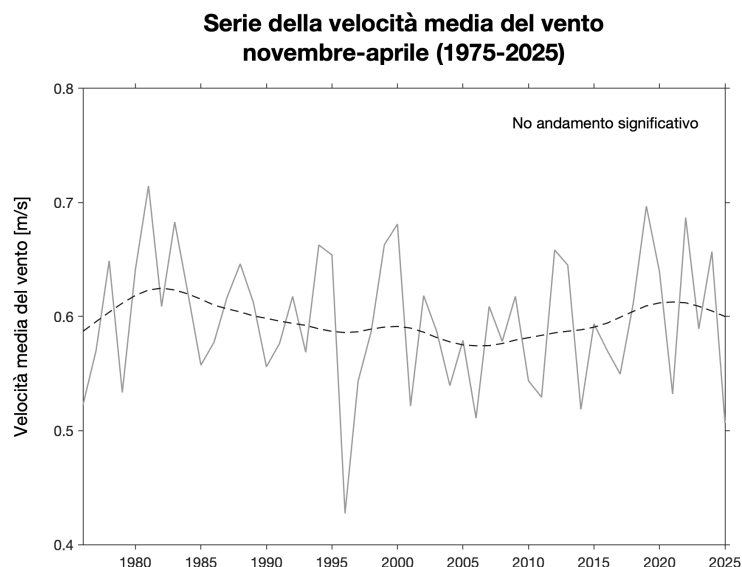


Figura 10. Serie della velocità media del vento calcolata per il periodo di novembre-aprile di ogni anno dalla stagione sciistica del 1975/1976 al 2024/2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalla linea tratteggiata del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. L'andamento mostrato dalla serie non è statisticamente significativo al 95%.

2.5 Condizioni favorevoli alla produzione di neve tecnica

Le condizioni meteorologiche (come temperatura ed umidità) influenzano in modo significativo la produzione della neve tecnica, sia in termini qualitativi che quantitativi, come anche le condizioni affinché la neve prodotta si accumuli al suolo. Per questo motivo, secondo le condizioni di funzionamento dei generatori per l'innevamento artificiale (si veda l'allegato CBII_0_PF_PG_002_1 Relazione illustrativa-signed.pdf), si vuole presentare l'evoluzione passata del numero di ore "fredde" (ore con temperatura $\leq -2^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa $\leq 60\%$) e ore "molto fredde" (ore con temperatura $\leq -7^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa $\leq 60\%$) favorevoli alla produzione di neve tecnica.

Per stimare il numero di ore "fredde" e "molto fredde" è quindi necessario calcolare l'umidità relativa a partire dai dati di temperatura e di temperatura di rugiada di ERA5 utilizzando l'equazione di August-Roche-Magnus (EPA, 2017). Con le temperature di ERA5 già corrette dall'errore sistematico identificato (vedi Sezione 2.1), si procede prima del calcolo dell'umidità relativa oraria a valutare la capacità di ERA5 di simulare le temperature di rugiada. Come per le temperature medie, minime e massime, anche per la temperatura di rugiada si identifica un elevato (e probabilisticamente significativo al 95%) grado di associazione tra dato misurato e dato simulato. Le temperature di rugiada secondo ERA5, specialmente le minime, differiscono fino a 5°C da quelle osservate – tale discrepanza è per la maggior parte dovuta ad un errore sistematico che viene quindi corretto prima di procedere al calcolo dell'umidità relativa e, quindi, del numero di ore "fredde" e "molto fredde".

Tabella 8. Statistiche di confronto tra dati osservati e dati di ERA5 per temperatura di rugiada giornaliera media, minima media e massima media nei mesi da novembre a aprile nel periodo 2020-2025: (a) coefficiente di correlazione di Pearson (coefficienti probabilisticamente significativi al 95% sono riportati in grassetto); (b) Radice dell'Errore Quadratico Medio (RMSE); e (c) errore sistematico o bias (calcolato come: ERA5 meno dato osservato).

	Temperatura di rugiada media			Temperatura di rugiada minima			Temperatura di rugiada massima		
	Correlazione	RMSE	Bias	Correlazione	RMSE	Bias	Correlazione	RMSE	Bias
Novembre	0.82	2.9°C	2.5°C	0.72	4.9°C	4.3°C	0.70	2.5°C	1.5°C
Dicembre	0.86	2.5°C	2.1°C	0.80	4.2°C	3.8°C	0.73	2.1°C	1.0°C
Gennaio	0.87	1.9°C	1.3°C	0.76	3.5°C	2.8°C	0.81	1.9°C	0.2°C
Febbraio	0.91	1.7°C	1.1°C	0.88	2.8°C	2.4°C	0.82	1.8°C	0.3°C
Marzo	0.91	3.0°C	2.9°C	0.83	4.7°C	4.7°C	0.87	2.2°C	1.6°C
Aprile	0.81	2.5°C	2.0°C	0.72	3.8°C	2.8°C	0.78	2.2°C	1.7°C

Dall'analisi dell'evoluzione del numero di ore "fredde" e "molto fredde" registrate nel periodo novembre-aprile (Figura 11), si osserva *una generale riduzione delle condizioni favorevoli alla produzione di neve tecnica*. In particolare, il numero di ore "fredde" ha mostrato una diminuzione di circa 4 ore ogni anno dal 1975 ad oggi – pur essendo tale tendenza caratterizzata da una grande variabilità inter-annuale. Tuttavia, tale numero, che si era assestato in media tra le 400 e le 500 ore a stagione fino al 2005, ha subito una drastica riduzione negli ultimi 20 anni, con una diminuzione di circa 24 ore ogni anno (un giorno in meno all'anno). Il numero di ore "molto fredde" (sottoinsieme, questo, della categoria ore "fredde") invece, pur contraddistinto anch'esso da una larga variabilità inter-annuale, si è

ridotto di 1.6 ore all'anno e negli ultimi 10 anni difficilmente è stato capace di superare le 100 ore a stagione sciistica.

Di conseguenza, analizzando l'andamento del numero di ore "fredde" e "molto fredde", si osserva **una diminuzione delle condizioni favorevoli alla produzione della neve tecnica**, seppure tali condizioni mostrino *grandi variazioni da un anno all'altro*. Tale riduzione è particolarmente significativa per il numero di ore "fredde", soprattutto negli ultimi 20 anni.

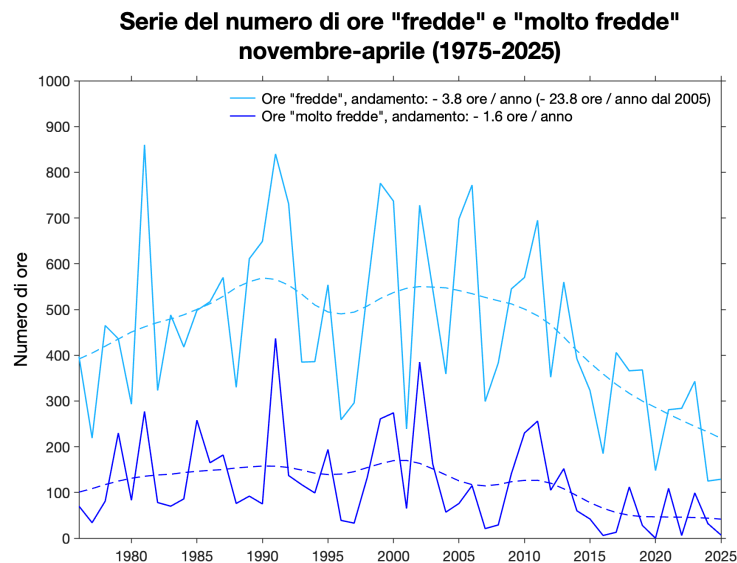


Figura 11. Serie del numero di ore "fredde" (con temperatura $\leq -2^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa $\leq 60\%$; linea azzurra) e di ore "molto fredde" (con temperatura $\leq -7^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa $\leq 60\%$; linea blu) calcolate per il periodo di novembre-aprile di ogni anno dalla stagione sciistica del 1975/1976 al 2024/2025. La variabilità a bassa frequenza è mostrata dalla linea tratteggiata del filtro di media ponderata gaussiana che è stato applicato su finestre temporali di 15 anni. Gli andamenti riportati sono statisticamente significativi al 95%.

3. RIEPILOGO DEI RISULTATI

Dall'analisi dei dati meteorologici e nivologici estratti dalla reanalisi ERA5 per Rucas (dati opportunamente verificati e corretti da errori sistematici) emergono segnali significativi di un aumento della temperatura media, minima e massima nel periodo novembre-aprile dal 1975/1976 ad oggi. Applicando le variazioni attese nei periodi 2011-2040 e 2041-2070 secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 si desume che tale riscaldamento continuerà anche nei prossimi decenni, con giornate che continueranno a essere mediamente sempre più calde sia in termini di temperatura massima che minima. Le giornate sempre più calde hanno guidato e guideranno la riduzione passata e futura del numero di giorni di gelo e senza disgelo (con la data del primo giorno dell'anno in assenza di gelo che è mediamente anticipata), pur essendo tali serie soggette a marcata variabilità inter-annuale. In linea con queste tendenze, anche la data di inizio di un periodo di almeno sei giorni consecutivi con temperatura media superiore a 1°C (data capace di identificare l'inizio di una risalita delle temperature giornaliere tale da favorire la fusione del manto nevoso) è mediamente anticipata, mostrando comunque ampie fluttuazioni da un anno all'altro.

Il regime della precipitazione totale (ovvero il flusso equivalente d'acqua – pioggia o neve – che raggiunge la superficie terrestre) non è variato dal 1975 ad oggi, restando però sempre caratterizzato da una marcata variabilità inter-annuale. Questo regime non cambierà in maniera significativa nei vari scenari futuri analizzati. Nonostante l'assenza di andamento significativo per la precipitazione totale, il riscaldamento ha inciso e inciderà negativamente su tutti i parametri dell'innevamento, come frazione della precipitazione nevosa sul totale della precipitazione, precipitazione nevosa e spessore medio del manto nevoso. Ne emerge così un quadro di diminuzione della quantità di neve in termini di frazione neve/precipitazione totale e precipitazione nevosa, dove però si osservano anni in cui le nevicate risultano superiori alla media.

Come la precipitazione totale, anche la velocità media del vento per il periodo novembre-aprile non ha mostrato alcun andamento statisticamente significativo negli ultimi 50 anni.

L'analisi dell'evoluzione del numero di ore “fredde” e “molto fredde” dal 1975 ad oggi (capaci di garantire l'innevamento artificiale) evidenzia una riduzione statisticamente significativa delle condizioni favorevoli alla produzione della neve tecnica, seppure anche queste serie siano marcate da grandi fluttuazioni da un anno all'altro.

BIBLIOGRAFIA

ARPA Piemonte. *Portale sul Clima in Piemonte: Gli andamenti climatici del passato, gli scenari futuri, gli indicatori*. Accessibile via: <https://webgis.arpa.piemonte.it/portale-sul-clima-in-piemonte/>

ARPA Piemonte (2021). *Gli effetti del cambiamento climatico sull'innevamento naturale delle Alpi piemontesi a supporto della Valutazione di Impatto Ambientale delle opere*. Accessibile via: https://webgis.arpa.piemonte.it/secure_apps/cambiamenti_climatici_webapp/documentazione_tecnica/Effetti_camb_clim_innevamento_Alpi_piemontesi.pdf

Dee D. P., e Coautori (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 137 (656), 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

EPA (2017). Meteorology – Humidity. In: *HMS – Hydrologic Micro Services*. Accessibile via: <https://qed.epa.gov/hms/meteorology/humidity/algorithms/>

Hersbach H., e Coautori (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Gibbons J.D., e Chakraborti S. (2003). *Nonparametric statistical inferences*. Marcel Dekker Inc., New York

Kouki K., e Coautori (2023). Evaluation of snow cover properties in ERA5 and ERA5-Land with several satellite-based datasets in the Northern Hemisphere in spring 1982-2018. *The Cryosphere*, 17, 5007-5026. <https://doi.org/10.5194/tc-17-5007-2023>

Minola L., e Coautori (2024). Climatology of near-surface wind speed from observational, reanalysis and high-resolution regional climate model data over the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 62, 933-953. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06931-3>

Trewin B.C. (2007). *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate*; WCDMP-No. 61. WMO-TD No. 1377; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.

van Vuuren, D.P., e Coautori (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Von Storch H., e Zwiers F. W. (1999). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press, Cambridge