

Gli osservatori di alta quota nelle Alpi

Storici, affascinanti, ricchi di dati. Custodi di un autentico patrimonio di conoscenza da divulgare. In questo report un focus sulla temperatura



Report n 3

Aprile 2025



Gli osservatori di alta quota nelle Alpi: temperature e tendenze di un clima che cambia

Guido Nigrelli

RIASSUNTO: In questo lavoro si analizzano le temperature registrate dai più importanti osservatori meteorologici di alta quota presenti sulle Alpi (Capanna Margherita, Jungfrauoch, Plateau Rosà, Piz Corvatsch, Gornergrat, Sonnblick, Zugspitze). La temperatura sta aumentando anche in questi ambienti dal clima polare e questo sta avvenendo a partire dagli anni '80 del 1900. Per il periodo climatologico normale 1961-1990 l'aumento della temperatura media annua è di circa 0,3 °C/10 anni, per il periodo climatologico normale 1991-2020 l'aumento passa a circa 0,4 °C/10 anni e, per l'ultimo trentennio (1995-2024), l'aumento è di circa 0,5 °C/10 anni. Il presente lavoro può costituire un utile documento di supporto per lo svolgimento di indagini più dettagliate e più ambiziose per diverse finalità.

PAROLE CHIAVE: Temperatura, Clima, Cambiamenti climatici, Alpi

ABSTRACT: In this work, we analyze the temperatures recorded by the most important high-elevation meteorological observatories in the European Alps (Capanna Margherita, Jungfrauoch, Plateau Rosà, Piz Corvatsch, Gornergrat, Sonnblick, Zugspitze). Temperature is also increasing in these polar climate environments and this has been happening since the 1980s. For the 1961-1990 climatological normal the increase in mean annual temperature is about 0.3 °C/10 years, for the 1991-2020 climatological normal the increase goes to about 0.4 °C/10 years and, for the last thirty years (1995-2024), the increase is about 0.5 °C/10 years. This work can be a useful supporting document for carrying out more detailed and more ambitious investigations for different purposes.

KEYWORDS: Temperature, Climate, Climate change, European Alps

Indice

1. Introduzione	2
2. Gli osservatori di alta quota sulle Alpi	3
3. Dati e stazioni	11
4. Temperature medie, minime e massime	14
5. Estremi termici	17
6. Tendenze della temperatura	20
7. Cenni sulla relazione quota-temperatura	23
8. Discussione e conclusioni	24
Ringraziamenti e bibliografia	27

1. Introduzione

Nelle Alpi europee (di seguito Alpi), gli ambienti di alta quota stanno rispondendo rapidamente e in maniera molto evidente all'aumento delle temperature, nel contesto di un cambiamento climatico sempre più preoccupante ([WMO, 2024](#)). Gli effetti più evidenti di questi cambiamenti nelle Alpi sono la drastica riduzione delle masse glaciali, la degradazione del permafrost, lo spostamento verso quote più elevate di molte specie floristiche unito alla riduzione di molti dei loro areali e, non ultimo, l'aumento della frequenza dei processi di instabilità naturale, cioè quei processi che generalmente vengono definiti come frane e che in questi ambienti si manifestano principalmente in crolli di roccia, crolli di ghiaccio, valanghe e colate detritico-torrentizie ([Dullinger et al. 2012](#); [Gariano et al. 2016](#); [Rumpf et al., 2018](#); [Hansson et al., 2021](#); [Chiarle et al. 2022](#); [Schickhoff et al., 2022](#); [Nigrelli et al. 2024](#)).

Sulle Alpi, il clima sta cambiando più velocemente che in altre aree del pianeta: questo soprattutto a causa della sempre più alta presenza di aree in rapida deglaciazione, in cui roccia e detriti esposti direttamente all'irraggiamento solare accumulano calore anziché rifletterlo (basso effetto albedo) e anche a causa della bassa o nulla presenza di suolo e copertura vegetale e della conseguente bassa o nulla evapotraspirazione. Sulle Alpi, la temperatura sta aumentando con tassi di circa 0,5 °C ogni 10 anni ([Hock et al. 2019](#); [Nigrelli et al. 2021](#); [Nigrelli et al. 2023](#)). In relazione a questi rapidi cambiamenti, l'arco alpino è considerato uno dei principali "hot-spot" climatici della terra, al pari di altre aree geografiche come il bacino del Mediterraneo e le regioni artiche.

La conoscenza di come stia cambiando il clima in alta montagna diventa quindi di fondamentale importanza al fine di stimare i futuri scenari evolutivi e di adottare le più corrette azioni di mitigazione e di adattamento. Molti sono gli studi che sono stati fatti sull'argomento e molte le pubblicazioni prodotte. Da una indagine bibliografica condotta mediante l'utilizzo dei più autorevoli motori di ricerca bibliografici disponibili in rete in forma gratuita, sembra però mancare un contributo in italiano (e forse non solo) che analizzi le temperature registrate dai più importanti osservatori meteorologici di alta quota presenti sulle Alpi e ne raggruppi i risultati in un unico scritto. In relazione a quanto riscontrato, si è quindi pensato di produrre questo report che, come i precedenti, non ha la pretesa di essere esaustivo ma può costituire un utile documento di supporto per lo svolgimento di indagini più dettagliate e più ambiziose per diverse finalità.

2. Gli osservatori di alta quota sulle Alpi

Grazie alla lungimiranza e al coraggio di alcuni scienziati, alpinisti e politici, attivi a cavallo tra la seconda metà del 1800 e la prima metà del 1900, sono nati sull'arco alpino alcuni importanti osservatori di alta quota, con finalità astronomiche e meteorologiche, che hanno iniziato a raccogliere dati in condizioni operative estreme, con strumenti manuali e a registrarli quotidianamente e in alcuni casi anche più volte al giorno su grossi registri cartacei. Lasciando l'astronomia ai più esperti, possiamo affermare senza ombra di dubbio che la meteorologia di montagna sia nata sulle Alpi, proprio grazie a questi uomini e a questi osservatori (Barry, 2008). A quei tempi, la meteorologia stava muovendo i suoi primi passi, seguita a breve dalla climatologia: due scienze che non potevano nascere prima che venissero realizzati degli strumenti in grado di fornire misurazioni accurate (per quel tempo) degli elementi atmosferici (Pinna, 1977). L'attività di raccolta dati agli osservatori meteorologici è proseguita, in alcuni casi ininterrottamente ed in altri casi con brevi o lunghe interruzioni, utilizzando strumenti meteorologici sempre più moderni, arrivando sino ai giorni nostri ed alle attuali stazioni meteorologiche automatiche. Infatti, con il passare degli anni e con l'avvento delle moderne tecnologie, si è passati da una situazione che vedeva strumenti e personale stabilmente presenti in sito, a stazioni meteorologiche automatiche non presidiate e gestite da remoto, i cui dati acquisiti vengono trasmessi in tempo quasi reale ai centri di competenza distanti anche centinaia di chilometri. Pertanto, l'osservatorio meteorologico di alta quota inteso come l'abbinamento strumenti-uomo attualmente non esiste più se non in rari casi oppure in occasione di specifiche campagne di misura effettuate da ricercatori diversi: la stazione meteorologica automatica è diventata la vera protagonista, internazionalmente conosciuta come *automatic weather station*, AWS.

Le lunghe serie di osservazioni effettuate e i dati acquisiti da questi osservatori costituiscono un vero e proprio patrimonio storico-scientifico da conservare e da valorizzare che, alla luce degli attuali cambiamenti climatici, riveste ancor più importanza. Gli osservatori meteorologici di alta quota presenti sulle Alpi non sono molti, la loro storia meriterebbe un volume scientifico dedicato, che otterrebbe sicuramente grande successo. Una sintetica descrizione degli osservatori di alta quota, trasformati nel tempo in AWS, oggetto di questo report e ordinati per quota decrescente, è riportata qui di seguito.

Capanna-Osservatorio Regina Margherita

Capanna-Osservatorio Regina Margherita è il nome storico dell'attuale rifugio "Capanna Regina Margherita", il rifugio più alto d'Europa, situato sulla Punta Gnifetti del massiccio del Monte Rosa, ad una quota di 4554 metri. L'ambiente che circonda la Capanna Margherita è di tipo glaciale. Il

rifugio, di proprietà del Club Alpino Italiano, fu inaugurato il 4 settembre 1893 e fu costruito con il duplice scopo di servire come rifugio per gli alpinisti e come luogo per svolgere studi di meteorologia e di fisica terrestre (Alessandri, 1911). Negli anni successivi, ci si rese conto del limitato spazio a disposizione e, nel 1902, si procedette ad alcuni ampliamenti al fine di rendere indipendenti i locali riservati all'osservatorio da quelli riservati ai custodi e agli alpinisti. Nel luglio 1904 fu nominato dal Ministero dell'Agricoltura un direttore dell'osservatorio (Ferrari, 1905). In relazione alla quota elevata ed alle condizioni meteorologiche estreme, le osservazioni e la raccolta dei dati avvenivano solamente durante il periodo estivo. Nel 2002, ARPA Piemonte installa sul tetto del rifugio una stazione meteorologica automatica, iniziando così la serie di dati in questo estremo luogo delle Alpi che prosegue tuttora (Figura 1).



Figura 1 – Il Rifugio Capanna Margherita in una recente foto non datata (fonte Associazione Gestori Rifugi Alpini, Escursionistici e posti tappa del Piemonte, <https://rifugidelpiemonte.it>). Sul tetto del rifugio, in alto a destra, è possibile intravedere la stazione meteorologica.

Osservatorio dello Jungfraujoeh

Jungfraujoeh si trova nelle Alpi svizzere tra le tre montagne Eiger, Mönch e Jungfrau. La stazione di ricerca si trova a un'altitudine di 3450 m sul livello del mare. Il laboratorio Sphinx è 130 m più in alto ed è stato fondato nel 1937. L'ambiente che circonda l'osservatorio è di tipo glaciale. Jungfraujoeh è un sito di ricerca ideale, grazie alla sua posizione di alta quota al centro dell'Europa. Una peculiarità

significativa rispetto alla maggior parte delle altre stazioni di ricerca in alta montagna è il facile e bellissimo accesso tramite il famoso trenino del Bernina. Inoltre, lo Jungfraujoch, che è forse la più famosa meta turistica della Svizzera, offre uno splendido punto panoramico sulle Alpi svizzere e sul magnifico ghiacciaio dell'Aletsch (Leuenberger et al. 2008). Un primo padiglione meteorologico fu costruito nel 1925 e così iniziarono le prime misure affidabili. Tuttavia, vento e terreno poco stabile distrussero più volte la struttura. Si decise pertanto di integrare la stazione meteorologica nel nuovo osservatorio inaugurato nel 1937 (Figura 2). Nel 1980 la stazione viene automatizzata ed entra a far parte della rete di rilevamento automatica di MeteoSvizzera. Oltre alla temperatura, comincia anche l'osservazione di altri parametri (Appenzeller et al. 2008).



Figura 2 – Lo Jungfraujoch Sphinx in una recente foto non datata (fonte: High Altitude Research Stations Jungfraujoch & Gornergrat, <https://www.hfsjg.ch>).

Osservatorio di Plateau Rosà

L'osservatorio di Plateau Rosà si trova in Valle d'Aosta, nel comune di Valtournenche, ad una quota di 3488 metri, sullo sperone roccioso di Testa Grigia, a pochi metri dalla linea di confine tra Italia e Svizzera. L'ambiente che circonda Plateau Rosà è di tipo glaciale. Facilmente raggiungibile mediante funivia da Cervinia, il sito offre una splendida vista panoramica a 360 gradi sugli ambienti glaciale e periglaciale dell'alta valle dove, la maestosa piramide del Cervino - senza ombra di dubbio una delle più belle montagne del mondo - domina e cattura l'attenzione di tutti. Plateau Rosà è soprattutto una

meta turistica in tutti i periodi dell'anno, ma il sito è anche un luogo ideale per lo svolgimento di attività di ricerca scientifica a diverse finalità: prova ne è la presenza nelle vicinanze della stazione di ricerca “Testa Grigia” del Consiglio Nazionale delle Ricerche, inaugurata nel 1948 e tutt'ora in piena attività. L'osservatorio meteorologico di Pian Rosa (il toponimo “italianizzato” in epoca fascista al fine di modificare quello originale di Plateau Rosà, è ancora presente negli annali meteorologici per identificare questa stazione), entra in funzione nel 1951, quando il servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare Italiana installa i primi strumenti sul terrazzo della costruzione realizzata per l'arrivo della funivia da Cervinia, inaugurata l'8 marzo 1939. L'Aeronautica Militare allestisce anche un vero e proprio osservatorio e gli strumenti vengono osservati più volte al giorno da personale militare stabilmente presente sul posto. La stazione sinottica è collegata alla rete meteorologica internazionale, iniziando così una serie di dati importante e di ottima qualità sino a marzo 2000, quando per motivi logistici se ne decide la chiusura ([Mercalli et al. 2003](#)). Fortunatamente, nel gennaio 2004 le misurazioni riprendono nello stesso sito continuando questa serie di dati, anche se con qualche piccola lacuna, sino ai giorni nostri.



Figura 3 – Lo sperone roccioso di Testa Grigia e l'arrivo della funivia al Plateau Rosà. Sul terrazzo alla destra del traliccio più alto sono installati i sensori meteorologici di Pian Rosa (foto G. Nigrelli, 04/07/2024).

Osservatorio di Piz Corvatsch

Piz Corvatsch è anch'esso un osservatorio di vetta, situato nelle Alpi svizzere nel Cantone dei Grigioni. Anche questo sito risulta facilmente raggiungibile mediante funivia da Siglio in Engadina e, una volta arrivati, nelle belle giornate si può godere di una splendida vista panoramica a 360 gradi. L'ambiente che circonda il Piz Corvatsch è di tipo glaciale e periglaciale. La stazione inizia la sua attività alla fine degli anni '70 e la serie dei dati di temperatura inizia nell'agosto del 1979. Nel 1981 la stazione viene automatizzata ed entra a far parte della rete di rilevamento automatica di MeteoSvizzera. Le pubblicazioni di tipo meteorologico e climatico relative ai dati acquisiti da questa stazione sembrano essere scarse (Nigrelli et al. 2023).



Figura 3 – Piz Corvatsch, la sensoristica della stazione è posizionata sui due tralicci di sinistra e sul terrazzo (foto da <https://www.corvatsch-diavolezza.ch/>, non datata).

Osservatorio del Gornergrat

L'osservatorio astronomico e astrofisico del Gornergrat è situato nelle Alpi svizzere, nel Canton Vallese, ad una quota di circa 3100 metri (Figura 4). L'ambiente che circonda il Gornergrat è di tipo periglaciale. Il sito risulta facilmente raggiungibile da Zermatt mediante una ferrovia a cremagliera elettrica, la cui prima realizzazione risale al 1898. Anche per questo sito, la vista panoramica a 360 gradi che è possibile ammirare una volta arrivati al Gornergrat è unica, con la piramide del Cervino anche qui autentica protagonista. La ricerca agli osservatori del Gornergrat e dello Jungfraujoch è strettamente correlata. Nei primi anni del decennio 1960 la presenza di molti astronomi allo

Jungfrauoch stimola la costruzione di un secondo osservatorio al Gornergrat: un sito ideale per condurre ricerche di alta quota grazie alle condizioni atmosferiche, alla presenza del Kulmhotel e all'accessibilità garantita tutto l'anno dal trenino a cremagliera. Attualmente gli osservatori sono gestiti dalla International Foundation High Altitude Research Stations Jungfrauoch and Gornergrat (<https://www.hfsjg.ch>). La stazione meteorologica, localizzata a circa 200 metri in direzione est dal complesso osservatorio-hotel, inizia la sua attività nel 1993 già come stazione della rete di rilevamento automatica di MeteoSvizzera.



Figura 4 – L'osservatorio del Gornergrat con, in primo piano, le due torri astronomiche e sulla sinistra, il Cervino lato svizzero (foto da <https://www.hfsjg.ch>, non datata).

Osservatorio del Sonnblick

L'osservatorio meteorologico del Sonnblick si trova in Austria, ad una quota di circa 3100 metri. L'ambiente che circonda il Sonnblick è di tipo glaciale e periglaciale (Figura 5). Costruito nel lontano 1886, in un periodo in cui si pensava che le persone non potessero sopravvivere alle rigide condizioni climatiche invernali, l'osservatorio ha proseguito la sua attività sino ai giorni nostri, trasformandosi da originale osservatorio di misurazioni atmosferiche a sito di ricerca scientifica multidisciplinare (Graßl et al. 2012). Le principali attività di ricerca riguardano la meteorologia e la climatologia, la glaciologia e il permafrost, la fisica e la chimica ambientale (Schöner et al. 2012).

L'osservatorio meteorologico del Sonnblick si distingue dagli altri osservatori alpini di alta quota per la lunghezza e la qualità delle osservazioni meteorologiche: per quanto riguarda la serie di dati di temperatura questa inizia nel 1887 costituendo un vero e proprio primato fra gli osservatori considerati in questo report. L'osservatorio è gestito da oltre 135 anni dall'Istituto Centrale di Meteorologia e Geodinamica austriaco (ZAMG).



Figura 5 – L'osservatorio meteorologico del Sonnblick (foto da <https://deims.org>, non datata).

Osservatorio dello Zugspitze

Questo osservatorio è stato costruito sulla montagna più alta della Germania, ad una quota di 2964 metri, nei pressi del confine austro-tedesco. L'ambiente che circonda lo Zugspitze è di tipo periglaciale (Figura 6). La torre meteorologica originale è stata costruita sotto gli auspici dell'Alpine Club tedesco ed è composta da un piano terra in mattoni e due piani superiori realizzati con strutture in legno. Il piano terra è adibito a ripostiglio, il primo piano come spazio abitativo, il secondo come sala strumenti. Sul tetto si trova la piattaforma di osservazione con la strumentazione. L'inaugurazione della stazione avviene il 19 luglio 1900 e la sua attività inizia subito come stazione di prima classe. La serie dei dati di temperatura inizia nel 1901, subendo un'unica interruzione dopo la fine della Seconda guerra mondiale (dal 6 maggio al 10 agosto 1945). Infatti, il 5 maggio 1945 la cima dello

Zugspitze viene occupata dalle truppe americane, struttura e strumenti vengono quasi completamente distrutti e le osservazioni si interrompono. Ad inizio agosto le autorità di occupazione concedono il permesso di ricostruire la torre meteorologica e le osservazioni riprendono in breve tempo (Wege 2002). Da questa data in poi le osservazioni proseguono senza interruzioni sino ai giorni nostri.



Figura 6 – Il complesso turistico dello Zugspitze, in una calda giornata estiva. In fondo all’edificio, la parte vecchia con la torretta e il terrazzo meteorologico (foto da <https://zugspitze.panomax.com>, immagine del 24/08/2024, ore 12:00 CEST).

Anche se non considerato in questo lavoro perché posizionato a quote inferiori, merita una citazione l’osservatorio svizzero di Säntis (<https://saentis.roundshot.com>). Localizzato ad una quota di 2501 m s.l.m., questo storico osservatorio di vetta inizia ad acquisire dati di temperatura nel 1864, costruendo una serie storica senza interruzioni che arriva sino ai giorni nostri. I dati provenienti da questa stazione sono stati utilizzati dall’autore in un recente lavoro (Nigrelli et al. 2023).

3. Dati e stazioni

Per questo lavoro sono stati presi in considerazione i sette più importanti osservatori meteorologici di alta quota presenti sull'arco alpino, le cui caratteristiche principali e la loro ubicazione sono riportate in [Tabella 1](#) e [Figura 7](#).

Tabella 1 – Stazioni meteorologiche utilizzate e loro principali caratteristiche. La latitudine e la longitudine sono espresse in gradi decimali, la quota in metri sul livello del mare. La numerazione delle stazioni mantiene la continuità con quella dei report precedenti. Nella colonna di destra è presente una icona che rimanda al link della webcam installata nelle vicinanze (W).

N	Stazione	Sigla	Lat. °N	Long. °E	Quota	Periodo	Fonte dati	W
21	Capanna Margherita (IT)	CAP	45,92692	7,87714	4554	2003-2024	ARPA Piemonte	
22	Jungfrauoch (CH)	JUN	46,54755	7,98544	3582	1933-2024	MeteoSvizzera	
23	Pian Rosa (IT)	PRO	45,93518	7,70731	3488	1952-2022	ISPRA-SCIA	
24	Piz Corvatsch (CH)	COV	46,41804	9,82130	3297	1980-2024	MeteoSvizzera	
25	Gornergrat (CH)	GOR	45,98363	7,78574	3131	1994-2024	MeteoSvizzera	
26	Sonnblick (AT)	SON	47,05403	12,95800	3106	1887-2024	HISTALP	
27	Zugspitze (DE)	ZUG	47,42099	10,98429	2962	1901-2015	HISTALP	

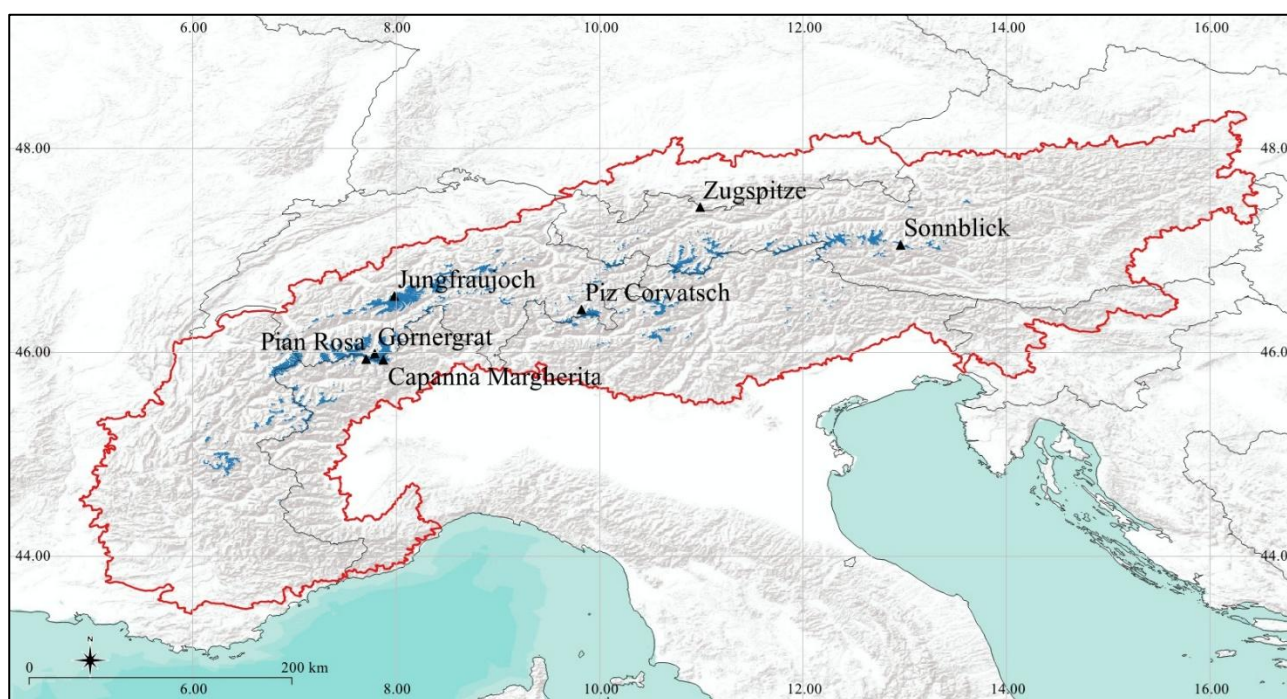


Figura 7 – Mappa delle Alpi con l'ubicazione delle sette stazioni meteorologiche considerate. In rosso, il perimetro dello spazio alpino così come definito dalla Convenzione delle Alpi, in blu le principali superfici glacializzate aggiornate al 2015 (<https://www.alpconv.org>). Elaborazione in QGIS su base cartografica ESRI Terrain.

Di questi sette osservatori meteorologici (di seguito stazioni) si sono acquisite le serie disponibili di dati giornalieri, mensili ed annuali di: temperatura media dell'aria (TM); Temperatura media dell'aria

omogeneizzata (TMhom); temperatura minima dell'aria (TN); temperatura massima dell'aria (TX). Dalle serie mensili degli stessi parametri si sono successivamente ricavate le serie stagionali (inverno: dicembre, gennaio, febbraio; primavera: marzo, aprile, maggio; estate: giugno, luglio, agosto; autunno: settembre, ottobre, novembre). Mediante le serie giornaliere di TN e TX sono state calcolate le rispettive serie degli estremi termici mensili (TNn e TXx).

Per le stazioni di JUN, SON e ZUG è stato possibile acquisire le serie delle temperature medie annuali già omogeneizzate. Per le stazioni di CAP, PRO, COV e GOR, si è proceduto ad una omogeneizzazione indiretta delle temperature medie annuali, utilizzando la stazione di JUN come serie di riferimento (*reference station*), applicando il test di Craddock (1979) calcolato mediante software AnClim (Stepánek 2008).

Le serie di dati omogeneizzate, in questo caso la temperatura media annuale (TMhom), vengono costruite con lo scopo di eliminare dalle serie originali i cambiamenti che nel corso dei molti anni di attività di una stazione sono avvenuti ma che non sono dovuti alle condizioni climatiche (WMO 2018). Questi cambiamenti sono principalmente lo spostamento della stazione in una zona vicina oppure a quota diversa, il diverso uso del suolo della zona, le pratiche di osservazione e di calcolo applicate da operatori diversi, il cambio di strumentazione, il passaggio da strumentazione analogica a digitale, le trasformazioni del paesaggio circostante, la crescita di vegetazione, oppure eventi naturali, storici e politici. Con un buon grado di affidabilità è possibile affermare che le sette stazioni qui considerate, hanno subito con il passare degli anni solo alcuni dei cambiamenti sopra riportati, come ad esempio le pratiche di osservazione e di calcolo applicate da operatori diversi, il cambio di strumentazione, il passaggio da strumentazione analogica a digitale. Per valutare la presenza di tendenze climatiche su periodi lunghi anche più di 50 o cento anni, diventa quindi fondamentale fare riferimento a serie di dati omogeneizzati (Domonkos et al. 2012).

Le serie storiche delle TMhom di cui si dispone, sono accurate e per alcuni casi molto lunghe: questo ci offre l'opportunità di osservare l'andamento della temperatura negli ambienti di alta quota dell'arco alpino per oltre un secolo. Pertanto, in questo report un contributo viene fornito anche in termini di conoscenza delle tendenze climatiche, verificando la presenza di incrementi o diminuzioni statisticamente significativi riferiti a lunghi periodi temporali e a periodi climatologici normali. I periodi climatologici normali (*climate normals*, CLINO) sono periodi temporali lunghi trent'anni e aggregati per decade (WMO 2017). La ricerca delle tendenze climatiche è stata condotta sulle serie annuali omogeneizzate relative alle singole stazioni. Le tendenze sono state calcolate applicando il test di Mann-Kendall e il test di Sen (Wilks 2020; Sen 1968). Questi due test sono tra i più utilizzati

per analizzare le serie temporali di parametri idrologici e climatici perché non sono influenzati dal tipo di distribuzione delle serie e accettano, se presenti, alcuni dati mancanti.

L'analisi sulla ricerca delle tendenze climatiche è stata effettuata utilizzando le serie delle temperature medie annuali omogeneizzate (TMhom), considerando quattro diversi periodi temporali:

1. Il periodo climatologico normale 1931-1960;
2. Il periodo climatologico normale 1961-1990;
3. Il periodo climatologico normale 1991-2020;
4. Il periodo 1995-2024, corrispondente al trentennio più recente.

Per alcune stazioni, la tendenza climatica sulla serie annuale delle TMhom è stata calcolata anche in termini di anomalia standardizzata ([Wilks 2020](#)), cioè di quanto il valore di un anno si discosta, positivamente o negativamente, dalla media della serie. L'indice standardizzato di anomalia climatica (SAI) viene calcolato mediante la seguente formula:

$$SAI = (TMhom_{anno} - mediaTMhom_{serie}) / devstTMhom_{serie}$$

L'indice SAI è particolarmente indicato per queste finalità perché confrontabile anche se calcolato per stazioni o aree geografiche diverse. Indici SAI compresi nell'intervallo $-1 \div 1$ sono considerati normali, poiché rientrano all'interno della deviazione standard della serie; indici compresi negli intervalli $-2 \div -1$ o $1 \div 2$ sono considerati come una moderata anomalia rispetto al valore medio; indici compresi negli intervalli $-3 \div -2$ o $2 \div 3$ sono considerati come una forte anomalia rispetto al valore medio; indici inferiori a -3 oppure superiori a 3 sono considerati come una eccezionale anomalia rispetto al valore medio.

Per questo report, non si è ritenuto utile calcolare la tendenza nel tempo della temperatura media annuale come media generale delle sette serie considerate, sia per le differenze di quota presenti fra le stazioni e sia per la differente lunghezza dei singoli periodi di osservazione, come riportato in [Tabella 1](#).

4. Temperature medie, minime e massime

Il regime mensile, stagionale ed annuale della temperatura media registrato alle sette stazioni considerate è riportato in [Tabella 2](#). Il valore mensile più elevato si osserva alla stazione di GOR, in luglio (5,5 °C), mentre l'opposto alla stazione di CAP, in febbraio (-18,9 °C). Stessa situazione per quanto riguarda i valori stagionali: con GOR a segnare 4,6 °C in estate e CAP a segnare -18,4 °C in inverno. Le medie annuali fanno registrare il valore più elevato alla stazione di GOR (-2,3 °C), mentre la temperatura media annuale più bassa appartiene ancora una volta a CAP (-11,9 °C). Si ricorda che le valutazioni su questi e su altri successivi confronti devono considerare la differenza dei periodi di osservazione presente tra le stazioni.

Tabella 2 – Valori medi mensili, stagionali e annuali delle temperature (°C) medie (TM) delle sette stazioni meteorologiche considerate (tra parentesi il periodo di osservazione in anni). In grassetto i valori minimi e massimi mensili in tabella. Per le sigle delle stazioni consultare la Tabella 1.

	CAP (2003- 2024)	JUN (1933- 2024)	PRO (1952- 2022)	COV (1980- 2024)	GOR (1994- 2024)	SON (1887- 2024)	ZUG (1901- 2015)
G	-18,8	-13,6	-11,6	-11,2	-8,6	-12,5	-11,4
F	-18,9	-13,9	-11,9	-11,6	-8,7	-12,8	-11,8
M	-17,4	-12,5	-10,6	-10,3	-7,4	-11,1	-10,0
A	-14,5	-10,3	-8,5	-7,9	-5,4	-8,2	-7,5
M	-10,6	-6,1	-4,3	-3,6	-1,2	-3,7	-2,8
G	-5,7	-2,6	-0,9	0,2	3,1	-0,3	0,0
L	-3,8	-0,4	1,7	2,7	5,5	1,9	2,2
A	-4,0	-0,4	1,6	2,8	5,4	2,0	2,3
S	-6,8	-2,5	-0,7	-0,2	2,3	-0,5	0,1
O	-9,6	-5,4	-3,7	-2,9	-0,1	-3,8	-3,0
N	-14,6	-9,8	-8,0	-7,5	-5,1	-8,0	-7,5
D	-17,6	-12,4	-10,4	-10,1	-7,4	-11,1	-10,2
I	-18,4	-13,3	-11,3	-11,0	-8,3	-12,1	-11,1
P	-14,2	-9,6	-7,9	-7,2	-4,7	-7,7	-6,8
E	-4,6	-1,1	0,9	1,9	4,6	1,2	1,5
A	-10,3	-5,9	-4,1	-3,5	-0,9	-4,1	-3,5
Anno	-11,9	-7,5	-5,6	-5,0	-2,3	-5,7	-5,0

Il regime mensile, stagionale ed annuale della temperatura minima registrato alle sette stazioni considerate è riportato in [Tabella 3](#). Per questo parametro risultano mancanti i dati delle stazioni di SON e ZUG. Anche qui come per le temperature medie, il valore medio mensile più elevato di TN si osserva alla stazione di GOR, in agosto (2,3 °C), mentre il valore medio mensile più basso di TN si

osserva alla stazione di CAP, in febbraio (-21,9 °C). Per quanto riguarda i valori medi stagionali, CAP presenta la TN più bassa con -21,2 °C in inverno, mentre GOR la TN più alta con 1,5 °C in estate, come unico valore positivo della stagione per le stazioni considerate. Le medie annuali di TN fanno registrare il valore più elevato alla stazione di GOR (-5,2 °C), mentre la TN annuale più bassa appartiene ancora una volta a CAP (-14,8 °C).

Tabella 3 – Valori medi mensili, stagionali e annuali delle temperature (°C) minime (TN) delle sette stazioni meteorologiche considerate (tra parentesi il periodo di osservazione in anni). In grassetto i valori minimi e massimi mensili in tabella. Per le sigle delle stazioni consultare la Tabella 1. La sigla “nd” indica assenza di dati

	CAP	JUN	PRO	COV	GOR	SON	ZUG
	(2003- 2024)	(1961- 2024)	(1952- 2022)	(1980- 2024)	(1994- 2024)	(1887- 2024)	(1901- 2015)
G	-21,6	-16,0	-14,2	-13,8	-11,5	nd	nd
F	-21,9	-16,4	-14,6	-14,2	-11,7	nd	nd
M	-20,4	-15,0	-13,3	-12,8	-10,2	nd	nd
A	-17,6	-12,8	-11,3	-10,3	-8,2	nd	nd
M	-14,0	-8,4	-7,1	-5,9	-4,0	nd	nd
G	-8,8	-4,8	-3,7	-2,2	0,1	nd	nd
L	-7,0	-2,5	-1,1	0,2	2,2	nd	nd
A	-7,1	-2,4	-1,0	0,5	2,3	nd	nd
S	-9,7	-4,7	-3,0	-2,3	-0,5	nd	nd
O	-12,3	-7,3	-5,9	-5,1	-2,8	nd	nd
N	-17,3	-12,3	-10,4	-9,9	-7,8	nd	nd
D	-20,4	-14,7	-13,0	-12,6	-10,2	nd	nd
I	-21,2	-15,7	-14,0	-13,6	-11,1	nd	nd
P	-17,4	-12,1	-10,7	-9,6	-7,5	nd	nd
E	-7,7	-3,2	-1,9	-0,4	1,5	nd	nd
A	-13,1	-8,1	-6,4	-5,7	-3,7	nd	nd
Anno	-14,8	-9,8	-8,2	-7,4	-5,2	nd	nd

Il regime mensile, stagionale ed annuale della temperatura massima registrato dalle sette stazioni considerate è riportato in [Tabella 4](#). Per questo parametro risultano mancanti i dati delle stazioni di SON e ZUG. Anche qui come per TM e TN, il valore medio mensile più elevato di TX si osserva alla stazione di GOR, in agosto (9,4 °C), mentre il valore medio mensile più basso di TX si osserva alla stazione di CAP, in gennaio e febbraio (-15,9 °C). Per quanto riguarda i valori medi stagionali, GOR presenta la TX più alta con 8,5 °C in estate, mentre CAP la TX più bassa con -15,5 °C in inverno. Le medie annuali delle temperature massime mettono in evidenza il valore di GOR (1,0 °C) come unico valore positivo fra le sette stazioni considerate.

Tabella 4 – Valori medi mensili, stagionali e annuali delle temperature (°C) massime (TX) delle sette stazioni meteorologiche considerate (tra parentesi il periodo di osservazione in anni). In grassetto i valori minimi e massimi mensili in tabella. Per le sigle delle stazioni consultare la Tabella 1. La sigla “nd” indica assenza di dati

	CAP (2003- 2024)	JUN (1961- 2024)	PRO (1952- 2022)	COV (1980- 2024)	GOR (1994- 2024)	SON (1887- 2024)	ZUG (1901- 2015)
G	-15,9	-10,3	-9,1	-8,7	-5,9	nd	nd
F	-15,9	-10,6	-9,2	-9,0	-5,8	nd	nd
M	-14,2	-9,5	-7,9	-7,8	-4,4	nd	nd
A	-10,8	-7,4	-5,7	-5,5	-2,1	nd	nd
M	-6,7	-3,1	-1,5	-1,3	2,2	nd	nd
G	-2,1	0,5	1,9	2,5	6,8	nd	nd
L	-0,3	2,6	4,6	5,4	9,4	nd	nd
A	-0,6	2,5	4,2	5,4	9,3	nd	nd
S	-3,7	0,2	1,7	2,0	6,0	nd	nd
O	-6,9	-2,4	-1,4	-0,8	3,2	nd	nd
N	-11,9	-6,9	-5,6	-5,2	-2,1	nd	nd
D	-14,9	-9,1	-7,9	-7,5	-4,7	nd	nd
I	-15,5	-10,0	-8,7	-8,4	-5,5	nd	nd
P	-10,6	-6,6	-5,2	-4,8	-1,5	nd	nd
E	-1,1	1,9	3,6	4,5	8,5	nd	nd
A	-7,5	-3,0	-1,7	-1,4	2,3	nd	nd
Anno	-8,7	-4,5	-3,0	-2,5	1,0	nd	nd

Da queste prime tre tabelle emerge chiaramente come CAP (4554 m) sia la stazione più fredda di tutte quelle considerate, questo perché localizzata ad una quota nettamente più elevata rispetto alle altre sei stazioni, le cui quote sono comprese tra i 3582 m di JUN e i 2962 m di ZUG.

Inoltre, sempre per quanto riguarda le temperature medie annuali, si segnala come GOR presenti il valore più elevato fra le sette stazioni considerate, nonostante questa stazione non sia quella situata alla quota più bassa: si ritiene che tale valore sia dovuto al fatto che la serie di dati della stazione di GOR è recente e breve (31 anni), mentre le serie di SON e di ZUG, cioè le serie delle due stazioni localizzate a quote inferiori rispetto a GOR, sono molto più lunghe (rispettivamente 138 anni e 115 anni) e quindi il valore medio risultante non è solamente determinato dall’andamento sul recente periodo, cioè in cui è maggiormente evidente l’effetto del riscaldamento globale, ma è un valore calcolato su un periodo temporale molto più lungo, di oltre cento anni, dove prevale nettamente una relativa stazionarietà climatica.

5. Estremi termici

Gli estremi termici massimi e minimi mensili delle stazioni considerate sono riportati rispettivamente nelle [Tabelle 5 e 6](#). Per le stazioni di SON e ZUG, non potendo disporre delle rispettive serie giornaliere di TX e TN, questi indici non si sono potuti calcolare.

Relativamente alle TXx, il valore massimo si è registrato a PRO, il 22 luglio 1988 (18,8 °C). Per quanto riguarda la stazione di PRO, si osservano valori di TXx elevati e fuori norma anche il 17 settembre 1997 (17,1 °C). Stessa situazione si verifica alla stazione di GOR, il 22 febbraio 1954 (12,6 °C). Da segnalare anche i 10,5 °C osservati a CAP il 19 luglio 2024. Questi valori, significativamente più elevati rispetto ai valori dei giorni precedenti e successivi, sono dovuti con buona probabilità ad un rialzo termico avvenuto in occasione di singole giornate di favonio. Per tali considerazioni, va segnalato che la mancanza di informazioni certe a riguardo non consente una accuratezza assoluta.

Tabella 5 – Valori estremi mensili delle temperature (°C) massime (TXx) delle sette stazioni considerate (tra parentesi il periodo di osservazione in anni). In grassetto i valori minimi e massimi in tabella. Per le sigle delle stazioni consultare la Tabella 1. La sigla “nd” indica assenza di dati

	CAP (2003- 2024)	JUN (1961- 2024)	PRO (1967- 2023)	COV (1980- 2024)	GOR (1994- 2024)	SON (1887- 2024)	ZUG (1901- 2015)
G	-3,7	3,3	10,4	3,7	7,4	nd	nd
F	-3,6	2,9	9,0	2,7	12,6	nd	nd
M	-2,2	3,5	6,4	4,2	4,5	nd	nd
A	1,9	4,9	11,0	5,0	8,3	nd	nd
M	5,1	8,9	11,4	8,4	12,0	nd	nd
G	9,7	12,2	13,0	13,3	17,1	nd	nd
L	10,5	12,7	18,8	14,0	17,5	nd	nd
A	9,1	12,8	13,4	13,2	18,0	nd	nd
S	9,3	11,6	17,1	11,8	15,9	nd	nd
O	3,4	7,1	14,0	8,1	13,6	nd	nd
N	1,4	4,8	10,0	6,5	10,6	nd	nd
D	-2,0	2,1	6,0	2,8	6,2	nd	nd

Relativamente alle TNn, il valore minimo si è registrato a CAP, il 25 gennaio 2005 (-37,3 °C), In generale e da come è giusto aspettarsi soprattutto in relazione alle differenti quote che le stazioni presentano, CAP fa registrare gli estremi termici più bassi, mentre GOR quelli più alti. I valori estremi, sia massimi e sia minimi, si originano da condizioni atmosferiche e termiche locali che a quote elevate possono variare rapidamente nel tempo e nello spazio a causa di diversi fattori, come ad esempio eventi di favonio, eventi temporaleschi con grandinate, nevicate fuori stagione. Gli

estremi sono valori che presentano una maggior variabilità rispetto ai valori medi e per questo sono di utilità per inquadrare il clima di un luogo soprattutto a livello di escursioni termiche.

Anche per questi due parametri è importante ricordare che le considerazioni ed i confronti qui esposti devono comunque considerare la differenza dei periodi di osservazione presente tra le stazioni.

Tabella 6 – Valori estremi mensili delle temperature (°C) minime (TNn) delle sette stazioni meteorologiche considerate (tra parentesi il periodo di osservazione in anni). In grassetto i valori minimi e massimi in tabella. Per le sigle delle stazioni consultare la Tabella 1. La sigla “nd” indica assenza di dati

	CAP	JUN	PRO	COV	GOR	SON	ZUG
	(2003- 2024)	(1961- 2024)	(1967- 2023)	(1980- 2024)	(1994- 2024)	(1887- 2024)	(1901- 2015)
G	-37,3	-35,6	-29,0	-32,6	-26,8	nd	nd
F	-36,6	-35,4	-29,0	-33,0	-27,2	nd	nd
M	-33,8	-36,6	-27,8	-27,7	-29,8	nd	nd
A	-33,5	-26,3	-27,0	-24,6	-21,9	nd	nd
M	-25,3	-23,6	-19,0	-17,6	-16,5	nd	nd
G	-23,0	-16,5	-16,0	-14,2	-13,0	nd	nd
L	-17,2	-13,5	-11,4	-10,0	-7,7	nd	nd
A	-17,5	-13,8	-11,0	-10,6	-8,2	nd	nd
S	-21,9	-16,9	-15,2	-13,7	-10,9	nd	nd
O	-26,2	-22,3	-20,0	-18,8	-17,8	nd	nd
N	-32,4	-30,0	-28,2	-26,2	-21,9	nd	nd
D	-35,0	-30,7	-28,0	-28,3	-26,0	nd	nd

L'andamento dei valori mensili delle temperature riportate nelle Tabelle dalla 2 alla 6, è riportato in [Figura 8](#).

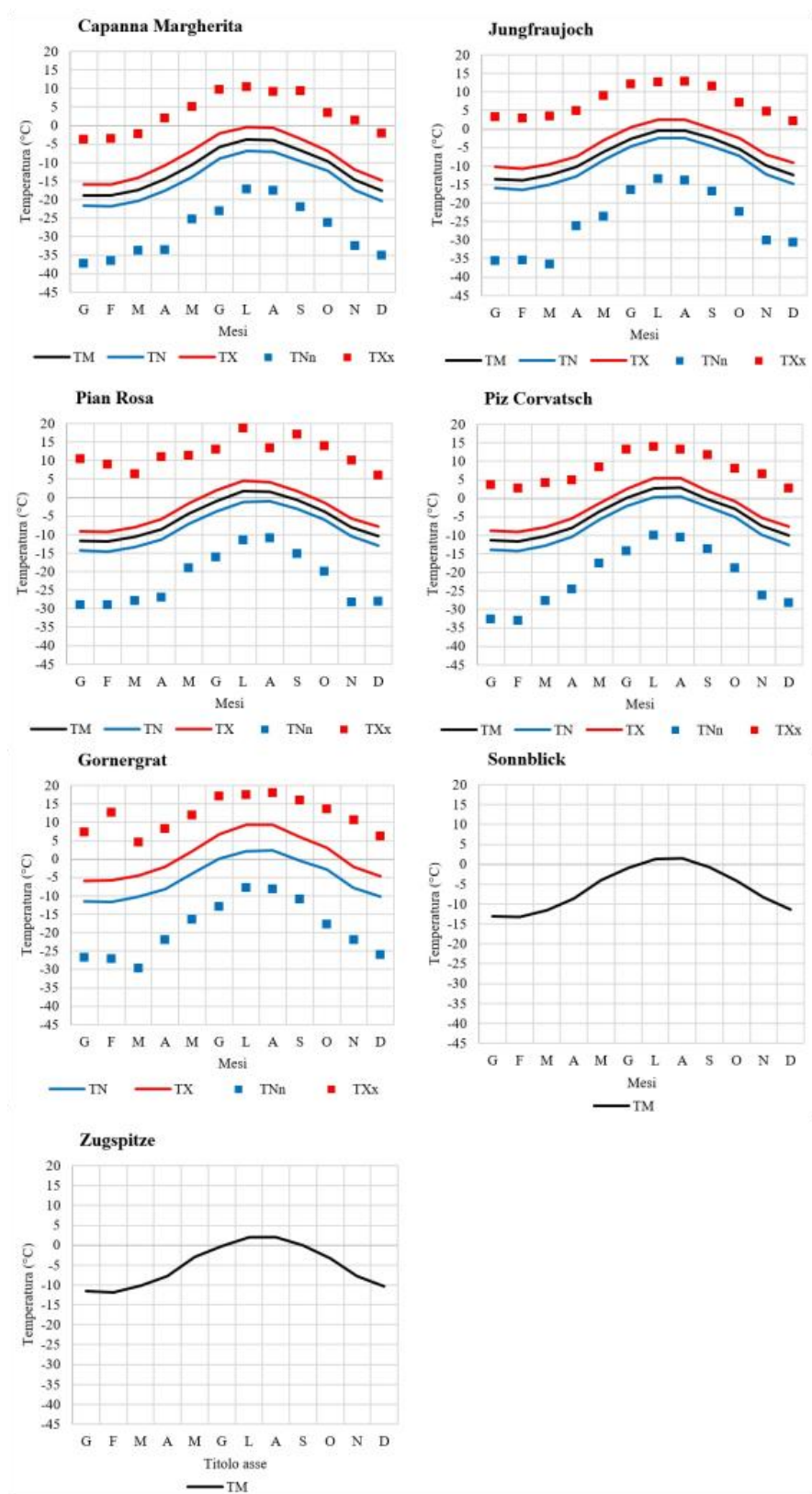


Figura 8 – Temperature medie mensili (TM, TN, TX) ed estremi termici mensili (TXx e TNn), per le sette stazioni considerate.

6. Tendenze della temperatura

L'analisi sulla ricerca delle tendenze climatiche (definite *climate trends* in inglese, nel caso si vogliano effettuare ricerche bibliografiche in rete sull'argomento) è stata effettuata utilizzando le temperature medie annuali omogeneizzate, i cui andamenti temporali sono riportati in [Figura 9](#). In questa figura è evidente la differente lunghezza delle serie di dati disponibili, così come un generale aumento dei valori a partire dagli anni '80 del secolo scorso, preceduto da una generale stabilità climatica presente dall'inizio delle osservazioni. Netta è anche la differenza delle temperature annuali tra la serie di CAP e le restanti sei, dovuta alla significativa differenza di quota. La serie di GOR è quella che presenta le medie più elevate, nonostante GOR non sia la stazione localizzata alla quota più bassa: si pensa che questo sia principalmente dovuto all'ambiente di natura periglaciale presente al Gornergrat ed alla quasi totale presenza di roccia esposta all'irraggiamento solare per gran parte dell'anno. Le serie di temperatura di JUN, SON, ZUG sono tra le serie storiche di temperatura più lunghe al mondo registrate in ambienti di alta quota e, per questo, costituiscono un vero patrimonio di conoscenza climatica da mantenere e da divulgare.

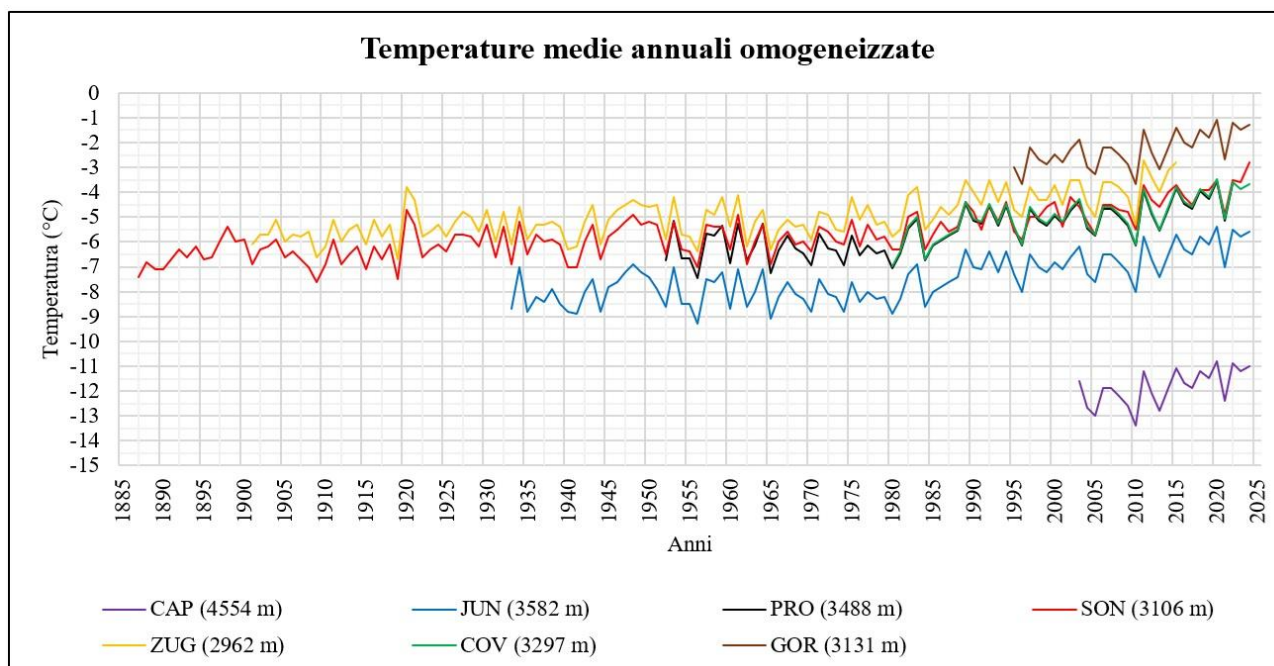


Figura 9 – Serie storiche delle temperature medie annuali omogeneizzate, relative alle sette stazioni meteorologiche considerate. Per le sigle delle stazioni consultare la Tabella 1.

I risultati delle tendenze climatiche calcolate per i quattro periodi considerati (1931-1960; 1961-1990; 1991-2020; 1995-2024), sono riportati in [Tabella 8](#). Questa tabella è forse una delle più interessanti di quelle presenti in questa indagine perché ci restituisce un quadro completo sull'evoluzione delle temperature negli ambienti di alta quota alpini, riferito a periodi temporali standard lunghi trent'anni,

a cui tutti i climatologi fanno riferimento. In questa tabella emerge come durante il CLINO 1931-1960 non vi siano tendenze significative verso una variazione positiva o negativa delle temperature. Per questo CLINO però, si dispone solamente di dati relativi a tre stazioni su sette in totale. Per il CLINO 1961-1990 le stazioni con dati sono quattro e, per due di queste, si osservano tendenze ad un aumento della temperatura, che per SON risulta essere di 0,3 °C/10 anni e per ZUG di 0,4 °C/10 anni. Il netto aumento delle temperature avviene durante il CLINO 1991-2020 quando, per tutte le cinque stazioni di cui si dispongono dati, si registrano tendenze positive statisticamente significative, variabili da 0,4 °C/10 anni a 0,5 °C/10 anni. I dati del più recente trentennio confermano questa tendenza con valori che vanno da 0,5 °C/10 anni a 0,7 °C/10 anni, quest'ultima tendenza registrata alla stazione più alta in quota (CAP). Per questo ultimo periodo aumenta anche il livello di significatività della tendenza. Parallelamente a queste tendenze e non potrebbe essere diverso, anche le temperature medie dei periodi, riportate tra parentesi, manifestano un chiaro aumento.

Tabella 8 – Tendenze della temperatura media annuale omogeneizzata (°C/10 anni) per quattro diversi periodi temporali e, tra parentesi, i valori medi del periodo (°C). I valori con asterisco indicano una tendenza statisticamente significativa con: * rischio di errore del 5% ($\alpha = 0,05$); ** rischio di errore del 1% ($\alpha = 0,01$); *** rischio di errore dello 0,1% ($\alpha = 0,001$), nd indica assenza di dati, nt indica assenza di una tendenza statisticamente significativa. Per le sigle delle stazioni consultare la Tabella 1.

N	Stazione	1931-1960	1961-1990	1991-2020	1995-2024
21	CAP	nd	nd	nd	0,7** (-11,7)
22	JUN	nt (-8,0)	nt (-7,9)	0,4* (-6,7)	0,5*** (-6,6)
23	PRO	nd	nt (-6,1)	0,4* (-4,9)	0,5** (-4,8)
24	COV	nd	nd	0,4* (-4,8)	0,5*** (-4,7)
25	GOR	nd	nd	0,5** (-2,4)	0,5*** (-2,3)
26	SON	nt (-5,9)	0,3* (-5,7)	0,5*** (-4,7)	0,6*** (-4,5)
27	ZUG	nt (-5,2)	0,4* (-5,0)	nd	nd

L'indice SAI per le stazioni di JUN, PRO e SON è riportato nelle [Figure 10, 11 e 12](#). Il confronto fra le tre figure mette in evidenza come, a partire dalla fine degli anni '80 del secolo scorso, l'indice SAI si sia stabilmente spostato verso anomalie positive della temperatura. I valori dell'indice SAI per la stazione di JUN manifestano una anomalia moderata a partire dal 1989 che assume valori forti, cioè superiori a 2, negli anni 2020 e 2022. Dal 1988 in avanti, si osservano anche tre casi isolati di anomalie negative ritenute normali: nel 1996, nel 2005 e nel 2010. I valori dell'indice SAI per la stazione di PRO iniziano ad essere stabilmente positivi dal 1989, con anomalie moderate e anche qui crescenti che si spostano verso una anomalia forte nel 2020 e nel 2022, come per JUN. Anche per PRO, si osservano tre casi isolati di anomalie negative normali: nel 1996, nel 2005 e nel 2010. I valori dell'indice SAI per la stazione di SON manifestano lo stesso andamento, con valori stabilmente

positivi a partire dal 1986: le anomalie positive forti iniziano a manifestarsi nel 2011, per ripetersi nel 2015, nel 2020 e dal 2022 al 2024 dove, per quest'ultimo anno, si è raggiunto il valore limite di 3.

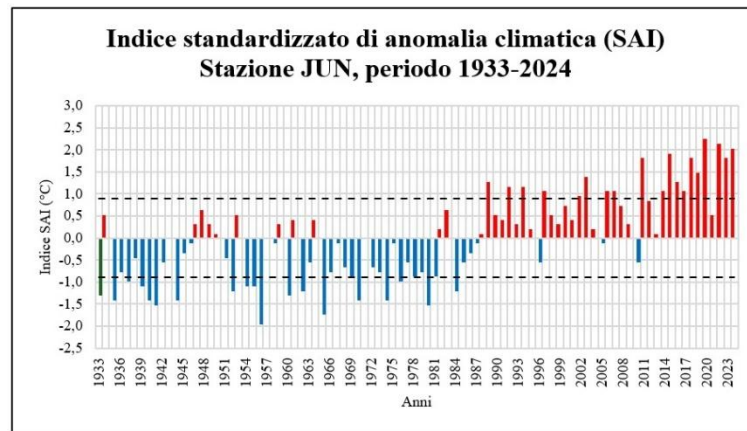


Figura 10 – Indice standardizzato di anomalia climatica per la stazione di JUN. Le due linee tratteggiate rappresentano il valore di 0,9, corrispondente a $\pm$ la deviazione standard.

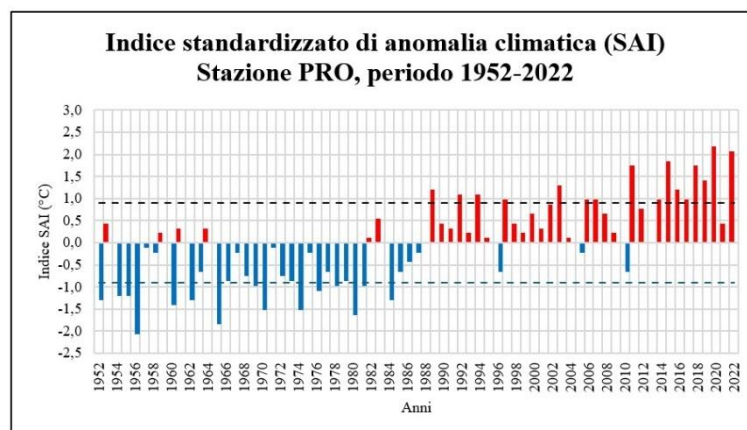


Figura 11 – Indice standardizzato di anomalia climatica per la stazione di PRO. Le due linee tratteggiate rappresentano il valore di 0,9, corrispondente a $\pm$ la deviazione standard.

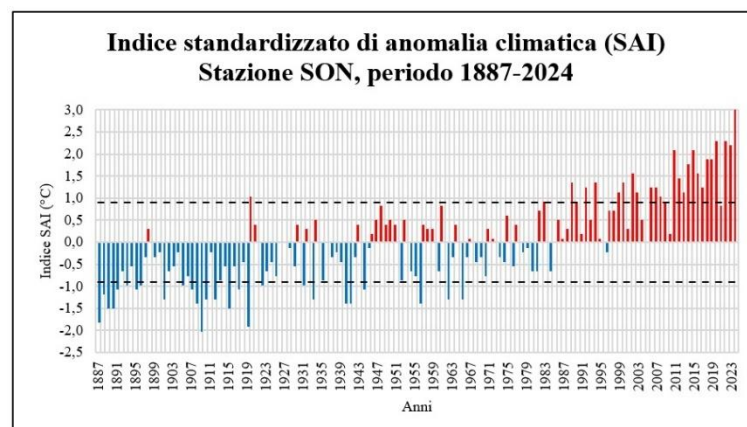


Figura 12 – Indice standardizzato di anomalia climatica per la stazione di SON. Le due linee tratteggiate rappresentano il valore di 0,9, corrispondente a $\pm$ la deviazione standard.

7. Cenni sulla relazione quota-temperatura

Una caratteristica importante dei climi di montagna è la diminuzione della temperatura con l'aumentare della quota. In libera atmosfera la temperatura diminuisce generalmente di 0,6 °C ogni 100 metri di aumento della quota, ma questa diminuzione (definita Gradiente Termico Verticale, GTV, oppure *altitudinal temperature lapse rate* in inglese, nel caso si vogliano effettuare ricerche bibliografiche in rete sull'argomento) è significativamente diversa da quella presente in prossimità dei rilievi montuosi (Barry 2008). Infatti, la temperatura sui rilievi montuosi è spesso superiore a quella presente alla stessa quota ma in libera atmosfera: questo perché la superficie terrestre riflette i raggi solari andando a riscaldare l'atmosfera circostante. Pertanto, il GTV in prossimità dei rilievi montuosi risente fortemente delle condizioni climatiche locali, mostra una significativa variabilità stagionale e una significativa differenza tra il giorno e la notte (Nigrelli et al. 2018; Dumas 2013; Kirchner et al. 2013).

Un esempio di relazione generale tra quota e temperatura, applicato alle stazioni di questo report, è riportato in Figura 13. In questo esempio si è preso come riferimento temporale il trentennio più recente (1995-2024), utilizzando le sei stazioni di cui si dispongono i dati: CAP, JUN, PRO, COV, GOR, SON e le cui TMhom sono rispettivamente -11,7 °C; -6,6 °C; -4,8 °C; -4,7 °C; -2,3 °C; -4,5 °C.

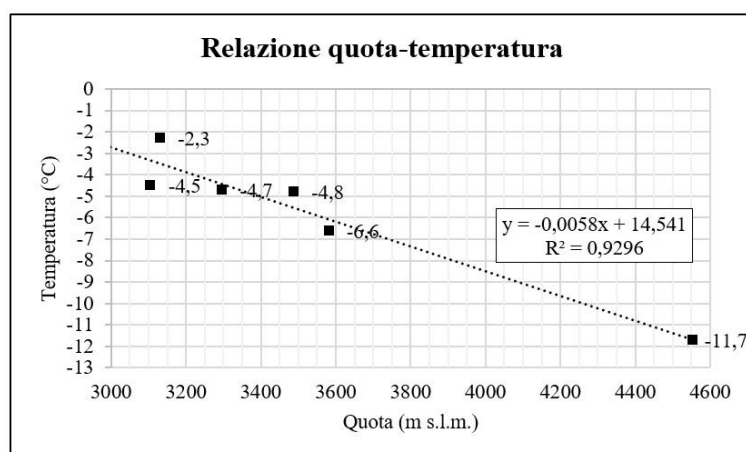


Figura 13 – Relazione quota-temperatura nel periodo 1995-2024 per le stazioni di CAP, JUN, PRO, COV, GOR e SON.

La relazione esistente tra aumento della quota e diminuzione della temperatura assume un andamento chiaramente lineare, come dimostra la disposizione dei punti-temperatura nel grafico, la retta di regressione calcolata ed il suo elevato coefficiente di correlazione (R^2 0,93). In questo caso il GTV è di 0,58 °C/100 m, valore pressoché identico a quello del GTV in libera atmosfera (0,6 °C/100 m). Questa uguaglianza tra i due valori può imputarsi al fatto che l'areale considerato è vasto e che le stazioni considerate sono ubicate in vetta, prive quindi di influenze dovute alla morfologia locale.

8. Discussione e conclusioni

Gli osservatori di alta quota delle Alpi sono luoghi storici, affascinanti e ricchi di conoscenza in diverse discipline scientifiche, tra le quali l'astronomia, la fisica dell'atmosfera, la meteorologia e la climatologia. La conoscenza raccolta da questi osservatori nel corso di oltre un secolo è un patrimonio di inestimabile valore per noi e per le generazioni future, da conservare e da divulgare. In questo report si sono analizzati alcuni dei principali aspetti della temperatura dell'aria, con particolare riferimento alle sue tendenze con il passare degli anni.

La temperatura sta aumentando anche in questi ambienti dal clima polare ([Kottek et al. 2006](#)) e questo sta avvenendo a partire dagli anni '80 del 1900. Per il periodo climatologico normale 1961-1990 l'aumento della temperatura media annua in questi ambienti è di circa 0,3 °C/10 anni, per il periodo climatologico normale 1991-2020 l'aumento passa a circa 0,4 °C/10 anni e, per l'ultimo trentennio (1995-2024), l'aumento è di circa 0,5 °C ogni 10 anni. Alla luce dei risultati ottenuti, il tasso di incremento sembra anch'esso aumentare con il passare del tempo, cioè l'aumento aumenta. Questi risultati sono in accordo con la tendenza al riscaldamento osservata nelle Alpi dall'autore in precedenti lavori aventi come area di indagine gli ambienti periglaciali e gli ambienti alpini con quote superiori ai 1500 m ([Nigrelli et al. 2023](#); [Nigrelli et al. 2021](#)) e da altri autori ([Masson-Delmotte et al. 2021](#); [Hock et al. 2019](#); [Schöner et al. 2012](#)) ai quali si rimanda per una più ampia bibliografia. Tuttavia, il confronto tra i valori di queste differenti indagini mette in evidenza lievi differenze, dovute principalmente ai diversi periodi di osservazione considerati, alle diverse stazioni meteorologiche utilizzate, ai diversi approcci metodologici applicati, ai diversi ambienti e ai diversi settori alpini. A proposito di quest'ultimo aspetto, recenti studi hanno confermato la presenza di tre domini (settori alpini) principali all'interno dell'arco alpino, differenti in base alle loro diverse caratteristiche orografiche, meteorologiche e climatiche. In questi tre domini le principali differenze riguardano soprattutto i regimi di precipitazione ([Kotlarski et al. 2023](#); [Gobiet et al. 2014](#)). Nello specifico sono stati individuati:

1. il “dominio meridionale”, che comprende le regioni a sud dello spartiacque principale alpino (praticamente tutta la catena alpina italiana), caratterizzato da una forte influenza mediterranea;
2. il “dominio nord-occidentale” (comprendente gran parte della Svizzera e l'estremo occidente austriaco, il settore sud-occidentale della Germania e parte della Francia orientale), caratterizzato da una forte influenza oceanica;
3. il “dominio nord-orientale” (in cui ricade l'Austria, la Germania sud-orientale e gran parte della Slovenia), con caratteristiche nettamente continentali.

Le stazioni di Capanna Margherita, Pian Rosa, Piz Corvatsch e Gornergrat ricadono nel “dominio meridionale”, la stazione allo Jungfrauoch ricade nel “dominio nord-occidentale” e le stazioni al Sonnblick e allo Zugspitze ricadono nel “dominio nord-orientale”.

Gli indici di anomalia standardizzata qui presentati testimoniano in maniera netta un andamento del tasso di aumento della temperatura media annua che sembra oramai attestato costantemente su valori positivi dalla seconda metà degli anni '80 del 1900 e sembra anch'esso crescere nel tempo, come anche riscontrato da altri autori ([Appenzeller et al. 2008](#)). La temperatura vicino alla superficie terrestre aumenta e con essa sembra anche aumentare la quota dello zero termico in aria libera. Infatti, uno studio condotto in Svizzera utilizzando dati provenienti sia da stazioni meteorologiche di superficie e sia utilizzando dati acquisiti da sensori lanciati in libera atmosfera mediante palloni sonda, ha rilevato un aumento di quota di questo parametro di circa 60-70 metri durante il periodo 1959-2011 ([Brocard et al., 2013](#)). Sempre in Svizzera, tali studi proseguono con la ricerca dei metodi più appropriati per lo studio di questo parametro in relazione agli attuali cambiamenti climatici ([Scherrer et al. 2021](#)).

Nel contesto degli attuali cambiamenti climatici e del preoccupante aumento delle temperature anche alle quote più elevate delle Alpi, è doveroso ragionare in termini di possibili scenari futuri. Questi scenari futuri sono strettamente connessi al livello di emissioni in atmosfera dei cosiddetti gas climalteranti (o gas a effetto serra) prodotti dalle attività antropiche. La comunità scientifica internazionale da decenni oramai affronta l'argomento. Per l'arco alpino, Kotlarski et al. ([2023](#)) hanno individuato 3 possibili scenari di temperatura a cui fare riferimento, in base a 3 differenti livelli di emissioni di gas serra (che principalmente sono metano, anidride carbonica, ozono, ossido di azoto):

1. RCP 2.6: riduzione delle emissioni di gas serra dal 2020;
2. RCP 4.5: riduzione delle emissioni di gas serra dal 2040;
3. RCP 8.5: aumento delle emissioni di gas serra.

I risultati del lavoro di Kotlarski et al. ([2023](#)) dicono che l'intera regione alpina avrà un clima più caldo nel corso di questo secolo, rispetto ai valori del periodo di riferimento 1981-2010, per tutti e tre gli scenari di emissione considerati. Le temperature aumenteranno maggiormente durante la stagione estiva nelle regioni a sud della dorsale alpina per lo scenario RCP 8.5. Alle quote più elevate il riscaldamento potrebbe essere maggiore. Sempre a sud della dorsale alpina, le precipitazioni potrebbero subire uno spostamento stagionale: maggiori in inverno, minori in estate, ma qui l'incertezza previsionale che ci restituiscono i modelli è ancora alta. Si prevede anche un aumento

dell'intensità giornaliera delle precipitazioni e questo in tutti e tre i domini, in contrapposizione ad una diminuzione dei giorni con precipitazioni in estate. La copertura nevosa sarà fortemente influenzata dai cambiamenti climatici previsti e sarà soggetta a una diminuzione diffusa, fatta eccezione per le altitudini molto elevate. In generale, l'entità dei segnali di cambiamento aumenta con l'aumentare delle emissioni climalteranti: da minima per lo scenario RCP 2.6 a massima per RCP 8.5.

I tre possibili scenari di variazione della temperatura media annua riferiti all'arco alpino italiano, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, sono riportati in [Figura 14](#). Per l'anno 2024, il modello previsionale riporta un aumento della temperatura media annua di poco inferiore a 1 °C rispetto al periodo di riferimento 1981-2010. In base ai dati elaborati in questo lavoro, la temperatura media annua relativa a tutte e sette le stazioni considerate, riferita al periodo 1981-2010 risulta essere di -5,5 °C, mentre la stessa media per l'anno 2024 è di -4,9 °C: la differenza risultante è quindi un aumento di 0,6 °C, in accordo con quanto riportato da Kotlarski et al. ([2023](#)).

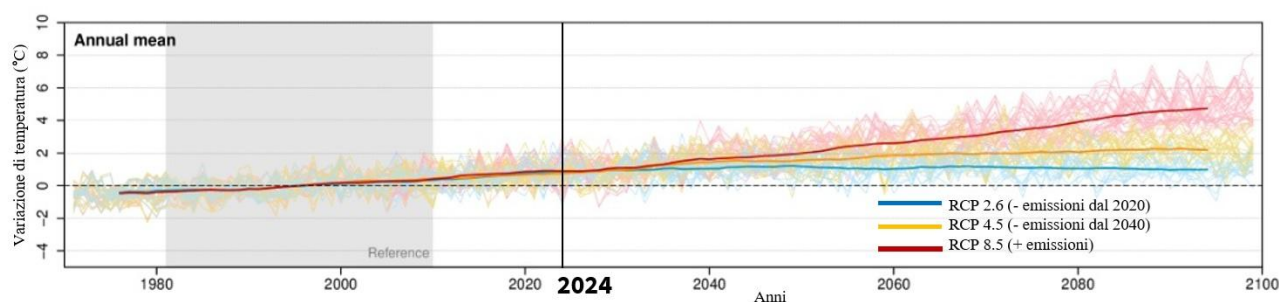


Figura 14 – Variazione della temperatura media annuale nel tempo per l'arco alpino italiano rispetto al periodo di riferimento 1981-2010 (area di colore grigio), secondo tre possibili scenari di emissione di gas a effetto serra (da Kotlarski et al. 2023, modificata).

I dati sulle emissioni a livello mondiale dei gas ad effetto serra confermano un progressivo aumento delle stesse, pertanto lo scenario RCP 2.6 non sembra più da considerare. Solo un grosso ed immediato sforzo ci consentirebbe di rientrare nello scenario RCP 4.5, ma il 2040 è solo fra quindici anni e per raggiungere l'obiettivo bisognerebbe già da oggi abbattere drasticamente le emissioni passando a nuovi modelli di sviluppo. Viste le attuali politiche globali sul clima, è probabile che alla fine di questo secolo ci arriveremo all'interno dello scenario RCP 8.5. Ci troviamo pertanto in un contesto di cambiamento climatico "accelerato" ([Fagan et al. 2021](#); [Lewis et al. 2019](#)).

Ma come sarà il paesaggio attorno ai nostri sette osservatori alla fine di questo secolo? Il clima sarà più mite, molti ghiacciai saranno estinti e al loro posto ci saranno versanti rocciosi e nude pietraie. Non a caso, proprio quest'anno l'ONU ha dichiarato il 2025 anno internazionale per la conservazione

dei ghiacciai, istituendo da quest'anno e ogni 21 marzo, la giornata mondiale dei ghiacciai (<https://www.un-glaciers.org/en>). Con l'aumento delle temperature il processo di degradazione del permafrost tuttora in corso procederà ancora più velocemente, l'ambiente da glaciale passerà a periglaciale, aumenteranno i processi di instabilità naturale (genericamente conosciuti come frane), la disponibilità di acqua sarà inferiore a quella attuale. A quote più basse si assisterà ad uno spostamento verso l'alto di molti ecosistemi alpini e con essi la fauna che li abita. La competizione tra le specie sarà maggiore a causa del minore spazio a disposizione, alcune di queste specie si estingueranno. Forse il turismo estivo aumenterà, stimolato a frequentare l'alta montagna per sfuggire dal gran caldo delle pianure: una problematica in più, non facile da gestire.

Ma i nostri osservatori di alta quota saranno ancora operativi, per raccogliere dati e per produrre nuova conoscenza, con la speranza che questa venga utilizzata meglio di come ora noi la utilizziamo.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, l'Ufficio federale di meteorologia e climatologia di MeteoSvizzera e il Department Climate-Impact-Research Geosphere, HISTALP Management, Austria, per la messa a disposizione in rete ed in forma gratuita dei metadati e dei dati meteorologici attraverso i loro portali pubblici.

Bibliografia

1. Alessandri C. (1911) – Storia della Capanna-Osservatorio “Regina Margherita” sul Monte Rosa (4560 m). Stabilimento Tipografico G. U. Cassone, Torino
2. Appenzeller C., Begert M., Zenklusen E., Scherrer S. C. (2008) – Monitoring climate at Jungfrauoch in the Swiss Alpine region. *Science of the Total Environment*, 391, 262-268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.005> accesso il 22/03/2025
3. Barry R. G. (2008) – Mountain Weather and Climate. Third edition, Cambridge University Press
4. Brocard E., Jeannet P., Begert M., Levrat G., Philipona R., Omanens G., Scherrer S. C. (2013) - Upper air temperature trends above Switzerland 1959–2011. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 4303–4317. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50438> accesso 22/04/2025
5. Chiarle M., Viani C., Mortara G., Deline P., Tamburini A., Nigrelli G. (2022) – Large glacier failures in the Italian Alps over the last 90 years. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 45(1), 19-40. <https://doi.org/10.4461/GFDQ.2022.45.2> accesso il 22/03/2025

6. Craddock J. M. (1979) – Methods of comparing annual rainfall records for climatic purposes. *Weather*. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1979.tb03465.x> accesso il 14/03/2025
7. Domonkos P., Venema V., Auet I., Mestre O., Brunetti M. (2012) - The historical pathway towards more accurate homogenisation. *Advances in Science & Research*, 8, 45-52. <https://doi.org/10.5194/asr-8-45-2012> accesso il 22/03/2025
8. Dullinger S., Gatttringer A., Thuiller W., et al. (2012) - Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature climate change*, 2, 619-622. <https://doi.org/10.1038/nclimate1514> accesso il 22/03/2025
9. Dumas M. D. (2013) - Changes in temperature and temperature gradients in the French Northern Alps during the last century. *Theoretical and Applied Climatology*, 111, 223-233. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0659-1> accesso il 20/04/2025
10. Fagan B., Durrani N. (2021) – Storia dei cambiamenti climatici. Il Saggiatore S.r.l., Milano
11. Ferrari A. (1905) – I rifugi del Club Alpino Italiano. Storia e descrizione illustrata. In *Bollettino del Club Alpino Italiano 1904-1905*, Vol. XXXVII
12. Gariano S.L., Guzzetti F. (2016) - Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011> accesso il 22/03/2025
13. Gobiet A., Kotlatski S., Beniston M., Heinrich G., Rajczak J., Stoffel M. (2014) - 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of The Total Environment*, 493, 1138-1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050> accesso il 22/04/2025
14. Graßl H., Hantel M., Rotach M. W., Rudel E. (2012) – Special issue: 125 years of high-mountain research at Sonnblick Observatory (Austrian Alps). *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 489-490. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0784-x> accesso il 30/04/2025
15. Hansson A., Dargusch P., Shulmeister J. (2021) - A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage. *Journal of Mountain Science*, 18, 291-306. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6221-1> accesso il 22/03/2025
16. Hock R., Rasul G., et al. (2019) - High Mountain Areas. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. <https://www.ipcc.ch/> accesso il 22/03/2025
17. Kirchner M., Faus-Kessler T., Jakobi G., Leuchner M., Ries L., Scheel H., Suppan P. (2013) - Altitudinal temperature lapse rates in an Alpine valley: trends and the influence of season and weather patterns. *International Journal of Climatology*, 33, 539-555. <https://doi.org/10.1002/joc.3444> accesso il 20/04/2025
18. Kotlarski S., Gobiet A., Morin S., Olefs M., Rajczak J., Samacoïts R. (2023) – 21st Century alpine climate change. *Climate Dynamics*, 60, 65-86. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06303-3> accesso il 22/04/2025

19. Kottek M, Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. (2006) - World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130> accesso il 28/02/2025
20. Leuenberger M., Flückiger E. (2008) – Research at Jungfrauoch. *Science of the Total Environment*, 391, 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.044> accesso il 23/03/2025
21. Lewis S. L., Maslin M. A. (2019) – Il pianeta umano. Come abbiamo creato l’Antropocene. Giulio Einaudi editore s.p.a., Torino
22. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., et al. (2021) - Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
23. Mercalli L., Cat Berro D., Montuschi S., Castellano C., Ratti M., Di Napoli G., Mortara G., Guindani N. (2003) – Atlante climatico della Valle d’Aosta. Società Meteorologica Subalpina
24. Nigrelli G., Chiarle M. (2023) – 1991–2020 climate normal in the European Alps: focus on high-elevation environments. *Journal of Mountain Science*, 20(8), 2149-2163. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-7951-7> accesso il 22/03/2025
25. Nigrelli G., Chiarle M. (2021) – Evolution of temperature indices in the periglacial environment of the European Alps in the period 1990–2019. *Journal of Mountain Science*, 18(11), 2842-2853. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6889-x> accesso il 22/03/2025
26. Nigrelli G., Fratianni S., Zampollo A., Turconi L., Chiarle M. (2018) – The altitudinal temperature lapse rates applied to high elevation rockfalls studies in the Western European Alps. *Theoretical and Applied Climatology*, 131, 3-4, 1479-1491. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2066-0> accesso il 19/04/2025
27. Nigrelli G., Paranunzio R., Turconi L., Luino F., Mortara G., Guerini M., Giardino M., Chiarle M. (2024) – First national inventory of high-elevation mass movements in the Italian Alps. *Computers and Geosciences*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105520> accesso il 22/03/2025
28. Pinna M. (1977) – Climatologia. UTET, Torino
29. Rumpf S.B., Hülber K., Klonner G., et al. (2018) - Range dynamics of mountain plants decrease with elevation. *PNAS*, 115, 8. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1713936115 accesso il 22/03/2025
30. Scherrer S., Gubler S., Wehrli K., Fischer A. M., Kotlarski S. (2021) - The Swiss Alpine zero degree line: Methods, past evolution and sensitivities. *International Journal of Climatology*, 41, 6785-6804. <https://doi.org/10.1002/joc.7228> accesso il 22/04/2025

31. Schickhoff U., Singh R. B., Mal S. (2022) – Mountain Landscapes in Transition. Effects of land use and Climate Change. Springer Nature
32. Schöner W., Böhm R., Auer I. (2012) - 125 years of high-mountain research at Sonnblick Observatory (Austrian Alps)-from “the house above the clouds” to a unique research platform. Theoretical and Applied Climatology, 110, 491-498. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0689-8> accesso il 24/04/2025
33. Sen P.K. (1968) – Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau. Journal of the American Statistical Association, 63 (324), 1379-1389
34. Stepánek P. (2008) – AnClim software for time series analysis. Department of Geography Faculty of Science, Masaryk University, Brno. <http://www.climahom.eu/> accesso il 14/03/2025
35. Wege K. (2002) – Das observatorium auf der Zugspitze. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins
36. Wilks D.S. (2020) – Statistical methods in the atmospheric sciences. Fourth Edition, Elsevier, Oxford
37. World Meteorological Organization, WMO (2017) – Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO No. 1203, Geneva, Switzerland
38. World Meteorological Organization, WMO (2018) – Guide to Climatological Practices. WMO-No. 100. Geneva, Switzerland
39. World Meteorological Organization, WMO (2024) – State of the Climate. Update for COP29. Geneva, Switzerland

www.naturacene.it

