



# Il primo archivio di osservazioni giornaliere di altezza neve al suolo nell'arco alpino: analisi delle tendenze dal 1971 al 2019

Alice Crespi<sup>1</sup>, Michael Matiu<sup>1</sup>, Giacomo Bertoldi<sup>2</sup>, Daniele Cat Berro<sup>3</sup>, Paola Cianfarra<sup>4</sup>, Bruno Majone<sup>5</sup>, Luca Mercalli<sup>3</sup>, Mauro Valt<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Istituto per l'Osservazione della Terra, Eurac Research, Bolzano

<sup>2</sup> Istituto per l'Ambiente Alpino, Eurac Research, Bolzano

<sup>3</sup> Società Meteorologica Italiana, Moncalieri (TO)

<sup>4</sup> Dip. di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita - DISTAV, Università degli Studi di Genova

<sup>5</sup> Dip. di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, Università di Trento

<sup>6</sup> Arpa Veneto - DRST - Centro Valanghe Arabba

1. Circa 2 m di neve il 08.01.2021 a Cima Sappada (1292 m, Carnia - UD). Pur in un quadro di riduzione dell'innevamento a lungo termine, l'inverno 2020-21 è stato molto nevoso sulle Alpi orientali (f. C. Bregant).

**Abstract** – First archive of daily snow depth observations for the Alps and analysis of trends 1971 to 2019. The first unified and harmonized database of daily snow depth series from more than 2000 measurement sites in the European Alps was set up thanks to the collaboration of more than 30 researchers from six Alpine countries (Austria, France, Germany, Italy,

Slovenia and Switzerland). Data processing and quality checks were applied consistently to all snow records and the resulting database was used to investigate the spatial variability of snow depth trends over the last five decades in the Alpine region. The trends largely differ over regions and elevations preventing the generalization of results from one station or region to the whole

Alps. However, the monthly snow depth shows a decreasing trend in the majority of sites, especially in spring, with an average decrease of seasonal mean snow depth (November to May) of -8,4% per decade. The largest snow depth decreases were observed in the southern Alps. Maximum snow depth values also experienced significant reductions in most areas and the





2. Modalità tradizionali e moderne di misura dello spessore nevoso al suolo. (a) Asta nivometrica per la lettura diretta - di solito ogni mattina - dell'altezza neve (Rifugio Fontana Mura, 1726 m, Val Sangone - TO); pressoché tutte le lunghe serie di dati alpini sono costituite da dati osservati in questo modo. (b) Asta nivometrica storica oggi teleosservata tramite webcam per ovviare al cesato presidio sul posto. Adattamento tecnologico che permette (rebbe) di salvare dalla chiusura importanti stazioni di montagna, come avvenuto qui, a Gressoney-D'Ejola (1850 m, M. Rosa, serie utilizzata in questo studio) grazie a una collaborazione tra SMI e Centro Funzionale della Regione Autonoma Valle d'Aosta. (c) Stazione meteorologica automatica ARPA Piemonte con nivometro (Ceresole Reale, 1581 m, Gran Paradiso): l'altezza neve viene dedotta dal tempo di ritorno di ultrasuoni emessi dal sensore e riflessi dalla superficie del manto (tempo più breve = distanza minore = neve più spessa, e viceversa). Apparecchi molto diffusi dagli Anni Novanta, permettono il monitoraggio continuo in zone remote, ma richiedono un'attenta validazione dei dati per rimuovere il rumore di misura (segnali indesiderati) e valori spuri (presenza di erba sotto al sensore, difficilmente distinguibile dal segnale generato da piccole nevicate soprattutto tra la tarda primavera e l'autunno).

snow season has shortened in the range of 20-30 days below 2000 meters since 1971. The negative trends can be mostly explained by the rising temperature and the related shift from solid to liquid precipitation.

estate per gli usi civili, le attività agricole e per la produzione di energia idroelettrica. La presenza di neve ha anche un importante ruolo nell'economia delle regioni alpine garantendo le attività legate al turismo invernale. L'acqua derivata dalla fusione delle nevi contribuisce inoltre alla ricarica degli acquiferi nelle regioni montane. Infine, la distribuzione e l'abbondanza della neve al suolo influenzano e regolano la presenza e lo sviluppo della flora e della

**Introduzione**

La neve sulle Alpi rappresenta da sempre un elemento fondamentale per gli ecosistemi e le attività umane. La neve accumulata nella stagione invernale fornisce acqua in primavera ed

**Come è cambiato l'innevamento sulle Alpi in mezzo secolo: una sintesi**

L'analisi di oltre 2000 serie di dati giornalieri di spessore nevoso al suolo ha permesso di caratterizzare la distribuzione spaziale delle normali climatologiche dell'innevamento sull'arco alpino, suddividendolo in sottozone omogenee per variabilità dei valori di altezza del manto tra un giorno e l'altro. Inoltre l'analisi delle 800 serie più complete ha rivelato che nell'intervallo 1971-2019 l'innevamento è complessivamente diminuito, in maniera più accentuata sul versante meridionale della catena montuosa, alle quote inferiori a 2000 m e in primavera (-4,9 cm/decennio di spessore medio, ovvero -11,4%/decennio in termini relativi, tra 1000 e 2000 m nel trimestre marzo-maggio sul versante Sud).

Circa l'85% delle serie e dei mesi analizzati mostra tendenze negative (diminuzione di nevosità), fino ai -30

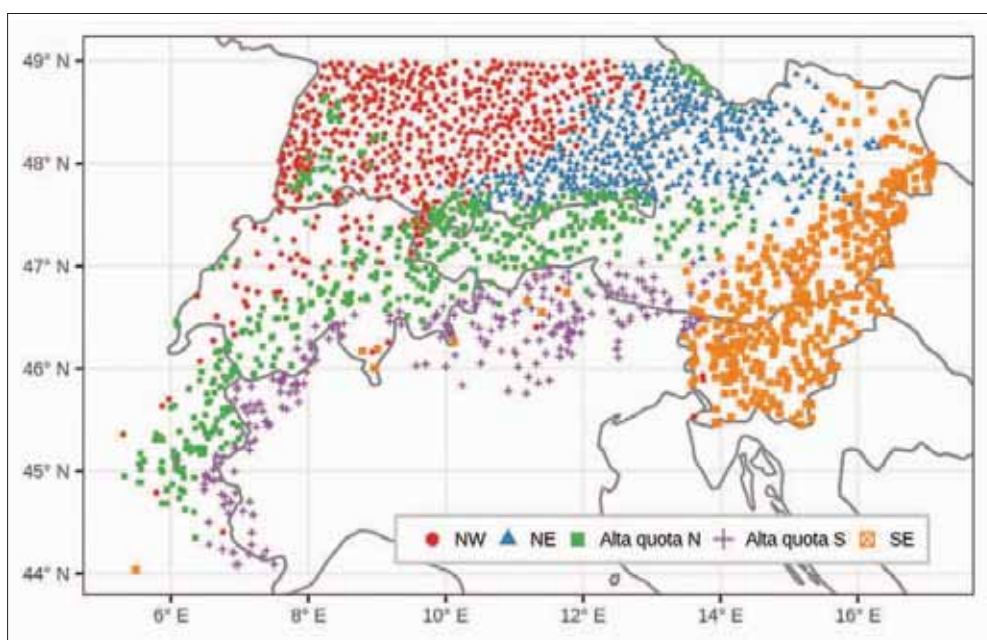
cm/decennio riscontrati in maggio al Passo del Grimsel (1970 m, Svizzera).

In alta montagna, dove nonostante il riscaldamento atmosferico recente le temperature restano per lo più sotto 0 °C nella stagione fredda, un certo aumento delle precipitazioni invernali ha determinato locali incrementi degli spessori nevosi medi (+15 cm/decennio in gennaio al Passo del Bernina, a 2260 m tra Engadina e Val Poschiavo).

Nelle fasce sotto i 1000 m e tra 1000 e 2000 m la stagione con suolo innevato in media si è accorciata, rispettivamente, di 22 e 26 giorni al Nord delle Alpi e di 24 e 33 giorni al Sud, per il ritardo nella formazione del manto nevoso autunnale ma soprattutto per l'anticipo della fusione primaverile a causa delle temperature più elevate. Sopra i 2000 m - dove peraltro le stazioni di misura sono poche - invece la durata della copertura nevosa è per ora pressoché stazionaria (o in lieve calo al Sud).



3. Classificazione dei siti di misura in regioni caratterizzate da una variabilità temporale simile nelle serie di altezza neve al suolo nel periodo 1981-2010. I risultati sono stati ottenuti applicando un metodo di classificazione (*k-means clustering*) alle sole misure giornaliere di spessore nevoso senza includere criteri geografici e altimetrici.  
 NW = Nord-Ovest, NE = Nord-Est, Alta quota N = siti in alta quota sul versante settentrionale, Alta quota S = siti in alta quota sul versante meridionale, SE = Sud-Est (figura adattata da MATU et al., 2021).

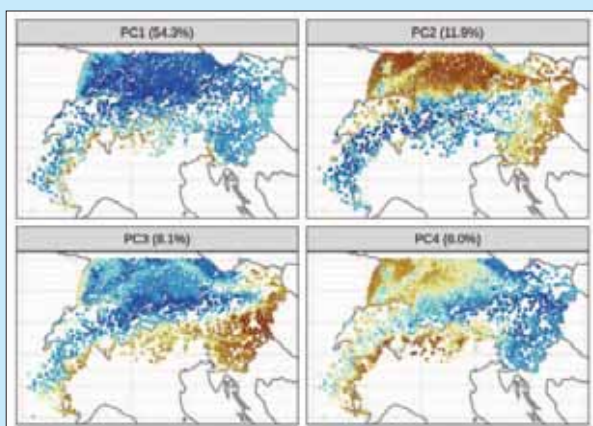


#### La statistica per analizzare la variabilità tra serie nivometriche

Al fine di comprendere meglio la variabilità delle serie giornaliere di altezza neve, è stata applicata una *Analisi delle Componenti Principali* (PCA). La PCA è una procedura statistica che individua i modi di variazione indipendenti e le correlazioni nei dati. Matematicamente, il metodo proietta i dati originali (le serie giornaliere di altezza neve) su un'altra base vettoriale. Questa nuova base è detta *spazio delle componenti principali*, le quali sono indipendenti (ortogonali in termini matematici) e sono ordinate in base alla quantità di varianza che spiegano. Nella figura sottostante (Fig. 4) è riportata, come esempio, la distribuzione spaziale delle prime quattro componenti principali ottenute dall'analisi delle serie giornaliere di altezza neve nel periodo 1981-2010. Osservando la distribuzione spaziale delle componenti è possibile fornirne un'interpretazione e identificare la correlazione con i principali fattori che determinano la variabilità tra un giorno e l'altro della neve al suolo. Nel caso in figura, le prime due componenti (PC1, PC2) possono essere legate all'influenza della quota, la terza (PC3) al gradiente Nord-Sud e la quarta al gradiente Est-Ovest (PC4).

Le serie sono state successivamente raggruppate sulla base dei modi principali di variazione individuati. A questo scopo, è stata applicata una procedura statistica chiamata *k-means clustering*, che consente di identificare la suddivisione ottimale dei dati in un numero definito di gruppi. Dal punto di vista matematico, il metodo minimizza la somma dei quadrati delle differenze tra ogni serie e

la serie media di ogni gruppo. Il numero dei gruppi, detti anche *clusters*, deve essere definito a priori e in questo caso la suddivisione ottimale è risultata essere di cinque clusters (Fig. 3). Nell'immagine a lato, il gradiente di colore corrisponde a un gradiente nella variabilità dello spessore nevoso tra un giorno e l'altro.



fauna di tutti gli ambienti montani.

Il cambiamento climatico in corso sulle Alpi, in particolare l'aumento delle temperature e le modifiche nei regimi delle precipitazioni, ha effetti rilevanti sulla distribuzione della copertura nevosa, soprattutto alle basse quote. In questo contesto, le serie di misure di neve al suolo sono uno strumento prezioso per studiare le tendenze in atto e valutare quelle future.

In particolare, l'**altezza della neve al suolo** è un parametro regolarmente misurato dai diversi servizi meteorologici e idrologici di tutte le regioni alpine. In molti casi le rilevazioni sono effettuate ancora oggi **manualmente**, anche se diverse reti hanno recentemente introdotto sistemi di misura **automatici** che agevolano il monitoraggio soprattutto alle quote più elevate.

Nonostante la disponibilità di un ricco patrimonio storico di lunghe serie osservative di altezza neve, la mancanza di un archivio di dati organizzato a scala alpina e la difficoltà di reperire e armonizzare le osservazioni disponibili presso una pluralità di enti e database, hanno in gran parte limitato gli studi sulle tendenze della neve a specifiche aree o regioni di interesse. I diversi dati analizzati e periodi considerati, e la disparità di metodi applicati, rendono i risultati dei singoli studi difficilmente sintetizzabili e generaliz-