

# I GHIACCIAI DEL TICINO

## Impressum

Repubblica e Cantone Ticino

Dipartimento delle finanze e dell'economia  
Divisione delle risorse  
Ufficio di statistica (Ustat)  
Via Bellinzona 31  
6512 Giubiasco  
+41 (0) 91 814 50 11  
[dfе-ustat@ti.ch](mailto:dfе-ustat@ti.ch)

Dipartimento del territorio  
Divisione dell'ambiente  
Via Franco Zorzi 13  
6501 Bellinzona  
+41 (0) 91 814 28 81  
[dt-da@ti.ch](mailto:dt-da@ti.ch)

Responsabili della pubblicazione  
Pau Origoni,  
*Capo Ufficio di statistica*  
Giovanni Bernasconi,  
*Direttore Divisione dell'ambiente*

A cura di  
Giorgia Valsesia Gerber e Lisa Bottinelli,  
*Ufficio di statistica*

Con la collaborazione di:  
Katia Balemi, Maura Käppeli e Tihon Cvijic,  
*Divisione dell'Ambiente*  
Mattia Soldati, *Sezione forestale*  
Sheila Paganetti e Michele Rigamonti,  
*Ufficio di statistica*

Impaginazione  
Sharon Fogliani, *Ufficio di statistica*

Progetto grafico  
Jannuzzi Smith, Lugano

Stampa  
Finito di stampare nell'ottobre 2022 presso  
Tipo-Offset Aurora SA, Canobbio

ISBN 978-88-8468-047-1

© Ufficio di statistica, 2022

La riproduzione è autorizzata con la citazione  
della fonte

## Consulenza scientifica

Giovanni Kappenberger, *glaciologo*  
Cristian Scapozza, *Istituto scienze della Terra, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana*

Testi, dati e fotografie di  
Andrea Baumer, *Officine Idroelettriche della Maggia SA e Officine Idroelettriche di Blenio SA*  
Lisa Bottinelli e Giorgia Valsesia Gerber, *Ufficio di statistica*  
Daniel Farinotti, *Laboratorio di ricerca per l'idraulica, l'idrologia e la glaciologia (VAW), Politecnico federale di Zurigo (ETH) e WSL*  
Maura Käppeli, *Divisione dell'ambiente*  
Giovanni Kappenberger, *glaciologo*  
Luca Nisi, *Ufficio federale di meteorologia e climatologia, MeteoSvizzera*  
Andrea Salvetti, *Ufficio dei corsi d'acqua*  
Cristian Scapozza e Chantal Del Siro, *Istituto scienze della Terra, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana*  
Mattia Soldati, Stefano Daverio e Daniele Barra, *Sezione forestale*  
Federico Tettamanti, *Studio Alpino - Ecology and nature conservation*  
Claudio Valeggia, *già tecnico di misurazione presso la Sezione forestale*  
Giorgio Valenti, *geologo*

## Si ringraziano inoltre

Andreas Bauder, *Laboratorio di ricerca per l'idraulica, l'idrologia e la glaciologia (VAW), Politecnico federale di Zurigo (ETH)*  
Gabriele Corti, *già ingegnere forestale presso la Sezione forestale*  
Susan Ivy-Ochs e Sarah Kamleitner, *Laboratory of Ion Beam Physics, Politecnico federale di Zurigo (ETH)*  
Andreas Linsbauer, *Dipartimento di geografia, Università di Zurigo e Dipartimento di geoscienze, Università di Friburgo*  
Damiano Maeder, *Oblivion Aerial SA*  
Giovanni Monegato, *Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto di Geoscienze e Georisorse, Padova*

---

# I GHIACCIAI DEL TICINO

---

|  |    |
|--|----|
| Editoriale   | 3  |
| Ghiacciai: alcune definizioni  | 4  |
| Glaciazioni ed ere geologiche  | 6  |
| L'antropocene: quando l'uomo riesce a influenzare il clima <i>di L. Nisi</i>         | 8  |
| I ghiacciai alpini nella storia recente  | 10 |
| Presente e futuro della ricerca glaciologica <i>intervista al Prof. D. Farinotti</i> | 12 |
| L'evoluzione delle misurazioni dei ghiacciai   | 14 |
| Le mal des glaciers <i>intervista a C. Vallengia</i>                                 | 15 |
| Il ghiacciaio del Basòdino   | 16 |
| La vita è una scalata perenne <i>intervista a G. Valenti</i>                         | 18 |
| Il Vadrecc di Bresciana  | 19 |
| Il Vadrecc di Camadra  | 20 |
| L'impatto sulla fauna <i>di F. Tettamanti</i>  | 21 |

---

|   |    |
|---|----|
| Conseguenze sui regimi idrici <i>di A. Salvetti</i>   | 22 |
| Il ghiacciaio del Cavagnö   | 23 |
| Il ghiacciaio del Corno   | 24 |
| Il ghiacciaio di Valleggia  | 25 |
| Il ghiacciaio grande di Croslina  | 26 |
| Ripercussioni sulla produzione idroelettrica ticinese <i>di A. Baumer</i>                               | 27 |
| Il futuro dei ghiacciai, raccontato da chi li osserva regolarmente <i>di M. Soldati</i>                 | 28 |
| Il ghiacciaio di Val Torta  | 29 |
| Permafrost e ghiacciai rocciosi <i>di C. Scapozza e C. Del Siro</i>                                     | 30 |
| Non si smette mai di raggiungere nuove mete... e di stupirsi: <i>intervista a G. Kappenberger</i>       | 32 |
| Iceberg nelle alpi? Una trasformazione in Val Bedretto: da ghiacciaio a lago! <i>di G. Kappenberger</i> | 33 |
| Bibliografia  | 34 |



Lisa Bottinelli  
*Responsabile settore territorio, Ufficio di statistica*

Katia Balemi  
*Aggiunta al Direttore della Divisione dell'ambiente*

L'Ufficio di statistica e il Dipartimento del territorio pubblicano questa raccolta di riflessioni in coda a un'estate che ha visto i ghiacciai – e il loro progressivo e inesorabile ritiro – riportati alla ribalta.

Silenziosi e maestosi, fanno parte del nostro paesaggio geografico, storico e mentale. Nei secoli hanno attratto commercianti, esploratori, geografi, artisti, viaggiatori, scrittori. Victor Hugo, Goethe, De Saussure, Rimbaud. Da allora le montagne e i ghiacciai, in particolare quelli elvetici, da ambienti ostili sono divenuti località di fascino e di cultura. E saperli in ritirata, prossimi a lasciarci, ci lascia sbigottiti: è una realtà che modifica con forza lo stereotipo di perfezione, bianca e innevata, che ancora pochi decenni fa si pensava (e si definiva) *perenne*, ponendo al contempo tutta una serie di domande sulle funzioni e sul valore dei ghiacciai, per il nostro cantone e per la Svizzera.

I ghiacciai sono infatti molto di più di un semplice accumulo di neve vecchia, o *vedrecc*, come li definivano in passato gli abitanti della montagna. Sono (o forse sarebbe meglio dire erano) veri e propri protagonisti delle creste alpine: per la loro imponenza, certamente, ma soprattutto per le loro molteplici funzioni, ecologiche, idrologiche e di protezione: basti citare il ruolo dei ghiacci quali riserva idrica e stabilizzatori del terreno. Dei temi di particolare attualità, in un 2022 che (finora) si è dimostrato molto caldo e particolarmente avaro di precipitazioni, con un periodo estivo purtroppo apertosi con un tragico evento, avvenuto a pochi chilometri da noi e generato proprio dallo staccamento di un seracco dal ghiacciaio della Marmolada, e poi proseguito con un lungo periodo di siccità e canicola che ha interessato tutta l'Europa, manifestandosi con forza anche nel nostro cantone.

Ma come si sono formati questi giganti di ghiaccio, che in passato hanno plasmato tutto il nostro territorio? Quali sono le loro funzioni? Che rapporto hanno con l'uomo e (in generale) l'ecosistema, e con i cambiamenti climatici? La pubblicazione che avete in mano, ricca per l'articolata e sfaccettata documentazione, vuole rispondere a queste domande, grazie ai testi e alle riflessioni degli autori, che esaminano i ghiacciai nelle loro diverse caratteristiche, particolarità e funzioni. L'approccio sistemico di questa pubblicazione va ben oltre il "classico" aggiornamento statistico, grazie a suggestivi contributi – di glaciologi, geologi, misuratori, ingegneri, biologi, ricercatori, guide e appassionati della montagna – che raccontano, con immagini, schemi, misurazioni, esperienze e aneddoti, di un patrimonio naturalistico e paesaggistico caratterizzato dalla copiosa presenza di... ghiaccio.

Un paesaggio che è però in continua evoluzione. Il ghiaccio si ritira, il permafrost si degrada, la stabilità dei pendii diminuisce e il ruolo di riserva idrica dei ghiacciai viene a mancare. Il ritiro dei ghiacciai, costantemente monitorato grazie al prezioso lavoro svolto dalla Sezione forestale e dagli istituti di ricerca universitari, in Ticino e oltralpe, è una manifestazione tangibile e documentata del cambiamento climatico in atto, anche alle nostre latitudini.

Lasciamo al lettore il piacere di immergersi in queste pagine, che hanno quali protagonisti i giganti del freddo, narrati in molte delle loro forme. Un viaggio attraverso il territorio e la sua evoluzione nel tempo che, ci auguriamo, possa contribuire ulteriormente a farci riflettere sul ruolo da assegnare alle nostre scelte in materia di clima ed energia (rinnovabile).

Buona lettura!

## GHIACCIAI: ALCUNE DEFINIZIONI

### Cos'è un ghiacciaio

Il ghiacciaio è una massa di ghiaccio formata nel corso di un lungo processo di accumulo e compressione degli strati di neve. L'aria viene espulsa e la struttura dei cristalli di ghiaccio si modifica: la neve, costituita da cristalli di ghiaccio e aria con bassa densità (circa 100 kg/m<sup>3</sup>), si trasforma prima in nevato (*firm*, o neve allo stato granulare) e infine in ghiaccio, con una densità di quasi 900 kg/m<sup>3</sup>. Il ghiaccio contiene inclusioni, quali bolle d'aria, pollini, polvere ecc.<sup>1,2</sup>

### Accumulo e ablazione

Il ghiacciaio è alimentato in inverno dalle precipitazioni nevose e perde massa in estate, a causa della fusione e della sublimazione (passaggio diretto dell'acqua dallo stato solido a quello gassoso). Alla fine del periodo di fusione estivo (periodo di ablazione), sul ghiacciaio si possono osservare due zone: a quote elevate si trova la *zona di accumulo*, che conserva parte della neve, mentre più in basso si trova la *zona di ablazione*, in cui scompare annualmente tutta la neve e una parte del ghiaccio. Il limite tra le due zone è definito dalla *linea di equilibrio*, che corrisponde anche al limite inferiore delle nevi perenni. Se il ghiacciaio è in equilibrio, la sua posizione rimane stabile [F. 1].<sup>1,2</sup>

### Il movimento del ghiacciaio

Il ghiacciaio, spinto dalla propria massa, si sposta lentamente verso valle come un fiume di ghiaccio, dalla zona di accumulo verso quella di ablazione [F. 2]. Un cristallo di neve sepolto nella zona di accumulo da successive nevicate riappare così in superficie nella zona di ablazione, sotto forma di ghiaccio, al termine di un viaggio che segue

le linee di flusso e può durare diversi secoli [F. 1 e F. 2].<sup>1,2</sup> Se il ghiaccio è contenuto dai versanti assume una forma allungata, chiamata *lingua* [F. 1 e F. 3]. La velocità di scorrimento dipende da molti fattori, tra i quali la morfologia del terreno e lo spessore del ghiaccio. Nei ghiacciai temperati (v. sotto) lo scorrimento è più marcato in estate che in inverno, perché l'acqua di fusione lubrifica il letto del ghiacciaio, favorendone lo scorrimento.

### Il fronte del ghiacciaio

Il *fronte* è il limite inferiore della lingua, a cui si riferiscono le misurazioni di lunghezza e regressione dei ghiacciai [F. 3]. La sua posizione è determinata da due dinamiche opposte: una di avanzamento, dovuta allo scorrimento del ghiaccio verso valle, e l'altra di regressione, dovuta alla fusione ed in piccola parte alla sublimazione del ghiaccio.<sup>1,2</sup>

### Crepacci, seracchi e morene

Lo scorrimento del ghiaccio sul substrato roccioso e i cambiamenti repentini di pendenza provocano forti tensioni, che causano la formazione di *crepacci* (fenditure nel ghiaccio; possono essere *trasversali*, *longitudinali* o *terminali*) e *seracchi* (ammassi di ghiacci isolati da ampi crepacci, formati a causa di un aumento marcato della pendenza e della velocità del ghiacciaio) [F. 3, F. 4 e F. 5]. Il *crepaccio terminale* [F. 3] separa la zona del ghiacciaio in movimento da quella superiore, che rimane immobile, perché è attaccata (congelata) al substrato roccioso congelato, il *permafrost*. Inoltre, il ghiaccio in movimento trasporta detriti rocciosi, che vengono depositati sui lati e di fronte al ghiacciaio, dando origine alle *morene* [F. 6].<sup>1,2</sup>

### I laghi glaciali

La fusione del ghiaccio è solitamente superficiale. L'acqua però può scorrere anche attraverso il ghiacciaio, erodendolo fino al suo letto e generando un torrente che esce dal *portale del ghiacciaio*. L'acqua di fusione può formare laghi di fronte o sui lati del ghiacciaio (*laghi proglaciali*), sulla sua superficie (*epiglaciali*) o al suo interno (*endoglaciali*) [F. 7 e F. 8].<sup>1,2</sup>

### La classificazione dei ghiacciai

A livello mondiale, i ghiacciai sono classificati secondo la loro posizione geografica e territoriale, la loro forma e le caratteristiche del fronte. Inoltre, sono classificati anche sulla base della temperatura, distinguendo tra *ghiacciai freddi* (con temperature costantemente sottozero) e *temperati* (le temperature alla base del ghiacciaio sono sempre al punto di fusione del ghiaccio, che a sua volta dipende dalla pressione).

Praticamente tutti i ghiacciai alpini appartengono alla categoria dei ghiacciai temperati: poiché il ghiaccio è al punto di fusione, alla base del ghiacciaio si forma uno strato di acqua, che (come visto) ne favorisce lo scorrimento verso valle.<sup>1</sup>

### La classificazione dei ghiacciai alpini

I ghiacciai alpini sono classificati in tre gruppi, secondo la definizione del Catasto dei ghiacciai italiani: tipo *pirenaico* o *montano* (con una zona di accumulo ma senza una vera e propria lingua, ad es. Basòdino, Vadrecc di Bresciana); tipo *alpino* (con un grande bacino di accumulo e una notevole lingua, ad es. Aletsch, Gorner) e tipo *himalayano* (ghiacciai derivanti dalla confluenza di colate e bacini diversi).<sup>1</sup>

Al giorno d'oggi, la maggior parte dei ghiacciai svizzeri e tutti quelli ticinesi sono di tipo montano, mentre fino alla metà del diciannovesimo secolo erano classificati come ghiacciai di tipo alpino.<sup>1</sup>

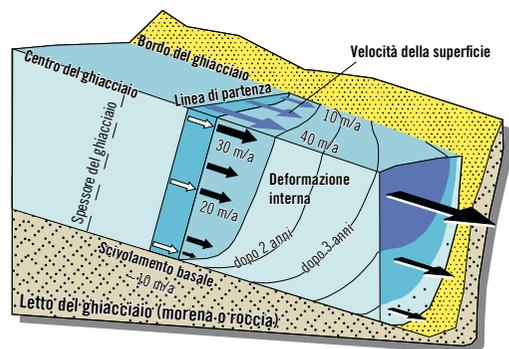
**F. 1**  
Zona di accumulo, zona di ablazione, linea di equilibrio e lingua del ghiacciaio Mer de Glace (Francia), nel 2012



Le linee nere (ogive, con inclusioni di materiale) sono la manifestazione delle linee di flusso. Lo spazio fra due ogive corrisponde al movimento del ghiacciaio in un anno.

Foto: S. Coutterand, Géomorphologie de la montagne, Società Svizzera di Geomorfologia (SSGm)

**F. 2**  
Movimento del ghiacciaio e linee di flusso



Lo spostamento verso valle del ghiacciaio avviene a velocità maggiori al centro e alla superficie.

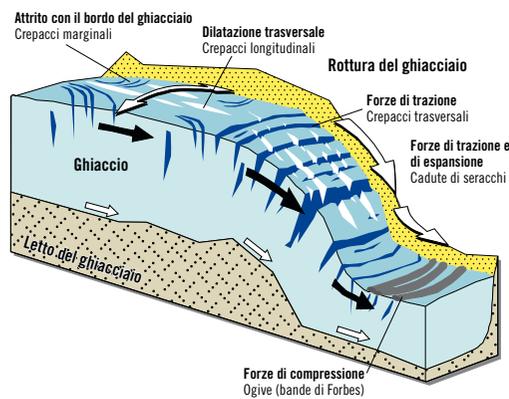
Fonte: Géomorphologie de la montagne, Società Svizzera di Geomorfologia (SSGm)

**F. 3**  
Lingua, fronte, crepacci e seracchi, del ghiacciaio del Gries, nel 2020



Foto: A. Baumer, Ofima

**F. 4**  
Genesi e tipi di crepaccio



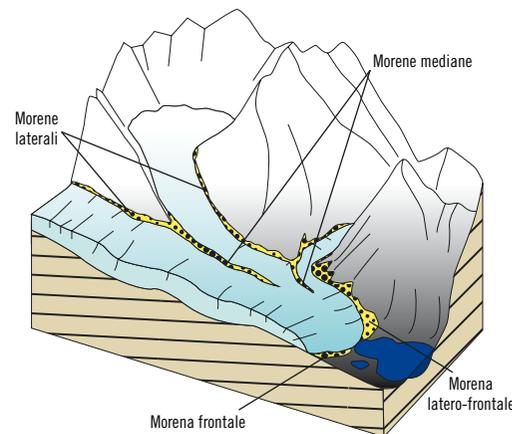
Fonte: Géomorphologie de la montagne, Società Svizzera di Geomorfologia (SSGm)

**F. 5**  
Crepacci trasversali sul ghiacciaio del Basòdino, nel 2022



Foto: D. Maeder

**F. 6**  
Tipi di morene glaciali



Fonte: Géomorphologie de la montagne, Società Svizzera di Geomorfologia (SSGm)

**F. 7**  
Lago proglaciale del ghiacciaio di Valleggia, nel 2022



Foto: D. Maeder

**F. 8**  
Lago epiglaciale del ghiacciaio del Chüeboden (lago di Geren), nel 2012



Foto: G. Kappenberger

## GLACIAZIONI ED ERE GEOLOGICHE

### La teoria astronomica dei paleoclimi

Nel corso di milioni di anni si sono susseguiti periodi di clima mite a periodi di clima più rigido, fasi glaciali e interglaciali [F. 1].<sup>3-6</sup> Le glaciazioni sono determinate dalla concomitanza di più fattori, fra i quali figurano i parametri astronomici della Terra<sup>3-6</sup> (cicli orbitali o di Milanković [F. 2]), la presenza di continenti in posizione polare (i continenti si spostano a causa della tettonica delle placche) e un sistema di correnti oceaniche e atmosferiche favorevoli alla formazione dei ghiacci. Sono inoltre amplificate dal feedback albedo-temperatura<sup>7</sup> e accompagnate da cambiamenti dei livelli dei mari, da inondazioni e da spostamenti delle fasce di vegetazione.<sup>6</sup>

### I periodi glaciali del Precambriano

La Terra porta le tracce di due periodi glaciali avvenuti circa 710 e 640 milioni di anni fa, nel Precambriano.<sup>8</sup> Le evidenze sono state riscontrate anche ai tropici, portando all'ipotesi che l'intero pianeta (o quasi) sia stato coperto di ghiaccio.<sup>8,9</sup> Considerando il margine di incertezza di datazioni così remote, è però più probabile che i continenti siano passati in tempi diversi nelle fasce temperate e polari (a causa della tettonica delle placche) subendo un flusso glaciale che non sarebbe quindi avvenuto contemporaneamente in tutto il globo.<sup>10</sup>

### La fusione dei ghiacci e l'esplosione della vita nel Cambriano

Pressappoco 540 milioni di anni fa, all'inizio del Paleozoico (Cambriano), i ghiacci si ritirarono completamente e ci fu la cosiddetta *esplosione del Cambriano*, ovvero la rapida comparsa e vasta diversificazione di una moltitudine di antiche forme di vita.<sup>11</sup>

### L'estinzione di massa al termine del Cretaceo

66 milioni di anni fa, il 76% delle specie presenti sulla Terra (tra cui i dinosauri) scomparve, probabilmente a seguito di eruzioni vulcaniche che liberarono CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, oppure a causa dell'impatto di un grande asteroide nello Yucatan, in Messico.<sup>12,13</sup> L'impatto (che formò il cratere di Chicxulub) liberò immense quantità di polvere, gas serra e aerosol di solfati, portando a un oscuramento e a un importante e rapido raffreddamento dell'atmosfera terrestre (la temperatura media ai tropici passò da 27 °C a 5 °C), seguito probabilmente dall'espansione di superfici innevate e ricoperte di ghiaccio.<sup>12,13</sup> L'evento fu talmente rapido (non rilevabile nella scala temporale di [F. 1]) che le specie allora esistenti non riuscirono ad adattarsi, ma si estinsero.

### Il massimo termico del Paleocene-Eocene

Circa 56 milioni di anni fa, tra il Paleocene e l'Eocene, vi fu un periodo di estremo riscaldamento terrestre (si stima un aumento di 5 °C sull'arco di 15.000-20.000 anni).<sup>14,15</sup> Le temperature, 7 °C più alte di quelle odierne, portarono alla fusione quasi completa dei ghiacci (incluse le calotte polari) e all'innalzamento dei mari.<sup>14-16</sup>

### Il Pleistocene e l'Ultimo massimo glaciale

In Europa, durante il Pleistocene (2,58 mio-11.700 anni fa), ci furono almeno 20 glaciazioni, intervallate da altrettante fasi interglaciali.<sup>17,18</sup> Durante l'Ultimo massimo glaciale (fra 29.000 e 19.900 anni fa) i ghiacci ricoprirono buona parte dell'emisfero nord.<sup>5,6,19,20</sup> In Europa si estendevano su Scandinavia, Russia, Polonia, Germania settentrionale e isole Britanniche, e un vastissimo ghiacciaio ricopriva le Alpi, Svizzera e Ticino inclusi, fino ai margini della Pianura Padana [F. 3].<sup>19-23</sup> Solo le cime del-

le montagne fuoriuscivano dall'immensa massa di ghiaccio: questi ambienti (denominati "Nunatak"), pur caratterizzati da temperature molto rigide, permisero la conservazione della flora e della fauna.<sup>24</sup>

### Dal Pleistocene all'Olocene

Circa 19.000 anni fa i ghiacci iniziarono a ritirarsi. I ghiacciai alpini si ritirarono dalle zone di pianura alle alte valli.<sup>19-23,25</sup> Il processo terminò 14.690 anni fa, e nelle valli alpine fu caratterizzato da un alternarsi di fasi di arretramento e di avanzata, che divennero via via sempre minori.<sup>19-21,26</sup> A sud delle Alpi, tra 19.900 e 12.500 anni fa il ghiacciaio del Ticino si ritirò dal Lago di Mergozzo (Varese) fino all'Alpe Maniò (Val Bedretto).<sup>21</sup> In seguito, a cavallo fra il Pleistocene e l'Olocene, in Europa si manifestò una triplice avanzata dei ghiacci (12.500, 11.700 e 11.200 anni fa), di sempre minore ampiezza.<sup>21</sup>

### L'Olocene, l'attuale periodo interglaciale

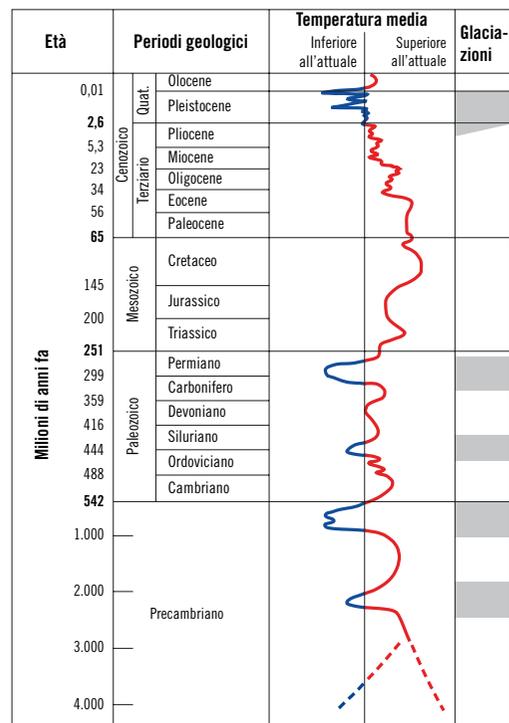
L'Olocene, che ebbe inizio 11.700 anni fa, vide l'inizio della fase di riscaldamento che culminò con il Massimo termico dell'Olocene (fra 9.500 e 6.300 anni fa). Da allora, su scala millenaria la Terra si sta gradualmente raffreddando, alternando periodi più temperati (p.es. il Periodo caldo del Bronzo, 1350-950 a.C., il Periodo caldo Romano, 300 a.C.-400 d.C., e il Periodo caldo Medievale, 850-1300 d.C.) a fasi più fredde. L'ultima fase fredda è conosciuta come la Piccola Era Glaciale (PEG), e durò dal 1300 al 1850/60 d.C., con tre picchi di avanzata dei ghiacciai culminati rispettivamente nel 1350, 1650 e 1850/60 d.C.<sup>22,23,26-28</sup>

### Il ritiro dalla Piccola Era Glaciale

Dalla metà dell'Ottocento, i ghiacciai hanno iniziato a ritirarsi. Dalla metà del Novecento il ritmo

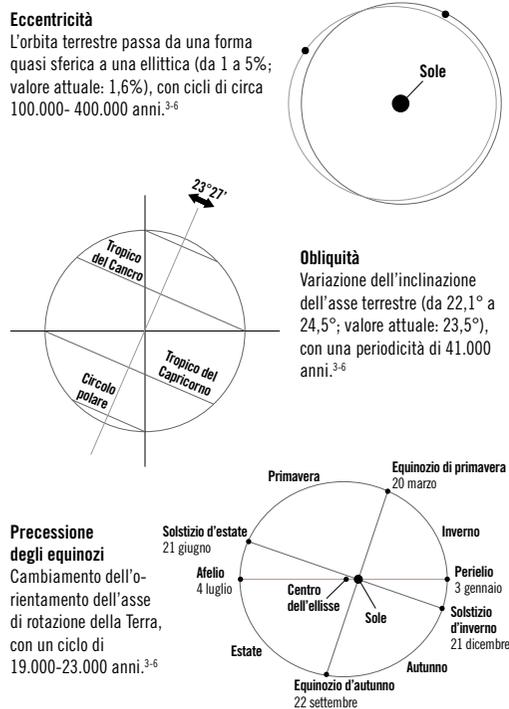
del loro ritiro è aumentato drasticamente, parallelamente all'aumento delle emissioni di gas a effetto serra e delle temperature. I cambiamenti più importanti si osservano per i ghiacciai di piccole dimensioni, a media altitudine e con poco o senza ombreggiamento, più sensibili ai cambiamenti climatici.<sup>25, 29</sup>

F. 1  
Variazioni climatiche e glaciazioni



Fonte: Joussaume 1999 e Menzies 2002, in Géomorphologie de la montagne, Società Svizzera di Geomorfologia (SSGm)

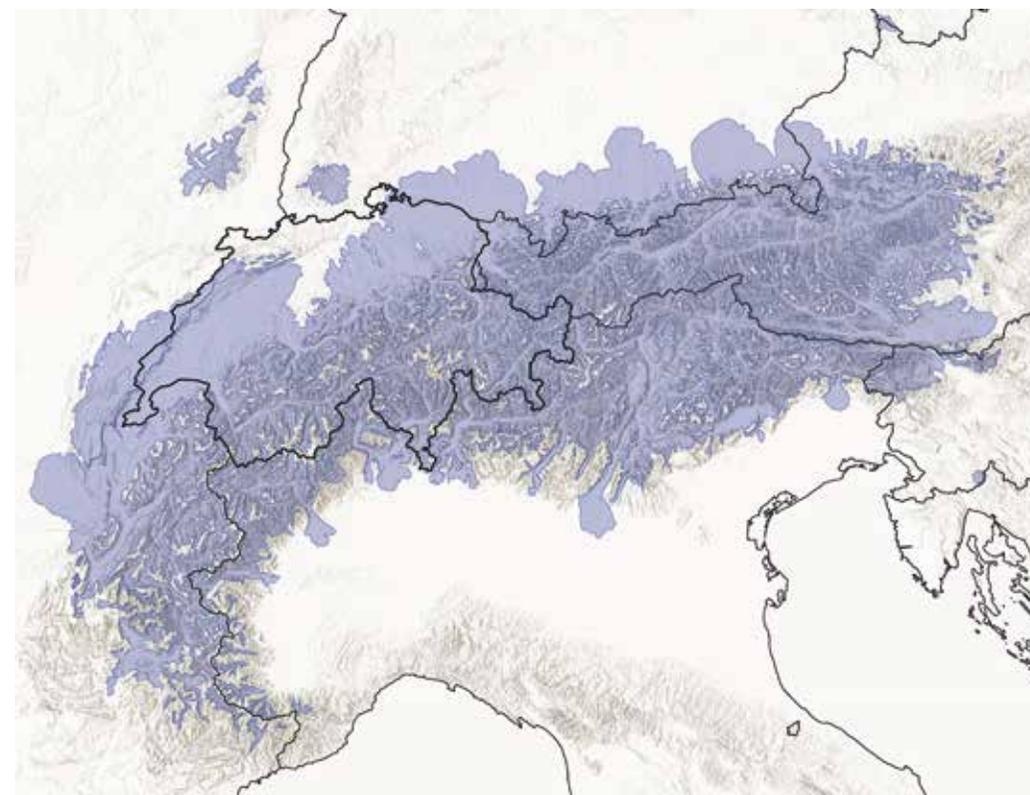
F. 2  
Oscillazioni cicliche dei parametri astronomici della Terra (cicli di Milanković)



Questi cicli modificano la quantità di energia solare ricevuta nell'emisfero nord, dove vi sono la maggior parte delle terre emerse, facendola variare fra 340 e 400 W/m<sup>2</sup>.

Fonte: Géomorphologie de la montagne, Società Svizzera di Geomorfologia (SSGm)

F. 3  
Estensione dei ghiacciai nelle Alpi durante l'Ultimo massimo glaciale



Fonti: Ivy-Ochs S., Monegato G. e Reitner J. M. (2022); fondi carta: Eurostat e Servizio server ArcGis

## L'ANTROPOCENE: QUANDO L'UOMO RIESCE A INFLUENZARE IL CLIMA

Luca Nisi, meteorologo, MeteoSvizzera, Centro Regionale Sud, Locarno-Monti

Il clima del nostro pianeta è da sempre caratterizzato da oscillazioni naturali, sia forti sia meno evidenti. Periodi di riscaldamento si sono alternati a periodi di raffreddamento. In passato queste variazioni sono tipicamente avvenute su lunghi periodi: in genere, da migliaia a centinaia di migliaia di anni (linea blu in [F. 1]), a causa di processi naturali molto differenti l'uno dall'altro (ad esempio le eruzioni vulcaniche o le variazioni dell'orbita terrestre attorno al Sole).

Spesso il paragone con il passato viene fatto limitandosi a confrontare i valori assoluti delle concentrazioni di gas a effetto serra, traendo talvolta conclusioni affrettate di dubbia validità scientifica. Innanzitutto, è importante porsi domande sull'intensità e sulla velocità con cui il riscaldamento globale si è verificato in passato e si sta verificando oggi. Ma non solo: le risposte sarebbero incomplete senza un'adeguata considerazione dei fattori che ne sono alla base. Sarebbe infatti inutile semplicemente osservare un processo problematico in atto senza conoscerne le cause: si ricaverebbero ben pochi elementi d'aiuto alla sua risoluzione.

Il progresso tecnologico ha richiesto enormi quantità di energia, ricavata quasi esclusivamente dai combustibili fossili. La concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera mostra da metà dell'Ottocento un preoccupante aumento, sempre più veloce (linea rossa in [F. 1]). La correlazione tra l'aumento della concentrazione di gas a effetto serra nell'atmosfera e la temperatura media terrestre è confermata da innumerevoli ricerche scientifiche, le prime risalenti addirittura alla fine dell'Ottocento (corrispondenza fra la linea blu e quella rossa in [F. 1]).

La conoscenza scientifica in merito è oramai solida: l'attuale riscaldamento globale è dovuto *in primis* alle emissioni di gas ad effetto serra dovute alle attività umane e ciò che si è verificato negli ultimi 150 anni non è paragonabile con quanto accaduto nel passato, anche molto remoto, quando importanti cambiamenti climatici sono avvenuti su un pianeta molto meno popolato e su tempi decisamente più lunghi.

Dal 1850 la temperatura media globale è aumentata di 1,1 gradi. Le estati degli ultimi decenni sono state caratterizzate da intense ed estese ondate di caldo, che non sono giustificabili unicamente con l'aumento delle temperature medie: alcune sono infatti risultate troppo estreme. Modifiche significative della circolazione atmosferica su larga scala sono in grado di modificare sia il "tempo" sul breve termine, per esempio con il verificarsi di eventi estremi, sia il "clima" su periodi più lunghi, con il cambiamento graduale delle condizioni climatiche in una data regione: gli effetti sono ora tangibili (Rousi et al. 2022).

In Svizzera l'aumento è stato di 2,1 gradi ([F. 2] e [F. 3]), dunque circa il doppio: a cosa è dovuta tale differenza? Qui di seguito spieghiamo i principali motivi.

In primo luogo, sulla terraferma il riscaldamento è più pronunciato rispetto a quanto avvenuto negli oceani, che ricoprono ben il 70% della superficie del nostro pianeta. A causa delle proprietà fisiche dell'acqua, gli oceani costituiscono infatti degli enormi serbatoi di energia termica e sono stati in grado di assorbire circa il 90% dell'energia

addizionale causata dall'effetto serra rafforzato dalle attività umane. Quest'energia si è distribuita anche negli strati oceanici più profondi: pertanto l'aumento della temperatura superficiale è risultato inferiore rispetto a quello registrato nelle zone continentali. In aggiunta a ciò, l'evaporazione che avviene alla superficie degli oceani richiede molta energia, che non va dunque a riscaldare l'aria a contatto con l'acqua. Gli oceani hanno pertanto, complessivamente, un effetto attenuante sul riscaldamento dell'atmosfera, che si estende in parte anche alle zone costiere, come per esempio l'Europa occidentale. Sulla terraferma vale invece il contrario: vi è una disponibilità d'acqua superficiale decisamente inferiore e dunque più energia termica a disposizione per riscaldare l'aria.

In secondo luogo, il riscaldamento è più pronunciato alle latitudini più elevate rispetto alle zone equatoriali (fenomeno noto come *amplificazione artica*). I processi che generano questa differenza sono complessi e le cause molteplici. Un contributo importante è dato dai terreni o dalle superfici marine sempre meno coperti di ghiaccio o neve: risultando più scuri, assorbono una quantità elevata di radiazione solare e di conseguenza, si riscaldano maggiormente. Un effetto simile all'amplificazione artica è riscontrabile anche sulle Alpi, in alta montagna, durante la stagione estiva: l'estensione del manto nevoso, caratterizzato da un'importante albedo, è in costante diminuzione e ciò provoca un maggiore riscaldamento della superficie.

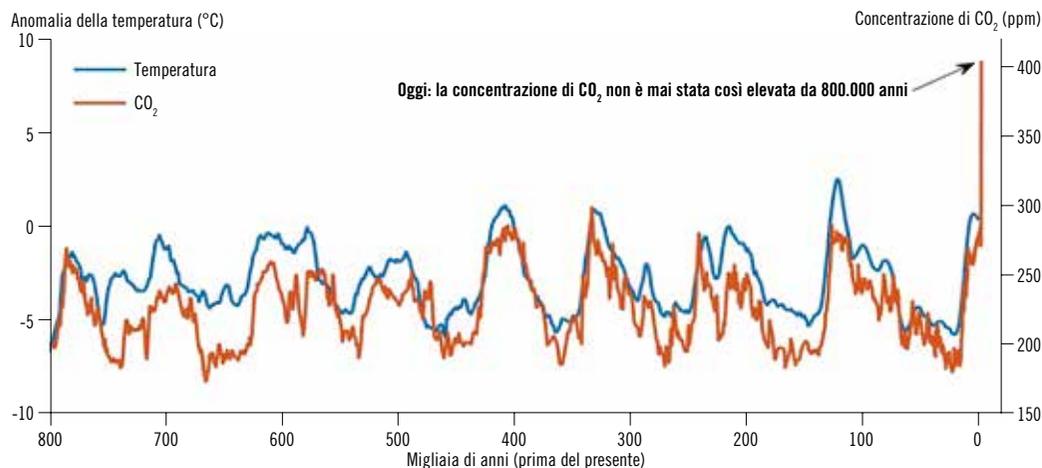
La differenza della temperatura media della Svizzera rispetto a quella globale può quindi essere spiegata tenendo conto della sua posizione conti-

mentale a medie latitudini, della sua distanza dagli oceani (non approfitta del loro effetto mitigatore) e della riduzione della superficie nevosa sulle Alpi (minore albedo).

L'aumento della temperatura media in Svizzera, come visto di 2,1 gradi rispetto al periodo preindustriale, potrebbe sembrare una cifra di poco conto. Gli effetti sul clima sono tuttavia importanti e alcuni di questi hanno un influsso molto marcato anche sulla criosfera (ovvero la superficie terrestre coperta o intrisa di acqua allo stato solido). Il riscaldamento è infatti riscontrabile a tutte le quote e in tutte le stagioni, ma è soprattutto marcato in primavera ed estate, proprio quando la fusione del manto nevoso e dei ghiacciai è già di per sé particolarmente importante e ora risulta accelerata rispetto al passato. Anche il terreno perennemente gelato, il cosiddetto permafrost, risente del riscaldamento e si sta vieppiù degradando. Gli scenari climatici CH2018 mostrano poi che in futuro le precipitazioni invernali potrebbero aumentare del 10%, ma a causa di temperature in ulteriore aumento in tutte le stagioni, il limite delle nevicate sarà sempre più alto e potenzialmente potrà influenzare (negativamente) i processi di accumulo dei ghiacciai alpini.

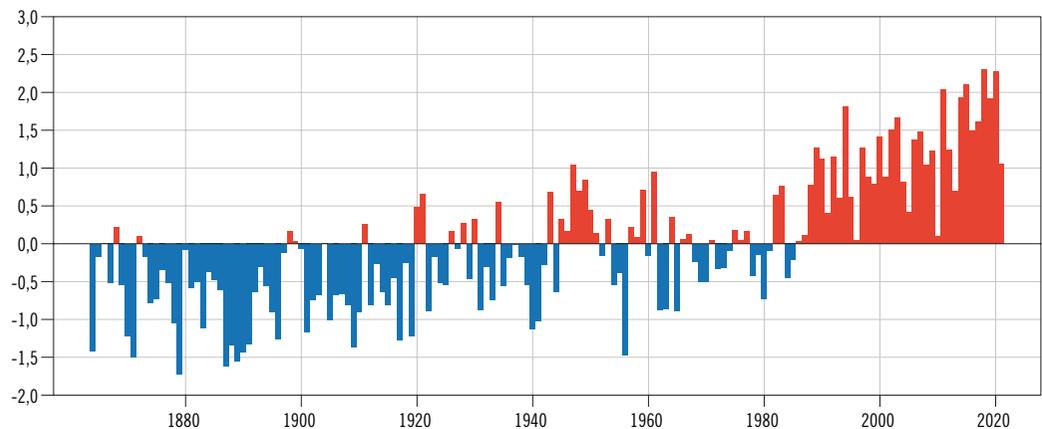
Per contenere il riscaldamento e i suoi effetti sul clima, in Svizzera come altrove, sono necessari forti riduzioni delle emissioni di gas serra. Senza azioni concrete e coerenti, la tendenza è chiara: nonostante le variazioni naturali sul breve periodo, che persisteranno anche in futuro, le condizioni climatiche impatteranno in modo marcato anche la criosfera, portando a un'ulteriore drastica riduzione delle superfici innevate o ghiacciate.

**F. 1**  
Deviazione della temperatura dalla media globale 1850-1900\* (in °C) e concentrazione di CO<sub>2</sub> medie dell'atmosfera (in ppm), negli ultimi 800.000 anni



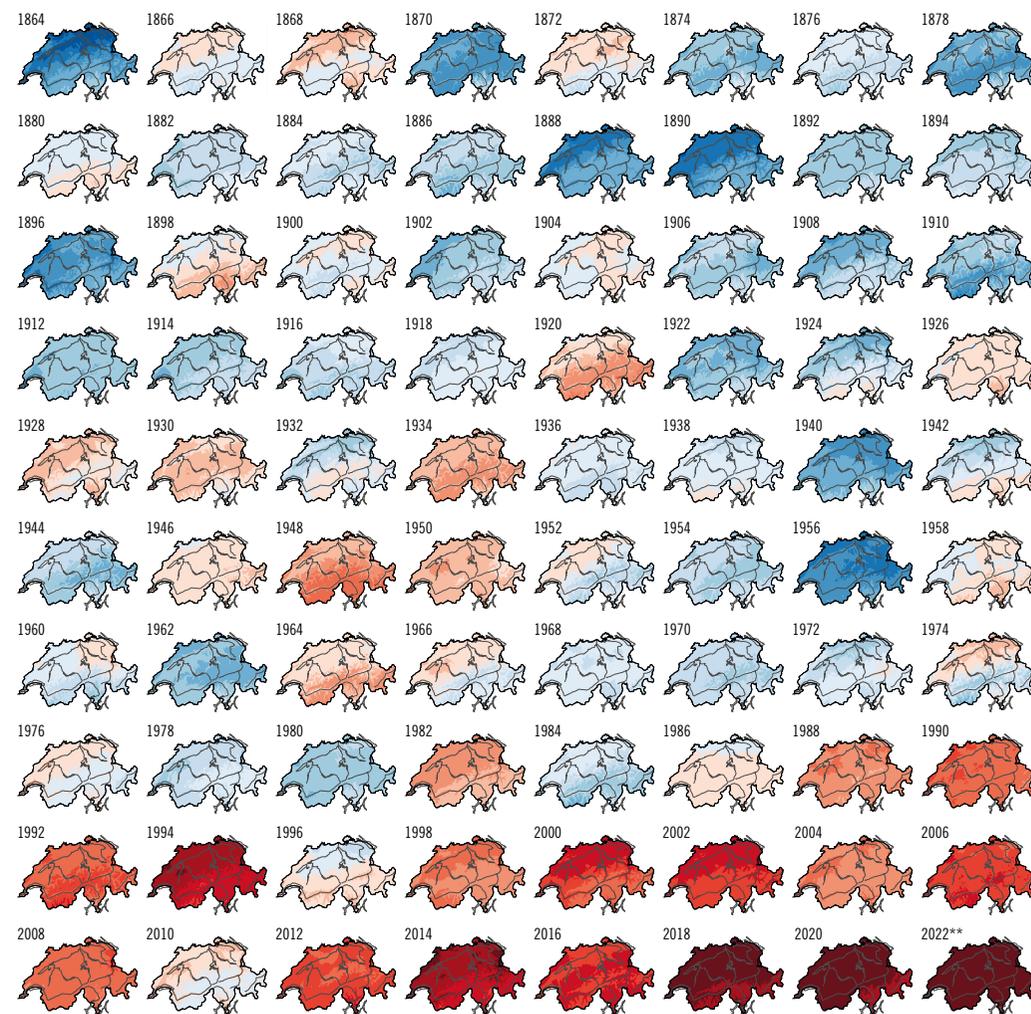
Fonte: NOAA \* Periodo di riferimento preindustriale utilizzato dall'IPCC per studiare le variazioni di temperatura.

**F. 2**  
Temperatura media: deviazione dalla media 1961-1990\* (in °C), in Svizzera, dal 1864



Fonte: MeteoSvizzera \* Valore utilizzato dall'OMM per studiare le variazioni climatiche a lungo termine.

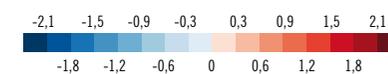
**F. 3**  
Temperatura media: deviazione dalla media 1961-1990\* (in °C), in Svizzera, dal 1864



\* Valore utilizzato dall'OMM per studiare le variazioni climatiche a lungo termine.

\*\* Dati fino al giugno 2022.

Fonte: MeteoSvizzera



## I GHIACCIAI ALPINI NELLA STORIA RECENTE

### I ghiacciai svizzeri nelle Alpi europee

I ghiacciai svizzeri hanno un ruolo centrale nel contesto alpino europeo, e non solo per la loro localizzazione: quasi metà della superficie dei ghiacciai alpini europei (il 46%) si trova infatti in Svizzera (il 21% in Italia, il 19% in Austria e il 14% in Francia) [F. 1].<sup>30</sup> Inoltre, dei sette ghiacciai alpini più vasti (con una superficie maggiore di 20 km<sup>2</sup>), sei si trovano in Svizzera: Grosser Aletsch, Fiescher, Unteraar, Unterer Grindelwald e Oberaletsch (della lista fa parte anche il ghiacciaio Mer de Glace, in Francia).<sup>30</sup>

### I ghiacciai alpini europei, dalla Piccola Era Glaciale...

Rispetto al massimo della Piccola Era Glaciale, avvenuto nel 1817/20 o nel 1850/60 a seconda delle regioni, i ghiacciai delle Alpi europee hanno perso più del 60% della loro superficie.<sup>26</sup> La diminuzione non è stata lineare nel tempo: a fine Ottocento e tra gli anni Dieci e Venti, rispettivamente Settanta e Ottanta del Novecento, si sono osservati anche brevi periodi di progressione, riconducibili a condizioni climatiche favorevoli (estati poco soleggiate e inverni con abbondanti nevicate).<sup>26,31</sup> Tra gli anni Trenta e Quaranta del Novecento c'è stata invece una notevole regressione, divenuta particolarmente importante a partire dagli anni Ottanta e intensificatasi nel ventesimo secolo, con l'aumento della temperatura atmosferica.<sup>26,32</sup> I ghiacciai svizzeri hanno seguito le stesse fasi, incluse le due avanzate del Novecento, che portarono a un'interruzione del ritiro di quasi la metà di essi (soprattutto quelli piccoli con tempi di reazione brevi, come quelli ticinesi).<sup>31</sup>

### ... e negli ultimi 50 anni

Negli anni Settanta del Novecento i ghiacciai del-

le Alpi europee si estendevano complessivamente su (circa) 2.900 km<sup>2</sup>, una superficie ridottasi a 1.800 km<sup>2</sup> nel 2015.<sup>26,30,33-35</sup> Attualmente, oltre l'80% dei ghiacciai alpini europei ha una superficie inferiore a 0,5 km<sup>2</sup>.<sup>30</sup> A causa del persistente aumento delle temperature, sono destinati a ritirarsi rapidamente – e molti addirittura a sparire – entro la fine del ventunesimo secolo.<sup>26,30,36</sup>

### I ghiacciai in Svizzera

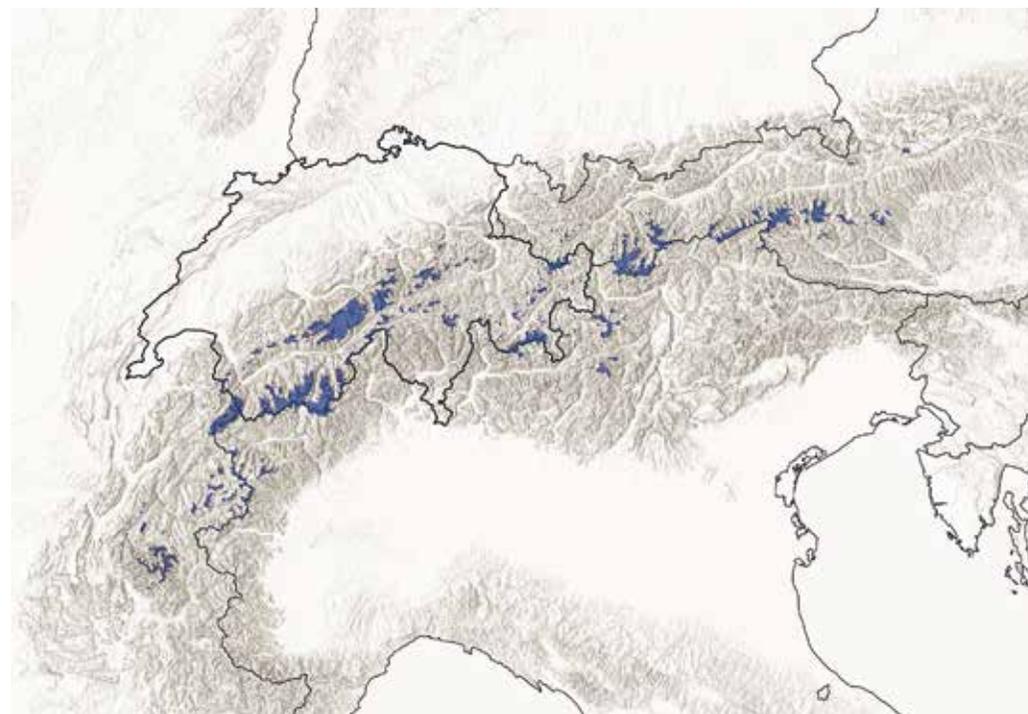
La maggior parte dei ghiacciai svizzeri si trova in Vallese, nelle Alpi bernesi e in quelle della Svizzera centrale [F. 2]. Il più grande (e conosciuto) è quello dell'Aletsch (fra i cantoni Berna e Vallese) che, con una superficie di circa 78 km<sup>2</sup> nel 2017, è anche il ghiacciaio più esteso delle Alpi europee.<sup>29,34</sup> Rispetto alla fine della Piccola Era Glaciale, la superficie totale dei ghiacciai svizzeri si è quasi dimezzata (-46,2%), passando da 1.788 km<sup>2</sup> (nel 1850) a 960 km<sup>2</sup> (nel 2016, di cui 104 km<sup>2</sup> coperti da detriti): rispettivamente il 4,3% e il 2,3% del territorio nazionale [F. 3]. Nello stesso periodo, il volume di ghiaccio si è ridotto del 20,7%, passando da 74 a 58,7 km<sup>3</sup>.<sup>29,35,37-42</sup>

### I ghiacciai in Ticino

I ghiacciai ticinesi sono tutti di piccole dimensioni [F. 3 e F. 4], pertanto particolarmente sensibili ai cambiamenti climatici. Da metà Ottocento hanno perso più dell'80% della loro superficie (-84,1%), passando da 30,2 km<sup>2</sup> (nel 1850) a 4,8 km<sup>2</sup> nel 2016 (rispettivamente 1,1% e 0,2% della superficie cantonale) [F. 3].<sup>24,29,37-41</sup> Negli ultimi decenni hanno subito importanti cambiamenti e un forte ritiro e, sulla base dei dati e dei modelli attualmente a disposizione, si prevede la loro scomparsa entro 10-30 anni<sup>31</sup>.

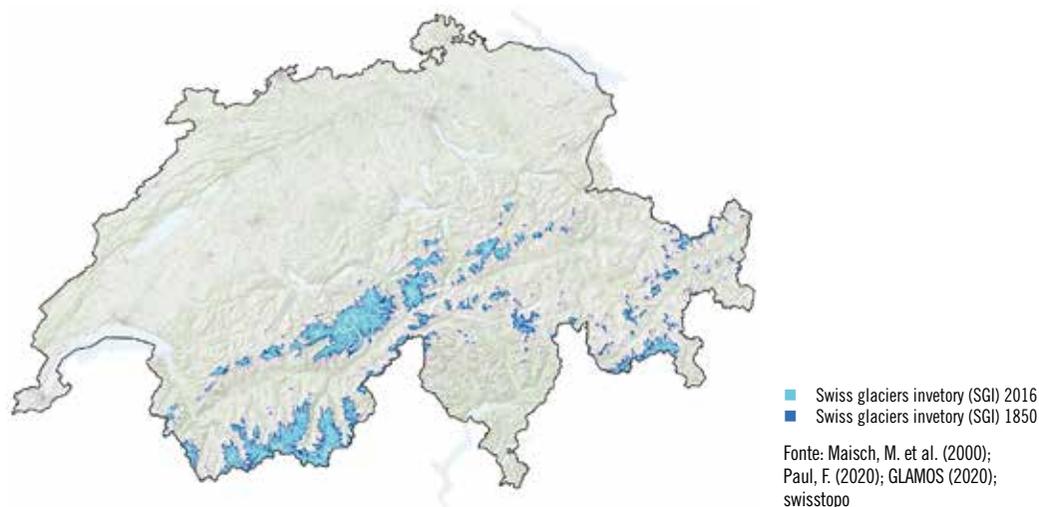
F. 1

L'estensione attuale dei ghiacciai delle Alpi europee

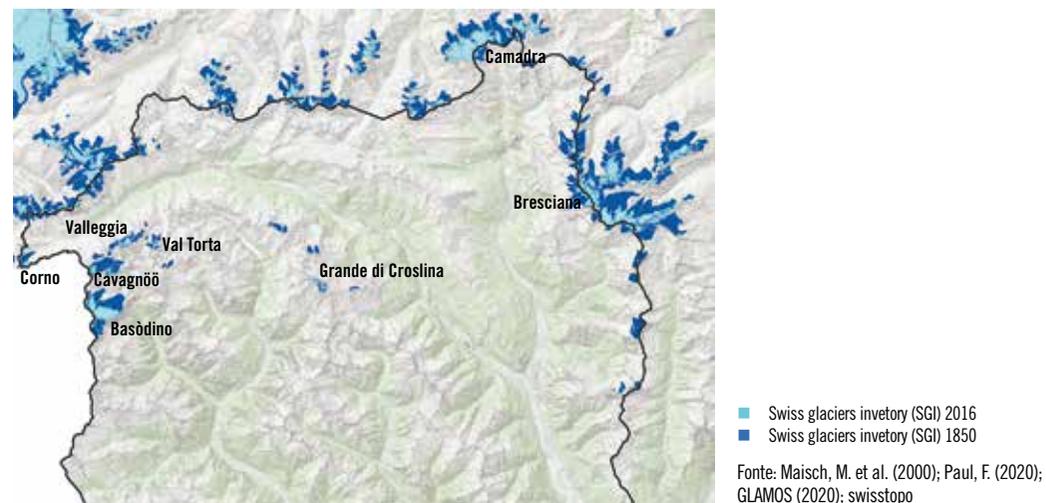


Fonte: GLIMS Consortium, 2005. GLIMS Glacier Database, Version 1. Boulder Colorado, USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. DOI: <https://doi.org/10.7265/N5V98602> [Accessed 05.04.2022]; fondi carta: Eurostat e Servizio server ArcGIS

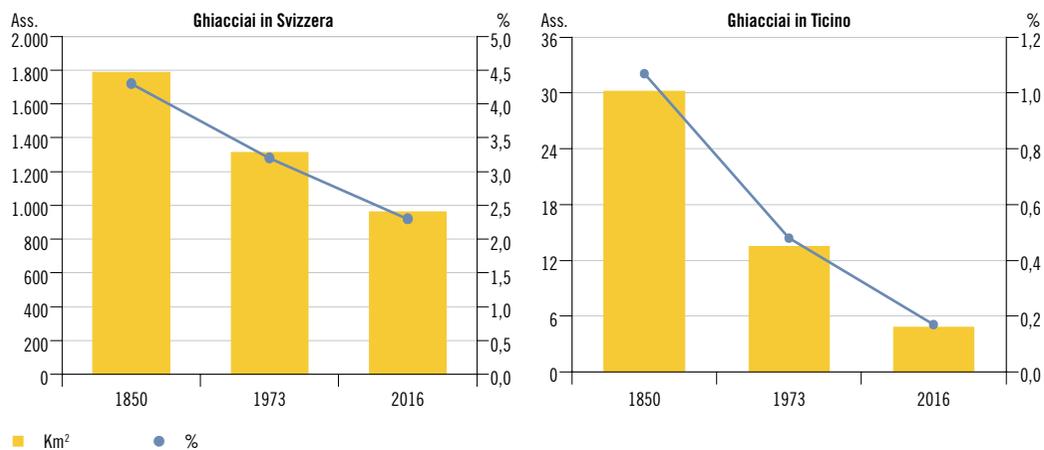
F. 2 Estensione dei ghiacciai, in Svizzera, nel 1850 e nel 2016



F. 4 Estensione dei ghiacciai, in Ticino, nel 1850 e nel 2016, e ghiacciai monitorati regolarmente



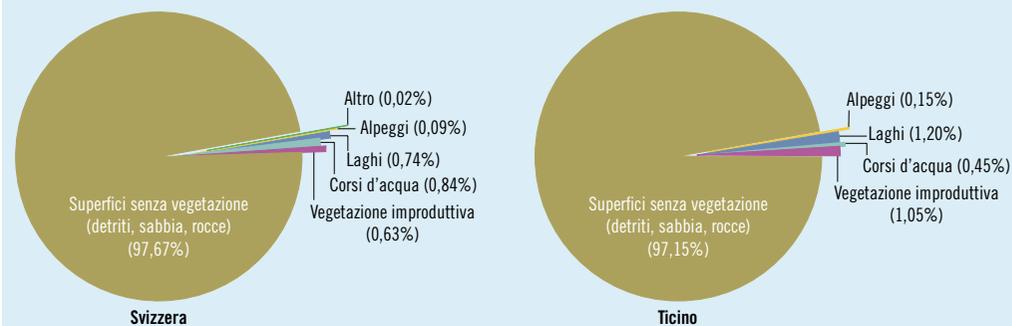
F. 3 Superficie dei ghiacciai (in km<sup>2</sup> e in % rispetto alla superficie totale), in Svizzera e in Ticino, dal 1850



Fonte: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); GLAMOS (2020); swisstopo

La quasi totalità della superficie che nel 1850 era occupata da ghiacciai e nevai è ora coperta da detriti, sabbia e rocce, in Ticino come in Svizzera.

Superficie dei ghiacciai e dei nevai scomparsi (in %), secondo la tipologia di utilizzazione della superficie presente attualmente, in Svizzera e in Ticino, tra il 1985 e il 2018



Fonte: Statistica svizzera della superficie (AREA), Ufficio federale di statistica

## PRESENTE E FUTURO DELLA RICERCA GLACIOLOGICA

Intervista a Daniel Farinotti, Professore assistente di glaciologia, Laboratorio di ricerca per l'idraulica, l'idrologia e la glaciologia (VAW) del Politecnico federale di Zurigo (ETH) e WSL\*

### **Lei rappresenta una nuova generazione di glaciologi, come mai ha intrapreso questa carriera?**

Il mio primo contatto con un ghiacciaio è avvenuto relativamente tardi, durante il servizio militare. Facevo parte degli esploratori paracadutisti. Durante un'istruzione alpina ad Andermatt (UR) scalammo la vetta del Clariden, passando dall'omonimo ghiacciaio. È stata un'esperienza di cui serbo bei ricordi, che ai tempi mi sembrava una vera e propria avventura. Qualche anno dopo, durante gli studi di ingegneria ambientale, entrai in contatto con un assistente che svolgeva misurazioni sul ghiacciaio di Arolla (VS). È a quel punto che mi venne il desiderio di approfondire la conoscenza dei ghiacciai anche professionalmente. Quindi ho cominciato a seguire i vari corsi di glaciologia offerti al Politecnico, per poi svolgere anche i lavori di diploma e di dottorato su questo tema, entrambi sotto la guida del Prof. Dr. Martin Funk, a cui ora mi posso riferire come al "mio predecessore". Di certo questo era lontano dalla mia immaginazione quando, salendo verso la vetta del Clariden, misi piede su un ghiacciaio per la prima volta!

### **Una domanda provocatoria: visto che i ghiacciai stanno sparando, in futuro ci sarà ancora abbastanza da studiare?**

Per rispondere scherzosamente, direi che dovrebbe esserci abbastanza da studiare almeno fino al mio pensionamento. Parlando seriamente, va ricordato che non spariranno tutti i ghiacciai al mondo, ma rimarranno sicuramente le calotte polari, ossia i ghiacci della Groenlandia e dell'Antartide. Queste riserve di ghiaccio sono estremamente importanti per il funzionamento del nostro pianeta, avendo un influsso sull'innalzamento del

livello dei mari, sull'evoluzione delle correnti marine e sulla meteorologia, in Europa ed altrove. Ci sono ancora tantissime domande aperte, quindi non mi preoccuperei per i futuri glaciologi. E anche se sparissero tutti i ghiacciai? Qualcuno mi disse: "Dov'è il problema? Ci sono ricercatori che studiano i dinosauri anche se si sono estinti da milioni di anni. Perché la cosa dovrebbe essere differente per i ghiacciai?".

### **Passiamo a un argomento di attualità: i metodi di protezione dei ghiacciai. Da diversi anni su molti ghiacciai svizzeri vengono posati teloni geotessili per impedirne il ritiro. Li ritiene dei metodi di intervento efficaci?**

Mi permetto una premessa: l'unica soluzione per proteggere i ghiacciai a lungo termine è il contenimento dei cambiamenti climatici. Per raggiungerlo, è imperativo ridurre le emissioni a effetto serra rapidamente e in maniera duratura. Tutto il resto, incluso il dispiegamento di teloni geotessili, non affronta la causa del problema.

Detto questo, i metodi di protezione, quali appunto i teloni geotessili o l'innervamento artificiale con cannoni da neve, sono molto efficaci localmente, per superfici limitate. Queste misure rallentano la fusione del ghiaccio e sono praticate in località ad alto interesse turistico-economico. Esempi conosciuti nell'arco alpino sono le piste sciistiche del Gemsstock, nel comprensorio di Andermatt, o la grotta di ghiaccio del ghiacciaio del Rodano (VS). Andermatt fu il primo gestore a sperimentare la posa estiva dei teloni, con l'obiettivo di limitare la perdita di spessore del proprio ghiacciaio, che minacciava di rendere impraticabile l'accesso alle piste.

### **Si potrebbero ottenere risultati positivi ricoprendo superfici di ghiacciaio più vaste?**

Sebbene siano efficaci a livello locale, queste misure riescono solo a rallentare ma non ad arrestare completamente la fusione dei ghiacciai. Non è quindi pensabile utilizzarle per salvarli nella loro dimensione attuale, o addirittura per ripristinare quella passata. Inoltre, queste misure sono difficili da realizzare, sia a livello logistico che finanziario. Nella maggior parte dei casi, i teli vanno posati alla fine della stagione invernale e rimossi a fine estate, un'impresa ardua se condotta per grandi superfici e in zone impervie. I costi degli interventi sono poi piuttosto elevati, anche se variabili: da 60 centesimi a 16 franchi all'anno per metro cubo di ghiaccio "salvato". In uno studio abbiamo calcolato che la protezione dei maggiori ghiacciai elvetici costerebbe circa 2 miliardi di franchi all'anno e ne ridurrebbe la fusione di circa il 60%. Da non dimenticare è poi l'importante impatto paesaggistico e ambientale di un'eventuale copertura a larga scala dei ghiacciai: proviamo soltanto a immaginarci le nostre montagne ricoperte di teli geotessili... Non certo da ultimo, l'usura dei teloni comporta dei problemi: col passare del tempo possono danneggiarsi, rilasciando frammenti che vanno a inquinare l'ambiente circostante, comprese le acque e gli ecosistemi locali. Questi effetti non sono stati ancora studiati a fondo, quindi un'applicazione a larga scala mi sembrerebbe irresponsabile.

Quanto invece all'uso dei cannoni per l'innervamento artificiale, il problema principale è l'approvvigionamento d'acqua necessario al loro funzionamento. Siccome quest'acqua non è generalmente disponibile, sarebbe necessario stoccarla

da qualche parte in prossimità dei ghiacciai. E se per proteggere i ghiacciai dovessimo iniziare a costruire delle dighe, non so se guadagneremmo molto: queste operazioni sono estremamente invasive a livello ecologico e paesaggistico, oltre che estremamente costose.

### **Si stanno sviluppando altre soluzioni?**

Purtroppo no. Da ciò che si può prevedere attualmente, anche nel prossimo futuro le tecniche di protezione rimarranno quelle dei teli geotessili e del cannoneggiamento di neve.

### **Siamo ancora in tempo per cambiare il destino dei ghiacciai?**

Secondo una nostra simulazione, se anche si riuscisse a bloccare il riscaldamento climatico, mantenendo il clima nella condizione degli scorsi decenni, il 40% della massa dei ghiacciai delle Alpi andrebbe comunque perso entro la fine del secolo. Per mantenere i ghiacciai allo stato attuale si dovrebbe quindi invertire la tendenza al riscaldamento globale. Questo non è molto verosimile. Quindi la nostra decisione non è se fermare il cambiamento o no, ma definire quanto cambiamento siamo disposti ad accettare.

### **Un altro tema è quello del ruolo dei ghiacciai per la produzione di energia idroelettrica. Qual è la situazione in Svizzera? Quali conseguenze avrà la fusione dei ghiacciai sulla sua produzione?**

In Svizzera ci sono molti bacini idrologici vicini ai ghiacciai. Tra i più noti vi sono la diga della Grande Dixence e quella di Mauvoisin, entrambe in Vallese. A livello nazionale, i ghiacciai contribuiscono però in maniera limitata alla produzione

di energia idroelettrica. In uno studio al riguardo, abbiamo calcolato che dal 1980 ad oggi, solo circa il 3% della produzione idroelettrica nazionale è attribuibile ad acqua risultante dalla fusione non rinnovabile dei ghiacciai. Infatti la maggior parte della produzione avviene grazie all'acqua piovana, ossia acqua che non è rilasciata da ghiacciai. Con la fusione dei ghiacciai, il volume totale di acqua effettivamente disponibile diminuirà, ma non in maniera estrema: anche se i ghiacciai dovessero scomparire del tutto, continuerà a piovere, e quindi la produzione di energia idroelettrica continuerà a essere possibile. Detto questo, i ghiacciai svolgono un'importante funzione di stoccaggio: accumulano l'acqua sotto forma di neve e ghiaccio in inverno e la rilasciano d'estate. Senza di loro questo effetto di stoccaggio verrebbe a mancare e sarebbe molto difficile rimpiazzarlo a larga scala, senza dover costruire grandi bacini d'accumulo.

**Come potremmo sfruttare il maggior deflusso di acqua durante la fase di fusione? Ad esempio, si pianifica la costruzione di nuove dighe?**

I nostri modelli prevedono che per la Svizzera l'esubero di acqua dovuto al ritiro dei ghiacciai durerà ancora circa un decennio, fino al 2030 circa. Il picco di questa disponibilità è quindi praticamente già raggiunto, e costruire nuove dighe "solo" per questa fase di esubero non conviene. Detto questo, il rafforzamento della produzione di energia idroelettrica è un punto importante della Strategia energetica svizzera 2050 che prevede, tra le molte cose, anche la rinuncia alla produzione elettrica da centrali nucleari. Per aumentare la capacità di produzione e di stoccaggio (sia per la

produzione di energia elettrica nei mesi invernali, sia per poter gestire la fluttuazione di produzione elettrica da energie rinnovabili come il fotovoltaico o l'eolico) sono pianificati sia l'innalzamento di varie dighe esistenti sia la costruzione di alcuni nuovi bacini, anche in aree "liberate" dal ritiro dei ghiacciai. Tra i progetti ritenuti più idonei dalle autorità federali vi sono la diga del ghiacciaio bernese del Trift e i potenziali siti dei ghiacciai vallesani Gorner e Oberaletsch.

**Quali altre conseguenze avrà la fusione dei ghiacciai?**

Come accennato, la sparizione dei ghiacciai comporterà anche la mancanza della loro funzione di "serbatoio di riserva" di acqua. Secondo gli scenari climatici, nei prossimi decenni andremo incontro a estati più secche e inverni più umidi. Tutto ciò influirà sulla disponibilità idrica durante la stagione estiva per settori molto importanti, come ad esempio l'agricoltura, che dipende fortemente dall'irrigazione. La scomparsa dei ghiacciai si ripercuoterà anche sulla temperatura dei corsi d'acqua, con conseguenze per gli ecosistemi acquatici (ad es. per le trote che necessitano di acque fresche) e per l'industria (ad es. il raffreddamento delle centrali nucleari).

**Infine, potrebbe parlarci del suo ambito di ricerca e delle attività del suo gruppo di ricerca?**

Le attività del mio gruppo possono essere suddivise in quattro blocchi tematici:

1. La ricerca sull'impatto dell'evoluzione dei ghiacciai a larga scala. Ci basiamo su modelli matematici per fare delle proiezioni sul futuro dei ghiacciai e per quantificare l'impatto

dei cambiamenti sulle risorse idriche o sullo sfruttamento idroelettrico, per esempio. Questi studi sono condotti a livello globale e sono basati sia su dati satellitari sia su simulazioni al computer.

2. La ricerca glaciologica fondamentale, nella quale studiamo i processi che influenzano la dinamica dei ghiacciai. Siamo interessati a capire, per esempio, come si muove l'acqua al loro interno, o come si formano le tasche d'acqua, che se si svuotano rapidamente possono rappresentare un pericolo naturale. Per questo tipo di ricerca, oltre alla modellizzazione sono necessarie anche attività sul campo.
3. Il monitoraggio dei ghiacciai svizzeri, in quanto responsabili della rete di monitoraggio GLAMOS. Questa è un'attività a lungo termine, condotta in collaborazione con le Università di Zurigo e Friburgo, oltre che con l'aiuto di innumerevoli osservatori a livello cantonale.
4. Infine offriamo anche consulenza nel contesto di incarichi esterni per i cantoni, per le officine idroelettriche ecc. Spesso queste consulenze concernono i pericoli naturali o l'approvvigionamento idrico.

**Ci sono dei progetti che le stanno particolarmente a cuore?**

Nel contesto di un progetto finanziato dal Fondo nazionale svizzero per la ricerca scientifica (*NdR: pubblicato sulla prestigiosa rivista scientifica Nature*) abbiamo analizzato l'evoluzione dei ghiacciai su scala globale nei due decenni passati. Non solo abbiamo potuto dimostrare che i ghiacciai si stanno sciogliendo praticamente ovunque,

ma anche che questa fusione ha subito un'accelerazione durante il ventunesimo secolo. Più recentemente abbiamo anche condotto uno studio sui laghi ritenuti dal ghiaccio nelle catene montuose dell'Himalaya e del Karakorum. Questi laghi possono essere instabili e, se il ghiaccio che li contiene cede, possono scaricarsi improvvisamente, causando danni lungo i territori a valle. Anche in Svizzera esistono dei laghi di questo tipo, che si svuotano annualmente. Un esempio è il lago di Faverges, sul ghiacciaio della Plaine Morte, al confine tra Berna e Vallese. Nel 2018, lo svuotamento improvviso del lago ha creato una piena di portata straordinaria, un evento naturale atteso soltanto ogni 300 anni. Per evitare che un evento del genere si ripeta è stata scavata una trincea sulla superficie del ghiacciaio, in modo da poter controllare il livello delle acque del lago e poter garantire la sicurezza a valle.

\* Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio.

## L'EVOLUZIONE DELLE MISURAZIONI DEI GHIACCIAI

### L'inizio delle misurazioni nelle Alpi

La ricerca glaciologica iniziò nelle Alpi bernesi, con i lavori di Louis Agassiz e colleghi sul ghiacciaio dell'Unteraar (canton Berna), pubblicati a partire dal 1840, e con le misure intraprese da James Forbes nelle Alpi savoiarde, pubblicate fra il 1842 e il 1851.<sup>26,43-45</sup> Nelle Alpi svizzere le rilevazioni sistematiche iniziarono attorno al 1880 e furono via via applicate a un numero sempre più vasto di ghiacciai. A livello internazionale il monitoraggio coordinato dei ghiacciai iniziò nel 1894.<sup>26</sup>

### L'inventario dei ghiacciai svizzeri

L'inventario dei ghiacciai svizzeri (*Swiss Glacier Inventory*, SGI), basato su carte topografiche e immagini aeree dell'Ufficio federale di topografia (Swisstopo), fa parte dell'Inventario Mondiale dei Ghiacciai (*World Glacier Inventory*, WGI). È stato allestito per la prima volta nel 1973 e poi aggiornato nel 2010 e nel 2016 (SGI1973, SGI2010 e SGI2016).<sup>29,39-41</sup> Nel 2000 è stato generato un inventario dei ghiacciai per l'anno 1850 (SGI1850).<sup>38,39</sup> Dal 2016 l'inventario dei ghiacciai svizzeri è gestito dalla Rete di Monitoraggio dei Ghiacciai Svizzeri (GLAMOS).<sup>29,37,46</sup> Attualmente sono monitorati regolarmente 156 ghiacciai.<sup>37</sup>

### L'inizio delle misurazioni sistematiche in Ticino

Iniziate nel 1892 con i ghiacciai del Basòdino e del Corno, le misurazioni si estesero poi a Cavagnoli (1893), Vadrecc di Bresciana (1896), Val Torta (1970), Valleggia (1971), ghiacciaio Grande di Crosolina (1989) e Vadrecc di Camadra (2005).<sup>47</sup> Altri tre ghiacciai furono misurati tra fine Ottocento e inizio Novecento: Pizzo Rotondo (1895-1925), Lucendro (1895-1911) e Sasso Nero (1860-1905).<sup>47</sup>

### Le misurazioni attuali in Ticino

Attualmente sono regolarmente monitorati sei ghiacciai (Basòdino, Corno, Cavagnoli, Bresciana, Valleggia e ghiacciaio Grande di Crosolina), mentre uno (Camadra) è misurato solo saltuariamente.<sup>25,47</sup> Per tutti i ghiacciai si esegue il rilievo frontale e, in alcuni casi, si realizzano anche i profili longitudinali, che permettono di stimare lo spessore del ghiaccio (p. es. i ghiacciai di Valleggia, Cavagnoli e Corno). Per il Basòdino si effettuano anche il bilancio di massa (regolarmente) e i rilievi fotogrammetrici e radar (più saltuariamente).<sup>25,47</sup> Dagli anni Settanta se ne occupa la Sezione forestale del Dipartimento del territorio, su incarico dell'Istituto sperimentale di ingegneria idraulica, idrologia e glaciologia (VAW) del Politecnico federale di Zurigo.

### Il rilievo frontale, dalle bindelle al GPS

Il rilievo frontale è la misura della posizione del fronte di un ghiacciaio, ed è il metodo più tradizionale e più frequentemente utilizzato per rilevare le variazioni di lunghezza dei ghiacciai. Le prime misurazioni erano effettuate con le bindelle metriche, ovvero dei metri flessibili che consentivano di misurare la distanza tra alcuni punti fissi e il fronte del ghiacciaio.<sup>25,47,48</sup> Si passò poi al teodolite, uno strumento ottico di alta precisione utilizzato per più di trent'anni e, dal 2016, al GPS (*Global Positioning System*) ad alta precisione (2-3 cm), più maneggevole e leggero del teodolite e quindi ideale per le misurazioni in alta montagna. L'accuratezza e la precisione dei rilievi GPS dipendono però dalla configurazione dei satelliti e dalla presenza del segnale GSM.<sup>25,47,48</sup>

### I rilievi fotogrammetrici

I rilievi fotogrammetrici sono elaborati sulla base di immagini ottenute tramite droni, dalle quali sono estrapolati i dati metrici del ghiacciaio (LIDAR, drone photogrammetry).<sup>25,26,48</sup> Questa tecnica consente di raccogliere informazioni sulle variazioni del fronte dei ghiacciai, sulla loro superficie e sul loro spessore. Oltre al Basòdino, nel 2015 è stato fatto un rilievo fotogrammetrico anche per il Vadrecc di Bresciana.

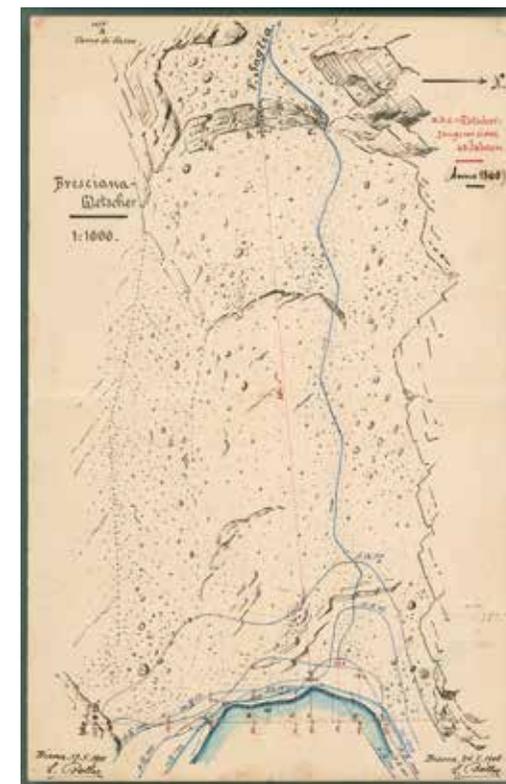
### I rilievi radar

Questa tecnologia permette di determinare la profondità media dei ghiacciai mediante il radar geologico o georadar.<sup>25,48</sup> L'interferometria radar è invece utilizzata per monitorare le parti instabili e riconoscere i movimenti.<sup>48</sup>

### Il bilancio di massa

Il bilancio di massa è definito come la differenza tra l'accumulo di neve sul ghiacciaio e la successiva ablazione (dovuta a fusione, sublimazione e caduta di seracchi), sull'arco dell'anno idrologico (dal 1 ottobre al 30 settembre dell'anno successivo).<sup>25,48</sup> Il bilancio di massa permette di quantificare la variazione (perdita o aumento) della massa di un ghiacciaio (in metri di acqua equivalenti) e viene calcolato per diverse fasce altitudinali.<sup>25,48</sup> Esistono due metodi per eseguire il bilancio di massa:

- **metodo glaciologico diretto:** rilievo dell'accumulo invernale (tramite carotaggi che permettono di valutare lo spessore del manto nevoso) e dell'ablazione estiva (determinata tramite aste di misurazione chiamate paline ablatometriche).
- **metodo geodetico:** basato sull'acquisizione e l'analisi di rilievi fotogrammetrici.



Schizzo della lingua del ghiacciaio Bresciana, 1908.

Fonte: Archivio della Sezione forestale, Dipartimento del territorio

## LE MAL DES GLACIERS

L'esperienza di Claudio Valeggia, già tecnico di misurazione presso la Sezione forestale, Dipartimento del territorio

Lo spirito dei ghiacciai ti resta dentro, anche quando il pensionamento ti permette di occuparti di tutto quanto esula da una professione, svolta per ben 35 anni, come tecnico di misurazione per la Sezione forestale del Dipartimento del territorio (settore pericoli naturali). Un lavoro preceduto da numerose esperienze professionali e formative: a Berna nel Servizio topografico federale (Dipartimento militare), a San Gallo per frequentare la scuola di fotogrammetria, a Davos e infine all'Ufficio tecnico della Città di Zurigo (comparto Züriberg). Poi il rientro, alla Sezione forestale (Dipartimento del territorio) per completare la Carta forestale cantonale e, al contempo, introdurre i nuovi metodi di misurazione.

L'amore per le vette non è però nato da giovanissimo: "Mi interessavano piuttosto il calcio e il tennis. La scoperta e la passione per la montagna (incluse le scarpinate) sono arrivate grazie ai colleghi di lavoro, Gabriele Corti e Fausto Riva, con i quali dal 1978 al 2013 abbiamo dato vita a un trio che andava a misurare otto ghiacciai ticinesi, applicando le tecniche e le indicazioni federali risalenti al 1895. Il materiale per il rilevamento constava in teodoliti, treppiedi, minio, palina, staggia, inclinometro, bussola, ramponi, corda; non mancavano scatole di tonno, acqua, ricambi, scarponi e camminate". Con il tempo lo zaino, o meglio, la strumentazione del trio Riva-Corti-Valeggia è diventata più tecnologica: "Certo, nel corso di pochi anni sono arrivati nuovi strumenti e apparecchi (come il GPS, per citarne uno) che hanno facilitato i nostri sopralluoghi e la raccolta di dati. Le misurazioni erano effettuate in stretta collaborazione

con l'allora geologo cantonale Giorgio Valenti. Noi arrivavamo fino al fronte, ma poi toccava a lui proseguire armato di corde, ramponi e altro ancora. Può sembrare un'impresa facile, ma quando la regressione inizia a raggiungere i 700-800 metri, diventa sempre più difficile e pericoloso misurare il fronte di un ghiacciaio, come nel caso dell'Adula, che dal 1980 a oggi ha perso oltre 800 metri".

E Claudio Valeggia di quanto sta avvenendo in alta quota può testimoniare in prima persona, proprio perché le misure le ha sempre prese di proprio pugno. "I primi anni, nel corso di un paio di mesi (da fine agosto a ottobre, il tempo di raccogliere dati e informazioni), riuscivamo a rilevare un avanzamento dei ghiacciai (ad esempio nel caso del Basòdino o dell'Adula), ma poi, dopo la metà degli anni Ottanta, ha cominciato a farsi strada il loro arretramento – ricorda -. Non ci siamo più limitati a misurare la linea del fronte, ma anche a considerarne il profilo (la sezione), per conoscerne il volume e la consistenza. È stato allora che ci siamo accorti che i ghiacciai si stavano ritirando". Qualche anno più tardi, tra il 2003 e il 2006, dopo qualche annata più calda del normale, la conferma: all'anno i ghiacciai perdevano 3-4 metri di spessore. "Dal 2003 al 2006 il Basòdino si è ridotto di una dozzina di metri, che in pratica equivale a una palazzina di quattro piani. A questo ritmo, i 25-30 metri del Basòdino nei prossimi trent'anni potrebbero sparire completamente".

Dal mal des glaciers al glacier fantôme il passo è breve, come testimoniato drammaticamente dal paesaggio lunare della zona del Cavagnoli,

risultato dell'arretramento in atto. Ciò nonostante Claudio Valeggia si dice ottimista: "Lo scorso autunno hanno fatto il funerale del Basòdino. Mi è sembrata una cerimonia infelice e non ci sono voluto andare, nonostante avessi misurato e camminato su quel ghiacciaio per decenni. Non mi sembra giusto infondere questa malinconia ai nostri giovani, con le nostre conoscenze dovremmo invece garantire loro continuità e alternative. Sono ottimista!"



Misurazione del Basòdino. Da sinistra a destra: Claudio Valeggia, Fausto Riva, Giorgio Valenti e Gabriele Corti.

Foto: Ti Press / F. Agosta

## IL GHIACCIAIO DEL BASÒDINO

Il ghiacciaio del Basòdino è un ghiacciaio montano nel comune di Cevio, in Vallemaggia [F. 1]. Con i suoi 1,6 km<sup>2</sup> (nel 2020) è il più esteso dei ghiacciai ticinesi, ed è anche il primo su cui sono state eseguite le misurazioni: è infatti monitorato dal 1892.

Dal 1899 al 2022 la sua lunghezza è diminuita di 796 m. Le riduzioni maggiori sono avvenute soprattutto tra metà anni Quaranta e fine anni Cinquanta del Novecento, e dai primi anni Novanta a oggi [F. 2]. La sua linea di equilibrio, che negli anni Ottanta si situava a circa 2.800 m s.l.m., attualmente si colloca attorno ai 3.100 m s.l.m. Anche la superficie è diminuita drasticamente, passando da 4,0 km<sup>2</sup> nel 1850 a 1,6 km<sup>2</sup> nel 2016 (e nel 2020) [F. 3 - F. 4].

Il bilancio di massa annuale, eseguito dal 1991, è stato solo sporadicamente positivo, risultando in una perdita cumulativa 1991-2022 di quasi 24 m equivalenti di acqua [F. 5]. Lo spessore è diminuito notevolmente nel corso degli anni [F. 6 e F. 7]. È difficile fare una valutazione ma, secondo le proiezioni più attuali, entro 20 anni (se non addirittura 5-10 anni, se dovessero verificarsi ancora delle condizioni come quelle avute nel 2022) sarà ridotto a poche piccole placche sottocresta.

F. 1  
Il ghiacciaio del Basòdino, dal 1885



Foto: dal libro "Va pensiero"

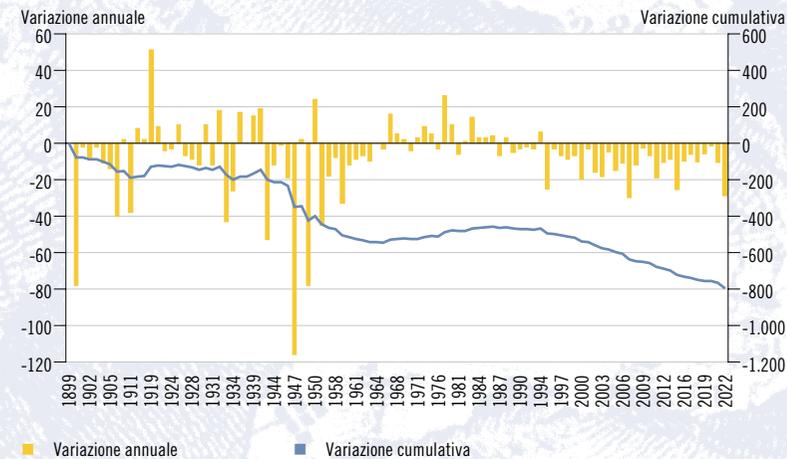


Foto: G. Ferrazzini, Lugano



Foto: G. Kappenberger

F. 2  
Variazione annuale e cumulativa della lunghezza del ghiacciaio del Basòdino (in m), dal 1899



Fonte: GLAMOS 1880-2021; dati 2022: Sezione forestale

F. 3  
Estensione del ghiacciaio del Basòdino, dal 1850

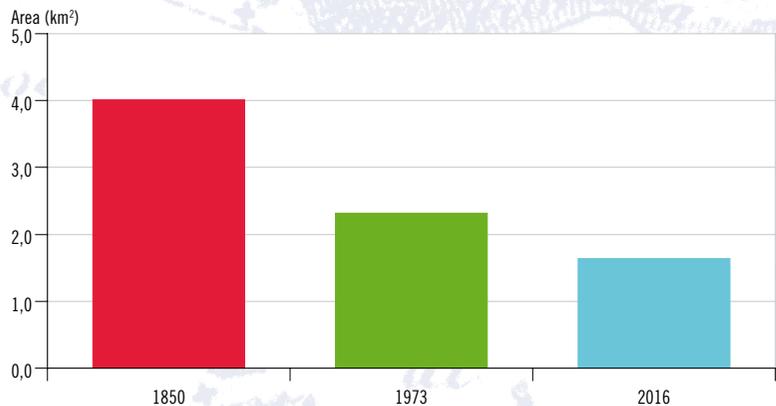


Linea rossa: 1850  
Linea verde: 1973  
Linea celeste: 2016

Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020); swisstopo

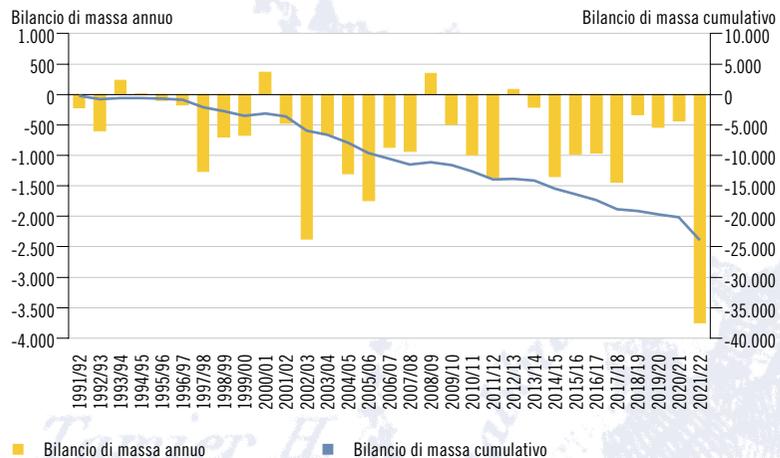
F. 4 Superficie del ghiacciaio del Basòdino (in km<sup>2</sup>), dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

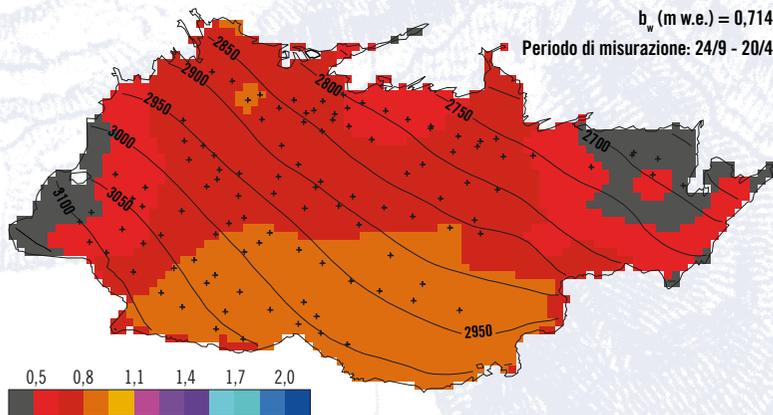
Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020)

F. 5 Bilancio di massa annuo e cumulativo del ghiacciaio del Basòdino (in mm di equivalente acqua), dal 1991/92



Fonte: GLAMOS 1880-2021; dati 2021/22: G. Kappenberger

F. 6 Bilancio di massa invernale del ghiacciaio del Basòdino (in m), per la stagione 2021/2022

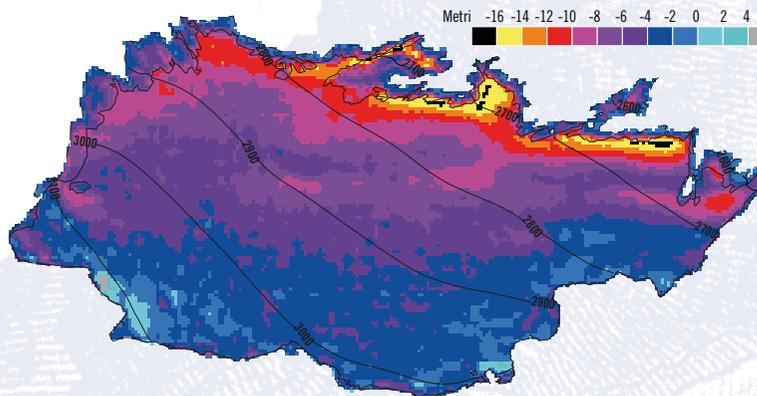


Le misurazioni sono effettuate tra fine aprile e maggio, quando si ha il massimo innevamento stagionale.

Fonte: VAW / ETH Zürich e GLAMOS

Un bilancio positivo si raggiunge quando vi è un forte accumulo di neve nella stagione invernale e un'estate poco calda. L'accumulo di neve porta a un rallentamento del processo di fusione estivo, perché la superficie innevata (che si contraddistingue per un'albedo elevata) riflette i raggi solari. Al contrario, quando la neve si scioglie, il ghiaccio sottostante viene esposto, e la fusione avviene rapidamente (fino a 10 cm al giorno), perché il ghiaccio, più scuro della neve, assorbe maggiormente il calore dei raggi solari.

F. 7 Rilievi fotogrammetrici del ghiacciaio del Basòdino: differenze di spessore (in m), tra il 2012 e il 2018



Linea nera esterna: limite del ghiacciaio nel 2018. Consente di osservare la superficie di ghiaccio andata persa fra le due misurazioni.

Fonte: VAW / ETH Zürich e GLAMOS

**Fonti**  
v. riferimenti 25, 29, 37, 38, 39, 40, 42, 47 e 48 nella Bibliografia, pp. 34-35.

## LA VITA È UNA SCALATA PERENNE

A tu per tu con Giorgio Valenti, già geologo cantonale della Sezione forestale, Dipartimento del territorio



Quello che resta del Cavagnö, luglio 2022.

Foto: A. Baumer

I misuratori arrivavano sino a un certo punto e poi... toccava a lui, il geologo cantonale Giorgio Valenti, raggiungere il fronte. Armato di piccozza, ramponi, viti da ghiaccio, corde ecc., raggiungeva in solitaria il traguardo dopo aver superato insidiose placche rocciose e distese di sassi. Più che il fegato serve una certa condizione fisica... *“Ho iniziato presto a frequentare corsi di alpinismo, già a 14 anni”,* racconta Valenti. *“Mi ricordo che i primi corsi sul ghiaccio si svolgevano (che fortuna!) sulle lingue dei ghiacciai, dell’Adula o al Campo Tencia per fare degli esempi, allora bassissime! Ora invece per raggiungere il fronte bisogna camminare parecchio.”* E di vette e altitudini Valenti ne ha viste parecchie...

comprese quelle scalate nei suoi numerosi viaggi in Nepal e in Sudamerica. Tutte esperienze che, nel corso di cinquant’anni, gli hanno permesso di osservare e valutare l’evoluzione (e la trasformazione) del paesaggio. *“Effettivamente ho avuto modo di assistere al ritiro dei ghiacciai: dalle lingue panciute della mia infanzia alla breve avanzata degli anni Settanta, fino alle attuali distese di sassi lasciate dal loro arretramento”,* sottolinea il geologo e alpinista. *“In cinquant’anni si è verificato un cambiamento incredibile... sebbene, anche se più lentamente, fosse già in atto dalla seconda metà dell’Ottocento. Il fatto che oggi ammiriamo i nostri bellissimi laghetti alpini deve infatti farci ricordare che buona parte*

*di essi sono stati generati proprio dal ritiro dei ghiacciai! Potrà lasciare un po’ di tristezza, ma è la natura che segue il suo corso.”*

Arretramento dei ghiacciai, pericoli naturali. Cosa dobbiamo temere per gli anni a venire? *“Il riscaldamento climatico è un fenomeno che l’attività umana ha accelerato. 40 anni fa, erano pochi gli ‘illuminati’ che ne parlavano, mentre oggi è sotto gli occhi di tutti. Il paesaggio si è trasformato, con situazioni molto diverse nelle varie parti del mondo: dove c’erano ghiacciai si possono trovare distese di sassi, laghi ma anche strutture in equilibrio precario. In Himalaya o sulle montagne Andine del Sudamerica ad esempio, morene frontali trattengono a malapena laghi, le cui acque esercitano una pressione enorme: se queste dighe naturali dovessero cedere, minaccerebbero intere vallate. Nelle Alpi le situazioni critiche – caduta di grosse porzioni frontali di ghiacciai, che minacciano generalmente vie di salita ai quattromila o impianti in quota, oppure esondazione di laghi proglaciali – sono fortunatamente poche. Queste situazioni sono comunque attentamente monitorate e costituiscono una sfida per chi si occupa della sicurezza di insediamenti, infrastrutture e turismo”,* sottolinea Valenti.

*“In Ticino, dove i ghiacciai sono di piccole dimensioni e relegati in prossimità delle vette, non si prevedono ritiri con conseguenze drammatiche, come la mancanza di una riserva di acqua o l’inesco di frane pericolose per paesi o infrastrutture. Sappiamo però che per pochi anni ancora potremo ammirare ghiacciai e ambienti che in pochi anni non saranno più tali, come il Cavagnoli, il*

*Basodino, il Tencia e l’Adula. Non va poi dimenticato che il ritiro dei ghiacciai è forse l’indizio più evidente della mutazione climatica e ambientale, ma ci sono altri fattori da considerare, come la degradazione del permafrost, che può causare crolli di porzioni rocciose. Proprio quest’ultimo è stato, ad esempio, la probabile causa del cedimento che alla fine degli anni Ottanta ha distrutto l’ex-rifugio della Gönerli, situato sul valico Gönerlilücke, che collega la valle Bedretto a Goms (VS)”,* ricorda Giorgio Valenti.

Invece per gli alpinisti il ritiro dei ghiacciai comporterà un brusco quanto letterale “cambio di vedute”: *“Nella pianificazione delle escursioni e delle scalate, oltre a una valutazione oggettiva delle proprie capacità fisiche e tecniche, occorrerà tener conto di fattori esterni quali l’aumento dei pericoli naturali e del numero dei frequentatori. Le temperature sempre più elevate e la degradazione del permafrost aumentano il rischio di franamenti e crolli di roccia, la formazione di nuovi crepacci o la caduta di seracchi, come purtroppo recentemente successo al ghiacciaio della Marmolada: una tragedia generata proprio dal crollo di un enorme seracco. Sulle nostre montagne, sarà necessaria maggior prudenza nel transitare lungo i canali deglaciatati recentemente, evitando che cordate in sovrannumero smuovano accidentalmente i sassi e i detriti rimasti dove il ghiaccio sarà scomparso”.*

## IL VADRECC DI BRESCIANA

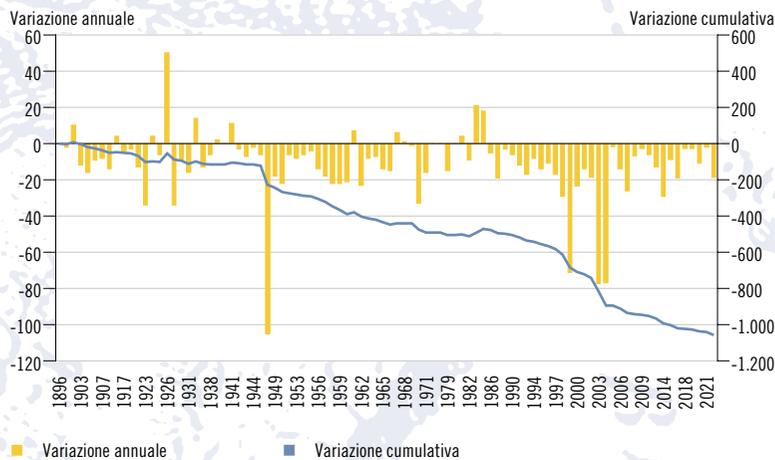
Il Vadrecc di Bresciana (anche chiamato ghiacciaio dell'Adula) è il secondo ghiacciaio per estensione del Ticino. Si tratta di un ghiacciaio montano nel comune di Blenio (Valle di Blenio) [F. 1].

All'inizio delle misurazioni, nel 1896, era ancora un ghiacciaio di tipo alpino, con una lingua evidente.

Dal 1896 al 2022 la sua lunghezza è diminuita di 1.058 m [F. 2]. Anche la sua estensione è diminuita drasticamente nel tempo: da 1,88 km<sup>2</sup> nel 1850 a 0,42 km<sup>2</sup> nel 2016 [F. 1, F. 3 e F. 4].

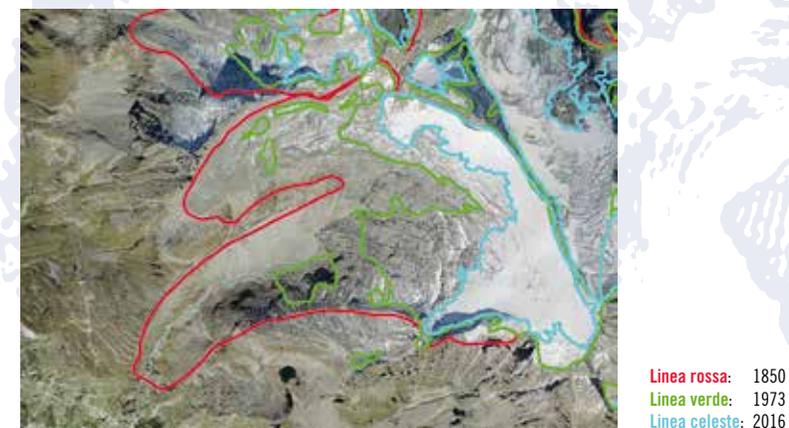
Nella zona tra le cime dell'Adula e del Grauhorn è molto stretto, per cui in futuro potrebbe dividersi in due parti (v. freccia in [F. 1]).

F. 2  
Variazione annuale e cumulativa della lunghezza del Vadrecc di Bresciana (in m), dal 1896



Fonte: GLAMOS 1880-2021; dati 2022: Sezione forestale

F. 3  
Estensione del Vadrecc di Bresciana, dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020); swisstopo

### Fonti

v. riferimenti 25, 29, 37, 38, 39, 40, 47 e 48 nella Bibliografia, pp. 34-35.

F. 1  
Il Vadrecc di Bresciana, dal 1939



Foto: Museo della Valle di Blenio, fondo G. Corti

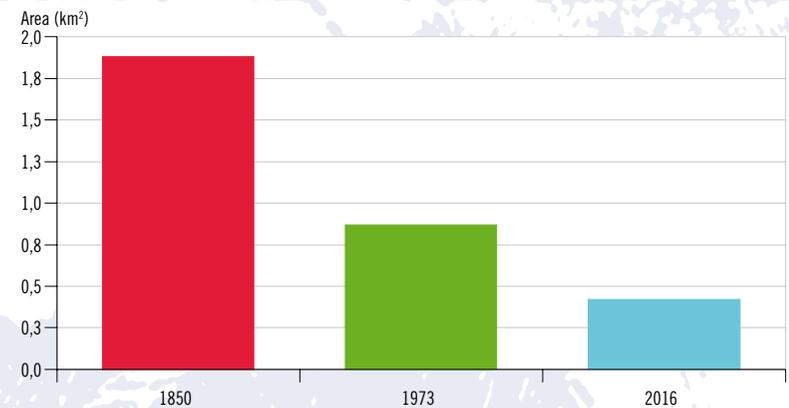


Foto: G. Corti



Foto: V. Noto

F. 4  
Superficie del ghiacciaio del Vadrecc di Bresciana (in km<sup>2</sup>), dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020)

## IL VADRECC DI CAMADRA

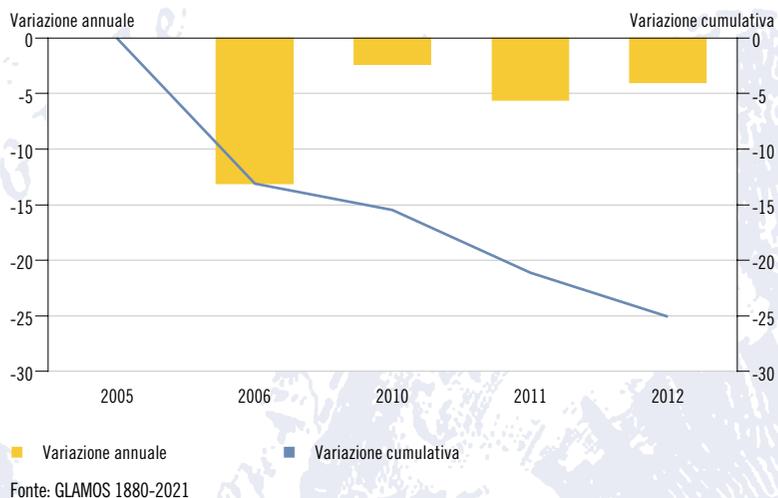
Il Vadrecc di Camadra è un ghiacciaio montano nel comune di Blenio (Valle di Blenio) [F. 1].

Il ghiacciaio viene misurato saltuariamente (ogni 3-4 anni). Le prime misure risalgono al 2005 (quando misurava 0,4 km di lunghezza) e da allora si è accorciato di 25 m. La superficie, stimata a 0,53 km<sup>2</sup> nel 1850, nel 2016 era ridotta a 0,14 km<sup>2</sup> [F. 2 - F. 4].

### Fonti

v. riferimenti 25, 29, 37, 38, 39, 40, 47 e 48 nella Bibliografia, pp. 34-35.

F. 2  
Variazione annuale e cumulativa della lunghezza del Vadrecc di Camadra (in m), dal 2005



F. 3  
Estensione del Vadrecc di Camadra, dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020); swisstopo

F. 1  
Il Vadrecc di Camadra, dal 2004

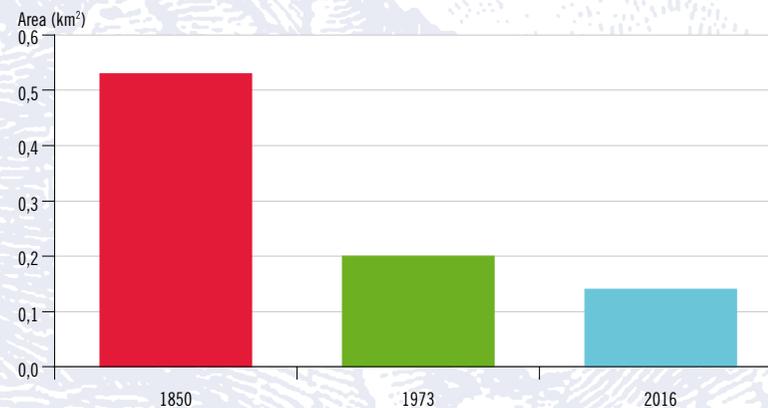


Foto: Ti Press / F. Agosta 2004



Foto: D. Barra

F. 4  
Superficie del Vadrecc di Camadra (in km<sup>2</sup>), dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020)

## L'IMPATTO SULLA FAUNA

Federico Tettamanti, biologo, titolare *Studio Alpino - Ecology and nature conservation*

Il territorio alpino è ricco di specie animali. Tra le più note ci sono i mammiferi come stambecco, camoscio, ermellino e lepre bianca, ma non mancano varie specie di uccelli (p. es. pernice bianca), insetti, ragni, ecc. Per molte di queste specie (ma non per la pulce del ghiaccio!) i ghiacciai alpini segnano un limite naturale, visto che su questi ambienti la vegetazione non cresce e dunque sarebbe troppo difficile trovare il nutrimento adeguato per sopravvivere. I cambiamenti climatici hanno dunque grandi ripercussioni sulla vita degli animali selvatici. Alcuni gruppi di animali si trovano confrontati, in base al luogo in cui vivono, a cambiamenti a volte anche importanti dell'ambiente che li circonda, con possibili conseguenze per alcune attività fondamentali come la riproduzione o la ricerca di cibo. Sempre più ricerche scientifiche negli ultimi anni studiano gli effetti del cambiamento climatico su specie di animali (come farfalle, uccelli e mammiferi), analizzando tra le altre cose i loro comportamenti e i loro spostamenti. Il tema è quindi importante e di attualità.

### Il cambiamento climatico altera l'equilibrio tra flora e fauna

Ogni specie, sia animale sia vegetale, si è adattata nel corso del tempo alle condizioni climatiche del luogo in cui vive, stabilendo un equilibrio con tutte le altre specie che fanno parte dello stesso ecosistema. Ad esempio la nascita dei piccoli di stambecco avviene normalmente in concomitanza con la ricrescita, dopo l'inverno, della prima vegetazione, che è la più ricca di nutrienti. L'aumento delle temperature, però, comporta meno precipitazioni nevose e una fusione anticipata della neve in montagna: questo causa una vegetazione più pre-

coce, che può perturbare l'equilibrio all'interno dell'ecosistema. Nel caso specifico dello stambecco, le mamme dopo aver partorito i piccoli potrebbero avere a disposizione erba di minore valore nutrizionale, con conseguenze sulla loro capacità di sopravvivenza e su quella dei loro piccoli.

### Il cambiamento climatico causa una migrazione delle specie verso l'alto

Con il riscaldamento climatico, sempre più specie di mammiferi, insetti e uccelli trovano rifugio a quote più alte. Animali che prima non potevano sopravvivere al di sopra di determinate altitudini (come la lepre comune) si stanno spostando sempre più in alto, entrando così in competizione per lo spazio e le sostanze nutritive con le specie alpine (pensiamo in particolare agli animali tipici delle alte quote, quali pernice bianca, lepre variabile, ermellino e stambecco). Salendo, lo spazio si restringe e la competizione inter specifica (cioè fra le diverse specie) e intra specifica (fra individui della stessa specie) aumenta. Le specie che già erano adattate alle alte quote vengono spinte sempre più in alto, verso le cime delle montagne, senza altri spazi dove andare.

### Alcune specie animali occuperanno gli spazi liberati dalla fusione dei ghiacciai

I ghiacciai si stanno ritirando sempre più, aprendo nuovi spazi vitali per alcune specie animali. I nuovi spazi generati dal ritiro dei ghiacciai potrebbero creare luoghi favorevoli alla sopravvivenza di alcune specie selvatiche. Pensiamo ad esempio a specie (come la lepre variabile, la pernice bianca o il merlo dal collare) che necessitano di habitat a *patchwork*, cioè con un manto nevoso a chiazze,



Stambecchi sul Monte Prosa. Sullo sfondo, il ghiacciaio del Basòdino.

Foto: F. Tettamanti

dove nei periodi primaverili la vegetazione è ricca di nutrienti e il suolo di larve di insetti. Ma questi nuovi spazi non saranno subito fruibili per la fauna. La vegetazione non si muove velocemente come gli animali selvatici e il manto nevoso a chiazze primaverile non si scioglierà su praterie alpine, ma su distese di roccia. Non ci saranno subito fiori per gli insetti, che quindi inizialmente non troveranno un habitat favorevole negli spazi liberati dai ghiacciai. Sarà un processo lento: bisognerà attendere che la vegetazione colonizzi le morene dei ghiacciai, nella speranza che per alcune specie di animali, come la lepre variabile, non sarà troppo tardi. La vita cercherà di insediarsi là dove un tempo c'erano solo pulci e ghiaccio.

## CONSEGUENZE SUI REGIMI IDRICI

Andrea Salvetti, Responsabile del settore idrologia e pericoli naturali, Ufficio dei corsi d'acqua

Il regime di un corso d'acqua dipende dalle condizioni del bacino idrografico di cui fa parte (geologia, uso del suolo e vegetazione ecc.) ed è influenzato dal clima, dai cicli stagionali delle precipitazioni e da quelli dell'evaporazione. I regimi idrologici sono dunque sensibili ai cambiamenti climatici in atto.

Nei bacini alpini, in inverno parte delle precipitazioni è temporaneamente immagazzinata come neve nei nevai e nei ghiacciai: di conseguenza, il deflusso risulta notevolmente ridotto. In primavera e in estate, al contrario, il deflusso aumenta, a seguito del disgelo della neve e dell'eventuale fusione del ghiaccio immagazzinato nei ghiacciai. Il contributo della neve può rappresentare fino al 60% del deflusso medio annuo, mentre quello dei ghiacciai varia notevolmente in funzione del grado di glaciazione (ovvero della percentuale di superficie glaciale rispetto alla superficie totale del bacino idrografico). Ad esempio, circa il 40% del deflusso del Reno a Basilea proviene dallo scioglimento stagionale della neve, mentre circa il 2% proviene dallo scioglimento dell'accumulo del ghiaccio (Bernhard e Zappa 2012; Stahl et al. 2016). Per l'Aare a Brienzwiler (altitudine media di 2.135 m s.l.m. e grado di glaciazione del 15,5%) il contributo dei ghiacciai sale al 13%. In Ticino invece, dove il grado di glaciazione per i bacini di media grandezza è molto ridotto (Maggia a Bignasco 0,9%; Brenno a Biasca 0,3%; Ticino a Piotta 0,3% e a Pollegio 0,2%), l'importanza della fusione estiva dei ghiacciai è molto limitata (è importante solo nei piccoli e piccolissimi bacini idrografici, cosiddetti di "testata", in cui la percentuale di superficie glaciale è significativa) [F. 1].

Numerosi studi hanno rilevato che in Svizzera i regimi idrologici sono cambiati già notevolmente nel corso del periodo di osservazione 1961-2015 (Weingartner 2018). Generalmente, nei mesi invernali le portate sono aumentate, a seguito dell'innalzamento della temperatura dell'aria e quindi al manifestarsi di precipitazioni sotto forma di pioggia più che di neve. Al contrario, in estate le portate sono tendenzialmente diminuite. Fanno eccezione proprio i bacini idrografici con grado di glaciazione elevato, dove l'apporto di acqua dovuto alla fusione di neve e ghiaccio è aumentato: questo contributo andrà però ad esaurirsi nei prossimi decenni. Ad esempio, per il Rodano a Gletsch si valuta che entro la fine del secolo, la percentuale del deflusso annuale dovuta alla fusione glaciale scenderà dal 27 al 10% o addirittura al 4%.

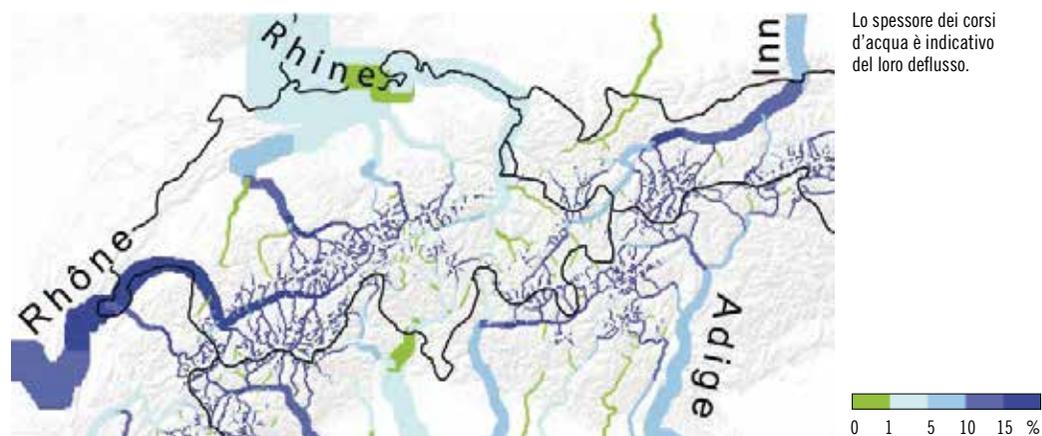
Queste tendenze sono confermate anche dai più recenti scenari, come il progetto Hydro-CH2018, che ha esaminato gli effetti dei cambiamenti climatici sulle acque in Svizzera. Si modificherà il regime idrologico nel suo complesso, ma in particolare cambierà la distribuzione stagionale delle risorse idriche, sia superficiali sia sotterranee. In primavera il deflusso tenderà ad aumentare, a causa dell'anticipo dello scioglimento delle nevi. In generale, inoltre, si osserverà un cambiamento nei tipi di regime: quelli attualmente di tipo *glaciale* tenderanno a diventare di tipo *nivale* (cioè influenzati dallo scioglimento della neve più che da quello dei ghiacci) mentre quelli che attualmente sono *nivali* diventeranno piuttosto *pluviali* (influenzati dalle piogge più che dallo scioglimento della neve). Le magre saranno più frequenti, con conseguenze importanti sull'ecologia delle acque,

sulla protezione contro le piene e sull'utilizzazione delle acque.

Per il versante sud delle Alpi, dove incidono sia l'influenza climatica alpina sia quella mediterranea, sono stati definiti dei tipi specifici di regime idrologico, detti *sudalpini*. Attualmente due tipi sono influenzati in maniera marcata dalla neve e dai ghiacciai: il regime *nivo-pluviale meridionale*, influenzato dalla neve e dalle piogge (con altitudine media 1.200-1.800 m s.l.m.) e quello *nivale meridionale*, influenzato dalla neve e dai ghiacciai (con altitudine media 1.800-2.300 m s.l.m.). Fanno parte di quest'ultima categoria i bacini idrografici situati a nord del cantone: Lavizzara, Bavona, Bedretto, Leventina e Brenno. Sul lato sud delle Alpi molti bacini sono però influenzati da capita-

zioni per usi idroelettrici o altre attività antropiche: quelli con condizioni di deflusso naturale o quasi naturale sono pochissimi e questo rende difficile analizzare i cambiamenti nei regimi di deflusso. Per il futuro, però, si prevede che in Ticino l'evaporazione aumenterà e il deflusso dovuto allo scioglimento dei ghiacciai si esaurirà. Secondo gli scenari climatici, in inverno le precipitazioni cadranno sempre più come pioggia piuttosto che come neve, riducendo così l'accumulo invernale e (di conseguenza) lo scioglimento primaverile. Ciò porterà a una diminuzione del deflusso in estate e in autunno. In inverno e in primavera il deflusso tenderà invece ad aumentare. Sarà pertanto necessario trovare nuove forme di gestione dell'acqua, affrontando gli inevitabili conflitti che sorgeranno tra i diversi utilizzatori e fruitori di questa risorsa.

F. 1  
Contributo dei ghiacciai al deflusso medio annuo (media 1980-2009)



Fonte: Farinotti D., Pistocchi A. e Huss M. (2016)

# IL GHIACCIAIO DEL CAVAGNÖÖ

Il ghiacciaio del Cavagnöo (Cavagnoli) è un ghiacciaio montano nel comune di Cevio, in Vallemaggia [F. 1].

Le misurazioni sono iniziate nel 1893 (sospese dal 1911 al 1979). Nel 2014 si è spaccato in due: il troncone inferiore è diventato ghiaccio “morto”, separato dalla zona di accumulo e dunque escluso dal ciclo di rinnovo del ghiaccio. Fra il 2021 e il 2022 si è ulteriormente frazionato. Di conseguenza, dall’inizio delle misurazioni al 2022 ha subito una regressione di 2.198 m, cifra che considera l’arretramento del punto di misurazione dovuto alle fratture del 2014 e del 2022, di 900 m e 290 m (le misurazioni sono realizzate sul fronte del ghiacciaio ancora attivo, dunque nella parte alta) [linea tratteggiata in F. 2].

La sua estensione è scesa drasticamente, da 1,95 km<sup>2</sup> nel 1850 a 0,17 km<sup>2</sup> nel 2016 [F. 3 e F. 4]. A seguito del suo ritiro, dal 1987 si è formato un lago proglaciale [F. 7 della scheda Definizioni].

In occasione delle ultime misurazioni, effettuate a fine estate, era sempre completamente privo di neve: la zona di accumulo non esiste più, pertanto il ghiacciaio non ha più una vera dinamica glaciale.

F. 1 Il ghiacciaio del Cavagnöo, dal 1985



Foto: G. Corti

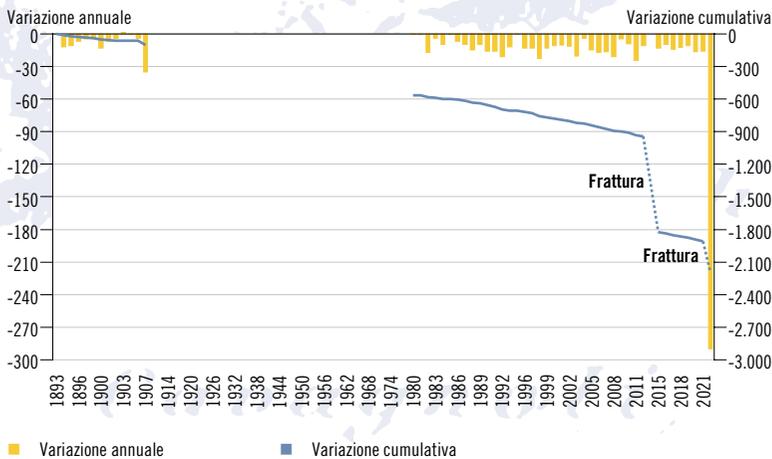


Foto: G. Corti



Foto: G. Corti

F. 2 Variazione annuale e cumulativa della lunghezza del ghiacciaio del Cavagnöo (in m), dal 1894

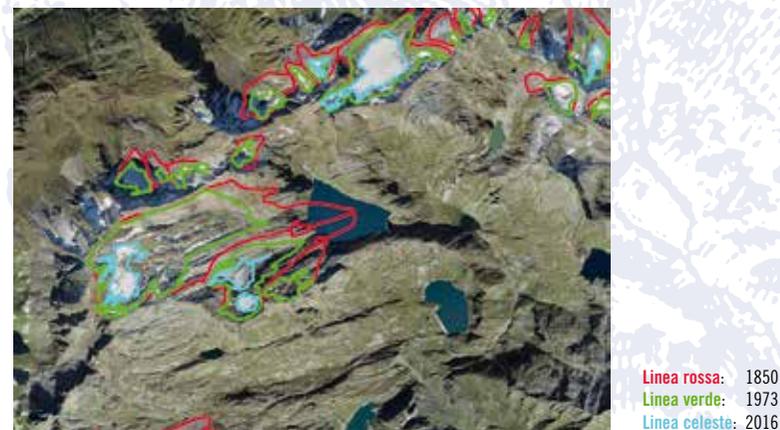


Fonte: GLAMOS 1880-2021; dati 2022: Sezione forestale

### Fonti

v. riferimenti 25, 29, 37, 38, 39, 40, 47 e 48 nella Bibliografia, pp. 34-35.

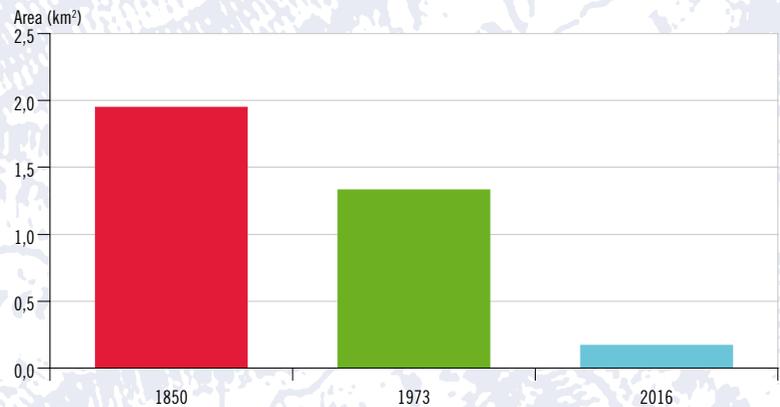
F. 3 Estensione del ghiacciaio del Cavagnöo, dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020); swisstopo

F. 4 Superficie del ghiacciaio del Cavagnöo (in km<sup>2</sup>), dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020)

## IL GHIACCIAIO DEL CORNO

Il ghiacciaio del Corno si trova nel comune di Bredretto, nell'omonima valle [F. 1]. Le sue misurazioni sono iniziate nel 1893 e sono proseguite biennalmente fino al 1909, quando sono state interrotte, per poi riprendere a cadenza annuale a partire dal 1974.

Alla fine della Piccola Era Glaciale, attorno al 1850, il ghiacciaio occupava il fondovalle della valle del Corno, ed era collegato al ghiacciaio del Gries.

Dal 1893 al 2020 la sua lunghezza è diminuita di 355 m. Durante gli anni Settanta e Ottanta del Novecento si sono però verificate estati relativamente avare di sole e poco calde, affiancate da innevamenti invernali consistenti, che hanno portato a un aumento (temporaneo) della sua lunghezza [F. 2].

La sua estensione è passata da 0,74 km<sup>2</sup> nel 1850 a 0,15 km<sup>2</sup> nel 2016 [F. 3 e F. 4].

### Fonti

v. riferimenti 25, 29, 37, 38, 39, 40, 47 e 48 nella Bibliografia, pp. 34-35.

F. 1  
Il ghiacciaio del Corno, dal 1985



Foto: G. Corti

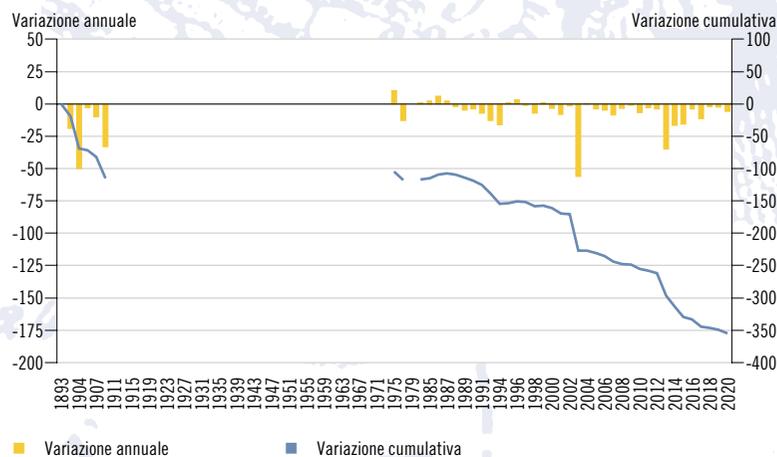


Foto: C. Valeggia



Foto: G. Corti

F. 2  
Variazione annuale e cumulativa della lunghezza del ghiacciaio del Corno (in m), dal 1893



Fonte: GLAMOS 1880-2021; avvertenza: dati dal 1979 rivisti

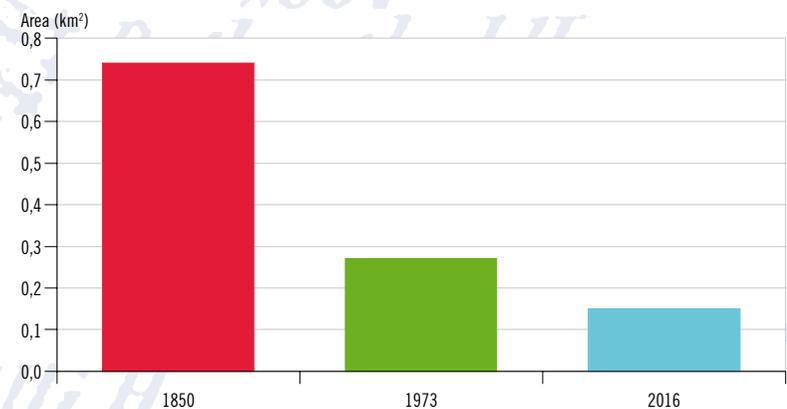
F. 3  
Estensione del ghiacciaio del Corno, dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020); swisstopo

F. 4  
Superficie del ghiacciaio del Corno (in km<sup>2</sup>), dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020)

## IL GHIACCIAIO DI VALLEGGIA

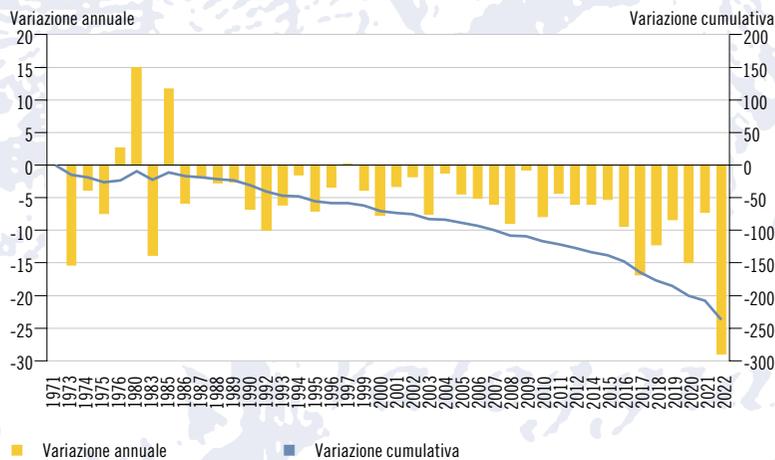
Il ghiacciaio di Valleggia è un ghiacciaio montano nel comune di Bedretto (Val Bedretto) [F. 1].

È stato misurato per la prima volta nel 1971, e da allora è arretrato di 237 m [F. 2]. Nel 1850 la sua superficie ammontava a 0,76 km<sup>2</sup>, mentre nel 2016 era ridotta a 0,29 km<sup>2</sup> [F. 3 e F. 4]. Anche il suo spessore ha subito una diminuzione molto importante negli ultimi anni.

### Fonti

v. riferimenti 25, 29, 37, 38, 39, 40, 47 e 48 nella Bibliografia, pp. 34-35.

F. 2  
Variazione annuale e cumulativa della lunghezza del ghiacciaio di Valleggia (in m), dal 1971



Fonte: GLAMOS 1880-2021; dati 2022: Sezione forestale

F. 3  
Estensione del ghiacciaio di Valleggia, dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020); swisstopo

F. 1  
Il ghiacciaio del Valleggia, dal 1932

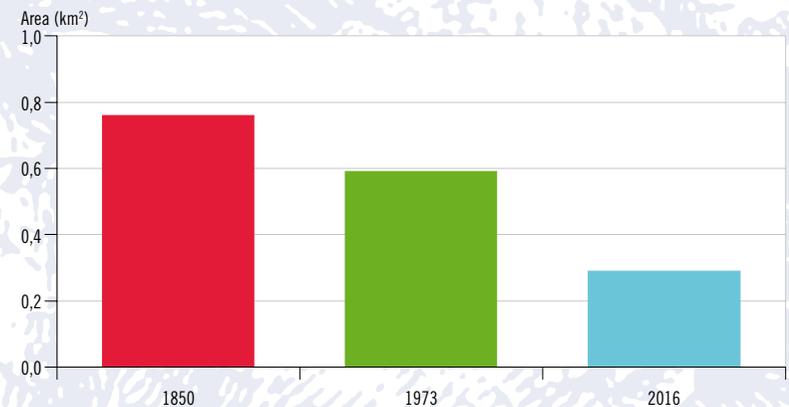


Foto: Museo della Valle di Blenio, fondo G. Corti



Foto: G. Corti

F. 4  
Superficie del ghiacciaio di Valleggia (in km<sup>2</sup>), dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020)

## IL GHIACCIAIO GRANDE DI CROSLINA

Il ghiacciaio Grande di Croslina, anche noto come ghiacciaio del Tencia, è un ghiacciaio montano nel comune di Faido, in Valle Leventina [F. 1]. Nel 1919 aveva ancora una lingua imponente, che scendeva fino a 2.500 m s.l.m. L'accesso alla vetta del Campo Tencia seguiva infatti un percorso diverso da quello odierno, per evitare passaggi pericolosi sul ghiacciaio.

Le sue misurazioni sono iniziate nel 1989, e da allora ha subito un ritiro di 106 m [F. 2]. Nel 1992, a seguito del suo arretramento si è formato un lago proglaciale (il laghetto di Croslina Grande). La sua estensione nel 2016 era di soli 0,07 km<sup>2</sup> [F. 3 e F. 4].

Alla fine dell'estate si presenta quasi completamente libero da neve: la zona di accumulo è quindi scomparsa e non c'è dunque un rinnovo del ghiaccio.

### Fonti

v. riferimenti 25, 29, 37, 38, 39, 40, 47 e 48 nella Bibliografia, pp. 34-35.

F. 1 Il ghiacciaio grande di Croslina, dal 1919



Foto: Museo della Valle di Blenio, fondo G. Corti

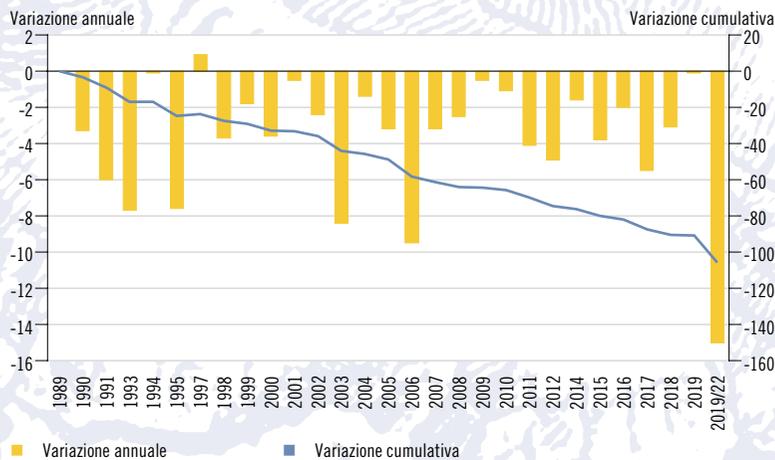


Foto: C. Valeggia



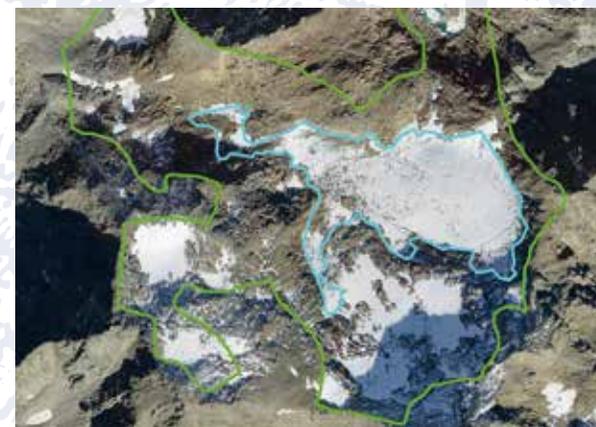
Foto: S. Daverio

F. 2 Variazione annuale e cumulativa della lunghezza del ghiacciaio Grande di Croslina (in m), dal 1989



Fonte: GLAMOS 1880-2021; dati 2022: Sezione forestale

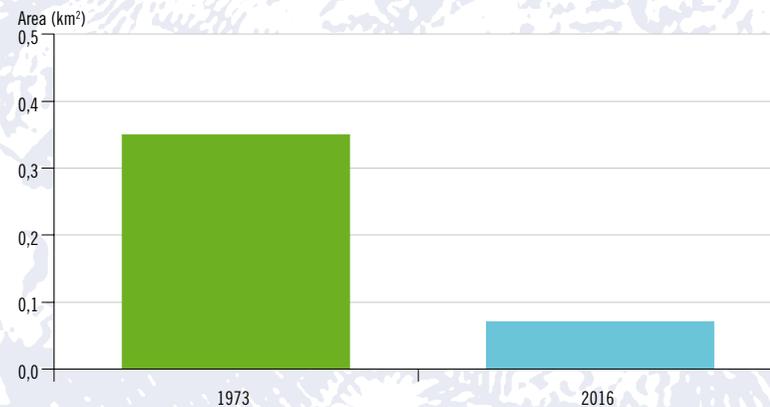
F. 3 Estensione del ghiacciaio Grande di Croslina, dal 1973



Linea verde: 1973  
Linea celeste: 2016

Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione. Il dato del 1850 non è disponibile. Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020); swisstopo

F. 4 Superficie del ghiacciaio Grande di Croslina (in km<sup>2</sup>), dal 1973



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione. Il dato del 1850 non è disponibile. Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020)

## RIPERCUSSIONI SULLA PRODUZIONE IDROELETTRICA TICINESE

Andrea Baumer, ingegnere, Officine Idroelettriche della Maggia SA e Officine Idroelettriche di Blenio SA

In Ticino, i ghiacciai che contribuiscono alla produzione di energia idroelettrica sono Basòdino, Valleggia, Vadrécc di Bresciana e Gries (quest'ultimo è localizzato in Vallese). A sud delle Alpi l'estensione dei ghiacciai è però ridotta, e la loro influenza sui regimi fluviali e sulla produzione idroelettrica è molto limitata. Ad esempio, i ghiacciai coprono solo lo 0,9% della superficie del bacino imbrifero della Maggia da Cevio in su (che si estende su circa 316 km<sup>2</sup>), quota che scende allo 0,4% se si considera tutto il bacino imbrifero, fino alla foce nel Lago Maggiore (che misura circa 927 km<sup>2</sup>). In Valle di Blenio la copertura è dello 0,3% e in Leventina dello 0,2%: tutti largamente sotto l'1% (Fonte: dati idrologici UFAM). Pertanto, anche l'impatto della fusione dei ghiacciai

non dovrebbe essere così rilevante sulla produzione idroelettrica. A titolo di esempio, da tutto il bacino imbrifero di Robiei fuoriescono in media 60 mio m<sup>3</sup> di acqua all'anno, ma di questi solo 2 mio m<sup>3</sup> sono dovuti al ritiro del ghiacciaio del Basòdino, che ogni anno si assottiglia di 1 metro e si accorcia di una ventina di metri. Un suo progressivo ritiro non cambierebbe dunque l'approccio nella gestione degli impianti idroelettrici situati a valle.

Diversa è la situazione in altre aree alpine. Un esempio è quello del ghiacciaio del Gries, le cui acque, gestite dalla società Aegina SA, sono convogliate a sud delle Alpi, negli impianti Ofima, per sfruttare il dislivello di oltre 2.000 metri fino al Lago Maggio-

re. Nel caso del Gries, la proporzione di copertura glaciale è molto maggiore: raggiunge il 35-40% del bacino imbrifero che alimenta il lago artificiale direttamente sotto il ghiacciaio, e circa il 25% se si considera il bacino imbrifero che alimenta l'impianto Aegina SA, comprese le due prese di captazione a valle della diga. Se negli anni Sessanta del secolo scorso, alla messa in servizio dell'impianto idroelettrico, si temeva che il ghiacciaio potesse avanzare fino al contatto con il muro in calcestruzzo della diga, in questi ultimi decenni si assiste a una sua forte fusione, che porta a medie di afflussi elevate nel bacino (+20% rispetto a quelle attese dalle sole precipitazioni annuali e dalla fusione "regolare" del ghiacciaio). Dopo la fase di esubero dovuta alla fusione del ghiacciaio, tra un paio di decenni questi afflussi caleranno, in parallelo al ritiro della massa di ghiaccio rimanente, e si passerà dagli attuali 25 mio m<sup>3</sup> di acqua all'anno a poco meno di 20 mio m<sup>3</sup> (considerando anche la diminuzione delle precipitazioni prevista dagli scenari climatici per il 2050). Nel complesso l'impatto non sarà così rilevante ma, poiché lo sbarramento del Gries rientra nell'elenco ristretto stilato dalla Confederazione per un eventuale innalzamento, sarà importante considerare gli sviluppi futuri legati alla graduale sparizione del ghiacciaio, così da poter adattare gli impianti al cambiamento idrologico e garantirne un utilizzo ottimale.

Va poi ricordato che in alta montagna le pur ridotte coperture glaciali contribuiscono a fornire un deflusso di fondo durante tutta l'estate, grazie all'effetto di ritenzione esercitato sulle precipitazioni di neve e acqua che, dopo essersi trasformate in ghiaccio nel periodo invernale, possono essere

rilasciate in seguito sotto forma di acqua, grazie alla fusione del ghiaccio dovuto all'irraggiamento solare e al calore dell'aria. Il processo di fusione del ghiaccio è più lento di quello della neve e, in un ciclo in equilibrio, ciò permette di dosare e distribuire nel tempo gli apporti di acqua agli impianti idroelettrici, garantendoli estate dopo estate. Questo effetto regolatore verrà a cadere una volta scomparsi i ghiacciai. Rimane però la possibilità che dove ora ci sono i ghiacciai, in futuro si formino dei laghi naturali, che potrebbero avere degli effetti mitigatori sul regime a valle.

Va infine menzionato un aspetto meno positivo dei ghiacciai sugli impianti idroelettrici: il trasporto di un importante carico di materiale solido. Il peso del ghiaccio e il movimento verso valle hanno un potere di abrasione sulla roccia di base, che viene frantumata in frazioni molto fini, trasportate a loro volta a valle assieme all'acqua. A questi sedimenti fini si aggiungono quelli più grossolani, che si accumulano al fronte del ghiacciaio, nelle morene, e possono essere erosi dal flusso di acqua in uscita. Tutto questo trasporto solido si accumula poi nei sottostanti bacini di accumulo dove, depositandosi sul fondale, può risultare critico per il loro esercizio. Con il ritiro dei ghiacciai si libereranno più detriti: va però detto che se i ghiacciai lasciassero spazio a dei laghetti, questi potrebbero fungere da bacini per la loro ritenzione.

In conclusione, è importante che i gestori degli impianti di accumulo a valle di un ghiacciaio seguano tutte queste evoluzioni, così da essere pronti a reagire a cambi di regime, sia idrologici sia di trasporto solido.



La diga e il lago ai piedi del ghiacciaio del Gries, nel 2020.

Foto: A. Baumer - Ofima

## IL FUTURO DEI GHIACCIAI, RACCONTATO DA CHI LI OSSERVA REGOLARMENTE

Mattia Soldati, collaboratore tecnico presso la Sezione forestale, responsabile per il monitoraggio dei ghiacciai ticinesi



Mattia Soldati esegue la misurazione del fronte del Basòdino.

Foto: S. Daverio

L'evoluzione dei ghiacciai ticinesi nei prossimi decenni può essere stimata in base alle osservazioni e misurazioni a disposizione, combinate con i valori calcolati da modelli climatologici (come per esempio quelli riportati nel rapporto IPCC 2014) e gli scenari futuri proposti da diversi autori (come per esempio Maisch, 2000).

In base alle informazioni attualmente disponibili, e considerando anche solo il riscaldamento minimo che le diverse fonti propongono, i ghiac-

ciai ticinesi sono destinati a sparire entro tempi ridottissimi.

Il ghiacciaio del Basòdino ad esempio, negli ultimi 15 anni ha perso mediamente 70-80 cm di ghiaccio all'anno. Il suo spessore medio, che nel 2005/2006 era di circa 27 metri, si è così ridotto a circa 15 metri nel 2022. Applicando un'interpolazione lineare, e senza tener conto delle retroazioni positive (un minor volume di ghiaccio e minori superfici ghiacciate e innestate comportano un mag-

gior accumulo di calore nell'ambiente circostante, e pertanto una fusione ancora più rapida), in 10-20 anni si avrebbe la sparizione totale del ghiacciaio al di sotto dei 3.000 metri s.l.m., e in meno di mezzo secolo la fusione totale della parte più a monte, spesso circa il doppio. Se nei prossimi anni dovessero verificarsi le condizioni avute nel 2022, l'orizzonte temporale sarà ancora più corto.

L'anno 2022, che stiamo vivendo, da questo punto di vista è infatti particolarmente significativo e estremo. A causa della scarsità di precipitazioni nevose durante l'inverno (a sud delle Alpi si sono registrati valori record negativi) e del caldo precoce, già a metà giugno la copertura nevosa dei ghiacciai si stava sciogliendo, e cominciavano a intravedersi delle macchie di ghiaccio. A inizio luglio praticamente tutti i ghiacciai ticinesi erano senza copertura nevosa, neve che normalmente copre il ghiaccio e lo protegge dalla fusione almeno fino a inizio agosto.

La campagna di misurazione dei ghiacciai ticinesi, svoltasi a cavallo tra fine agosto e inizio settembre, ha confermato le previsioni e le preoccupazioni emerse già durante la primavera. La combinazione fra un inverno estremamente povero di precipitazioni nevose e un prolungato periodo estivo, con temperature torride e isoterma di zero gradi a quote elevate, ha favorito un'importante accelerazione della fusione dei ghiacciai ticinesi.

Le prime misurazioni effettuate da Giovanni Kapfenberger sul ghiacciaio del Basòdino, a inizio luglio 2022, mostravano già delle perdite di quasi un metro di spessore di ghiaccio: un risultato

superiore alla media annua osservata negli ultimi anni, e in anticipo di circa 60 giorni rispetto alle stagioni precedenti. A fine estate le perdite erano di 4 metri di ghiaccio.

L'arretramento medio dei ghiacciai è risultato 2-3 volte superiore a quanto registrato negli ultimi anni: per quanto concerne il Basòdino e il Valleggia, ad esempio, si registrano degli arretramenti medi di quasi 30 metri rispetto al 2021, per il Bre-sciana di quasi 20 metri.

Per i ghiacciai di cui si misura la perdita di spessore si sono registrati valori quasi doppi rispetto alle medie pluriennali degli scorsi anni: il ghiacciaio del Valleggia per esempio ha subito un "abbassamento" di 4,5 metri, contro i 2-2,5 metri annui dei periodi precedenti.

Sempre più spesso, inoltre, si osservano delle placche di ghiaccio "morto" non più collegate al resto del ghiacciaio e in parte ricoperte di detriti. È quanto abbiamo riscontrato al Cavagnoli: fra il 2021 e il 2022 la parte bassa si è frazionata in varie placche isolate e di conseguenza, il fronte del ghiacciaio è retrocesso di 290 metri. La parte superiore è anch'essa una placca di ghiaccio morto, senza più nessuna dinamica.

Non da ultimo, i laghi proglaciali assumono dimensioni sempre maggiori e contribuiscono a velocizzare ancor più lo scioglimento dei ghiacciai.

Consiglio dunque a tutti di andare a vedere i nostri ghiacciai – prima che spariscano definitivamente!

## IL GHIACCIAIO DI VAL TORTA

Il ghiacciaio di Val Torta è un ghiacciaio montano nel comune di Bedretto (Val Bedretto) [F. 1].

Alla fine del diciannovesimo secolo scendeva fino all'altezza della vecchia capanna Cristallina (a circa 2.300 m s.l.m.). Nel corso dei decenni si è ritirato, e i detriti si sono accumulati, ricoprendolo quasi completamente e rendendo difficoltose le misurazioni.

Nonostante alcune fasi di avanzata, a cavallo fra gli anni Settanta e Ottanta del Novecento, dall'inizio delle misurazioni nel 1970 fino al 2011 (anno dell'ultima misurazione) si è ritirato di 105 m [F. 2]. Nel 1850 la sua superficie misurava 0,41 km<sup>2</sup>, mentre nel 2016 si era ridotta a 0,03 km<sup>2</sup> [F. 3 e F. 4].

Essendo privo di una zona di accumulo, nel 2012 è stato dichiarato estinto.

### Fonti

v. riferimenti 25, 29, 37, 38, 39, 40, 47 e 48 nella Bibliografia, pp. 34-35.

F. 1 Il ghiacciaio di Val Torta, dal 1985



Foto: C. Valeggia

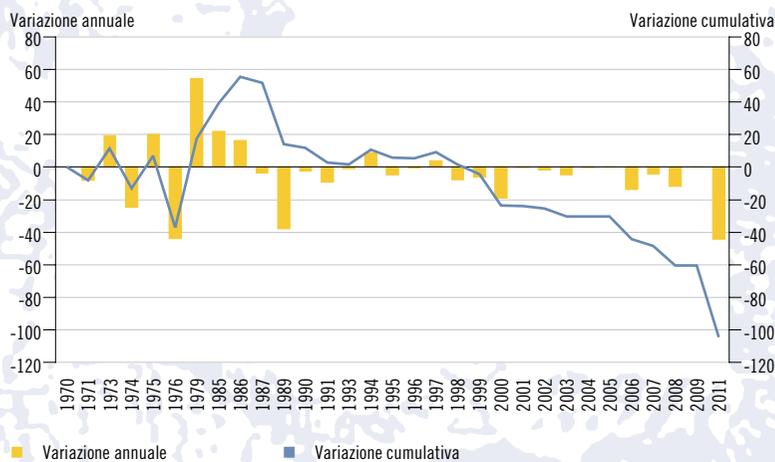


Foto: C. Valeggia



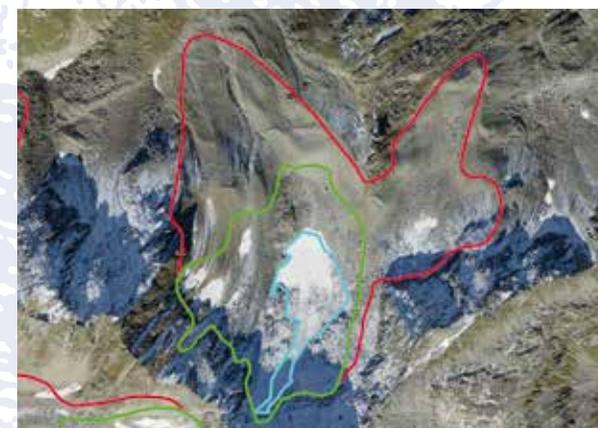
Foto: G. Corti

F. 2 Variazione annuale e cumulativa della lunghezza del ghiacciaio di Val Torta (in m), dal 1971



Fonte: GLAMOS 1880-2021

F. 3 Estensione del ghiacciaio di Val Torta, dal 1850



Linea rossa: 1850  
Linea verde: 1973  
Linea celeste: 2016

Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020); swisstopo

F. 4 Superficie del ghiacciaio di Val Torta (in km<sup>2</sup>), dal 1850



Avvertenza: gli anni di riferimento sono indicativi del periodo di misurazione.

Fonti: Maisch, M. et al. (2000); Paul, F. (2020); Müller, F. et al (1976); GLAMOS (2020)

## PERMAFROST E GHIACCIAI ROCCIOSI

Cristian Scapoza, Ricercatore senior, e Chantal Del Siro, Assistente con master, Istituto scienze della Terra, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI)

### Il permafrost: definizione

Il *permafrost* è definito come un terreno (o della roccia) che si mantiene a una temperatura uguale o inferiore a 0 °C per almeno due anni, senza implicare necessariamente la presenza di ghiaccio.<sup>49,50</sup> La struttura verticale di un permafrost alpino presenta, dall'alto verso il basso, lo strato attivo (che scongela e ricongela stagionalmente), il tetto del permafrost, il corpo del permafrost (perennemente congelato), la base del permafrost e il sottosuolo non congelato [F. 1].<sup>50,51</sup>

### Ripartizione del permafrost

Nelle Alpi si utilizza il termine di *permafrost discontinuo*, poiché interessa dei settori dove si possono trovare anche zone senza permafrost<sup>49</sup>. Il *limite inferiore del permafrost discontinuo* è un limite teorico basato sulla quota e sull'esposizione del versante, e nelle Alpi Ticinesi è situato fra 2.300 e 2.450 m s.l.m. per i versanti esposti a nord e fra 2.500 e 2.650 m s.l.m. per quelli esposti a sud.<sup>52,53</sup> Secondo il modello PERMAL-TI, basato sull'apprendimento automatico (*machine learning*)<sup>54,55</sup>, la superficie con una probabilità di occorrenza del permafrost superiore al 50% è pari a 265 km<sup>2</sup>, corrispondente al 9,4% del cantone Ticino [F. 2].<sup>54,55</sup> La superficie cantonale potenzialmente interessata dal permafrost è quindi circa 55 volte più estesa rispetto a quella coperta dai ghiacciai (4,8 km<sup>2</sup> nel 2016).<sup>29</sup>

### L'espressione visibile del permafrost: il ghiacciaio roccioso

Un permafrost alpino, se il volume di ghiaccio fra i detriti di roccia supera il 50% del volume totale, inizia a fluire verso valle a causa della de-

formazione lenta e continua del ghiaccio stesso, generando un *ghiacciaio roccioso* [v. foto]. I ghiacciai rocciosi sono distinti in *attivi* (contengono del ghiaccio e si muovono), *transizionali* (contengono ancora del ghiaccio ma non si muovono) e *relitti* (non contengono più ghiaccio).<sup>52</sup> In Ticino, sono stati censiti 281 ghiacciai rocciosi (contro i soli 30 ghiacciai "classici"), di cui 70 attivi (25%), 54 transizionali (19%) e 157 relitti (56%).<sup>53,55</sup>

### La temperatura della superficie del suolo

Lo stato termico del permafrost è monitorato grazie alla *temperatura della superficie del suolo* (*Ground Surface Temperature*, GST), misurata tramite sensori autonomi collocati su ghiacciai rocciosi, falde di detrito e pareti rocciose.<sup>56</sup> Il monitoraggio sistematico della GST è svolto su sei siti di studio (v. pallini viola e blu in [F. 2]), con un numero variabile compreso fra 2 e 10 sensori di temperatura per sito.<sup>56,57</sup> Due siti sono integrati alla rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS.<sup>58</sup> L'indicatore di evoluzione di GST è la *temperatura media annua della superficie del suolo* (*Mean Annual Ground Surface Temperature*, MAGST), che si ottiene applicando una media mobile su 365 giorni ai valori medi giornalieri di GST.<sup>56-58</sup>

### La velocità dei ghiacci rocciosi

Un altro indicatore significativo dello stato termico del permafrost nei ghiacciai rocciosi è la *velocità orizzontale media di riferimento della superficie* (vH).<sup>29,56,57</sup> Questa misura è eseguita sul terreno, con un sistema satellitare globale di navigazione GNSS, o indirettamente, grazie a fotografie aeree acquisite con un drone. L'accuratezza ot-

tenuta è di 0,5-2,0 cm sulla posizione orizzontale e di 1,0-2,5 cm sulla posizione verticale, ciò che consente di monitorare anche un ghiacciaio roccioso dai movimenti particolarmente lenti (meno di 10 cm all'anno). Sette ghiacciai rocciosi attivi delle Alpi Ticinesi sono monitorati con questa tecnica (v. pallini viola e gialli in [F. 2]).<sup>56,57</sup>

### Evoluzione dal 2006

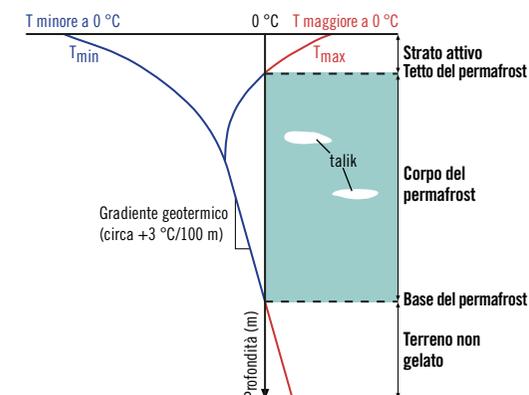
La MAGST misurata sui ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi presenta delle fluttuazioni pluriennali dovute soprattutto alle variazioni di innevamento e alle fasi canicolari estive, come è stato il caso nel 2015 e nel 2019.<sup>56-58</sup> Nonostante queste fluttuazioni, la tendenza misurata è quella di un riscaldamento medio della temperatura di 0,73 °C al decennio per il ghiacciaio roccioso di Piancabella (dove le misure sono iniziate nel 2006) e di ben 1,10 °C al decennio per tutti i siti dal 2010 [F. 3]. L'evoluzione della vH presenta un comportamento in linea con quello della MAGST, con due fasi di accelerazione nei periodi 2009-2015 e 2018-2021 [F. 4]. È stato possibile stabilire una chiara relazione fra il riscaldamento delle temperature e l'accelerazione nel movimento dei ghiacciai rocciosi [F. 5], la cui risposta non è lineare ma addirittura di tipo esponenziale, con un fattore che aumenta da 1,4 a 2,5 per un riscaldamento di 1°C.<sup>57</sup>

### Il futuro del permafrost

Il riscaldamento di GST osservato dal 2006, così come le periodiche accelerazioni delle velocità dei ghiacciai rocciosi misurate dal 2009, sono un chiaro indicatore del riscaldamento e della conseguente degradazione del permafrost.<sup>56-58</sup> Il modello PERMAL-TI consente di modellare la diminu-

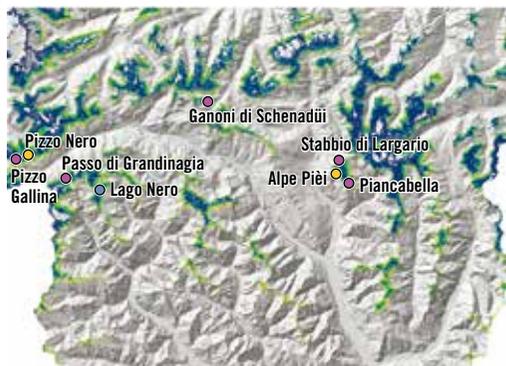
zione della superficie del permafrost in funzione degli scenari climatici svizzeri CH2018.<sup>54</sup> Nella seconda metà del secolo, per un aumento di temperatura di +1,1°C entro la fine del periodo 2020-2049, la probabilità di occorrenza del permafrost passerà al di sotto del 35% per tutte le quote e tutte le orientazioni. Per scenari di riscaldamento delle temperature dell'aria meno conservativi (+1,3/+1,4°C), alla fine del ventunesimo secolo sarà molto improbabile osservare delle temperature del suolo tali da permettere il mantenimento del permafrost, poiché il suo limite inferiore si troverà ben al di sopra delle quote massime delle montagne ticinesi.<sup>55</sup>

F. 1  
Struttura del permafrost e temperatura del suolo e sottosuolo (in presenza di permafrost), secondo la profondità



Fonte: Scapoza e Fontana (2009: 28)

**F. 2**  
Ripartizione potenziale del permafrost nelle Alpi Ticinesi e siti di monitoraggio gestiti dalla SUPSI



**Ghiacciai rocciosi**  
 ● monitoraggio GST e vH  
 ● solo monitoraggio GST  
 ● solo monitoraggio vH

**Permafrost**  
 Probabilità di occorrenza  
 0,25 0,50 0,75 1,00

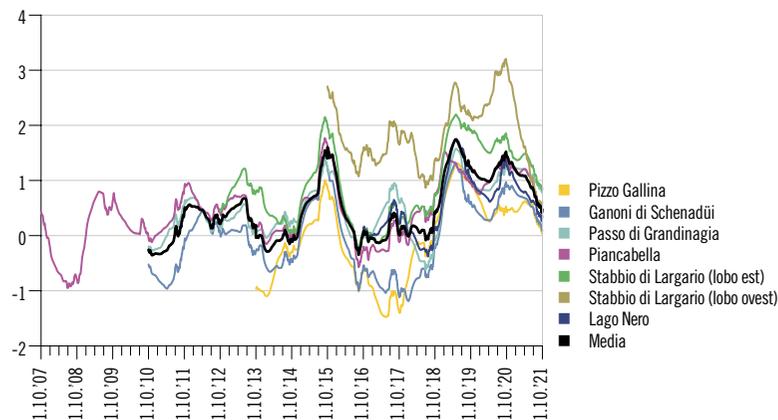
La carta interattiva è scaricabile su: <http://repository.supsi.ch/11589/>

Modificato da: Deluigi e Scapozza (2020: 25). Rilievo: ©swisstopo



Il ghiacciaio roccioso dei Ganoi di Schenadüi, Val Cadlimo  
 Foto: M. Buzzi, 4 agosto 2013

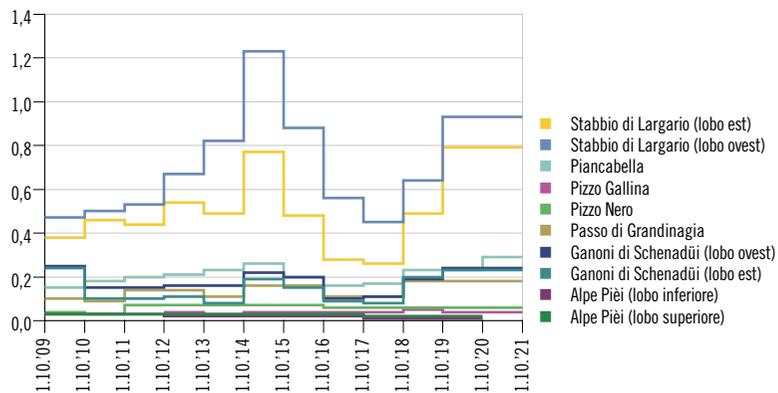
**F. 3**  
MAGST dei ghiacciai rocciosi monitorati (in °C), dal 1° ottobre 2007



MAGST: temperatura media annua della superficie del suolo.

Fonte: IST-SUPSI e PERMOS, 2022: <http://dx.doi.org/10.13093/permos-2022-01>

**F. 4**  
vH dei ghiacciai rocciosi monitorati (in m/anno\*), dal 1° ottobre 2009



vH: velocità orizzontale media di riferimento della superficie.

\* È considerato l'anno idrologico (1° ottobre-30 settembre).

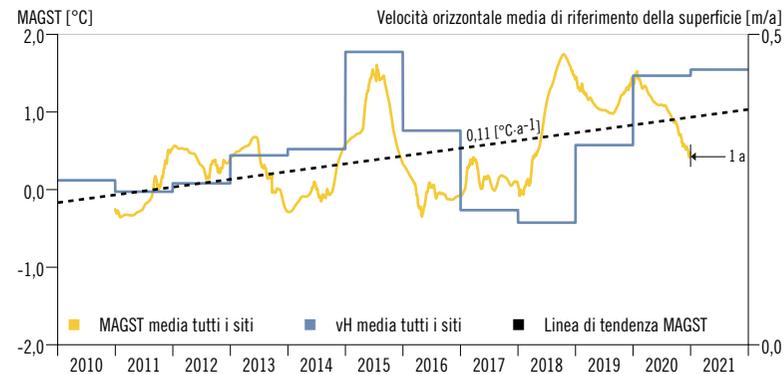
Fonte: IST-SUPSI e PERMOS, 2022: <http://dx.doi.org/10.13093/permos-2022-01>



Il ghiacciaio roccioso del Lago di Leit, nella regione del Pizzo Campolungo.

Foto: C. Del Siro, 12 settembre 2019

**F. 5**  
Relazione fra MAGST (in °C) e vH (in m/anno\*), dal 1° ottobre 2010



MAGST: temperatura media annua della superficie del suolo (spostata indietro 1 anno).

vH: velocità orizzontale media di riferimento della superficie.

\* È considerato l'anno idrologico (1° ottobre-30 settembre).

Fonte: IST-SUPSI e PERMOS, 2022: <http://dx.doi.org/10.13093/permos-2022-01>

## NON SI SMETTE MAI DI RAGGIUNGERE NUOVE METE... E DI STUPIRSI

Intervista a Giovanni Kappenberger, glaciologo

Dinamico, irrefrenabile... sempre in movimento, come i “suoi” ghiacciai. Incontriamo Giovanni Kappenberger a poche settimane da un viaggio in Himalaya. Scopo: osservazioni glaciologiche, tanto per cambiare! E con la sua più che cinquantennale attività di glaciologo e alpinista, Kappenberger oggi dei ghiacciai riesce a cogliere persino la poetica. È infatti di recente pubblicazione *Gli iceberg del Gerenpass*: un diario che descrive una decina di sopralluoghi effettuati tra dicembre 2020 e ottobre 2021 nella zona del Geren, nell’alta valle Bedretto [v. estratto a fianco]. “Documentarne la breve esistenza è un doveroso omaggio”, rileva Kappenberger, ricordando come ghiaccio e acqua stiano trasformando l’aspetto dei paesaggi alpini.

Gli mancheranno le vette “non per tutti”? “Sicuramente, ma ci convivo – osserva, ammettendo di sopportare sempre meno il freddo – ma soprattutto mi spiace che i ghiacciai si ritirino sempre più in alto, perché (anche per l’età) faccio sempre più fatica a raggiungerli! Oltre a meravigliarmi, i ghiacciai mi sorprendono: con il riscaldamento climatico in atto avrebbero dovuto regredire completamente, invece resistono! E ciò perché hanno un tempo di reazione abbastanza lento, giacché serve tantissima energia per farli sparire (consideriamo solo quante ore ci mette a scongelarsi un congelatore lasciando aperto lo sportello...). È tutta una questione di energia. Qualche esempio: un’estate calda a un ghiacciaio come il Basòdino

può portare via due-tre metri di ghiaccio, mentre all’Aletsch, che ha la lingua molto più in basso, può portarne via anche una decina. Dunque, per la sopravvivenza di un ghiacciaio è molto più determinante un’estate mite che un inverno nevoso!”.

E cosa ne pensa Giovanni Kappenberger di teloni, cannoni, cavi, canali e altri stratagemmi per limitare il ritiro dei ghiacciai? “Sono soluzioni provvisorie, ma che a lunga durata non sono così funzionali; potrebbero sì salvare una stagione turistica o un progetto di dimensioni limitate, ma non risolverebbero il problema”. Un tocco di malinconia sul ritiro dei ghiacciai: “Celebrare il funerale del Basòdino è stata un’azione di sensibilizzazione pubblica sulla mancanza di rispetto riservata a Madre Terra. E qui cito il letterato islandese Andri Snær Magnason: ‘Chi decide di non dire certe cose alla comunità si rende responsabile e sarà giudicato!’”. È stata anche una cerimonia per prepararci agli scenari che ci attendono, ai paesaggi ai quali ci dovremo adattare”.

Nuovi scenari che creano comunque ottimismo in Kappenberger: “Voglio continuare a vedere il classico bicchiere mezzo pieno, perché quanto ho potuto vedere in Valle Bedretto mi ha lasciato senza fiato: queste meravigliose formazioni di ghiaccio emerse da un laghetto alpino, che riportano alla luce strati che contengono persino la sabbia del Sahara depositata millenni or sono... sono fenomeni nuovi, spettacolari, fuoriusciti da una trasformazione! Ben presto laddove c’erano ghiacciai avremo laghetti alpini: la natura continua e si ripropone sotto altre forme. Ci sono poi molti altri problemi da affrontare: la diminuzione della biodiversità, le micropla-

stiche, l’acidificazione degli oceani e tutti i disastri provocati da chi non rispetta il nostro pianeta”.

E alle nuove generazioni, Giovanni Kappenberger che cosa consiglia? “Di seguire i propri interessi!”. Sorride, e poi rilancia: “Ottenuta la maturità (e pure su consiglio di un docente) avrei voluto fare arti visive. Per motivi famigliari ho però scelto le scienze naturali; poi è arrivata la glaciologia e quindi un trentennio di meteorologia. Invece mio zio Augusto Gansser, professore di geologia al Politecnico di Zurigo, mi diceva: ‘Fa quello che ti piace, che nella tua vita troverai la tua strada’. Non mi aveva nemmeno suggerito di seguire le sue orme, perché ‘di geologi ce ne sono troppi’, diceva”.

Un brevissimo bilancio della sua carriera, però, Kappenberger lo sigla così: “Mi ritengo un privilegiato perché ho potuto vivere in decenni molto intensi: dapprima, grazie ai miei genitori, ho superato il periodo della ricostruzione dopo la seconda Guerra mondiale; in seguito ho assistito all’inizio della crisi climatica, una realtà di cui sono testimone e che continuo a divulgare tramite la mia attività, in diversi ambiti e livelli”. Non ha disdegnato nemmeno l’impegno politico: sedendo sui banchi del legislativo e dell’esecutivo di Cavigliano e nel Parlamento ticinese... sino al 2016, quando ha trasferito il domicilio fuori cantone, a San Bernardino. “E per quanto attiene alle professioni artistiche – conclude – i miei (tre) figli hanno recuperato per me, scegliendo musica, circo, acrobatica, sport, danza, shiatsu e quant’altro. Quindi ai giovani ripeto quanto detto ai miei ragazzi: esercitate al massimo le vostre capacità, i risultati poi arriveranno”. Facendo esperienza sul campo, non importa a quale altitudine!



Giovanni Kappenberger durante la misurazione del bilancio di massa del Basòdino.

Foto: Ti Press / F. Agosta

# ICEBERG NELLE ALPI? UNA TRASFORMAZIONE IN VAL BEDRETTO: DA GHIACCIAIO A LAGO!

Giovanni Kappenberger, glaciologo

L'acqua di fusione generata dal ritiro dei ghiacciai non sempre scorre a valle: a volte si accumula in conche rocciose, modellate dai ghiacciai nel corso dei millenni, fino a formare dei laghi glaciali. E più o meno frequentemente, dalla lingua dei ghiacciai si staccano pezzi di ghiaccio, che poi galleggiano alla deriva. È quello che è successo anche al lago del Geren, in Val Bedretto: in una conca rocciosa piuttosto profonda, riempitasi di ghiaccio nei millenni scorsi, è nato un laghetto di fusione sul ghiacciaio, che è andato crescendo negli ultimi 20 anni [F. 1]. E fino all'estate 2020 si scorgevano solo piccoli blocchi di ghiaccio.

Il 26 novembre 2020, però, è accaduto un evento rarissimo: la lingua sommersa del ghiacciaio è improvvisamente venuta a galla, creando degli iceberg, come si vedono solamente ai poli! [F. 2]. A seguito di ciò, il livello del lago del Geren si è abbassato di colpo: secondo i nostri livellamenti,

di circa due metri (le acque di fusione della neve hanno poi riportato il livello del lago allo stato originale). In base alle nostre stime, il volume delle parti emerse degli iceberg misurava circa 240.000 m<sup>3</sup>, mentre la massa di ghiaccio totale (incluse le parti immerse), staccatasi di colpo il 26 novembre, circa due milioni di m<sup>3</sup>.

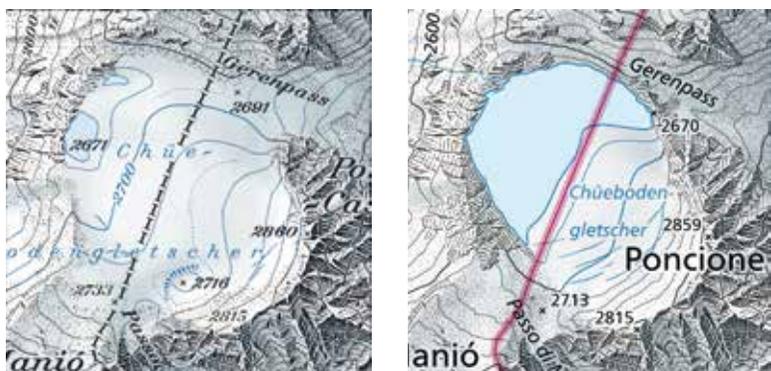
Quello a cui abbiamo assistito è un fenomeno della Natura improvviso e spettacolare, che nessuno si sarebbe immaginato, dovuto alla trasformazione del ghiacciaio in lago. Possiamo considerarlo come un monito: quando saremo confrontati con importanti cambiamenti dovuti al riscaldamento globale, non saremo mai in grado di prevederli correttamente, con tutte le loro sfaccettate conseguenze. Vi saranno altre sorprese! Alle generazioni future l'augurio di poter vivere positivamente queste sorprese che la Natura ci offrirà.



L'iceberg più grande (e più fotografato) è stato denominato "Olaf".

Foto: G. Kappenberger

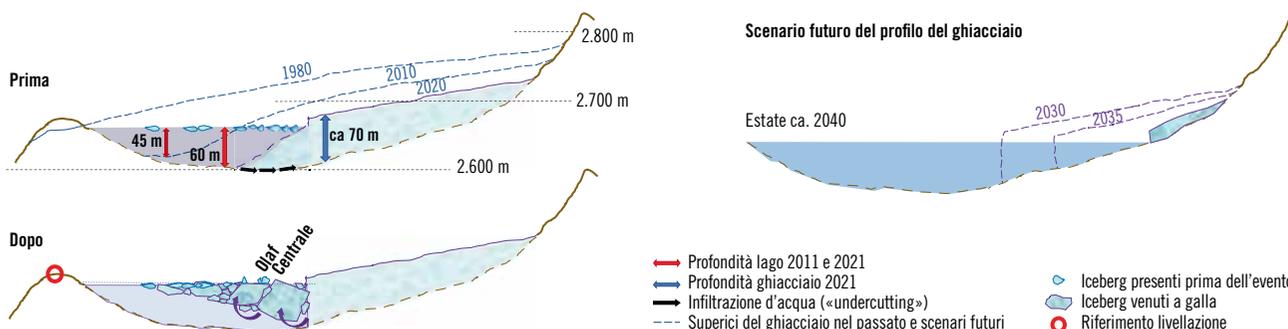
F. 1  
Ghiacciaio del Geren, nel 2001 e nel 2020



Il ghiacciaio (con sopra due laghetti) si è trasformato in un lago, con un ghiacciaio per buona parte sommerso.

Fonte: swisstopo

F. 2  
Sezioni del lago e del ghiacciaio del Chüeboden, prima e dopo l'evento del 26 novembre 2020 e scenari futuri



Grazie all'iniziativa del Prof. Daniel Farinotti del Politecnico Federale di Zurigo (ETHZ), il 31 marzo 2021 è stata organizzata una misurazione radar della profondità del ghiacciaio. Sorprendentemente sono stati misurati spessori massimi di ghiaccio di ben 70 metri (ricordiamo che il Ghiaccio del Basòdino attualmente ha uno spessore medio tra i 10 e i 20 metri). Il 16 ottobre 2021 abbiamo effettuato delle misurazioni della profondità del lago (batimetria), che hanno permesso di rilevare ben 60 metri al suo centro.

Fonte: Kappenberger, G. (2022).

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- <sup>1</sup> Kappenberg, G. (2006). Che cos'è un ghiacciaio. *Dati – Statistiche e società*, VI, 2, 6-9.
- <sup>2</sup> Ghiacciai del Ticino. Poster. [https://www4.ti.ch/fileadmin/DTI/temi/forestali/ghiacciai/documenti/Manifesto\\_ghiacciai.pdf](https://www4.ti.ch/fileadmin/DTI/temi/forestali/ghiacciai/documenti/Manifesto_ghiacciai.pdf).
- <sup>3</sup> Campisano, C. J. (2012). Milankovitch Cycles, Paleoclimatic Change, and Hominin Evolution. *Nature Education Knowledge* 4, 3, 5.
- <sup>4</sup> Buis, A. (2020). Milankovitch (Orbital) Cycles and Their Role in Earth's Climate. NASA. <https://climate.nasa.gov/news/2948/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>. (20.1.2022).
- <sup>5</sup> Imbrie, J. e Palmer Imbrie, K. (1979). *Ice Ages: Solving the Mystery*. Cambridge etc.: Harvard University Press.
- <sup>6</sup> Bralower, T. e Bice, B. Ancient Climate Events: Pleistocene Glaciation. College of Earth and Mineral Science, The Pennsylvania State University. <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/636>. (19.1.2022).
- <sup>7</sup> Loutre, M. F. (2002). Ice Ages (Milankovitch theory). In Holton, J. R.; Pyle, J. e Curry, J. A. (Eds.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (995-1003). Amsterdam etc.: Academic Press.
- <sup>8</sup> Schirber, M. (2015). "Snowball Earth" Might Have Been Slushy. NASA. [https://www.giss.nasa.gov/research/features/201508\\_slushball/](https://www.giss.nasa.gov/research/features/201508_slushball/). (19.1.2022).
- <sup>9</sup> Bralower, T. e Bice, B. Ancient Climate Events: Snowball Earth. College of Earth and Mineral Science, The Pennsylvania State University. <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/640>. (19.1.2022).
- <sup>10</sup> Allen, P. A. e Etienne, J. L. (2008). Sedimentary Challenge to Snowball Earth. *Nature Geoscience*, 1, 817–825.
- <sup>11</sup> Marshall, C. R. (2006). Explaining the Cambrian "Explosion" of Animals. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 34, 355–84.
- <sup>12</sup> Brugger, J.; Feulner, G., e Petri, S. (2017). Baby, It's Cold Outside: Climate Model Simulations of the Effects of the Asteroid Impact at the End of the Cretaceous. *Geophysical Research Letters*, 44, 419–427.
- <sup>13</sup> Chiarenza, A. A.; Fansworth, A.; Mannion, P. D. e Allison, P. A. (2020). Asteroid Impact, Not Volcanism, Caused the End-Cretaceous Dinosaur Extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 29, 17084–17093.
- <sup>14</sup> Jardine, P. (2011). The Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Palaeontology Online*, 1, 5, 1-7.
- <sup>15</sup> Bralower, T. e Bice, B. Ancient Climate Events: 5, Thermal Maximum. College of Earth and Mineral Science, The Pennsylvania State University. <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/639>. (19.1.2022).
- <sup>16</sup> Zachos, J. C.; Dickens, G. R. e Zeebe, R. E. (2008). An Early Cenozoic Perspective on Greenhouse Warming and Carbon-Cycle Dynamics. *Nature*, 451, 279–283. <https://doi.org/10.1038/nature06588>.
- <sup>17</sup> Lisiecki, L. E. e Raymo, M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic  $\delta^{18}\text{O}$  Records. *Paleoceanography*, 20, PA1003.
- <sup>18</sup> Marshall, S. J. (2009). Glaciations, Quaternary. In: Gornitz, V. (Ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments* (389-393). Dordrecht: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3\\_97](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3_97).
- <sup>19</sup> Ivy-Ochs, S.; Kerschner, H.; Reuther, A.; Preusser, F.; Heine, K.; Maisch, M.; Kubik, P. W. e Schlüchter, C. (2008). Chronology of the Last Glacial Cycle in the European Alps. *Journal of Quaternary Science*, 23, 6-7, 559-573.
- <sup>20</sup> Ivy-Ochs, S.; Monegato, G. e Reitner, J. M. (2022). The Alps: Glacial Landforms from the Last Glacial Maximum. In Palacios, D. et al (Eds.), *European Glacial Landscapes. Maximum Extent of Glaciations* (449-460). Amsterdam: Elsevier.
- <sup>21</sup> Scapozza, C.; Castelletti, C.; Soma, L.; Dall'Agno, S. e Ambrosi, C. (2014). Timing of LGM and Deglaciation in the Southern Swiss Alps. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 20, 4, 307–322.
- <sup>22</sup> Kamleitner, S.; Ivy-Ochs, S.; Monegato, G.; Gianotti, F.; Akçar, N.; Vockenhuber, C.; Christl, M. e Synal, H.-A. (2022). The Ticino-Toce Glacier System (Swiss-Italian Alps) in the Framework of the Alpine Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 279, 107400.
- <sup>23</sup> Bernoulli, D.; Ambrosi, C.; Scapozza, C.; Stockar, R.; Schenker, F. L.; Gaggero, L.; Antognini M. e Bronzini, S. (2018). 1373 Mendrisio-Como. Note esplicative. In *Atlante geologico della Svizzera 1:25.000*. Berna: Swisstopo.
- <sup>24</sup> Corti, G.; Kappenberg, G. e Bauder, A. (2006). Appunti sui ghiacciai svizzeri e ticinesi. *Dati – Statistiche e società*, VI, 2, 10-12.
- <sup>25</sup> Spinedi, F.; Kappenberg, G.; Soldati, M. e Corti, G. (2017). Cambiamenti climatici: conseguenze sul ritiro dei ghiacciai mondiali e ticinesi. *Dati – Statistiche e società*, XVII, 2, 4-17.
- <sup>26</sup> Haeberli, W.; Oerlemans, J. e Zemp, M. (2019). The Future of Alpine Glaciers and Beyond. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. <https://oxfordre.com/climate-science/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.0001/acrefore-9780190228620-e-769>.
- <sup>27</sup> Scapozza, C. (2014). Appunti climatici e glaciologici sulle descrizioni della Valle di Blenio tra Settecento e Ottocento. *Archivio Storico Ticinese*, 155, 38–63.
- <sup>28</sup> Scapozza, C.; Del Siro, C.; Lambiel, C. e Ambrosi, C. (2021). Schmidt Hammer Exposure-Age Dating of Periglacial and Glacial Landforms in the Southern Swiss Alps Based on R-Value Calibration Using Historical Data. *Geographica Helvetica*, 76, 401–423.
- <sup>29</sup> GLAMOS. (2020). Swiss Glacier Inventory 2016, Release 2020. Glacier Monitoring Switzerland. doi:10.18750/inventory.2016.r2020.
- Pubblicazioni:*  
Linsbauer, A.; Huss, M.; Hode, I. E.; Bauder, A.; Fischer, M.; Weidmann, Y.; Bärtschi, H. e Schmassmann, E. (2021). The New Swiss Glacier Inventory SGI2016: from a Topographical to a Glaciological Dataset. *Frontiers in Earth Sciences*, 9, 704189. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.704189>.

- Weidmann, Y.; Bärtschi, H.; Zingg, S. e Schmassmann, E. (2019). Das Schweizerische Gletscherinventar als Produkt des swissTLM3D. *Geomatik Schweiz*, 5, 114–119.
- <sup>30</sup> Zemp, M.; Paul, F.; Hoelzle, M. e Haerberli, W. (2008). Glacier Fluctuations in the European Alps, 1850-2000: an Overview and Spatio-temporal Analysis of Available Data. In Orlove, B. et al. (Eds.), *Darkening Peaks. Glacier Retreat, Science, and Society* (152-167). Berkeley: University of California Press.
- <sup>31</sup> Kappenberger, G. e Spinedi, F. (2006). Appunti sul clima. *Dati – Statistiche e società*, VI, 2, 51-53.
- <sup>32</sup> Zemp, M. et al. (2015). Historically Unprecedented Global Glacier Decline in the Early 21st Century. *Journal of Glaciology*, 61, 228, 745-761.
- <sup>33</sup> Haerberli, W. et al. (Eds.). (1989). *World Glacier Inventory - Status 1988*. Zurich: World Glacier Monitoring Service.
- <sup>34</sup> Paul, F.; Frey, H. e Le Bris, R. (2011). A New Glacier Inventory for the European Alps from Landsat TM Scenes of 2003: Challenges and Results. *Annals of Glaciology*, 54, 59, 144-152.
- <sup>35</sup> Paul, F. et al. (2020). Glacier Shrinkage in the Alps Continues Unabated as Revealed by a New Glacier Inventory from Sentinel-2. *Earth System Science Data*, 12, 1805-1821.
- <sup>36</sup> Zekollari, H.; Huss, M. e Farinotti, D. (2019). Modelling the Future Evolution of Glaciers in the European Alps Under the EURO-CORDEX RCM Ensemble. *The Cryosphere*, 13, 1125-2246.
- <sup>37</sup> GLAMOS (1880-2021). The Swiss Glaciers 1880-2018/19, Glaciological Reports No 1-140. *Yearbooks of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT)*. doi:10.18752/glrep\_series.
- <sup>38</sup> Maisch, M.; Wipf, A.; Denneler, B.; Battaglia, J. e Benz, C. (2000). *Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850, Aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien. (Schlussbericht NFP 31)*. 2. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- <sup>39</sup> Paul, F. (2006). *The new Swiss Glacier Inventory 2000 – Application of Remote Sensing and GIS*. Zurich: Department of Geography, University of Zurich. (Schriftenreihe Physische Geographie, Glaziologie und Geomorphodynamik, 52).
- <sup>40</sup> Müller, F.; Cafilisch, T. e Müller, G. (1976). *Firn und Eis der Schweizer Alpen. Gletscherinventar*. Zürich: Geographisches Institut, ETH. (Publ. 57/57a).
- <sup>41</sup> Fischer, M.; Huss, M.; Barboux, C. e Hoelzle, M. (2014). The New Swiss Glacier Inventory SGI2010: Relevance of Using High-resolution Source Data in Areas Dominated by Very Small Glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46, 933–945.
- <sup>42</sup> Grab, M. et al. (2021). Ice Thickness Distribution of All Swiss Glaciers Based on Extended Ground-Penetrating Radar Data and Glaciological Modeling. *Journal of Glaciology* 1–19. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.55>.
- <sup>43</sup> Agassiz, L. (1840). *Études sur les glaciers*. Neuchâtel: O. Petitpierre.
- <sup>44</sup> Forbes, J. (1842-1851). Letters on Glaciers. *Edinburgh New Philosophical Journal*.
- <sup>45</sup> Agassiz, L.; Guyot, A. e Desor, E. (1847). *Système glaciaire ou recherches sur les glaciers, leur mécanisme, leur ancienne extension et le rôle qu'ils ont joué dans l'histoire de la Terre. 1<sup>re</sup> partie, Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels, leur structure, leur progression et leur action physique sur le sol*. Paris: Victor Masson.
- <sup>46</sup> Rete di Monitoraggio dei Ghiacciai Svizzeri. [www.glamos.ch](http://www.glamos.ch)
- <sup>47</sup> Corti, G. e Valeggia, C. (2006). La misurazione delle variazioni frontali dei ghiacciai in Ticino. *Dati – Statistiche e società*. VI, 2, 13-15.
- <sup>48</sup> Bauder, A.; Eisen, O.; Kappenberger, G.; Casartelli, G.; Strozzi, T.; Valenti, G. e Spinedi, F. (2006). Il ghiacciaio del Basodino. *Dati – Statistiche e società*, VI, 2, 16-39.
- <sup>49</sup> Harris, S. A.; French, H. M.; Heginbottom, J. A.; Johnston, G. H.; Ladanyi, B.; Sego, D. C. e Van Everdingen, R. O. (1988). *La terminologie du pergélisol et notions connexes*. Ottawa: Conseil National de Recherches du Canada. (Note de service technique, 142).
- <sup>50</sup> Société Suisse de Géomorphologie (2021). Géomorphologie de la montagne froide. <https://geomorphologie-montagne.ch/> (29.03.2022).
- <sup>51</sup> Scapoza, C. e Fontana, G. (2009). *Le Alpi Bleniesi. Storia glaciale e periglaciale e patrimonio geomorfologico*. Lugano: STSN. (Memorie della Società ticinese di scienze naturali e del Museo cantonale di storia naturale, 10).
- <sup>52</sup> Scapoza, C. (2013). *Stratigraphie, morphodynamique, paléoenvironnements des terrains sédimentaires meubles à forte déclivité du domaine périglaciaire alpin*. Lausanne: Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne. (Géovisions, 40)
- <sup>53</sup> Scapoza, C. e Mari, S. (2010). Catasto, caratteristiche e dinamica dei rock glacier delle Alpi Ticinesi. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 98, 15–29. <https://repository.supsi.ch/2152/>.
- <sup>54</sup> Deluigi, N. e Scapoza, C. (2020). PERMAL-TI: Carta della ripartizione potenziale del permafrost nelle Alpi Ticinesi. <https://repository.supsi.ch/11589/> (29.03.2022).
- <sup>55</sup> Deluigi, N. e Scapoza, C. (2020). Il permafrost nelle Alpi Ticinesi: ripartizione potenziale attuale e futura. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 108, 19–31. <https://repository.supsi.ch/12075/>.
- <sup>56</sup> Scapoza, C.; Antognini, M. e Ambrosi, C. (2018). Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2015/2016 e 2016/2017). Rapporto no. 4 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 106, 13–22. <https://repository.supsi.ch/9639/>.
- <sup>57</sup> Scapoza, C.; Deluigi, N.; Del Siro, C.; Pollo, A. e Antognini M. (2020). Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2017/2018 e 2018/2019). Rapporto no. 5 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 108, 33–43. <https://repository.supsi.ch/12077/>.
- <sup>58</sup> Noetzli, J. e Pellet C. (Eds.). (2022). *Swiss Permafrost Bulletin 2021*. Davos Dorf etc.: PERMOS. <https://doi.org/10.13093/permos-bull-2022>.

#### Contributo di Luca Nisi

NCCS. (2018). CH2018. Scenari climatici per la Svizzera. Zurigo-Aeroporto: NCCS. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/cambiamenti-climatici-e-impatti/scenari-climatici-per-la-svizzera/ordinate-l-opuscolo-sugli-scenari-climatici-ch2018.html>.

Gulev, S. K. et al. (2021). Changing State of the Climate System. In Masson-Delmotte, V. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 287–422). Cambridge etc.: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.004.

#### Contributo di Andrea Salvetti

Aschwanden, H. e Weingartner, R. (1985). *Die Abflussregimes der Schweiz*. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern. (Publikation der Gewässerkunde, 65)

BAFU (2021). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft*. Bern: BAFU. (Umwelt-Wissen, 2101).

Bernhard, L. e Zappa, M. (2012). *Schlussbericht CCHydrologie - Teilprojekt WHH-CHHydro, Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete*. Birmensdorf: WSL.

Farinotti, D.; Pistocchi, A. e Huss, M. (2016). From Dwindling Ice to Headwater Lakes: Could Dams Replace Glaciers in the European Alps? *Environmental Research Letters*, 11, 054022.

HADES. (2018). Hydrologischer Atlas der Schweiz: Daten- und Analyseplattform. Bern: BAFU. [www.hydromaps.ch](http://www.hydromaps.ch).

Stahl, K.; Weiler, M.; Kohn, I.; Freudiger, D.; Seibert, J.; Vis, M.; Gerlinger, K. e Böhm, M. (2016). *Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels: Synthesebericht*. Lelystad: CHR/KHR. (Berichte der KHR, I-25).

Weingartner, R. (2018). *Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren*. Bern: Universität Bern.

#### Contributo di Giovanni Kappenberger

Kappenberger, G. (2022). *Gli iceberg del Gerenpass. Poetica del ghiaccio*. Bellinzona: Salvioni.

Ogier, C. et al. (2021). *The Ice Thickness of Chüebodengletscher*. Zürich: VAW-ETH. (Report 88015).

---

Ufficio di statistica  
Via Bellinzona 31  
CH - 6512 Giubiasco

+41 (0) 91 814 50 11  
dfe-ustat@ti.ch  
www.ti.ch/ustat

Divisione dell'ambiente  
Via Franco Zorzi 13  
6501 Bellinzona

+41 (0) 91 814 28 81  
dt-da@ti.ch  
www.ti.ch/da

---

