

## Il ghiaccio racconta

### I cambiamenti dei ghiacciai

Le osservazioni sulle variazioni frontali consistono nel rilevare i cambiamenti di forma e di posizione della fronte di un ghiacciaio. Un tempo questa operazione veniva effettuata “a mano”, disegnando pazientemente i profili della fronte, più recentemente fotografandoli da posizioni fisse, e misurando gli arretramenti con strumenti meccanici. Ora queste operazioni si svolgono generalmente con l'uso di GPS e di foto aeree o da satellite, che permettono di confrontare di anno in anno le variazioni. Il Comitato Glaciologico Italiano promuove ogni anno campagne di misure di variazioni frontali su tutti i ghiacciai dell'arco alpino e organizza interessanti corsi per chi volesse diventare operatore glaciologico.

#### **Delicati equilibri**

Per valutare lo “stato” di un ghiacciaio, in particolare se questo sia in fase di avanzata o di ritiro, non basta quindi valutare le variazioni di posizione della fronte, ma occorre considerare il delicato equilibrio tra apporti nevosi, e quindi formazione di nuovo ghiaccio, e perdite di ghiaccio nella zona di ablazione: in poche parole, si devono valutare le variazioni di volume del ghiacciaio, studiando il “bilancio” tra questi due fattori, realizzando quello che i ricercatori chiamano “bilancio di massa”. Si tratta, in pratica, di misurare gli apporti e le perdite, un po' come in un bilancio aziendale, e dedurre da questo se il volume del ghiacciaio stia aumentando o diminuendo.

Se il bilancio è positivo, e gli apporti superano le perdite, il ghiacciaio tenderà ad espandersi, spostando la posizione della fronte più a valle, mentre se il bilancio è negativo, il ghiacciaio si ridurrà, sia assottigliando il proprio spessore, sia ritirando progressivamente la fronte verso monte. Una fronte stabile nel tempo indica invece una situazione stazionaria, di equilibrio tra apporti e perdite (ma non significa affatto che il ghiacciaio sia fermo!).

La risposta del ghiacciaio non è però immediata: in genere, il ghiacciaio risponde con una certa inerzia, che dipende anche dalle sue dimensioni, e occorrono alcuni anni di bilancio positivo per assistere ad un'avanzata e viceversa. Molti ghiacciai delle Alpi sono studiati da decenni, alcuni da oltre un secolo, e i ricercatori dispongono quindi di lunghe serie temporali di misure di variazioni alla fronte e di bilanci di massa: questo ha permesso, confrontando gli avanzamenti e i ritiri dei ghiacciai con dati climatici e meteorologici, di comprendere come i ghiacciai hanno reagito alle variazioni climatiche più recenti, permettendo quindi di avanzare ipotesi sul futuro dei nostri ghiacciai.

### Il bilancio di massa

Il bilancio di massa è un'operazione più complessa: occorre, infatti, svolgere una serie di misure e di rilevamenti:

- **quantificare gli apporti**, misurando la quantità di precipitazioni sul ghiacciaio, tenendo conto anche delle cosiddette “precipitazioni occulte”, come la brina o il formarsi di ghiaccio di sublimazione, e degli apporti da valanghe.  
Per fare questo si **misura lo spessore** della neve caduta durante l'inverno e la primavera in punti fissi e significativi del ghiacciaio, in genere infiggendo, durante l'estate, apposite aste lunghe e sottili, del diametro di un paio di centimetri, chiamate “paline”, e deducendo dal loro sporgere lo spessore del manto nevoso. Poiché per il bilancio occorre **trasformare la neve caduta in millimetri d'acqua equivalenti**, è necessario conoscere anche la **densità della neve**: per questo si realizzano apposite trincee, scavando all'interno del manto nevoso e misurandone la densità a varie profondità. Queste operazioni devono essere fatte in diversi punti del ghiacciaio, a quote diverse, in modo da avere un quadro rappresentativo di tutto il ghiacciaio.
- **quantificare le perdite**, determinando la quantità di ghiaccio asportata per **ablazione**. La maggior parte dell'ablazione, almeno nei ghiacciai alpini, è dovuta alla fusione del ghiaccio. Per la misura di questo parametro, si dispongono sulla superficie del ghiacciaio delle serie di paline (che normalmente sono le stesse usate per determinare lo spessore del manto nevoso), che, numerate e contrassegnate, vengono infisse con un'apposita trivella per una profondità nota. Periodicamente, nel periodo estivo anche giornalmente, si misura l'altezza della

palina che rimane scoperta via via che il ghiaccio fonde. In questo modo, si può misurare lo spessore di ghiaccio perduto in un determinato periodo di tempo, e da qui, con misure ripetute, stimare la quantità di ghiaccio globalmente perduta nel corso dell'estate. Sul Ghiacciaio dei Forni, nel Gruppo dell'Ortles-Cevedale, per esempio, nel periodo estivo l'ablazione asporta uno spessore di circa 3-3,5 m di ghiaccio, con una fusione che tra metà luglio e metà agosto raggiunge punte di 4-5 cm al giorno (dati da Smiraglia). Le stesse paline possono anche essere utilizzate, misurandone gli spostamenti rispetto a punti fissi fuori dal ghiacciaio, per quantificare la velocità di spostamento verso valle del ghiacciaio.

Poichè una grande quantità di ghiaccio fonde anche alla base del ghiacciaio, dove si raccolgono formando laghi e torrenti sottoglaciali, nel bilancio di massa è importante misurare anche le **portate dei torrenti** che fuoriescono alla fronte del ghiacciaio: a queste dovrebbe essere sottratta la quantità d'acqua dovuta all'ablazione superficiale, per ricavare la **fusione basale**.

Determinare un bilancio di massa di un ghiacciaio è un'operazione complessa, e in Italia vengono realizzati sistematicamente, ogni anno, solo su pochissimi ghiacciai, tra cui il Careser (dal 1966) e la Sforzellina (dal 1986) nel Gruppo del Cevedale, il Chardonay nel Gruppo del Gran Paradiso (dal 1992). Indicazioni di massima possono essere ricavate osservando, anche da foto aeree, il rapporto tra area di accumulo, coperta di neve, e area di ablazione alla fine dell'estate, oppure il limite delle nevi: se questo è a bassa quota, è probabile che il bilancio sia positivo, anche se non è possibile avere indicazioni quantitative. Anche l'osservazione delle caratteristiche della fronte può essere indicativa: a parità di posizione, una fronte alta e rigonfia indica in genere un bilancio positivo, al contrario di una fronte "depressa" e assottigliata.

## Misurare la velocità

La misura della velocità con cui si muove un ghiacciaio è stata sicuramente una delle prime operazioni effettuate dai primi glaciologi dell'800, insieme alle **osservazioni sulle variazioni frontali**. Per misurare la velocità con cui il ghiaccio si sposta, occorre fissare un punto del ghiacciaio, riconoscibile per qualche sua caratteristica naturale particolare, come, per esempio, un grosso masso sulla superficie, oppure marcandolo con una o più paline, e misurare costantemente, più volte all'anno e per diversi anni consecutivi, lo spostamento che questo subisce rispetto ad un punto di osservazione fisso al di fuori del ghiacciaio. Attualmente, l'uso di **fotografie aeree e immagini da satellite**, insieme all'utilizzo di strumenti particolari, come i GPS, permettono di rendere questa operazione molto più facile, veloce e precisa che in passato, quando occorrevano misure dirette sul terreno effettuate da un operatore che doveva raggiungere, spesso faticosamente, i punti di misura. Osservazioni più complesse, fatte su allineamenti di massi o su sistemi di inghiottitoi glaciali, hanno permesso di riconoscere, all'interno di un ghiacciaio, zone di flusso differente, che si muovono con **velocità diverse**. Le velocità con cui si muovono i ghiacciai sono molto diverse nei diversi apparati glaciali. Subiscono delle variazioni nel corso dell'anno (rallentando, in genere, durante l'inverno) e possono variare di anno in anno.

## Misurare lo spessore

Lo spessore di un ghiacciaio può essere ricavato, con apposite formule, conoscendone la velocità, l'inclinazione, la larghezza, insieme alle caratteristiche del ghiaccio, come densità e viscosità, ma, trattandosi di parametri difficili da valutare e diversi in diversi punti del ghiacciaio, si tratta di una stima grossolana.

Il metodo più antico e più diretto per misurare lo spessore di un ghiacciaio consiste nel realizzare una **perforazione fino a raggiungere il substrato roccioso**. Si tratta, però di un metodo molto costoso, che richiede macchine pesanti e difficili da trasportare, soprattutto in montagna, e che, in ogni caso, permette di conoscere lo spessore soltanto in un punto preciso, e non su tutto il ghiacciaio. Il ghiaccio estratto per la perforazione, in forma di cilindri lunghi e sottili, detti, per il loro aspetto "**carote**", può essere studiato ricavandone molte informazioni.

Per conoscere lo spessore di un ghiacciaio in **modo indiretto**, si ricorre alla geofisica, una speciale branca della geologia che attraverso lo studio delle anomalie del campo gravitazionale terrestre e della propagazione di onde sismiche e ed elettromagnetiche ricava le caratteristiche dei materiali che costituiscono la crosta terrestre, ivi compreso il

ghiaccio dei ghiacciai. Le **prospezioni sismiche** a riflessione sono la tecnica più usata sui ghiacciai: lo scoppio di una carica esplosiva o i colpi di un pesante maglio sulla superficie del ghiaccio generano onde che si propagano nel ghiaccio e si riflettono sul substrato roccioso: studiando i percorsi delle onde e conoscendone la velocità di propagazione nei diversi materiali, è possibile ricavare lo spessore del ghiaccio attraversato. Le **prospezioni elettriche**, invece, utilizzano l'analisi delle differenze di potenziale generate dal passaggio di una corrente elettrica tra due punti di misura infissi nel ghiaccio, sfruttando le differenze di conducibilità elettrica tra ghiaccio e roccia. Una tecnica recente, molto efficace e veloce, sfrutta, invece, il comportamento del ghiaccio rispetto alla propagazione di onde radar, che lo attraversano come se fosse trasparente. La grande utilità di questa tecnica è che gli strumenti di misura possono essere montati su aerei che sorvolano zone amplissime: è stato così possibile ricostruire l'andamento del substrato e gli spessori delle calotte antartiche e groenlandesi. Questa tecnica innovativa fu scoperta quasi per caso dai piloti di aerei che sorvolando l'Antartide riferivano funzionamenti "anomali" degli altimetri radar di cui erano dotati gli apparecchi.

## Carote e perforazioni

La presenza di impurità solide e di bolle d'aria intrappolate all'interno del ghiaccio fornisce importantissime informazioni sulla composizione chimica dell'atmosfera e sulle temperature al momento della formazione. Naturalmente, è necessario che il ghiaccio non abbia subito processi di fusione, che disperderebbero le bolle d'aria: per questo tipo di studi, quindi, si deve lavorare su ghiacciai freddi, in **regioni polari**. In alcuni luoghi della Terra, il ghiaccio può essere **molto antico**, come, per esempio, alla base delle grandi calotte antartiche e groenlandesi, dove l'età del ghiaccio può essere superiore ai 300.000- 500.000 anni. Lo studio del ghiaccio in questi luoghi permette quindi di **ricostruire in dettaglio le variazioni di temperatura e di composizione chimica dell'atmosfera** su un periodo di tempo molto lungo, permettendoci di avere accesso ad un preziosissimo archivio di dati sul clima del passato. Per questo tipo di studi, vengono effettuate delle **perforazioni** che prelevano campioni di ghiaccio sotto forma di una lunga carota cilindrica, che non deve presentare interruzioni o parti mancanti, dalla superficie fino alla profondità raggiunta: perforazioni di questo tipo in Antartide hanno raggiunto profondità di oltre 2.000 m, come a Dome C (progetto al quale ha partecipato anche l'Italia) o nella perforazione Vostok (sovietica): qui è stata recuperata la carota più lunga, che copre un intervallo di tempo di 420.000 anni.

## Bolle nel ghiaccio

Le temperature dell'atmosfera intrappolata vengono ricavate studiando il **rapporto tra isotopi pesanti dell'ossigeno**, come  $^{18}\text{O}$ , e il più comune  $^{16}\text{O}$ , l'isotopo più diffuso. Il rapporto  $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  viene poi confrontato con la composizione di un campione standard di acqua marina, il cosiddetto **SMOW** (*Standard Mean Oceanic Water*), ricavandone la differenza, indicata con  $\delta^{18}\text{O}\%$ . Il **ghiaccio formato in un periodo freddo** ha un contenuto in isotopi pesanti, come  $^{18}\text{O}$ , minore, e quindi un  $\delta^{18}\text{O}\%$  negativo rispetto al ghiaccio formato con temperature più alte. Apposite tabelle permettono di ricavare le temperature medie dell'aria in funzione del valore di  $\delta^{18}\text{O}\%$ . Analisi di questo tipo su diverse carote in Antartide e Groenlandia hanno permesso, per esempio, di riconoscere, andando indietro nel tempo, la fine dell'ultima glaciazione, all'incirca 13.000 anni fa, e il suo inizio, risalente a circa 75.000 anni fa, separato da episodi glaciali più antichi da un periodo caldo, un interglaciale, tra 120.000 e 140.000 anni fa (dove la temperatura era di oltre  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  più alta dell'attuale, secondo quanto ricostruito nella carota di Vostok). L'analisi della **composizione chimica dell'aria intrappolata**, invece, prende in considerazione, in particolare, i gas serra, come anidride carbonica e metano, considerati i responsabili principali di un riscaldamento globale. L'analisi delle carote mostra, in effetti, che il contenuto di questi gas è naturalmente più basso durante i periodi freddi, corrispondenti a periodi glaciali, e si innalza al contrario con l'aumentare delle temperature. È stato possibile, con lo studio di numerose carote, ricostruire l'andamento dei due principali gas serra nel tempo, identificando diversi periodi caldi e freddi. Il dato più significativo di queste analisi è però il drammatico **aumento di questi gas negli ultimi 200 anni**, a partire dallo sviluppo delle attività industriali, con un incremento che non ha paragoni negli ultimi 160.000 anni. Dalla fine dell'ultimo episodio glaciale all'inizio dell'Olocene (un arco di tempo di circa 2-3.000 anni), la concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera è aumentata di 70 ppm, e lo stesso aumento è stato riscontrato dall'epoca preindustriale ad oggi (meno di 200 anni)!

I dati forniteci dai ghiacciai ci permettono quindi di ricostruire con grande dettaglio informazioni sul clima e sull'atmosfera del passato fondamentali per comprendere il funzionamento del sistema climatico del nostro pianeta, e nello stesso tempo suonano un campanello d'allarme che dovrebbe invitarci a riflettere e a prendere provvedimenti: sapremo sfruttare i "consigli" dei nostri ghiacciai?

## Ghiaccio sporco

Il ghiaccio di ghiacciaio, formandosi, intrappola al suo interno, oltre alle bolle d'aria, numerose **impurità solide**, che, se opportunamente studiate, forniscono importanti e preziosi dati sulla storia del nostro pianeta. I detriti più grossolani provengono di solito dai versanti prossimi al ghiacciaio o dalla sua base: importantissimi per ricostruire, attraverso l'esame dei depositi glaciali, ghiacciai ormai scomparsi, non forniscono in genere informazioni significative circa i ghiacciai attuali, di cui ci sono già note l'estensione e la posizione.

Più interessanti sono i **frammenti più fini, polveri sottili portate dal vento**, che possono provenire da molto lontano. Dalla loro distribuzione si possono, per esempio, ricostruire le direzioni dei venti, mentre l'analisi della composizione delle polveri può presentare a volte delle sorprese: granuli di sabbie provenienti dal Sahara si trovano, per esempio, molto diffusi sui ghiacciai alpini, e non è infrequente trovare **tracce di eruzioni vulcaniche** particolarmente violente sotto forma di livelli ricchi di ceneri vulcaniche. Lo studio della composizione di queste ceneri permette sovente di risalire all'apparato vulcanico da cui sono partite, fornendoci informazioni sui venti che le hanno trasportate e sulla potenza dell'esplosione. Se riferibili a eventi vulcanici storici, forniscono anche una datazione del livello di ghiaccio in cui sono stati ritrovate, mentre, al contrario, la possibilità di datare i livelli di ghiaccio permette di stabilire un'età per eventi vulcanici molto antichi.

Lo studio delle **polveri in Antartide e in Groenlandia** mostra, per esempio, che le concentrazioni durante l'ultimo episodio glaciale sono molto superiori all'attuale: questo fa ipotizzare che durante le glaciazioni la circolazione atmosferica lungo i meridiani fosse più "energica" a causa delle maggiori differenze di temperatura tra la fascia tropicale e le zone polari e che le terre aride e desertiche fossero più estese.

Il ritrovamento di **inquinanti di origine industriale in carote di ghiacciai molto lontani** da insediamenti antropici, come quelli dell'Himalaya o del Karakorum, permette invece di studiare come queste sostanze si propagano nell'atmosfera e, in alcuni casi, anche di stabilire chi è il "colpevole".

## L'età del ghiaccio

Il ghiaccio di ghiacciaio, lungi dall'essere un materiale omogeneo, presenta in genere una sorta di stratificazione, dovuta al progressivo accumulo annuale di strati di neve di diverso spessore: le parti più vecchie si trovano alla base e le parti più giovani vicino alla superficie. In genere il ghiaccio estivo ha un aspetto vitreo, solitamente ricco di polveri scure e di limitato spessore, mentre il ghiaccio invernale è bianco e di maggior spessore. E' possibile quindi "contare" i **diversi strati** e risalire al numero di anni, un po' come si fa con gli anelli di accrescimento degli alberi. Questo metodo, però, funziona soltanto fino a che la pressione crescente all'interno del corpo del ghiacciaio non cancella la stratigrafia del ghiaccio. Per il ghiaccio più antico e profondo, si utilizzano metodi indiretti e più complessi, che sfruttano le bolle d'aria intrappolate nel ghiaccio.

Con il metodo del **radiocarbonio** si utilizza il carbonio <sup>14</sup>C contenuto nell'anidride carbonica intrappolata, in modo analogo a quanto si fa per datare manufatti umani o materiale organico, ma è un metodo poco usato, per la grande quantità di materiale richiesto. Il metodo più usato analizza il contenuto in isotopi pesanti dell'ossigeno dell'aria contenuta nelle bolle. Per gli strati più vecchi e profondi, invece, occorrono altri metodi, basati su **modelli matematici** del flusso del ghiaccio. Importanti sono i ritrovamenti di livelli ricchi di polveri, in particolare di ceneri vulcaniche: quando è possibile ricondurle ad un evento eruttivo noto, è possibile dare un'età precisa al livello in cui sono state ritrovate.