

## La criosfera

### Introduzione

Così come l'idrosfera comprende tutte le acque allo stato liquido del pianeta, in qualunque luogo e in qualunque forma si presentino, o la biosfera è costituita dall'insieme di tutti gli organismi viventi, a qualunque regno essi appartengano e in qualunque luogo essi vivano, così la criosfera comprende tutto il ghiaccio che si trova sulla Terra. Quando si pensa al ghiaccio, l'immagine che viene alla mente è quella delle candide distese scintillanti di un ghiacciaio, ma il ghiaccio sulla Terra si trova in molte altre forme, a volte anche molto "nascoste", e, sorprendentemente, anche in aree geografiche "insospettabili", come il centro dell'Africa!

La quasi totalità del ghiaccio terrestre è costituita da ghiaccio di ghiacciaio o da ghiaccio marino. Grandi quantità di ghiaccio di congelamento si trovano anche nelle zone di permafrost, intrappolate nel terreno e nelle fratture delle rocce, ma, non essendo direttamente osservabili, è molto difficile quantificarne il volume e l'estensione. Anche le grotte possono contenere depositi di ghiaccio, a volte con caratteristiche di ghiaccio di ghiacciaio, più spesso come ghiaccio di congelamento: si tratta in genere di quantitativi abbastanza piccoli, ma che rappresentano un preziosissimo archivio di dati sul clima del passato.

## Il ghiaccio sulla Terra

### Dove si trova

I ghiacciai possono esistere solo a due condizioni: la prima, abbastanza ovvia, è che le **temperature annue siano al di sotto dello zero** per un certo periodo dell'anno, in modo che il ghiaccio possa conservarsi, la seconda, meno intuitiva, ma altrettanto indispensabile, è che cada **un quantitativo di neve sufficiente** alla formazione di una certa massa di ghiaccio. Infatti, così come un calore eccessivo non permette la conservazione di un ghiacciaio, così la scarsità di precipitazioni impedisce che un ghiacciaio possa nascere, anche dove le temperature siano abbondantemente sotto lo zero: per questo motivo, nelle aree desertiche polari non si formano ghiacciai.

I ghiacciai sono quindi degli ottimi **indicatori dei due più importanti parametri climatici**: la temperatura e le precipitazioni.

A seconda della localizzazione geografica, variano le temperature all'interno e alla base del ghiacciaio, a contatto con il substrato roccioso. Per questo si distinguono **ghiacciai freddi**, o polari, con temperature costantemente e interamente al di sotto dello zero, e **ghiacciai temperati**, che possono presentare, in superficie e/o alla base, temperature più elevate, con fenomeni di fusione: la presenza o meno di acqua allo stato liquido fa sì che il comportamento dei ghiacciai e la risposta alle variazioni climatiche siano molto diversi nei due casi. I primi si trovano alle alte latitudini, i secondi a basse latitudini, ma in zone di alta quota, dove il raffreddamento dell'aria dovuto all'altitudine compensa il calore dovuto alla bassa latitudine: ghiacciai temperati sono i nostri ghiacciai delle Alpi, ma anche ghiacciai particolari, come quelli che si trovano in zone tropicali o equatoriali, come, per esempio, i ghiacciai del Kilimangiaro o del M. Kenya, in Africa, o quelli delle Ande Peruviane e Boliviane.

## Il ghiaccio sulla Terra

Un'importante distinzione viene fatta tra il **ghiaccio che copre terre emerse e il ghiaccio marino**, che galleggia sulla superficie dei mari polari. Per parlare di ghiacciai è necessario che il ghiaccio sia in movimento sotto la spinta del suo stesso peso: il ghiaccio marino o gli iceberg, quindi, pur essendo talvolta in movimento, non costituiscono un ghiacciaio, poichè i movimenti sono passivi, generati da correnti marine, moto ondoso o venti.

Pur essendo costituiti dal medesimo materiale, i **ghiacciai terrestri** sono molto diversi tra loro, per estensione, spessore del ghiaccio, posizione geografica e regime climatico, situazione topografica, forma, tutti fattori che determinano, oltre che un aspetto assai differente, anche un comportamento molto diverso e una diversa risposta alle variazioni climatiche. I ricercatori che si occupano di ghiacciai utilizzano molte e diverse classificazioni, alcune assai complesse, in funzione

anche del tipo di studio che si vuole intraprendere. Una prima importante distinzione può essere fatta tra **ghiaccio di congelamento**, che comprende il ghiaccio marino e il permafrost, e il **ghiaccio di ghiacciaio**, che comprende calotte, piattaforme e ghiacciai montani.

## Quanto ghiaccio

La maggior parte del ghiaccio terrestre che possiamo osservare si trova in grandi masse di ghiaccio “quasi” puro (con le debite considerazioni fatte più sopra): le **calotte glaciali** e i **ghiacciai**, nelle loro diverse tipologie, le **piattaforme di ghiaccio** e le **banchise di ghiaccio marino**. È abbastanza facile stabilire la superficie delle aree coperte da ghiaccio: si calcola che questo copra circa 15 milioni di km<sup>2</sup>, pari a un decimo della superficie delle terre emerse. E' più difficile, invece, calcolare il volume del ghiaccio stesso, perchè occorre conoscerne lo spessore su tutta l'area coperta: speciali tecniche permettono di misurare lo spessore del ghiaccio in diversi punti di un ghiacciaio e di fare quindi una stima del volume. Per esempio, lo spessore medio della calotta antartica è di 2.100 m, con punte di 4.800 m nella Terra di Wilkes, nel settore orientale: con una superficie di poco meno di 13.600.000 km<sup>2</sup>, il volume totale del ghiaccio antartico è di 30 milioni di km<sup>3</sup>. Qualcuno si è divertito a calcolare che questo equivale a  $9 \times 10^{16}$  cubetti di ghiaccio!

## Freddi mari polari

Il ghiaccio marino ha un'origine completamente diversa da quello dei ghiacciai. Si forma, infatti, per **congelamento diretto dell'acqua di mare**, quando la temperatura dell'aria rimane al di sotto di  $-1.8^{\circ}\text{C}$  per qualche giorno.

La sua **formazione**, stagionale, è spettacolare: dapprima si formano aghi e lamelle di ghiaccio, che, galleggiando, danno alla superficie marina un particolare aspetto “oleoso”, il cosiddetto *grease ice*, il ghiaccio “grasso”. I cristalli si aggregano, originando lastre sempre più spesse che, a causa delle continue collisioni provocate dal moto ondoso, prendono una forma circolare con i bordi rialzati, somigliando a grosse frittelle bianche, da cui il nome di *pancake ice*. Con il mantenersi di temperature basse, le lastre si saldano tra loro a dare una copertura continua, la **banchisa, o pack**. Lo spessore varia da 1 a 5-7 metri, e si accresce continuamente per congelamento di acqua marina alla base e per apporti di neve sulla superficie. Le correnti, i venti, le tempeste mantengono la banchisa in continuo movimento, causando rotture di lastroni, accavallamenti, collisioni, creando un paesaggio tormentato fatto di creste sporgenti dal ghiaccio e grandi fratture, che rendono molto difficile l'esplorazione. E' una zona molto pericolosa per la navigazione: navi anche di grande tonnellaggio sono rimaste intrappolate tra i lastroni alla deriva e molte sono finite letteralmente stritolate tra i ghiacci. La storia delle esplorazioni polari è costellata di avventure e tragedie legate ai pericoli della banchisa.

A differenza dell'Antartide, che è un continente, nell'**Artico** le poche terre emerse sono costituite da arcipelaghi di isole. Non vi si trovano, quindi, grandi ghiacciai o grandi calotte, ma soltanto un'enorme estensione di ghiaccio marino galleggiante sul Mar Glaciale Artico. Un'estesa fascia di ghiaccio marino circonda però anche l'Antartide, raggiungendo la massima estensione in settembre, con una larghezza di 2.000 km. A differenza dei ghiacciai e delle calotte, che mantengono più o meno inalterate le loro dimensioni nel corso dell'anno, il ghiaccio marino subisce spettacolari variazioni di estensione, particolarmente apprezzabili se osservate da satellite, su aree che coprono 15-20 milioni di km<sup>2</sup> dei mari polari. Le variazioni sono particolarmente evidenti intorno all'Antartide, dove le correnti marine tendono ad allontanare i frammenti di banchisa, disperdendoli, mentre sono di minore entità nel Mar Glaciale Artico, dove le correnti tendono, invece, a concentrare intorno al Polo Nord i **lastroni alla deriva**, il cui allontanamento è ostacolato anche dalla presenza delle circostanti terre emerse. A differenza del ghiaccio dei ghiacciai, che può essere antico di diverse migliaia di anni, l'età del ghiaccio marino raramente supera l'anno. Lastroni di età pluriennale si trovano soltanto nel Mar Glaciale Artico.

## Il permafrost

Quando le temperature medie annue dell'aria sono sotto lo zero per periodi lunghi, l'acqua che si trova nel terreno è sempre allo stato solido, e il **terreno risulta permanentemente gelato**. In questo stato, prende il nome di permafrost (cioè, ghiaccio permanente). Il terreno, indurito e privo di acqua liquida, è costituito da particelle minerali (particelle di terreno, granuli e detriti rocciosi di varie dimensioni) cementate tra loro da ghiaccio. La profondità a cui giunge il ghiaccio

dipende dalla rigidità del clima, ma può essere di parecchie decine di metri (in alcune zone della Siberia e dell'Alaska, con temperature medie annue dell'aria comprese tra  $-7$  e  $-16^{\circ}\text{C}$ , si è trovato permafrost a profondità di 300-600 m, con un massimo di 1.500 m in una località della Siberia settentrionale).

Durante l'estate, un sottile strato superficiale, il cosiddetto **strato attivo**, viene riscaldato dal sole e il ghiaccio può fondere: poichè il sottostante permafrost è impermeabile, l'acqua di fusione non può essere allontanata e il terreno sgelato diviene molle e intriso di acqua, si formano spesso paludi e acquitrini e si possono creare gravi problemi di stabilità agli edifici che vi sono costruiti sopra.

Per costruire in queste aree occorrono **tecniche edilizie particolari**, con gli edifici che poggiano su pali infissi nel terreno fino a raggiungere lo strato permanentemente gelato: una sorta di "palafitte" sul morbido e cedevole strato attivo. Il permafrost interessa piccole aree in alta montagna (anche sulle nostre Alpi) ma, soprattutto, vastissime aree alle alte latitudini: circa un quinto delle terre emerse è interessato da questo fenomeno (metà del territorio della ex-Unione Sovietica, metà del territorio canadese, tre quarti dell'Alaska, la quasi totalità della Groenlandia e dell'Antartide)

## I ghiacci continentali

Le **calotte glaciali**, o *ice sheet* (dall'inglese "coltri di ghiaccio"), chiamate anche, con un termine norvegese, *inlandsis*, ghiacci continentali, sono estensioni di ghiaccio con una superficie superiore a  $50.000 \text{ km}^2$ , dove il ghiaccio seppellisce e maschera il rilievo sottostante, che non ne influenza l'andamento.

La superficie è in genere blandamente convessa, come una sorta di cupola molto piatta, da cui possono emergere le cime più elevate del rilievo sottostante, che prendono il nome di **nunatak**, termine Inuit che significa "montagna isolata". Il settore centrale, più rilevato, di una calotta prende il nome di duomo, o, in inglese, dome.

Simili alle calotte, ma di dimensioni minori sono gli **ice cap**, "cappelli di ghiaccio".

Dalle calotte si dipartono **colate di ghiaccio** che fluiscono radialmente in varie direzioni e prendono il nome di ghiacciai di sbocco. Questi sono veri e propri fiumi di ghiaccio, a volte con dimensioni immense: il più grande della Terra è il **Ghiacciaio Lambert**, che si stacca dalla calotta antartica, lungo 400 km, con una larghezza che supera i 50 km.

La maggior parte dei ghiacciai di sbocco raggiunge il mare dove origina **lingue di ghiaccio** che si estendono galleggiando sulla superficie marina anche per chilometri: con un processo chiamato **calving**, è qui che si produce la maggior parte degli iceberg. Il Ghiacciaio Lambert, per esempio confluisce nella **piattaforma di Amery** e scorre formando una lingua galleggiante che si estende 300 km con un fronte largo 200 km.

Circa **l'85,7% del ghiaccio** sulla superficie terrestre si trova nelle grandi calotte dell'Antartide, mentre nella calotta della Groenlandia si trova circa il 10,9%: queste due aree insieme costituiscono la quasi totalità (96,6%) del ghiaccio sulla superficie terrestre.

Calotte e ice cap di dimensioni molto minori si trovano in Alaska, sulle isole dell'arcipelago canadese (Baffin, Ellesmere, Heiberg, Vittoria) e in Islanda, sugli arcipelaghi di Jan Mayen, delle Svalbard, della Terra di Francesco Giuseppe e sulla penisola scandinava (dove il ghiacciaio più esteso è lo Jostedalubre, dove *bre* significa ghiacciaio, il più grande d'Europa, esclusa l'Islanda). Nell'emisfero australe, vaste estensioni di ghiacci simili a calotte si trovano sulle Ande patagoniche, a formare lo *Hielo Continental* (*hielo* significa gelo, o ghiaccio in spagnolo), con una superficie di  $17.000 \text{ km}^2$  e ben 50 ghiacciai di sbocco che se ne dipartono: alcuni di questi terminano in grandi laghi di contatto glaciale, come il lago Vidma e il lago Argentino.

## Le piattaforme

Quando un ghiacciaio raggiunge il mare, si allunga in una lingua galleggiante. La confluenza di diverse lingue galleggianti origina la formazione di una **piattaforma glaciale**: una sorta di tabulato pianeggiante che galleggia sul mare ancorandosi alla terraferma tramite le lingue che lo alimentano. La più estesa piattaforma glaciale è la **Piattaforma di Ross**, in Antartide, con uno spessore medio di 300 m e una superficie di  $530.000 \text{ km}^2$ , pari a quella della Francia, delimitata verso il mare da pareti di ghiaccio alte fino a 200 m. Le diverse lingue glaciali che alimentano le piattaforme si muovono con velocità differenti, e questo, insieme alle correnti marine e al moto ondoso, determina una grande instabilità dei margini. Vi si formano infatti enormi fratture, dette **chasm**, come per esempio quella osservata in Antartide,

sulla Barriera di Filchner, lunga 100 km e larga da 400 m a 5 km. Queste impressionanti fratture sono il preludio al distacco di enormi porzioni di piattaforma, che formano giganteschi iceberg tabulari, che si allontanano andando alla deriva. Basi di ricerca scientifica costruite sulla piattaforma sono state coinvolte nella formazione di questi enormi iceberg e trascinate alla deriva, come è accaduto a due basi americane e a una sovietica.

## Gli iceberg

Gli iceberg (da *ice*, ghiaccio e *berg*, montagna, montagne di ghiaccio) si formano in due condizioni:

- quando ghiacciai terrestri scendono fino al mare o a un lago, la parte finale della lingua di ghiaccio, a contatto con l'acqua, inizia a galleggiare. Con un fenomeno detto **calving**, si formano grandi fratture nella massa di ghiaccio, con conseguente distacco di porzioni più o meno grandi. La forma di questo tipo di iceberg è in genere irregolare, con una superficie frastagliata e tormentata.
- i movimenti di correnti e maree nell'acqua sottostante, insieme alla costante spinta esercitata dai ghiacciai che alimentano le piattaforme, causano la fratturazione e la frammentazione delle piattaforme stesse. Ogni anno in Antartide, per esempio, si perdono in questo modo tra i 1.450 e i 2.000 km<sup>3</sup> di ghiaccio (un volume equivalente a circa la metà dell'acqua potabile consumata in un anno nel mondo).

Gli iceberg di questo ultimo tipo hanno in genere la forma di piatti tavolati dalla superficie relativamente liscia e regolare. Sono tipici della zona antartica, mentre gli iceberg del primo tipo si formano più facilmente nei mari artici, dove le terre emerse non sono circondate da piattaforme di ghiaccio galleggiante e i numerosi ghiacciai terrestri possono perciò sfociare direttamente in mare. Iceberg di piccole dimensioni si possono formare anche per crolli di blocchi di ghiaccio dalle fronti, senza che necessariamente queste galleggino sul mare o su un lago.

Essendo il ghiaccio meno denso dell'acqua, **gli iceberg galleggiano** sulla superficie marina: la parte immersa è quindi circa 7- 10 volte (a seconda della differenza di densità tra acqua e ghiaccio) più alta di quella emersa. Se si considera che alcuni iceberg possono essere alti, rispetto alla superficie del mare, parecchie decine di metri, si comprende bene come l'appellativo di "montagne di ghiaccio" sia particolarmente indicato: un iceberg che mostra una parete di 30 metri, continua, per esempio, sotto il livello del mare, fino a una profondità di più di 200 metri!.

L'iceberg più grande mai avvistato è un iceberg antartico, osservato nel 1956, che misurava 335 x 97 km, con una superficie di 31.000 km<sup>2</sup>, pari a quella del Belgio. Dopo la frammentazione dell'iceberg B-15, grande come l'Abruzzo, attualmente il primato spetta a C-19A, vasto come la Liguria.

Una volta staccatisi dal ghiacciaio o dalla piattaforma, gli iceberg vengono sospinti alla deriva dai venti, dalle correnti e dalle maree. L'erosione operata dal vento e dalle onde e la progressiva fusione a cui vanno incontro spostandosi verso latitudini più calde ne riducono le dimensioni, insieme a frammentazioni causate da violente tempeste o collisioni tra loro o con la terraferma. Il destino degli iceberg è quindi quello di ridursi di dimensioni fino a scomparire, ma la loro vita può essere anche di parecchi anni.

## I ghiacci montani

Si tratta, per definizione, di corpi di ghiaccio che si trovano in ambiente di montagna. Possono essere classificati in molti modi, tenendo conto della posizione geografica, della forma, della temperatura. Le dimensioni non sono un criterio distintivo: si possono avere piccolissimi ghiacciai, come quello appenninico del Calderone, sul Gran Sasso d'Italia, poco più di un sottile lembo di neve vecchia (attualmente considerato praticamente "estinto"), oppure giganteschi "fiumi" di ghiaccio, lunghi diverse decine, persino centinaia di km, con spessori di ghiaccio di oltre 1000 m, come i grandi ghiacciai dell'Alaska, di cui il più esteso è il Ghiacciaio Bering, seguito dal Ghiacciaio Malaspina, che al suo sbocco in pianura si espande con il lobo pedemontano più grande del mondo.

## Dove si trova

### L'Antartide

La "calotta antartica" è in realtà costituita da **due calotte distinte**, una occidentale, più piccola, ancorata ad un gruppo di isole, e una orientale, vastissima, che costituisce da sola il 78% di tutti i ghiacciai della Terra, che ricopre il continente antartico elevandosi in corrispondenza di numerosi domi a quote superiori ai 4000m. Le due calotte sono separate dalla **catena Transantartica**, con cime che superano i 4.000 m.

La calotta occidentale ha uno spessore massimo di 3,5 km e la sua base è situata prevalentemente al di sotto del livello del mare, mentre quella orientale, spesso fino a 4,5 km, è in prevalenza al di sopra del livello marino.

Il ghiaccio antartico si forma lentamente, a causa della scarsità di precipitazioni, ma la sua fusione è altrettanto lenta, grazie alle bassissime temperature: è qui che si trova il **ghiaccio più antico della Terra**. Non si riescono ancora a fare previsioni sullo stato di salute della calotta antartica: il suo bilancio sembrerebbe ancora positivo, anche se la porzione occidentale risulta soggetta a grandi perdite per calving, in quanto la sua base è situata al di sotto del livello del mare.

La **piattaforma di Ross**, la più vasta del pianeta, deve il suo nome a James Ross, che la scoprì nel 1841, mentre navigava per conto del governo britannico per raggiungere il Polo Sud: furono proprio le enormi pareti che bordano la piattaforma a porre fine all'esplorazione del capitano. Ross non raggiunse il Polo Sud, ma eseguì un rilievo di dettaglio dei margini della piattaforma, lasciandoci una preziosissima informazione storica per lo studio dell'evoluzione dei ghiacci antartici.

### La calotta groenlandese

La Groenlandia, la "**terra verde**", fu così chiamata da Eric il Rosso nel X secolo, per invogliare i Vichinghi a colonizzarla. In quell'epoca, in effetti, la Groenlandia era in parte verde, ma la successiva avanzata dei ghiacci costrinse i coloni ad abbandonare l'isola: soltanto gli Inuit sopravvissero alla Piccola Età Glaciale.

La calotta glaciale groenlandese occupa i sette ottavi dell'isola, con una superficie di 1,73 milioni di km<sup>2</sup> e un volume di 2,6 milioni di km<sup>3</sup>, e lascia libera solo una ristretta fascia costiera montuosa che delimita e "contiene" la calotta. Lo spessore del ghiaccio è in media 1.790 m, ma supera in alcuni punti i 3.000 m, culminando in due domi a 3.300 m di altitudine. Molte lingue defluiscono dalla calotta, ma, a causa dei rilievi costieri, soltanto poche possono raggiungere il mare, per cui la Groenlandia è praticamente priva di piattaforme.

Uno dei ghiacciai di sbocco più importanti è il **Ghiacciaio di Jakobshavn**, una vera e propria fabbrica di enormi quantità di iceberg. Si tratta del ghiacciaio più rapido al mondo, che, in prossimità della fronte, si sposta con l'impressionante velocità di 1 m all'ora, producendo continui crolli ed enormi quantità di iceberg, più di 20 milioni di tonnellate all'anno. La caduta di iceberg in mare dalle fronti può provocare onde di tsunami alte fino a 10 m. L'iceberg che affondò il Titanic proveniva proprio dalla Groenlandia.

Lo spessore della calotta groenlandese è tenuto sotto controllo dal dicembre 2002 dal **satellite Nasa ICESat**, insieme ai ghiacci antartici, con apparecchi laser in grado di misurare variazioni di altezza fino a 1 cm.

### I ghiacciai delle Alpi

I ghiacciai delle Alpi coprono, complessivamente, meno dello 0,02% dei ghiacciai della Terra, ma sono molto importanti perchè qui sono nati i primi studi di glaciologia e su questi ghiacciai possediamo molte informazioni sulle variazioni nel tempo. Il **Catasto Internazionale** del 1989 censisce 5.154 ghiacciai sulle Alpi, con una superficie di poco meno di 3000 km<sup>2</sup>, di cui i maggiori si trovano sul versante settentrionale, dove sono frequenti grandi ghiacciai vallivi. I maggiori ghiacciai si trovano in Svizzera, nelle Alpi Bernesi, dove si trova, tra gli altri, il più grande ghiacciaio delle Alpi, l'Aletschglätscher (lungo 24 km, con una superficie di 170 km<sup>2</sup> e uno spessore di poco meno di 900 m), nelle Alpi Vallesi, dove il maggiore è il Gornerglätscher, nel Gruppo del M. Rosa, e nelle Alpi Retiche, dove il più esteso è il Morteratschglätscher, nel Gruppo del Bernina (Glätscher significa ghiacciaio in tedesco). Importanti ghiacciai si trovano anche nel Gruppo del M. Bianco, tra cui la celebre Mer de Glace, il mare di ghiaccio, uno dei primi ghiacciai ad essere studiato, in Austria, nell'Ötztal e negli Alti Tauri.



## I ghiacciai italiani

Il **Catasto dei Ghiacciai Italiani**, redatto tra il 1959 e il 1962 a cura del Comitato Glaciologico Italiano e del CNR, individua 838 ghiacciai, con una superficie complessiva di 540 km<sup>2</sup>, di cui quasi 100 km<sup>2</sup> nel Gruppo dell'Ortles-Cevedale, seguito dal Gruppo dell'Adamello-Presanella e dal Gruppo del Bianco. Sugli Appennini è presente un solo ghiacciaio, attualmente in via di estinzione, il Ghiacciaio del Calderone, un minuscolo lembo sul Gran Sasso d'Italia. I ghiacciai di maggior estensione delle Alpi italiane sono il Ghiacciaio dei Forni, nel Gruppo dell'Ortles-Cevedale, che nel 1989 aveva una superficie di 13 km<sup>2</sup>, che rivaleggia per il primato italiano con il Ghiacciaio dell'Adamello, che ha una superficie di 18 km<sup>2</sup>, ma divisa in colate distinte. Il Ghiacciaio dei Forni è formato da tre bacini di accumulo, le cui colate confluiscono in un'ampia lingua che scende lungo la valle, mentre il Ghiacciaio dell'Adamello è un ghiacciaio di altopiano, una sorta di piccola calotta chiamata Pian di Neve, da cui scendono numerose lingue e colate minori.

## Grotte nel ghiaccio

### Come si forma una grotta nel ghiaccio

L'acqua di fusione sulla superficie dei ghiacciai si raccoglie in piccoli corsi d'acqua stagionali, che si scavano un letto incassato nel ghiaccio, le cosiddette **bediére** (da un termine francese): il ghiaccio, infatti, è impermeabile, e non consente all'acqua di infiltrarsi in profondità. La parte più superficiale di ogni ghiacciaio, però, è attraversata da numerose fratture: attraverso queste, l'acqua di superficie può infiltrarsi e scorrere all'interno del ghiacciaio.

L'acqua liquida è ovviamente più calda del ghiaccio con cui viene a contatto, e ne determina la fusione, creando un sistema di vuoti, cunicoli, pozzi, gallerie, del tutto simile ai sistemi di grotte in roccia: la differenza è che le grotte in roccia sono create da processi chimici (dissoluzione del calcare), mentre le grotte nel ghiaccio si formano per un processo fisico (fusione del ghiaccio).

Le cavità glaciali si formano in tutti i ghiacciai abbastanza "caldi" perché possa essere presente acqua allo stato liquido. La formazione delle grotte nel ghiaccio è molto rapida, e può essere osservata, per così dire, in "tempo reale": le cavità si formano e si modificano nel corso di poche settimane, o pochi giorni, e questo offre l'opportunità di comprendere forme analoghe sviluppate, in tempi molto più lunghi, in roccia. Perché si formino grotte glaciali, è necessario che il ghiaccio, di per sé impermeabile, sia attraversato da fratture, che permettano all'acqua di scendere in profondità e, fondendo il ghiaccio circostante, di allargarle fino a formare pozzi e gallerie che possono raggiungere parecchi metri di diametro. In superficie, si osservano pozzi e inghiottitoi, chiamati mulini, poiché l'acqua vi turbinava come in un mulino ad acqua, attraverso i quali l'acqua si inoltra nelle profondità del ghiacciaio. Spinta dalla gravità, l'acqua tende a seguire un percorso il più possibile verticale, scavando grandi pozzi e profonde forre nel ghiaccio, fratturato a causa delle enormi tensioni che si sviluppano all'interno della sua massa, che fluisce lentamente sotto la spinta del suo stesso peso. Oltre una certa profondità (che è di circa 150- 200 m ed è uguale per tutti i ghiacciai, indipendentemente dal loro spessore), il ghiaccio diviene plastico e si comporta come una barriera impermeabile, che impedisce all'acqua di approfondire ulteriormente il suo percorso. Si formano così gallerie orizzontali, completamente allagate, che portano l'acqua dai pozzi fino alla fronte, dove, grazie alla presenza di profondi crepacci, può raggiungere la base del ghiacciaio, per poi uscire nuovamente a giorno attraverso le "porte" del ghiacciaio, con gallerie che possono avere diametri di parecchi metri, da cui si riversano le turbolente acque grigiastre degli scaricatori glaciali. Le "porte del ghiacciaio" assumono spesso l'aspetto di grandi "bocche", simili alla bocca di un forno, da cui vengono i toponimi di alcuni ghiacciai alpini (Ghiacciaio dei Forni, nel Gruppo dell'Ortles-Cevedale, Ghiacciaio del Forno in Val Bregaglia, Svizzera).

I luoghi migliori per osservare gli inghiottitoi glaciali sono i tratti pianeggianti, lontano dalle zone crepacciate, o lungo le morene mediane o ai lati del ghiacciaio: si trovano in tutti i ghiacciai delle Alpi, ma solo in alcuni casi raggiungono dimensioni penetrabili dall'uomo. Grandi inghiottitoi si trovano, per esempio, sul Ghiacciaio del Gorner, sulla Mer de Glace e sul Ghiacciaio dei Forni.

### Evoluzione di una grotta

Un mulino si forma in un punto preciso del ghiacciaio, dove la fratturazione è favorevole, e, come tutto ciò che si trova

sopra e dentro il ghiacciaio, viene poi lentamente trascinato a valle dal movimento del ghiaccio stesso: la primavera successiva, un nuovo mulino si formerà nel medesimo punto, e il vecchio mulino, privato dell'acqua catturata del suo compagno più giovane, piano piano si chiuderà, grazie al rigonfiamento plastico del ghiaccio, fino a scomparire nel giro di pochi anni, mentre nuovi mulini continuano a formarsi più a monte. Per questo motivo, i mulini si presentano quasi sempre a gruppi, allineati lungo precise direzioni, e sempre nello stesso punto del ghiacciaio: da monte verso valle, è possibile osservare tutti gli stadi della vita di un mulino, da "embrioni" di mulini, fratture appena allargate dall'acqua, a mulini "bambini", fori cilindrici di pochi centimetri di diametro, ma spesso profondi diversi metri, fino a grandi pozzi, profondi parecchie decine di metri, larghi qualche metro, con forme complesse, per arrivare a vecchi pozzi inattivi, fossili e silenziosi, che, di anno in anno, si fanno inesorabilmente sempre più stretti, fino a scomparire senza lasciare traccia. Abituati a pensare ai fenomeni geologici come processi per lo più lenti, anche se inesorabili, stupisce la rapidità con cui le grotte glaciali si formano, si modificano e scompaiono: tornando, anche solo dopo pochi giorni, ad osservare i medesimi mulini, si possono facilmente notare profondi cambiamenti di forma, dimensioni, quantità d'acqua che li alimenta, tanto che, a volte, si arriva a dubitare di stare osservando proprio la stessa struttura. Per studiare questo tipo di cavità è perciò necessario contrassegnarle con paline, in modo da riconoscerle di anno in anno, e disegnarne il rilievo topografico, per monitorarne le variazioni di forma e di profondità. In questo modo è stato possibile, per esempio, studiare i mulini del Ghiacciaio dei Forni, e stabilire che i mulini hanno una vita media di almeno 6 anni, di cui i primi tre necessari per raggiungere le dimensioni massime e i successivi di progressivo declino. Su ghiacciai più grandi, come alle isole Svalbard, sono stati osservati mulini vecchi di più di 25 anni. In ogni caso, indipendentemente dallo spessore del ghiaccio, la profondità massima delle grotte glaciali non supera i 200 m (203 m, per la precisione, in Groenlandia): nessuno grotta può infatti esistere al di sotto di questa profondità, considerata il limite del comportamento fragile del ghiaccio.

## Due mondi da non confondere

### ***Grotte nel ghiaccio e ghiaccio nelle grotte!***

Molte grotte carsiche, scavate in roccia, contengono ghiaccio al loro interno, in quantità che possono essere anche importanti. Non vanno quindi confuse con le grotte nel ghiaccio, interamente formate all'interno di un ghiacciaio. I meccanismi che portano alla formazione di ghiaccio in grotta sono molti e molto complessi. Ghiaccio stagionale si può formare in inverno per congelamento dell'acqua che percola attraverso le fessure, in prossimità degli ingressi, dove le temperature della grotta risentono delle rigide temperature esterne. Quantità di ghiaccio maggiori si possono formare per congelamento di piccoli specchi d'acqua, come è documentato, per esempio, da alcune grotte sulla Grigna Settentrionale, nelle Prealpi Lombarde: qui il ghiaccio risulta essere piuttosto antico, risalendo all'inizio dell'attività industriale. In alcuni casi, la vicinanza di un ghiacciaio può spingere nelle gallerie ghiaccio di ghiacciaio, come nella famosa Castelguard Cave, in Nord America. In altri casi, il ghiaccio si forma per accumulo e trasformazione di neve caduta nei pozzi d'ingresso. Lo studio del ghiaccio in grotta, affrontato in modo analogo allo studio delle carote prelevate sui ghiacciai, può dare preziosissime informazioni sulle variazioni climatiche più recenti.

## Speleologia nel ghiaccio

Fin dalle prime esplorazioni sui ghiacciai alpini, alpinisti e studiosi hanno osservato lo spettacolo, insieme affascinante e pauroso, degli inghiottitoi glaciali. I mulini erano visti come bizzarre anomalie naturali, che suscitavano curiosità e timore, per la profondità a volte insondabile e per la violenza con cui le acque sembrano essere risucchiate nel ventre del ghiacciaio: per più di un secolo molti si sono interrogati sull'origine di queste strutture e sull'invisibile percorso dell'acqua all'interno del ghiacciaio (le prime esplorazioni documentate risalgono alla fine del 1800, sulla Mer de Glace, in Francia), tuttavia è solo dagli anni '80 che il progresso tecnico permette l'esplorazione diretta, in sicurezza e con relativa facilità, degli inghiottitoi glaciali.

Nasce così una nuova disciplina, la speleologia glaciale, che unisce il lato esplorativo e sportivo alla ricerca scientifica: grazie al lavoro dei glaci speleologi, si cominciano ora a capire i meccanismi che originano le grotte glaciali e l'importanza del loro studio per la comprensione del comportamento dei ghiacciai, in particolare della circolazione delle

acque al loro interno. Molte esplorazioni hanno per teatro gli immensi e spettacolari ghiacciai dell'Islanda, delle Svalbard, della Patagonia e della Groenlandia (e proprio qui nel 1998 è stato raggiunto un lago ghiacciato alla profondità di 203 m sul fondo dello spettacolare mulino di Malik, il più profondo finora mai esplorato), ma da qualche anno anche i più modesti ghiacciai alpini stanno suscitando interesse, soprattutto per la possibilità di effettuare studi ripetuti nell'arco di diversi anni.

Ogni anno, in una breve stagione che va dalla tarda primavera alle prime nevicite autunnali, i principali mulini vengono discesi, fotografati, misurati, contrassegnati con paline, allo scopo di cogliere, nelle variazioni che vi si osservano, qualche indizio che permetta di capire la formazione e l'evoluzione futura. Al di là della ricerca scientifica, che, ancora agli albori, rende questa disciplina particolarmente stimolante per chi vi si dedica, la discesa in un mulino è una delle cose più emozionanti che la montagna possa offrire e rappresenta sicuramente una delle ultime frontiere dell'esplorazione. A causa dell'acqua, solo i mulini e una piccola parte delle cavità alla fronte sono percorribili, mentre il resto del sistema resta inaccessibile all'esplorazione diretta: sulla sua struttura si possono solo fare ipotesi, aiutandosi con metodi particolari, come, per esempio, l'immissione di traccianti colorati. La visita alle cavità orizzontali che si aprono alla fronte dei ghiacciai, apparentemente priva di rischi, sembrerebbe non richiedere particolari accorgimenti e attrezzature: si tratta spesso, infatti, di ampi ambienti dove è possibile camminare sul substrato roccioso. In realtà non è consigliabile addentrarsi in questi ambienti, in quanto si tratta di strutture che, sottoposte all'enorme spinta della massa del ghiacciaio, possono essere molto instabili.

Crolli di blocchi di ghiaccio e sassi che cadono dalla superficie sovrastante sono frequenti, specialmente nelle ore più calde, pertanto, in mancanza di indicazioni precise o di una guida del posto, è meglio ammirare queste cavità da una certa distanza. Invece, nonostante le apparenze, l'esplorazione dei pozzi glaciali è meno pericolosa, a patto, naturalmente, di possedere un'adeguata attrezzatura e un minimo di conoscenze tecniche. In questo caso, non vengono adottate le usuali tecniche di progressione su ghiaccio verticale (tipo piolet traction), ma si ricorre ad un connubio tra alpinismo e speleologia. Si sale e scende, infatti, appesi a corde di tipo speleologico, con attrezzi tipici della progressione in grotta, mentre dall'alpinismo derivano i chiodi da ghiaccio tubolari e i ramponi e le piccozze corte, che facilitano sia la progressione verticale sia gli spostamenti una volta toccato il fondo. I rischi sono legati all'acqua, che si riversa dall'esterno con notevole portata nei pozzi attivi, e ai sassi che a volte incombono sul bordo. Per questi motivi è opportuno scegliere con cura il periodo dell'anno e l'orario della giornata nei quali scendere, al fine di minimizzare i rischi e rendere più sicura possibile un'attività tanto spettacolare.

## Studio delle grotte nel ghiaccio

Tutto il corpo di un ghiacciaio è in continuo movimento verso valle e trascina in questo suo movimento tutto ciò che vi si trova in superficie e all'interno. Anche i sistemi di grotte glaciali si muovono quindi verso valle insieme al ghiacciaio che le ospita. Studiando i meccanismi di formazione di queste cavità è stato possibile osservare che un nuovo inghiottitoio si forma ogni anno nello stesso punto del ghiacciaio, al di sopra di un punto fisso rispetto al substrato. E' come se in quel punto esistessero particolari condizioni, dovute, per esempio, alle caratteristiche del substrato, che determinano la formazione di un mulino nel ghiaccio che in quel momento viene a trovarvisi. Lo stesso accade per i gorghi e i mulinelli formati dalla corrente di un corso d'acqua: la forma del gorgo è sempre la stessa, così come il punto in cui si forma, ma l'acqua che lo costituisce viene continuamente sostituita. Per questo, pur variando continuamente, le grotte glaciali sono delle strutture stabili, all'interno del ghiacciaio. La distanza che separa un nuovo inghiottitoio da quello formatosi l'anno precedente è giocoforza pari alla velocità di spostamento verso valle del ghiacciaio: la misura della distanza tra mulini allineati è quindi un ottimo e veloce sistema per valutare la velocità di un ghiacciaio. Proprio l'osservazione di mulini allineati da monte verso valle ha permesso di osservare che la velocità non è uguale per tutto il ghiacciaio, ma è come se all'interno del corpo di ghiaccio esistessero zone con flusso differente, più o meno rapido: le distanze tra mulini appartenenti al medesimo allineamento permettono di valutare "a occhio", senza bisogno di complesse misure, le zone più veloci, dove i mulini saranno più distanti tra loro e le zone più lente, dove i mulini sono più ravvicinati.