

Monte Rosa, un libro scritto nel ghiaccio.

Storia e prospettive
di ricerca in alta quota

ICEM MEMORY

Monte Rosa, un libro scritto nel ghiaccio.
Storia e prospettive di ricerca in alta quota

Indice

Monte Rosa: storie di esplorazioni scientifiche F. Burgay (PSI)	7
Leggere il ghiaccio ed i ghiacciai F. de Blasi (ISP-CNR)	11
Memorie di una carota F. Burgay (PSI)	17
Ghiaccio sporco F. Burgay (PSI)	20
Anni di piombo F. Burgay (PSI)	27
Il futuro è tutto da scrivere F. Burgay (PSI)	31
Riferimenti bibliografici	34
Biografie	36
Credits	37

Prefazione

Quando mi sono avvicinato per la prima volta alla scienza delle carote di ghiaccio ero un giovane ricercatore in cerca di ispirazione su quali sarebbero stati i temi di ricerca della propria vita. Inutile dire che rimasi folgorato quando mi trovai agli inizi degli anni '90 sul Colle del Lys, Monte Rosa, per testare un carotiere da ghiaccio che avremmo poi usato in Antartide: un'esperienza travolgente che veniva al momento giusto, visto che nel gruppo di ricerca in cui ero inserito dovevo trovare qualcosa che mi caratterizzasse e indicasse la mia strada futura.

Sino ad allora il gruppo di ricerca si era sempre occupato della contaminazione ambientale delle aree polari, prevalentemente per quello che riguardava l'ambiente marino, ora si apriva per me un nuovo orizzonte.

Di lì a pochi anni una nuova missione sul Monte Rosa, la mia prima a Colle Gnifetti che era già un sito chiave per i pochi gruppi di ricerca impegnati a sviluppare questo campo di ricerca. Ma gli aspetti innovativi mi avevano sempre affascinato e cercavamo così di applicare nuovi metodi di analisi a dei campioni veramente preziosi.

Pensare a come analizzavamo prima di allora i nostri campioni e a quanto abbiamo affinato le tecniche analitiche in questi ultimi decenni, rende evidente il progresso tecnologico e scientifico di cui siamo stati parte integrante.

Da considerazioni come questa è nata l'idea di Ice Memory. Non possiamo prevedere quali strumenti e quali metodologie avranno a disposizione tra qualche decennio i nostri dottorandi, i nostri studenti di oggi. Certamente, non avranno a disposizione la stessa quantità e qualità di materiale da analizzare proveniente dai ghiacciai alpini e montani, rispetto a quello potenzialmente disponibile qualche decennio fa.

Per questo, centri di ricerca di vari paesi hanno deciso di unire le forze oggi, per la conoscenza di domani.

Per questo, Ice Memory è un atto di responsabilità e di fiducia nei confronti delle ricercatrici e dei ricercatori che ci seguiranno.

Il Monte Rosa ha un ruolo centrale in questa sfida. Lo riteniamo al sicuro, ma non possiamo permetterci di perderne un solo metro in più. La missione che tenterà di regalare al futuro una carota di ghiaccio di Colle Gnifetti, quindi, ci offre l'occasione per guardare al passato. In queste pagine, due ricercatori che con rispetto e dedizione saliranno sul ghiacciaio per interrogarne le profondità ci offrono una sintesi di quanto è rilevante conoscere sulla nostra scienza, sulle scoperte fatte, sulla storia che il Colle Gnifetti ci ha già raccontato e sui capitoli che vogliamo scrivere a breve.

Perché, come sempre, se vogliamo comprendere gli scenari che abbiamo di fronte, non possiamo distogliere lo sguardo dal passato.

Carlo Barbante,

direttore dell'Istituto di scienze polari del Consiglio Nazionale delle Ricerche e professore all'Università Ca' Foscari Venezia



Monte Rosa: storie di esplorazioni scientifiche

Fin dagli ultimi anni dell'800, il Monte Rosa e la Capanna Margherita hanno richiamato l'attenzione degli scienziati. Tra i primi a condurre esperimenti scientifici di medicina d'alta quota in questi luoghi è stato il fisiologo piemontese Angelo Mosso che, grazie alle sue ricerche, ha significativamente contribuito all'avanzamento delle conoscenze relative all'adattamento dell'uomo alle alte quote e agli effetti sull'organismo umano del mal di montagna. In anni più recenti, il Monte Rosa e la Capanna Margherita sono stati oggetto di nuove campagne scientifiche tra cui l'estrazione di carote di ghiaccio presso il Colle Gnifetti ed esperimenti all'avanguardia circa la trasmissione del segnale Internet utilizzando dispositivi a basso costo.

Collocata a 4560 metri di altitudine, presso la Punta Gnifetti, la Capanna Margherita è il rifugio più alto d'Europa e il primo laboratorio scientifico d'alta quota mai costruito. Fu infatti realizzata per volere del CAI di Torino e inaugurata il 18 Agosto 1893 alla presenza della regina Margherita di Savoia. Da subito, il Rifugio, forte della sua posizione unica nel panorama internazionale, si rivelò un privilegiato osservatorio scientifico per lo studio di discipline differenti tra cui la fisiologia e la medicina, le scienze ambientali e la fisica dell'atmosfera. Fu proprio in questo luogo che il fisiologo Angelo Mosso, futuro rettore dell'Università di Torino e senatore del Regno d'Italia, iniziò alcuni esperimenti di fisiologia d'alta montagna all'avanguardia. Scienziato poliedrico, Mosso sfruttò l'osservatorio scientifico della Capanna Margherita anche per osservazioni meteorologiche e di fisica terrestre, ma furono gli studi incentrati

sull'adattamento dell'uomo alle alte quote e sugli effetti del mal di montagna che lo portarono a scrivere il volume *La fisiologia dell'uomo sulle Alpi*, pubblicato nel 1897. Gli studi condotti da Mosso valsero il riconoscimento ufficiale della Capanna Margherita da parte del Consiglio Internazionale delle Accademie che, nel 1903, la definì come una "istituzione di utilità scientifica e meritevole di appoggio". Nel corso della sua attività scientifica, Mosso inaugurò un osservatorio al Col d'Olen (2900 m s.l.m.), visitabile anche ai giorni nostri. I risultati delle sue ricerche rivoluzionarono il mondo della fisiologia e, insieme all'istituzione dell'osservatorio, gettarono le basi per l'allestimento di un laboratorio per la selezione degli aspiranti piloti nel corso del primo conflitto mondiale sotto la direzione di un successore di Mosso, Amedeo Herlitzka. L'Istituto Mosso al Col d'Olen fu un punto di riferimento per le osservazioni meteorologiche e

glaciologiche fino a quando un devastante incendio lo distrusse nel 2000. Grazie ad un progetto INTERREG, l'istituto fu ricostruito e, dal 2007, ospita un'importante realtà museale focalizzata sulla divulgazione della storia della ricerca scientifica sul Monte Rosa e sulla didattica climatologica e nivologica.

L'eredità di Mosso è stata raccolta, nella sfera pubblica italiana, dall'Ambulatorio di Medicina di Montagna che, dal 2007, opera all'interno dell'ospedale Umberto Parini di Aosta. Le attività di ricerca svolte dall'ambulatorio e da altri enti associati alla Società Italiana Medicina di Montagna, sono incentrate sullo studio delle reazioni dell'organismo umano in condizioni di ipossia permettendo di comprendere e prevenire, a partire dai dati estrapolati da soggetti sani, l'insorgenza di malattie, come l'ictus o gli infarti.

Per quanto gli studi sulla fisiologia e

medicina siano stati prevalenti negli ultimi anni presso la Capanna Margherita, si sono sviluppati nuovi filoni di ricerca riguardanti le scienze ambientali e la climatologia. A tal proposito, il Colle Gnifetti, collocato qualche centinaia di metri più in basso rispetto alla Capanna Margherita, è ad oggi il sito alpino più studiato a livello internazionale per le ricostruzioni del clima del passato attraverso l'estrazione e la conseguente analisi di carote di ghiaccio. Le attività di ricerca, condotte tra gli altri dal Paul Scherrer Institut (Svizzera), dall'Istituto di Scienze Polari del CNR e dall'Università Ca' Foscari di Venezia, hanno permesso di ricostruire le condizioni ambientali e climatiche degli ultimi 10.000 anni. Più recentemente, altre indagini si sono invece concentrate sulla quantificazione di inquinanti organici persistenti (POPs) e contaminanti radioattivi che, attraverso fenomeni di trasporto a lungo raggio, si

sono depositati sui ghiacciai del Monte Rosa. Sempre in ambito glaciologico, l'Università di Torino è coinvolta insieme a Imageo S.r.l., al Comitato Glaciologico Italiano, al Politecnico di Milano e ad altri partner scientifici internazionali in lavori di monitoraggio per la determinazione dello spessore della copertura glaciale e per la valutazione di eventuali problemi di stabilità a carico della Capanna Margherita. Dal punto di vista ingegneristico, la Capanna Margherita è stata utilizzata per testare l'applicabilità di sistemi di generazione di elettricità con celle a combustibile da parte del Politecnico di Torino. Lo stesso Politecnico, attraverso i laboratori iXemLabs, ha permesso l'installazione di una connessione Wi-Fi presso il Rifugio grazie ad un innovativo sistema di trasmissione del segnale a lunghe distanze utilizzando dispositivi a basso costo. L'installazione, avvenuta

nel 2007, ha delle importanti ricadute sociali in quanto permetterà di portare la connessione Internet in aree remote, tra cui alcune regioni del Sudan (Darfur) e dell'America Latina.

In 128 anni di storia, quindi, la Capanna Margherita ha contribuito attivamente, grazie al suo importante ruolo logistico, al progredire della conoscenza in diverse discipline: dalla fisiologia di montagna con gli studi pionieristici di Mosso, alla climatologia e alle scienze ambientali grazie ai carotaggi avvenuti nel vicino Colle Gnifetti. Si è rivelata inoltre un importante centro per la validazione di tecnologie all'avanguardia tra cui nuovi sistemi *low-cost* per la trasmissione del segnale Internet a grande distanza. Un luogo in cui l'esplorazione alpinistica, che richiama ogni anno centinaia di appassionati, incontra l'esplorazione scientifica: entrambe unite dal desiderio di conoscenza.



Figura 1 - Capanna Osservatorio Rifugio Margherita in una cartolina d'epoca (autorizzazione per la pubblicazione dal possessore dell'originale: cartolinedairifugi.it)

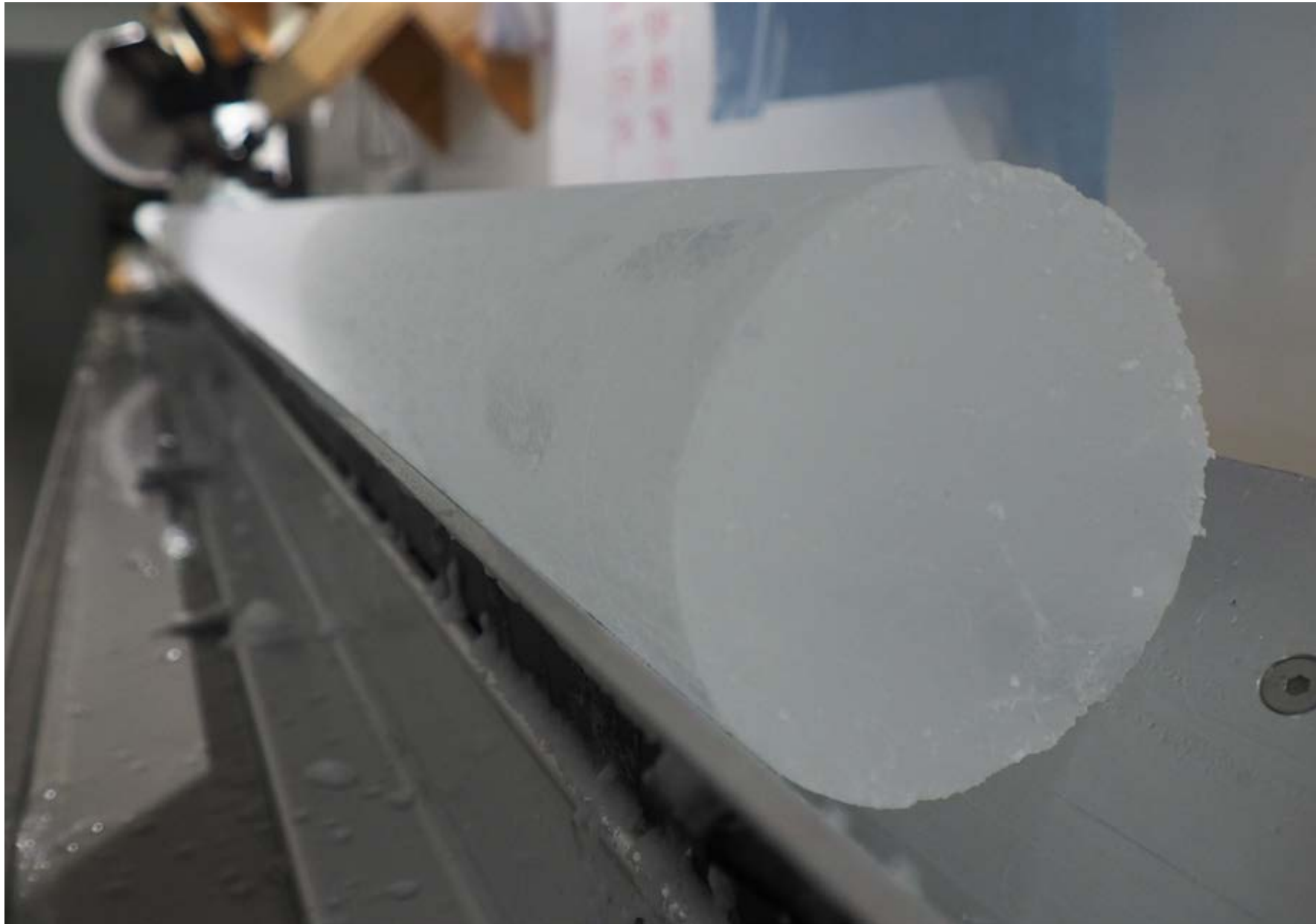


Leggere il ghiaccio ed i ghiacciai

Se pensiamo ad un ghiacciaio come un corpo statico, ci sbagliamo di grosso. Fin dalle prime nevicate che hanno contribuito alla loro formazione, i corpi glaciali sono entità dinamiche, vive, in continuo movimento. In più, nascondono al loro interno preziose informazioni chimiche in grado di raccontarci l'evoluzione del clima e delle condizioni ambientali del nostro Pianeta. Le Alpi rappresentano un luogo privilegiato dove effettuare questi studi

Cos'è un ghiacciaio? E come si forma? Un ghiacciaio è un sistema dinamico, composto di neve, firn, ghiacciaio e di acqua liquida che, purtroppo, negli ultimi decenni, è sempre più presente all'interno del sistema. La formazione di quello che viene definito ghiaccio di ghiacciaio è un processo lento e molto dipendente dalle condizioni climatiche del singolo sito. Se volessimo seguire la vita di un ghiacciaio, dalla sua nascita alla maturità fino alla scomparsa, dovremmo partire dal momento iniziale, dalla prima nevicata che ha dato l'avvio alla formazione di quei giganti di ghiaccio che ancora possiamo ammirare in alcune zone delle Alpi. Immaginatoci allora di essere in un bacino di roccia in alta montagna, e assistere alla prima nevicata di un autunno incipiente. La neve si accumula sullo strato roccioso e, favorita dalle basse temperature, si mantiene. Resiste, quindi, a contatto con l'aria esterna fino alla nevicata successiva, che la ricopre. Immaginatoci ora di assistere a questo continuo accumularsi di strati di neve successivi fino all'inizio dell'estate seguente. Nel corso dei mesi, potremmo vedere accumularsi metri di neve fino a che le calde temperature estive non comincino a intaccare questo cumulo. Ecco quindi che quello che è stato guadagnato durante l'inverno in termini di

spessore nevoso, comincia a perdersi. La neve fonde, si trasforma in acqua e viene trasferita ai torrenti più a valle. Ma siamo in alta quota, e, fortunatamente, anche le calde temperature dell'estate non sono in grado di far fondere l'intero cumulo dell'inverno precedente. A fine settembre, magari prima, la stagione estiva finisce e con essa le temperature ricominciano ad abbassarsi e il cumulo di neve rimasto viene ricoperto dalle prime nevicate del nuovo autunno. Ecco che ci siamo, questo è il primo passo per la formazione di un ghiacciaio: quella neve che si è accumulata in inverno e non viene persa sotto forma di acqua liquida a causa della fusione estiva e viene infine ricoperta dalla neve fresca d'autunno, viene chiamata firn. Pensiamo adesso di assistere a questo processo per dieci anni successivi, potremmo contare dieci diversi tipi di firn, il più vecchio con un'età di 10 anni, e il più giovane di solo 1 anno. Lo strato più vecchio e quindi il più profondo, avrà avuto molto tempo per *trasformarsi* a causa sia del peso della nuova neve che nel tempo lo avrà coperto, sia dei processi di gelo e disgelo che si sono alternati tra le stagioni. Questa vera e propria trasformazione, ha modificato la struttura della neve, che, passando allo stato di firn in cui i fiocchi di neve originali si sono uniti tra loro aumentando



di dimensioni a scapito delle bolle d'aria presenti tra essi, si è ora, dopo un tempo sufficientemente lungo e favorevole, trasformato in ghiaccio di ghiacciaio. Il firn è quindi uno stadio intermedio tra la neve e il ghiaccio. Spingiamoci ora ancora più avanti nel tempo, facciamo passare 100 anni e figuriamoci di osservare

questa colonna di strati accumulatasi nel tempo. Nella parte più profonda avremo il ghiaccio più vecchio, che non è altro che la lenta trasformazione della prima nevicata di quell'autunno di ormai 100 anni prima. Nella parte centrale della colonna troveremo il ghiaccio più giovane via via fino a quello appena formato, e subito

sopra, il firn più vecchio, prossimo alla successiva trasformazione in ghiaccio. Risalendo ancora verso la superficie, troveremo firn sempre più recente fino ad arrivare alla neve fresca caduta appena qualche ora fa. Tutto questo è successo in un singolo punto del nostro bacino in alta quota.

Se si estende l'intero processo a tutta la nostra area in roccia, possiamo immaginare di avere infinite colonne di neve, firn e ghiaccio contigue tra loro, unite, fino a formare un corpo unico, il ghiacciaio. In realtà, possiamo trovare delle differenze tra queste colonne. Infatti, quelle che staranno nella parte più alta, dove fa più freddo, manterranno la neve anche durante l'estate, quelle invece che stanno più in basso, dove fa più caldo, non riusciranno a preservare la neve invernale che verrà quindi fusa completamente durante l'estate. Assistiamo quindi a un disequilibrio delle zone di un ghiacciaio, in quella di accumulo avremmo un continuo avvicinarsi di strati e in quella di ablazione una perdita continua. Il ghiacciaio però, come sistema omogeneo, compensa questo disequilibrio locale trasferendo la massa in eccesso dalla zona in accumulo verso quella di ablazione. Se il trasferimento di massa da monte a valle è maggiore delle perdite, l'intero ghiacciaio si espanderà aumentando la sua superficie e il suo volume. Nel caso in cui, le perdite di massa nella parte inferiore saranno maggiori degli accumuli a monte, il ghiacciaio si ritirerà, diminuendo la sua estensione e quindi il suo volume. Purtroppo, quest'ultima è la situazione di quasi tutti i ghiacciai alpini, se non mondiali. È il declino e la morte di un ghiacciaio, la scomparsa di tutte quelle colonne accumulate negli anni, fino all'ultima, la più profonda. Lo studio delle *carote di ghiaccio*, non è altro che l'analisi di una di quelle colonne di un punto preciso di un ghiacciaio. Selezionato con cura il sito di prelievo, le analisi dei singoli strati della carota di ghiacciaio sono in grado di fornirci informazioni sul passato, sulla storia di quel ghiacciaio e del clima (locale o regionale) che ha influenzato la composizione del fiocco di neve che nel tempo si è trasformato in ghiaccio e non è andato perduto.



Ghiacciaio Gorner

Il Ghiacciaio Gorner è il secondo ghiacciaio più esteso dell'arco alpino. Con un'area di circa 40 km², si estende dai 2190 m fino ai 4600 m s.l.m. A fronte della sua estensione, nel 2017 è stato calcolato un volume di circa 4.9 km³. Grazie alla quota media particolarmente elevata, la localizzazione su versanti settentrionali e i volumi in gioco, il ghiacciaio Gorner rappresenta un esempio meno negativo di riduzione della massa glaciale. Infatti, dalla fine della Piccola Era Glaciale (PEG), avvenuta a metà del XIX secolo, i ghiacciai alpini hanno perso mediamente il 65% della loro area. Durante il medesimo periodo, il Gorner ha registrato una diminuzione di circa il 40% della sua area a seguito di un ritiro della sua fronte pari a circa 3.3 km. La causa principale di tale arretramento è da imputarsi all'aumento delle temperature. Ricostruzioni di serie storiche di temperatura dal 1860 ad oggi a 4200 m di quota in un'area glaciale limitrofa al Gorner, hanno evidenziato un aumento

delle temperature medie estive di 0.7 °C dal 1900 al 1984 e un aumento di circa 2.0 °C dal 1985 al 2020 rispetto alla media della seconda metà del XIX secolo. Tuttavia, nonostante le condizioni di sofferenza del ghiacciaio, il Gorner rappresenta ancora un ottimo sito per l'estrazione di carote di ghiaccio. Nella parte sommitale, a circa 4500 m s.l.m., è presente un plateau glaciale denominato Colle Gnifetti, con uno spessore di circa 80 m tra neve, firn e ghiaccio. Grazie alle favorevoli condizioni locali, al Colle Gnifetti il ghiaccio accumulato nel corso dei secoli non è ancora stato intaccato dall'acqua di fusione superficiale mantenendo così intatte le caratteristiche originarie dei singoli strati. Ghiacciai come il Gorner sono sempre più rari nel panorama alpino e rappresentano le ultime chance per la collezione di carote di ghiaccio non ancora corrotte dal cambiamento climatico e in grado di fornire preziose informazioni sulla storia del nostro clima.

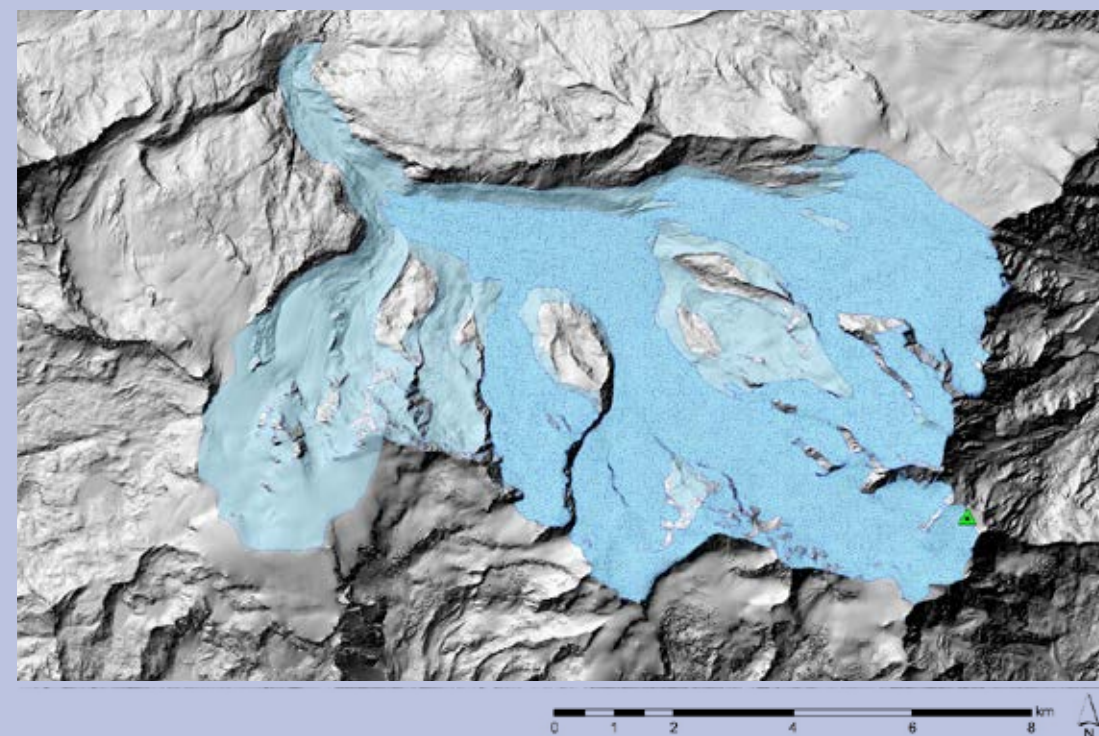


Figura 2: Estensioni del Ghiacciaio Gorner: in azzurro chiaro i confini del ghiacciaio nel 1850 (65.4 km²), in azzurro più scuro l'estensione nel 2015 (40.1 km²). Il triangolo verde rappresenta il Colle Gnifetti, il sito di estrazione delle carote di ghiaccio a 4500 m s.l.m. (Grafica: F. De Blasi)

Memorie di una carota

Le prime carote di ghiaccio vennero estratte durante la Guerra Fredda dapprima in Groenlandia e successivamente in Antartide. La loro analisi permise di ottenere un primo spaccato sul passato climatico del nostro pianeta. Negli anni successivi, sono state estratte carote di ghiaccio anche dai ghiacciai alle più basse latitudini che, insieme all'avanzamento delle tecniche di indagine scientifica, hanno permesso di migliorare le nostre conoscenze sul sistema Terra.

La Guerra Fredda, in alcune aree del pianeta era più fredda che altrove. In un'area remota della Groenlandia del Nord, a circa 220 km di distanza da Thule, l'esercito americano installò tra il 1958 ed il 1959 la prima stazione artica mai costruita al di sotto del ghiaccio: Camp Century. L'obiettivo ufficiale di Camp Century era quello di valutare diverse tecniche di costruzione sul plateau groenlandese, così come effettuare delle indagini scientifiche circa le proprietà fisiche della neve e del ghiaccio. Inoltre gli americani dovevano anche testare la capacità di adattamento e reazione in un ambiente così ostile in caso di attacco militare da parte dell'Unione Sovietica. In un ambiente in cui le temperature medie annue si aggiravano intorno ai -24°C , il campo era dotato di ogni comfort. Un reattore nucleare da 1.5 MW produceva l'energia necessaria per le attività di ogni giorno nei 32 edifici scavati nella neve che includevano: uffici, stazione radio, garage, negozi, ospedale, centro fitness, mensa, cinema, una biblioteca, una chiesa e diversi bar. Le strutture erano collegate le une alle altre da gallerie che confluivano tutte in una "via principale". Fu in questi ambienti che, tra il 1963 ed il 1966 venne estratto il primo cilindro di ghiaccio profondo della storia. Gli scienziati definiscono queste porzioni

cilindriche, "carote" e quella di Camp Century era profonda 1390 metri. Grazie all'intuizione dello scienziato danese Willi Dansgaard, questa lunga carota di ghiaccio fu analizzata nella sua interezza e fu proprio così che nacque una nuova disciplina: l'analisi chimica delle carote di ghiaccio. Se, grazie alle attività di carotaggio condotte a Camp Century, Dansgaard si concentrò sull'analisi degli isotopi stabili per ricostruire le variazioni di temperatura degli ultimi 100.000 anni, nei successivi decenni le carote di ghiaccio furono studiate per una grande varietà di parametri da scienziati di tutto il mondo: il contenuto dei gas intrappolati nel ghiaccio ha permesso di ricostruire le variazioni di anidride carbonica, metano e altri gas serra nel corso delle centinaia di migliaia di anni, la composizione chimica del ghiaccio è servita a ricostruire altri aspetti della chimica dell'atmosfera terrestre del passato, la polvere ci ha permesso di scoprire la frequenza e l'intensità di tempeste di sabbia, mentre l'acidità del ghiaccio insieme ad altri elementi come i solfati ed il ferro, ci hanno dato uno spaccato sulle attività vulcaniche del passato evidenziando le loro importanti conseguenze nel raffreddare il clima terrestre. Da Camp Century, che fu completamente abbandonato nel 1967,



numerose altre spedizioni scientifiche sono state organizzate. La carota di ghiaccio successiva venne estratta in Antartide, a Byrd Station e, attraverso l'analisi degli isotopi stabili, fu possibile evidenziare similitudini e differenze in termini di temperatura tra l'emisfero Nord e l'emisfero Sud. Le principali differenze si osservarono tra 25 e 80 mila anni fa, in piena glaciazione, quando le temperature in Groenlandia aumentarono anche di una decina di gradi nel giro di qualche decennio. Queste anomalie climatiche, che si verificarono per più di 20 occasioni, anche se con intensità variabile, presero il nome di eventi Dansgaard-Oeschger dai suoi scopritori e sono, a tutt'oggi, uno dei grandi misteri irrisolti della paleoclimatologia. Dalle prime indagini glacio-chimiche avvenute tra la fine degli anni '60 e gli inizi degli anni '70, i progetti di carotaggi profondi si moltiplicarono sia in Groenlandia che in Antartide. Tra i più importanti, vi sono NEEM (in Groenlandia), che ha permesso di ricostruire il passato climatico dell'emisfero boreale degli ultimi 120.000 anni e EPICA (in Antartide) che ci ha descritto un clima che negli ultimi 800.000 anni è oscillato per ben otto volte tra periodi glaciali (più freddi e con concentrazioni di anidride carbonica intorno alle 280 ppm—oggi la concentrazione è superiore alle 400 ppm) e periodi interglaciali (più caldi, con concentrazioni di anidride carbonica che non hanno superato le 300-320 ppm) con una ciclicità di circa 100.000 anni. Attualmente sono in corso progetti di carotaggio in Groenlandia (East Grip) e in un prossimo futuro comincerà la più imponente campagna di carotaggio mai realizzata in Antartide: Beyond Epica, un progetto, finanziato dall'Unione Europea, che si pone l'obiettivo di ricostruire il clima del passato degli ultimi 1.5 milioni di anni. Una sfida scientifica e tecnologica che terrà paleoclimatologi ed ingegneri impegnati per il prossimo decennio.

I siti polari, grazie alle loro basse temperature durante tutto l'anno e alla loro elevata profondità (fino a 3 km), sono ideali per ricostruire il clima del passato a livello globale o emisferico. Tuttavia falliscono nel tentativo di ricostruire eventi a scale spaziali inferiori, ad esempio legati a fonti locali di inquinamento. In quest'ottica i siti alpini, meno profondi e con un'estensione temporale più limitata (una carota prelevata dal Colle Gnifetti ad esempio copre gli ultimi 10.000 anni di storia) risultano particolarmente adatti e permettono di identificare con un elevato grado di dettaglio spaziale, l'impatto ambientale delle attività antropiche o, attraverso l'analisi dei pollini, monitorare la variabilità temporale delle colture. Si tratta di archivi di ghiaccio complementari a quelli polari e, visto che si trovano a latitudini inferiori, decisamente più a rischio di fusione con conseguente mescolamento e perdita dell'informazione climatica che custodiscono. Un patrimonio scientifico, culturale e storico da salvaguardare e proteggere.



Figura 3: Una ripresa aerea di Camp Century (Credits: US Army)



Ghiaccio sporco

Gli elementi o molecole che si possono analizzare nel ghiaccio sono innumerevoli ed ognuno di essi contiene delle informazioni preziose per la comprensione del sistema climatico ed ambientale. Il sito del Colle Gnifetti è stato molto studiato relativamente ad alcuni inquinanti risultando così un osservatorio scientifico libero, indipendente e privilegiato per la valutazione dell'impatto antropico sull'ambiente.

A meno di dieci anni di distanza dal carotaggio di Camp Century, anche i ghiacciai alle più basse latitudini iniziarono ad attirare l'interesse della comunità scientifica. Le Alpi, ad esempio, rappresentano un "serbatoio" naturale di ghiaccio, con più di 5100 corpi glaciali per una superficie complessiva di circa 1600 km² al 2017. Tuttavia, nonostante questa grande abbondanza, il numero di ghiacciai effettivamente utili ai fini paleoclimatici si riduce drasticamente. In effetti, un ghiacciaio per poter essere utilizzato a tali scopi deve soddisfare alcuni requisiti fondamentali, tra cui: a) un buon accumulo durante il periodo invernale ed una scarsa fusione, o ablazione, durante il periodo estivo; b) una generale assenza di deformazioni e quindi movimenti di massa al sito di perforazione e c) una profondità tale da permettere di estrarre ghiaccio sufficientemente vecchio e freddo, ossia non intaccato dall'acqua di fusione superficiale, per permettere valutazioni di carattere paleo-ambientale. Se la maggioranza dei siti polari soddisfa tutte le caratteristiche sopraelencate, purtroppo lo stesso non vale per i ghiacciai alpini. In effetti, molti di essi si trovano a quote interessate da forti fenomeni di fusione durante il periodo estivo il che implica un mescolamento dell'informazione climatica

contenuta nella neve con conseguente impossibilità di ricostruire la variazione dei parametri chimici nel corso degli anni. Inoltre, molti di essi sono caratterizzati da movimenti relativamente elevati su tutte le differenti zone del ghiacciaio che impediscono l'ottenimento di una stratigrafia ben conservata e definita. In ultimo, anche qualora tutti i criteri di cui sopra venissero rispettati, i ghiacciai potrebbero non essere sufficientemente profondi e freddi per poter ricostruire le condizioni ambientali precedenti a quelle di un secolo fa. La presenza di ghiaccio freddo, infatti, è strettamente legata alla quota e all'esposizione di un ghiacciaio; se sui versanti nord è possibile trovare ghiaccio freddo già sopra i 3400 m.s.l.m., su quelli esposti a sud la probabilità di trovare ghiaccio freddo sotto i 4200 m s.l.m. è pressoché nulla. Dalla rosa di più di 5000 candidati, quindi, il cerchio si restringe drammaticamente a qualche decina. Il Colle Gnifetti, insieme al Col du Dome, al Fiescherhorn e a pochi altri, è forse il miglior sito alpino dove effettuare indagini paleoclimatiche considerando la sua quota, l'età massima raggiungibile (circa 10.000 anni fa), la presenza di un plateau con scarsi movimenti di massa e la relativa facilità di accesso che può trarre vantaggio della presenza della vicina

Capanna Margherita. Per questi motivi, al Colle Gnifetti sono state prelevate più di 10 carote di ghiaccio negli ultimi 30 anni rendendo questo sito tra i più studiati in assoluto sull'arco alpino. Quando si tratta di studiare una carota di ghiaccio, la prima sfida che si pone dinanzi ai ricercatori è quella della datazione, vale a dire l'associazione di una profondità ad un determinato periodo. Ciò è fondamentale per una corretta interpretazione del record climatico, così come per effettuare confronti con carote prelevate altrove. Al fine di ottenere una precisa datazione, esistono differenti tecniche che si distinguono in "relative" e "assolute". La datazione relativa si basa sul principio per cui alcuni ioni, come il calcio (Ca²⁺) o l'ammonio (NH₄⁺), tendono ad essere più concentrati durante il periodo primaverile-estivo. Pertanto, "contando" il numero di volte in cui questi elementi raggiungono un valore massimo di concentrazione si riesce ad andare a ritroso nel tempo. Validi alleati in questo processo di datazione relativa sono gli isotopi stabili, gli stessi che analizzò Dansgaard dalla carota di Camp Century. In effetti, un arricchimento di isotopi pesanti ($\delta^{18}\text{O}$ verso valori meno negativi), corrisponde a temperature più elevate, quindi estive. Analogamente al calcio e

all'ammonio, quindi, anche gli "isotopi di Dansgaard" possono essere utilizzati per contare manualmente gli anni e datare una carota. Questa metodologia, però, può essere utilizzata soltanto per le porzioni più superficiali del campione di ghiaccio. Infatti, all'aumentare della profondità, il ghiaccio viene compresso dagli strati superiori con diverse conseguenze: la prima è che si perde la possibilità di contare i picchi di calcio, ammonio e degli isotopi stabili (quindi la datazione relativa non è più possibile), la seconda, collegata alla prima, è che la risoluzione temporale andrà a diminuire. In altre parole, se in un metro di ghiaccio superficiale era compresso un anno, negli strati più profondi in un metro di ghiaccio si possono racchiudere secoli. Nel caso del Colle Gnifetti, su una profondità complessiva di 80 metri, nei primi 60 metri si riesce a trovare un'informazione climatica risalente fino a 300 anni fa, mentre negli ultimi 20 si arriva fino a 10.000 anni fa. I metodi assoluti hanno come obiettivo quello di identificare degli orizzonti temporali ben definiti che servono come *checkpoint*, o punti di controllo, per le datazioni relative. Tra questi orizzonti troviamo le eruzioni vulcaniche (ad esempio il Laki nel 1783), l'orizzonte di trizio, legato agli esperimenti nucleari in



atmosfera (1963) e gli orizzonti di polveri sahariane (1977, 1937 e 1901 ad esempio), tutti riconoscibili grazie ad una precisa impronta chimica. Negli ultimi anni è stata messa a punto un'innovativa metodologia al Paul Scherrer Institut e all'Università di Berna per la datazione delle carote di ghiaccio attraverso il carbonio-14: una metodologia "assoluta" che permette di caratterizzare anche gli strati più profondi.

È grazie a questa tecnica che sappiamo che il ghiaccio profondo al Colle Gnifetti ha circa 10.000 anni. Le carote del Colle Gnifetti sono state analizzate per diversi elementi chimici e molecole, col fine principale di ricostruire l'impatto ambientale delle attività umane. I solfati, SO_4^{2-} , sono prodotti dall'ossidazione di SO_2 , un inquinante emesso dalla combustione di combustibili

fossili tra cui carbone e petrolio. Le analisi condotte sul Colle Gnifetti hanno permesso di ricostruire l'evoluzione di questo ione dal periodo pre-industriale (1760) ad oggi, evidenziando come, dall'inizio del XX secolo le concentrazioni siano aumentate fino a raggiungere un picco tra il 1963 ed il 1981. Questo aumento di più di 10 volte rispetto al periodo pre-industriale nella concentrazione di solfati dimostra come,

le attività economiche e la combustione di carbone e petrolio, prevalentemente dalle regioni della Svizzera, Francia e Germania dell'Ovest, abbiano avuto un impatto rilevante anche alle alte quote del Colle Gnifetti. L'alto grado di dettaglio dell'informazione climatica custodita nel ghiaccio del Colle Gnifetti permette di osservare da vicino come è cambiato l'impatto

ambientale a cavallo tra le due guerre mondiali e al termine della seconda. Negli anni immediatamente successivi alla Prima e Seconda Guerra Mondiale, la concentrazione dei solfati diminuì significativamente per poi riprendere un trend di crescita a partire dal 1955. Un comportamento che ben rappresenta sia le condizioni di stagnazione economica registrate in seguito ad entrambi i conflitti, sia la successiva rapida crescita economica che ha caratterizzato il continente europeo a partire dagli anni '60 del Novecento. Un altro indicatore che conferma questa

interpretazione è rappresentato da una classe di inquinanti organici persistenti, gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) che si generano prevalentemente in seguito a processi di combustione. Attraverso un'analisi di altri campioni provenienti dal Colle Gnifetti, si è osservato un forte calo nella concentrazione di questi contaminanti al termine della Prima Guerra Mondiale a causa della crisi economica e del rallentamento dei processi produttivi. Intorno alla metà degli anni '30, la ripresa economica sul continente Europeo ha portato ad un

iniziale raddoppio delle concentrazioni di idrocarburi policiclici aromatici rispetto al periodo precedente, per poi contrarsi nuovamente di circa 5 volte in seguito al rallentamento dell'economia europea al termine del secondo conflitto mondiale. A questo calo, seguì una rapida crescita fino al 1975 ricalcando gli anni del *boom* economico. Ad oggi, la concentrazione di idrocarburi policiclici aromatici sta nuovamente aumentando verosimilmente a causa del ricorso sempre più frequente alla combustione di biomasse che, oltre ad emettere IPA in atmosfera, provoca l'immissione di grandi quantità di polveri sottili e diossine. Tali evidenze, rimarcate anche dai più recenti rapporti dell'Istituto Superiore per la Protezione dell'Ambiente, suggeriscono l'urgenza di adottare politiche ambientali più stringenti, specialmente in ambito di riscaldamento domestico. Da questo punto di vista, quindi, i ghiacciai alpini si rivelano importanti strumenti indipendenti per il monitoraggio della qualità ambientale dai quali è possibile non solo studiare e ricostruire il passato climatico del nostro pianeta, ma anche valutare l'efficacia delle politiche ambientali intraprese a livello di singolo paese e di Comunità Europea. Analogamente ai solfati, vi sono altre due sentinelle ambientali che sono state analizzate nel ghiaccio del Colle Gnifetti: i nitrati (NO_3^-) e lo ione ammonio (NH_4^+). I primi derivano dai gas NO_x , emessi principalmente dal traffico veicolare. Dopo aver raggiunto un massimo in termini di concentrazione intorno agli anni '80, sono lentamente calati grazie all'introduzione di marmitte catalitiche nelle automobili e di appositi filtri negli impianti industriali. L'ammonio si forma in atmosfera a partire dall'ammoniaca, un gas emesso principalmente dall'allevamento di animali e dai fertilizzanti. Tra il 1973 ed il 2003 la concentrazione di ammonio nel ghiaccio ha registrato un'ulteriore crescita indicando come il problema ambientale legato

alle pratiche agricole sia ancora lontano dall'essere risolto. Se la Guerra Fredda ci ha regalato la prima carota di ghiaccio della storia, ha anche lasciato un'indelebile impronta nel ghiaccio. Tra gli anni '50 ed il 1963, furono infatti più di 500 i test nucleari condotti in atmosfera da USA e USSR, alcuni dei quali, come l'esplosione della bomba termonucleare Tsar, con un impatto ambientale devastante. Una delle conseguenze principali di questi test è stata quella di contaminare in maniera irreversibile i siti in cui sono stati fatti esplodere gli ordigni (es. poligono nucleare di Semipalatinsk nell'odierno Kazakistan o le regioni desertiche del Nevada). L'analisi di carote di ghiaccio prelevate a grande distanza dai siti di test (come il Colle Gnifetti) ha evidenziato la dimensione globale di questi eventi. Nel ghiaccio, infatti, è possibile riconoscere uno strato di plutonio direttamente collegabile ai test effettuati dalle allora superpotenze in atmosfera. Una traccia indelebile che dovrebbe far riflettere sull'impatto globale dei test nucleari.

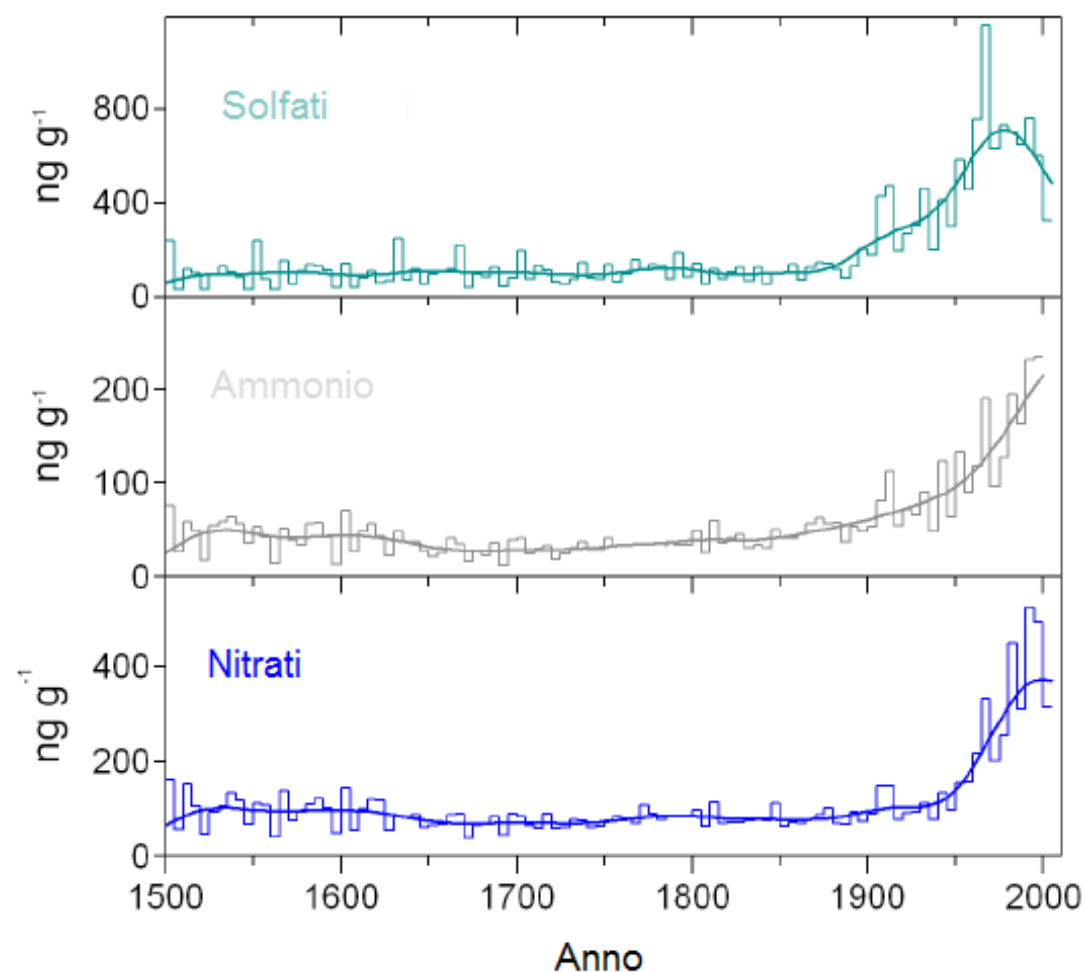


Figura 4: Profilo di concentrazioni di alcuni inquinanti indagati al Colle Gnifetti: solfati, ammonio e nitrati (Grafica: Margit Schwikowski)



Anni di piombo

Clima e società sono da sempre legate da un nesso indissolubile: le grandi civiltà del passato hanno prosperato grazie a condizioni climatiche favorevoli, mentre diverse crisi economiche e sociali si sono verificate durante un loro peggioramento. Le carote di ghiaccio sono per scienziati e storici un archivio di informazioni dal valore incalcolabile permettendo, da un lato, la ricostruzione delle temperature e delle condizioni ambientali del passato e, dall'altro, offrendo una visione complementare alle fonti storiche tradizionali circa l'evoluzione delle società nel corso dei secoli.

I materiali che ci circondano sono fatti di plastica: dalla tastiera del computer, alla penna che utilizziamo fino ai vestiti che indossiamo. La plastica è ubiquitaria e la sua invenzione ha di fatto rivoluzionato l'umanità entrando nella nostra quotidianità. Un elemento per certi versi "simile", per via del fatto che veniva usato per gli scopi più vari, è stato il piombo. In epoca romana, infatti, il piombo che veniva estratto come sottoprodotto dell'argento e dell'oro, trovava applicazione in moltissimi oggetti di uso comune: dalle condutture per l'acqua alle urne cinerarie passando per la produzione delle monete fino ad alcuni impieghi nell'edilizia dove, una volta fuso, poteva essere impiegato nella saldatura dei blocchi di pietra. Ciò che i romani ignoravano, anche se alcuni iniziarono a sospettarlo, era che il piombo aveva delle proprietà particolarmente tossiche per l'uomo e poteva causare ritardo mentale nei bambini oppure ridurre la fertilità.

Analogamente alla plastica, la cui scarsa biodegradabilità e una precaria cultura del riuso hanno determinato un devastante impatto sull'ambiente, il massiccio utilizzo di piombo da parte dei Romani fu forse il primo esempio di inquinamento ambientale della storia dell'uomo. Infatti, una parte del piombo estratto veniva inevitabilmente dispersa nell'atmosfera e trasportata a grandi distanze. Studi recenti hanno evidenziato come durante i periodi di maggiore prosperità e ricchezza dell'impero romano, la nota *Pax Romana*, la concentrazione di piombo nel ghiaccio delle regioni polari (Groenlandia) e alpine (Colle Gnifetti e Col du Dome) raggiunse valori massimi per quell'epoca rimarcando da un lato il periodo economicamente florido e dall'altro la dimensione continentale dell'inquinamento. Il ghiaccio del Colle Gnifetti custodisce molto bene l'impronta delle attività minerarie operate durante l'epoca romana

anche grazie alla prossimità di diverse miniere d'oro come quelle della Valsesia e della Valle Anzasca, che, nei periodi di maggiore produzione, arrivarono ad impiegare fino a 5.000 schiavi. Considerando che le rocce di quelle aree possiedono un quantitativo naturale di piombo circa 250 volte superiore rispetto alla media della crosta terrestre, non c'è da stupirsi se, proprio negli anni di massima prosperità dell'impero romano, quando cioè le attività di estrazione dell'oro (e di conseguenza di piombo) raggiunsero l'apice, si siano rilevate delle concentrazioni elevate di questo elemento nei ghiacci del Monte Rosa. Il forte intreccio tra prosperità economica e piombo nel ghiaccio si manifestò anche in occasione della caduta dell'impero romano: il collasso delle attività economiche portò ad una riduzione delle attività estrattive, quindi anche di emissioni di piombo in atmosfera. Successivamente, quando l'economia ripartì, come ad esempio durante il Rinascimento, lo stesso fece la concentrazione di questo metallo nel ghiaccio.

La storia del piombo nelle carote di ghiaccio si carica di fascino specialmente quando riesce ad essere complementare alle ricostruzioni storiche ottenute grazie alle fonti tradizionali. Un esempio molto significativo, e per certi versi attuale, è l'epidemia di peste del Trecento, nota anche come la Peste Nera. Durante quella pandemia di peste bubbonica, tra il 30 ed il 50% della popolazione europea morì. Uno studio effettuato sul Colle Gnifetti ha registrato quell'evento. In effetti, proprio in quegli anni i ricercatori hanno osservato una profonda diminuzione della concentrazione di piombo nel ghiaccio e l'hanno messa in relazione con l'interruzione quasi totale delle attività economiche, quindi anche estrattive. Il legame tra pandemia, economia e ambiente non dovrebbe stupirci, considerando l'esperienza che abbiamo maturato in occasione della crisi sanitaria

che ancora stiamo vivendo. Se oggi, infatti, la forte limitazione della mobilità di superficie e del trasporto aereo hanno contribuito significativamente alla riduzione temporanea di emissioni di gas serra in atmosfera, analogamente, nel Trecento, il collasso delle società, delle popolazioni e delle economie europee dovuto alla pandemia di peste, ha determinato una contrazione del 70% della concentrazione di piombo nel ghiaccio rispetto ai periodi precedenti e immediatamente successivi. Va tuttavia sottolineato che questo risultato, per quanto interessante, necessita di ulteriori conferme che potrebbero arrivare proprio dalle carote di ghiaccio estratte in occasione della campagna di carotaggio del 2021.

Quella della Peste Nera non è però soltanto una storia di piombo e di attività minerarie. Le carote di ghiaccio, ed in particolare quella del Colle Gnifetti, ci possono raccontare molto altro. Questi archivi climatici, oltre a preservare l'informazione chimica del passato del nostro pianeta, custodiscono al loro interno anche delle particelle, tra cui i pollini. Attraverso una loro analisi è quindi possibile ricostruire la tipologia di piante che cresceva in una determinata regione e capire come si siano evolute le colture nel corso dei secoli. Negli anni della pandemia di peste, il clima europeo stava cambiando. Si stava infatti entrando in quella che passò alla storia come Piccola Era Glaciale che si protrasse fino a metà del 1800. La riduzione delle temperature aveva già causato profonde carestie nel continente e, si ipotizza, favorì le condizioni ideali per la proliferazione della malattia. I pollini conservati nel ghiaccio del Colle Gnifetti raccontano questa transizione climatica. Le condizioni fino al 1250 erano infatti caratterizzate dalle miti temperature dell'*Optimum Medievale*, un periodo che favorì il progredire delle tecniche agricole e che trova riscontro nella prevalenza



di pollini di erba e di alcune spore fungine originate dal letame. In seguito, l'irrigidimento delle temperature e l'arrivo della Peste Nera, determinarono un crollo nella concentrazione di pollini ad indicare il collasso dell'agricoltura e il sopraggiungere di carestie. L'unione di queste informazioni con quelle archivistiche conferisce alle carote di ghiaccio una rilevanza non solo scientifica, ma anche culturale che deve essere a maggior ragione tutelata e salvaguardata dal riscaldamento globale. Tornando al piombo, ha tutta un'altra origine quello che ha contaminato le nevi perenni del Monte Rosa (e non solo) tra la fine della Seconda Guerra Mondiale ed il 1975. In quegli anni infatti si utilizzava un additivo antidetonante nelle benzine, il piombo tetraetile. L'utilizzo di queste *benzine super* portò all'immissione in atmosfera a livello europeo di circa 40.000

tonnellate di piombo all'anno tra il 1960 ed il 1970. In seguito alla decisione di ridurre il contenuto di piombo da 0.4 g/L a 0.15 g/L, anche le emissioni si ridussero fino al pressoché azzeramento avvenuto in seguito alla ratifica del Protocollo di Aarhus sui metalli pesanti del 1998. In seguito a queste azioni e ad altre stringenti politiche ambientali, in Italia le emissioni di piombo si sono ridotte del 94%, passando dalle circa 4.000 tonnellate nel 1990 alle 11 nel 2013 (ISPRA). Si può quindi dire che gli anni di piombo sono definitivamente alle spalle.



Un futuro tutto da scrivere

Mandare una mail agli inizi degli anni 2000 non era semplice come lo è oggi. Bisognava avere un computer e staccare la linea telefonica per potersi connettere ad Internet. Un passato talmente obsoleto e lontano che probabilmente ce lo siamo già dimenticato.

Lo studio delle carote di ghiaccio ha vissuto un'evoluzione simile. Se si confrontano le moderne tecniche di indagine con quelle a disposizione dei ricercatori meno di un quarto di secolo fa, ci si rende immediatamente conto di quali siano stati gli incredibili progressi scientifici compiuti. Progressi che hanno permesso di migliorare la nostra conoscenza sul funzionamento del sistema Terra e comprendere come questo possa evolversi in un contesto di cambiamento climatico. Tra le innovazioni più significative, vi sono quelle relative allo studio delle molecole organiche, impossibile fino ad inizio XXI secolo a causa della loro bassissima concentrazione nel ghiaccio, e la quantificazione di elementi chimici. Se, infatti, fino a metà anni '90 gli elementi che potevano essere analizzati simultaneamente erano pochi e l'analisi di un singolo campione poteva richiedere fino a quattro ore di lavoro, oggi lo stesso campione può essere analizzato per trenta o più elementi in contemporanea in appena un paio di minuti.

Questa inarrestabile evoluzione di nuove metodologie di indagine si scontra però con la precarietà degli archivi di ghiaccio. In effetti, indipendentemente dagli scenari climatici, entro la metà di questo secolo circa il 60% del volume di tutti i ghiacciai alpini sarà scomparso e con esso anche

la preziosa e unica informazione climatica ivi conservata. In questo contesto, il progetto Ice Memory si pone l'obiettivo di "salvare" questo patrimonio di ghiaccio per custodirlo in un frigorifero naturale, l'Antartide, per le future generazioni di scienziati. Sarà infatti grazie alle loro intuizioni e al progresso della tecnica che, attraverso appositi bandi internazionali, questo ghiaccio potrà essere nuovamente a disposizione della comunità per poter effettuare scoperte oggi semplicemente impossibili.

A dimostrazione di come la ricerca scientifica in ambito chimico-ambientale, paleoclimatico e biologico stia vivendo un periodo particolarmente fertile, riportiamo alcuni esempi di ricerche in corso di svolgimento presso l'Università Ca' Foscari di Venezia, l'Istituto di Scienze Polari del CNR (ISP-CNR) ed il Paul Scherrer Institut (PSI) i cui sviluppi futuri potrebbero beneficiare dell'azione di Ice Memory. La chimica, la biologia ed il vulcanesimo si intrecciano all'intelligenza artificiale nel progetto IceLearning, di cui Niccolò Maffezzoli, ricercatore presso l'Università Ca' Foscari di Venezia, è il *principal investigator*. Il progetto, che ha ricevuto i finanziamenti dall'Unione Europea nell'ambito delle Marie-Skłodowska Curie *fellowships*, ha l'obiettivo di identificare in maniera automatica e simultanea le particelle custodite nel ghiaccio (polveri atmosferiche, ceneri vulcaniche, pollini, micro-organismi...) attraverso l'utilizzo di un microscopio e di algoritmi di *machine learning*. La metodologia non solo ridurrà considerevolmente i tempi di analisi, ma permetterà di studiare particelle finora

sconosciute o scarsamente indagate. *“Un’interessante applicazione potrebbe essere quella di identificare e studiare le diatomee,”* spiega Niccolò *“minuscole alghe provenienti da laghi e oceani che vengono trasportate e depositate sui ghiacciai dal vento. La loro identificazione tassonomica e lo studio di come le varie specie siano evolute nel corso dei secoli o dei millenni potrebbe aprire interessanti orizzonti di ricerca”*.

Interessata alle particelle è anche Beatrice Rosso, dottoranda in Scienze Ambientali all’Università Ca’ Foscari di Venezia. La sua ricerca, coordinata dalla dott.ssa Fabiana Corami del ISP-CNR verte sullo sviluppo di una nuova metodologia per la determinazione e quantificazione di microplastiche con un diametro inferiore ai 100 µm nel ghiaccio e nella neve. *“Ad oggi manca una vera e propria procedura standardizzata per l’analisi delle microplastiche nella neve e nel ghiaccio”* ci racconta. Un problema che rende il confronto tra siti e analisi differenti molto complesso. *“Ho recentemente ottenuto dei finanziamenti dallo Svalbard Science Forum per la realizzazione del progetto MICRONESIA (sMall mICROplastics in sNow and aErosol in Svalbard IslAnds) che ha l’obiettivo di identificare le strategie migliori per il campionamento e di comprendere i fenomeni di trasporto a lungo raggio delle microplastiche in ambienti remoti come quelli polari”*. Lo sviluppo di nuove metodologie analitiche richiede però diversi anni per la loro validazione: *“Il fattore tempo è decisivo, soprattutto se si pensa ad un’applicazione di questi metodi sulle carote di ghiaccio”* conclude Beatrice. *“Per questi motivi, l’azione di salvaguardia promossa da Ice Memory potrebbe essere funzionale ai nostri studi in quanto ci permetterebbe di avere a disposizione degli archivi climatici ancora integri dai quali ricostruire i flussi atmosferici delle microplastiche, identificarne le sorgenti e, in ultimo, suggerire l’adozione di politiche*

ambientali atte alla riduzione di questo tipo di contaminazione”.

Un settore disciplinare in rapida ascesa negli ultimi anni è quello legato all’analisi delle molecole organiche. In effetti, gli studi che mirano ad una loro quantificazione nella neve e nel ghiaccio sono pochi e limitati ad una selezione ristretta di molecole. Ed è da questo presupposto che è stato ideato dalla Prof.ssa Margit Schwikowski del PSI, il progetto *Organics in Ice*, finanziato dalla Swiss National Science Foundation. *“Ritengo che le molecole organiche siano la nuova frontiera della chimica analitica applicata alle carote di ghiaccio”* afferma François Burgay, post-doc presso il PSI. *“Si tratta di un vero e proprio universo largamente inesplorato che potrebbe aiutarci a ricostruire meglio alcune condizioni climatiche del passato contribuendo significativamente al miglioramento degli attuali modelli climatici”* aggiunge Thomas Singer, dottorando presso il medesimo gruppo di ricerca. La disponibilità di archivi climatici ben preservati è quindi prioritaria per una migliore comprensione di come il clima terrestre potrebbe evolvere nei prossimi decenni.

Negli ultimi anni, un altro settore della ricerca scientifica si è rapidamente evoluto, si tratta di quello della microbiologia: *“Se un’analisi di routine, come il sequenziamento genomico di un micro-organismo, 20 anni fa richiedeva diversi anni di lavoro ed uno sforzo congiunto di più laboratori, oggi si può completare in maniera pressoché automatizzata nel giro di poche ore”*, ci racconta Beatrice Mezzena Lona, dottoranda in Scienze Polari presso l’Università Ca’ Foscari di Venezia. *“Il mondo della microbiologia è in rapida espansione e l’interesse verso le carote di ghiaccio è recentissimo: ad oggi infatti non esistono ancora indagini microbiologiche sulle carote alpine e solo alcune su ghiaccio polare”*. La ricostruzione temporale di batteri, funghi

e virus attraverso gli archivi glaciali alpini può essere fondamentale per ottenere informazioni climatiche ed ambientali complementari rispetto a quelle ottenibili dai tradizionali indicatori chimici: *“l’identificazione nella stratigrafia delle carote di ghiaccio di comunità batteriche aventi specifiche caratteristiche, come ad esempio una maggiore resistenza a condizioni di scarsità d’acqua o di più intensa radiazione ultravioletta, potrebbe aiutarci a comprendere meglio il clima del passato e a decifrare con un più alto grado di dettaglio le differenze tra il periodo attuale e quello pre-industriale”* aggiunge Beatrice. *“Tuttavia, la precarietà dei ghiacciai alpini può mettere a serio rischio tutti i progressi scientifici che si stanno raggiungendo nel campo della microbiologia: la percolazione di acqua liquida nel ghiaccio causata dalle alte temperature potrebbe favorire una migrazione dei batteri in strati differenti rispetto a quelli nei quali si erano originariamente depositati, mettendo in discussione l’integrità e l’affidabilità delle nostre analisi. Per questo la tempestiva azione di Ice Memory è fondamentale: la microbiologia è un settore in rapida evoluzione e chissà quante altre informazioni sono ancora nascoste nel ghiaccio che, tra qualche anno, potremo finalmente rilevare”*.

Riferimenti bibliografici

Monte Rosa: storie di esplorazioni scientifiche

Storia della Capanna Margherita

Capanna Margherita: il rifugio più alto d'Europa—Club Alpino Italiano

Leggere il ghiaccio ed i ghiacciai

RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. DOI: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>

Zekollari H, Huss M, Farinotti D. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*. 2019 Apr 9;13(4):1125-46.

Zemp, M, Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. In *Nature* (Vol. 568, Issue 7752, pp. 382–386). Springer US. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>

Memorie di una carota

Carotaggi in Groenlandia
Frozen Annals. Greenland Ice Sheet Research—Willy Dansgaard

NEEM
<http://www.neem.dk>

BEYOND EPICA
<https://www.beyondepica.eu/>

Studio sui pollini al Colle Gnifetti
Brugger SO, Gobet E, Schanz FR, Heiri O, Schwörer C, Sigl M, Schwikowski M, Tinner W. A quantitative comparison of microfossil extraction methods from ice cores. *Journal of glaciology*. 2018 Jun;64(245):432-42.

Ghiaccio Sporco

IPA, Pu e Pb dal Colle Gnifetti
Gabrieli J, Barbante C. The Alps in the age of the Anthropocene: the impact of human activities on the cryosphere recorded in the Colle Gnifetti glacier. *Rendiconti Lincei*. 2014 Mar 1;25(1):71-83.

Ricostruzione dei solfati dal Colle Gnifetti
Schwikowski M. Reconstruction of European air pollution from Alpine ice cores. In *Earth Paleoenvironments: records preserved in mid- and low-latitude glaciers 2004* (pp. 95-119). Springer, Dordrecht.

La datazione usando il carbonio-14
Jenk TM, Szidat S, Bolius D, Sigl M, Gaeggeler HW, Wacker L, Ruff M, Barbante C, Boutron CF, Schwikowski M. A novel radiocarbon dating technique applied to an ice core from the Alps indicating late Pleistocene ages. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009 Jul 27;114(D14).

Wagenbach D, Bohleber P, Preunkert S. Cold, alpine ice bodies revisited: what may we learn from their impurity and isotope content?. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2012 Jun 1;94(2):245-63.

Anni di piombo

Impatto delle benzine addizionate a piombo sull'ambiente: evidenze dal Colle Gnifetti
Schwikowski M, Barbante C, Doering T, Gaeggeler HW, Boutron C, Schotterer U, Tobler L, Van de Velde K, Ferrari C, Cozzi G, Rosman K. Post-17th-century changes of European lead emissions recorded in high-altitude alpine snow and ice. *Environmental science & technology*. 2004 Feb 15;38(4):957-64.

L'esperimento isotopico di Torino
Gabrieli J, Barbante C. The Alps in the age of the Anthropocene: the impact of human activities on the cryosphere recorded in the Colle Gnifetti glacier. *Rendiconti Lincei*. 2014 Mar 1;25(1):71-83.

Gli effetti della Peste Nera sulle concentrazioni di piombo al Colle Gnifetti
More AF, Spaulding NE, Bohleber P, Handley MJ, Hoffmann H, Korotkikh EV, Kurbatov AV, Loveluck CP, Sneed SB, McCormick M, Mayewski PA. Next-generation ice core technology reveals true minimum natural levels of lead (Pb) in the atmosphere: Insights from the Black Death. *GeoHealth*. 2017 Jun;1(4):211-9.

Piombo e prosperità: evidenze da una carota di ghiaccio prelevata in Groenlandia
McConnell, J.R., Wilson, A.I., Stohl, A., Arienzo, M.M., Chellman, N.J., Eckhardt, S., Thompson, E.M., Pollard, A.M. and Steffensen, J.P., 2018. Lead pollution recorded in Greenland ice indicates European emissions tracked plagues, wars, and imperial expansion during antiquity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(22), pp.5726-5731.

Una storia di pollini: l'impatto della Peste Nera sulle colture europee. Istantanee dal Colle Gnifetti
https://www.oeschger.unibe.ch/about_us/people/profiles/sandra_bruegger/index_eng.html
<https://www.nytimes.com/2018/09/17/science/icecore-europe-pollen.html>

Il futuro è tutto da scrivere

Misure ancillari di piombo da neve antartica
Barbante C, Turetta C, Capodaglio G, Scarponi G. Recent decrease in the lead concentration of Antarctic snow. *International journal of environmental analytical chemistry*. 1997 Dec 1;68(4):457-77.

Il futuro dei ghiacci alpini
Zekollari H, Huss M, Farinotti D. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*. 2019 Apr 9;13(4):1125-46.

Il futuro climatico delle Alpi
Gobiet A, Kotlarski S, Beniston M, Heinrich G, Rajczak J, Stoffel M. 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of the Total Environment*. 2014 Sep 15;493:1138-51.

Biografie

François Burgay (Aosta, 1989) è attualmente ricercatore post-doc presso il Paul Scherrer Institut (Svizzera) dove sta sviluppando nuovi metodi per l'analisi di molecole organiche nelle carote di ghiaccio. Si è laureato in Chimica dell'Ambiente presso l'Università degli Studi di Torino e ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Scienza e gestione dei Cambiamenti Climatici presso l'Università Ca' Foscari di Venezia. Ha effettuato diverse spedizioni di ricerca scientifica in Groenlandia, alle Isole Svalbard e sulle Alpi dove ha contribuito all'estrazione di diverse carote di ghiaccio, autentici libri di storia del passato climatico del nostro pianeta.

Fabrizio de Blasi, ricercatore dell'Istituto di Scienze Polari del CNR. Laureato in Scienze Forestali con un dottorato in ambito glacio-idrologico, si occupa di glaciologia, geomorfologia e meteorologia. In particolare, studia l'evoluzione degli ambienti glaciali e periglaciali d'alta quota in risposta alla variabilità climatica.

Credits

Fotografie

François Burgay
pp. 10, 12-13, 16, 19, 22-23

Roberto Cilenti
copertina, pp. 6, 8, 14-15, 26, 30

Margit Schwikowski
p. 29

Cartolinedairifugi.it
p. 9

US Army
p. 19

Elaborazioni grafiche

Fabrizio De Blasi
p. 15

Margit Schwikowski
p. 24



Università
Ca'Foscari
Venezia



Progetto finanziato da



Coordinamento



Sponsor



In collaborazione con



