

CLAUDIO SMIRAGLIA

Università di Milano - Comitato Scientifico del Club Alpino Italiano

Comitato Glaciologico Italiano

I GHIACCIAI POLARI, GRANDI ARCHIVI DELLA STORIA DEL CLIMA TERRESTRE

Introduzione.

E' ormai noto anche a livello di divulgazione scientifica il duplice interesse di tipo ambientale che riveste attualmente lo studio delle masse glaciali. I ghiacciai infatti con le variazioni della loro geometria, soprattutto lunghezza e volume, costituiscono in primo luogo dei sensibili indicatori delle tendenze del clima; in secondo luogo con le loro particolari caratteristiche fisiche e chimiche rappresentano degli archivi insostituibili nella ricostruzione dell'ambiente e del clima antico.

Ciò è particolarmente vero per le grandi calotte polari dove la genesi del ghiaccio avviene con temperature dell'aria costantemente al di sotto di 0°C e con processi di metamorfismo molto diversi rispetto ai ghiacciai temperati. Il più importante processo della fase iniziale del metamorfismo sia in ambito polare sia in ambito temperato è la compattazione (*packing*), attraverso la quale i singoli cristalli, sottoposti alla pressione degli strati sovrastanti, mutano posizione reciproca rispetto ai cristalli circostanti. Tuttavia con questo processo la porosità si riduce solo al 40 % e la densità arriva solo a circa 0,55 g/cm³. Intervengono quindi altri fenomeni a ridurre la porosità e ad aumentare la densità.

Nei climi temperati, dove durante l'estate le temperature dell'aria, anche nelle regioni montuose che ospitano i ghiacciai, superano ampiamente 0°C, alla compattazione si aggiungono fusione e rigelo. La fusio-

ne accelera l'arrotondamento dei singoli cristalli, in quanto questi fondono prima alle loro estremità e, producendo un sottile velo di acqua, favorisce la compattazione; il rigelo amplia le dimensioni dei cristalli ed elimina rapidamente ogni porosità (*sealing off*). Nei ghiacciai delle zone temperate si verifica quindi un'intensa percolazione estiva, che dagli strati superiori si propaga in quelli inferiori, producendo un rimescolamento e una omogeneizzazione delle caratteristiche fisiche e chimiche di ogni strato.

Nei ghiacciai polari, sostanzialmente le calotte dell'Antartide e della Groenlandia, le prime decine di metri sono rappresentate da neve porosa e da nevato, che a maggiore profondità si trasformano in un materiale totalmente privo di porosità, il ghiaccio polare. I processi che intervengono, oltre alla compattazione, sono la sublimazione-condensazione e la diffusione, la cui velocità è condizionata sia dall'entità dell'accumulo di neve, sia dalla temperatura all'interno della neve stessa. In ogni caso, tenendo conto delle temperature tipiche delle calotte polari, costantemente ben al di sotto di 0°C, non si verifica fusione. La chiusura dei canali intergranulari (che blocca ogni contatto per convezione con l'aria esterna) e la mancata fusione implicano che la composizione dell'aria incorporata nei singoli cristalli di ghiaccio sia la stessa che vi era all'esterno quando si verificò la nevicata che diede origine a quel ghiaccio.

In realtà al di sotto di alcune centinaia di metri di profondità man mano che la densificazione aumenta, si producono variazioni nella composizione originale delle bolle d'aria, soprattutto ad opera della gravità che tende a concentrare verso il basso le molecole gassose più pesanti. Le correzioni da apportare sono tuttavia note e di sufficiente precisione.

A profondità maggiori la densificazione porta a una riduzione progressiva del volume delle bolle d'aria incorporate nel ghiaccio e ad un aumento della pressione dei gas atmosferici al loro interno. Più sotto

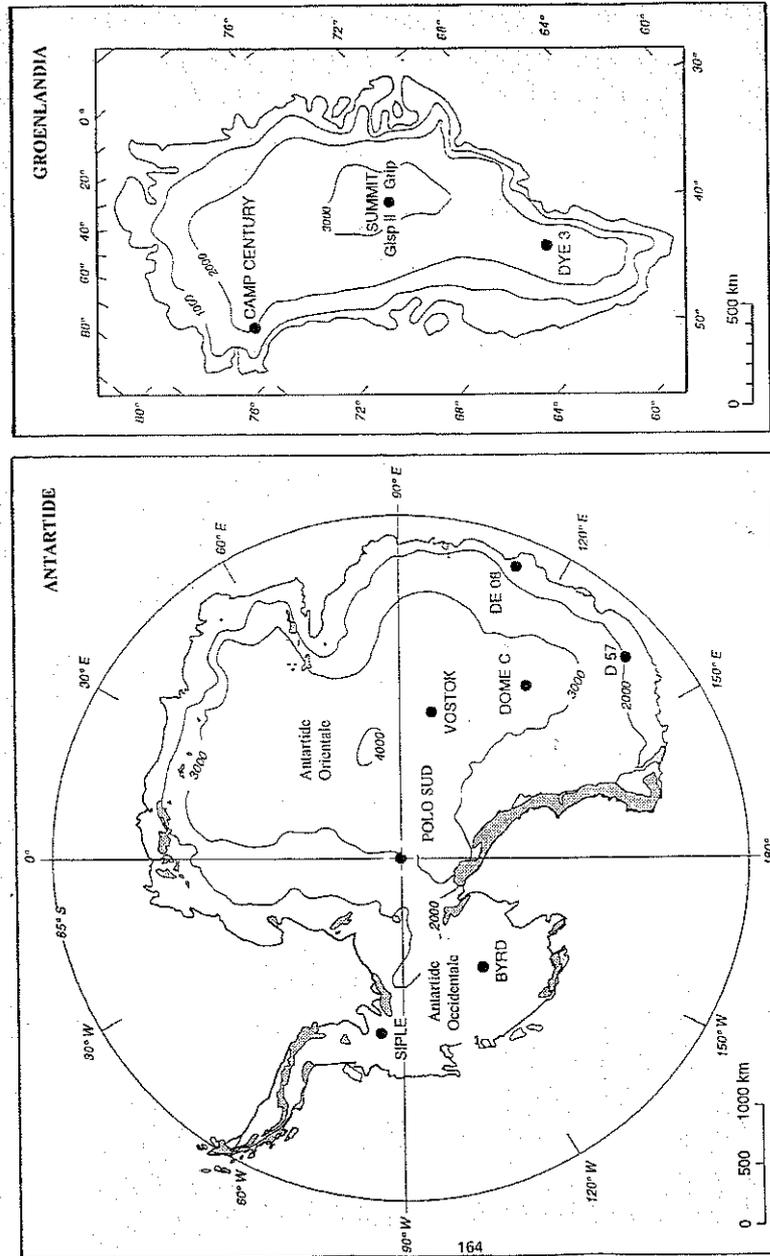


Fig. 1.- Carte schematiche dell'Antartide e della Groenlandia. I pallini neri indicano i siti delle perforazioni profonde (da Jouzel & Lorius, 1995).

ancora, le molecole dei vari gas tendono ad inserirsi progressivamente nelle molecole di acqua del ghiaccio formando i cosiddetti *clatrati*. A questo punto tutta l'aria è completamente ed intimamente incorporata nel ghiaccio sotto forma di clatrati e il ghiaccio stesso non presenta più bolle visibili.

Va inoltre aggiunto che nel ghiaccio ricco di impurità, come quello groenlandese, si possono verificare reazioni chimiche che alterano la composizione dell'anidride carbonica dell'aria contenuta nel ghiaccio. Le variazioni della concentrazione di CO_2 nel passato vengono dunque ricavate esclusivamente dall'Antartide.

In conclusione, se si prendono determinate precauzioni di ordine sperimentale, le caratteristiche dell'aria contenuta nei ghiacci polari non sono influenzate dai vari processi che avvengono durante la densificazione; si ha quindi la possibilità di ottenere informazioni di enorme importanza ambientale e climatica risalendo nel tempo anche a centinaia di migliaia di anni fa, in particolare sulle temperature (attraverso l'analisi degli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno) e sulla concentrazione di *gas serra*, come l'anidride carbonica e il metano.

I vari programmi di ricerca

Negli ultimi decenni, a partire dall'inizio degli Anni Sessanta, numerose perforazioni *profonde* (con questa denominazione si intendono le perforazioni che superano i 1000 m di profondità) sono state effettuate sia a livello nazionale che internazionale in Groenlandia e in Antartide (fig. 1). Essendo entrambe in posizione polare, queste due regioni presentano ambienti simili dal punto di vista chimico e fisico; ad un'analisi approfondita rivelano però molte differenze che rendono complementari le ricerche in esse effettuate. La regione polare meridionale è costituita da un continente disabitato (l'Antartide) circondato da

oceani, mentre a settentrione si trova un oceano ghiacciato circondato da continenti dove la presenza umana e le attività antropiche sono estremamente importanti e diffuse. Da ciò derivano sensibili differenze nella circolazione atmosferica, particolarmente per quanto riguarda l'intensità dei flussi fra le medie e le alte latitudini (i flussi, e quindi anche i materiali trasportati, sono più intensi nell'emisfero boreale).

Nelle varie perforazioni effettuate in Antartide e in Groenlandia sono stati estratti campioni di ghiaccio (in italiano vengono detti *carote*, in inglese *ice core*) di migliaia di metri di lunghezza, in alcuni casi raggiungendo il fondo roccioso. Fra le più note vi è sicuramente la *carota* di Vostok, estratta nell'Antartide Orientale presso la base sovietica omonima all'inizio degli Anni Settanta, che ha consentito di retrocedere nel tempo per 220.000 anni coprendo quindi più di un intero ciclo climatico glaciale-interglaciale. Fra le perforazioni più recenti in Groenlandia vi sono quella europea del GRIP (*Greenland Ice Core Project*), cui ha partecipato anche l'Italia, e quella americana del GISP (*Greenland Ice Sheet Project*). Entrambe sono state realizzate a Summit Dome a 3250 m di altezza nel centro della calotta groenlandese e hanno raggiunto il fondo roccioso a oltre 3000 m di profondità, coprendo più di un intero ciclo climatico. Attualmente sono in corso in Antartide le operazioni preliminari per una perforazione europea che dovrebbe arrivare a profondità ancora maggiori. Si tratta del Progetto EPICA (*European Programme for Ice Coring in Antarctica*), che prevede di raggiungere il fondo roccioso a 3500 m di profondità a Dome C sulla calotta orientale per ottenere informazioni sulla storia del clima terrestre fino ad 300.000 anni fa (fig. 2). Anche l'Italia è impegnata in questo progetto con numerosi ricercatori che hanno già effettuato studi geodetici e geofisici.

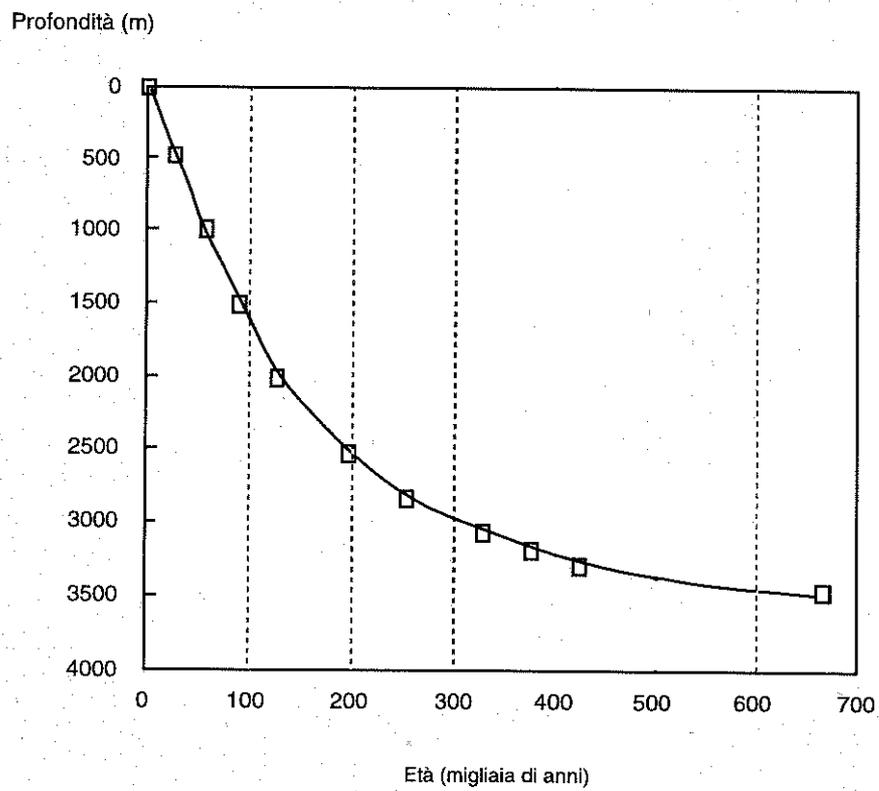


Fig. 2.- Relazione fra la profondità e la prevista età del ghiaccio nella perforazione del Progetto EPICA a Dome C in Antartide.

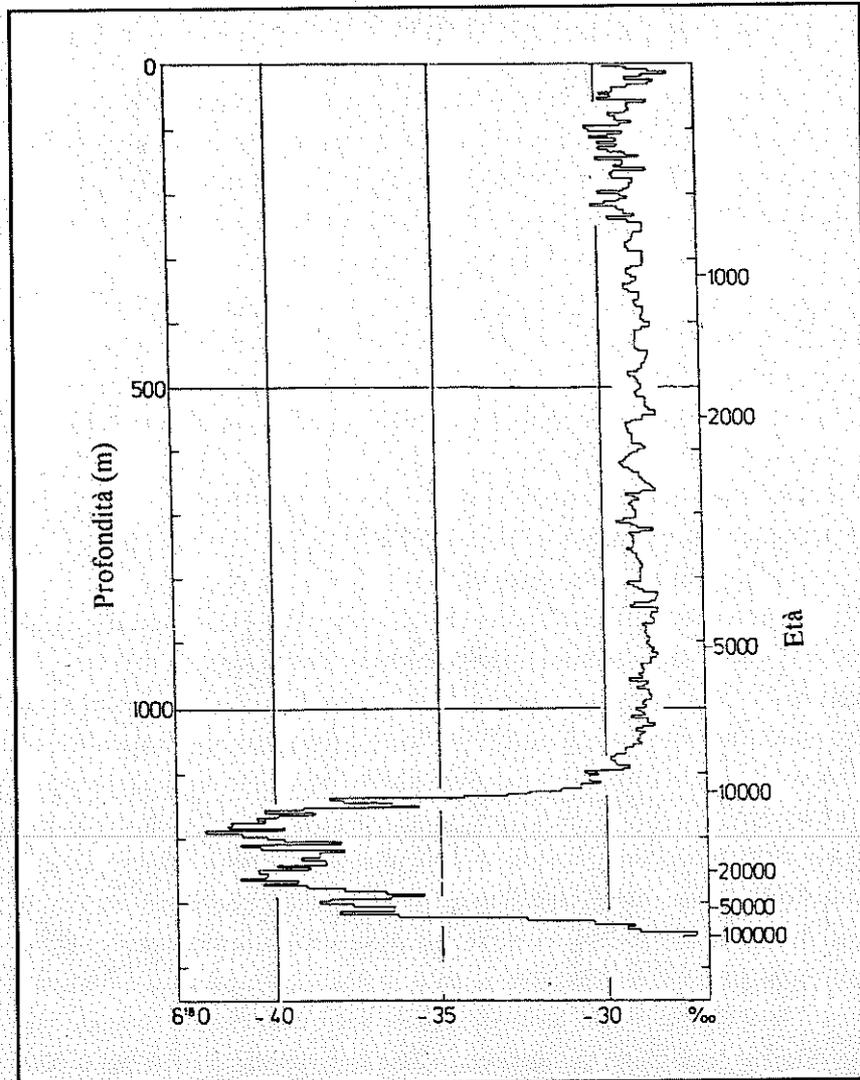


Fig. 3.- Variazione della composizione isotopica dell'ossigeno in funzione della profondità e dell'età del ghiaccio nella *carota* di Camp Century (Groenlandia). Si osservi come al di sotto di 1100 m di profondità, corrispondenti a 10.000 anni fa, i valori isotopici si abbassano rapidamente indicando l'inizio dell'Ultimo Glaciale (da Souchez, 1988).

Il problema della datazione

In qualsiasi analisi delle *carote* il problema fondamentale e preliminare è quello della datazione dei vari strati di nevato e di ghiaccio, che permette, talora con dettaglio annuale o addirittura stagionale, di cogliere non solo le variazioni della concentrazione dei vari composti chimici, ma anche le oscillazioni dell'accumulo nevoso.

Le tecniche di datazione sono molto varie e dipendono da diversi fattori, quali il dettaglio richiesto, la scala temporale presunta, l'accumulo nevoso medio del sito. Si possono quindi usare:

- 1) tecniche stratigrafiche basate sull'alternanza stagionale di alcuni segnali morfologici e chimici
- 2) livelli che formano orizzonti particolari di riferimento
- 3) decadimento radioattivo di alcuni radionuclidi
- 4) modelli fisico-matematici di flusso

Le tecniche stratigrafiche vengono usate nelle parti superiori delle *carote* e permettono, spesso usate contemporaneamente, di determinare una datazione accurata (annuale) degli strati di nevato e di ghiaccio, contando letteralmente gli anni. Si possono prendere in considerazione per limitate profondità le proprietà fisico-morfologiche della neve, come l'alternanza di strati di brina profonda (che indica un metamorfismo estivo dello strato superficiale) e di nevato a grani fini. Molto diffuso l'uso degli isotopi stabili dell'acqua che presenta il grande vantaggio di non richiedere particolari tecniche per prevenire la contaminazione dei campioni di ghiaccio. Questo metodo si basa sulla relazione esistente fra la concentrazione di isotopi stabili nell'atmosfera, e quindi nel ghiaccio (in particolare deuterio e ^{18}O) e la temperatura dell'aria. Si è calcolato che la diminuzione di 1°C della temperatura dell'aria corrisponda a una diminuzione dello 0,67 ‰ dell'ossigeno 18 e del 6 ‰ del deuterio. Questo fenomeno permette da un lato l'identificazione delle alternanze stagionali (le precipitazioni invernali contengono quan-

tità minori di isotopi rispetto a quelle estive), e quindi di datare l'età del ghiaccio contando le successioni di alternanze estate-inverno, dall'altro di determinare le temperature dell'aria sempre a livello stagionale (fig. 3).

Si possono inoltre utilizzare altri indicatori, come l'acqua ossigenata (la sua concentrazione è maggiore durante l'estate), il sodio, il calcio, che hanno evidenziato sensibili differenze stagionali sia in Antartide sia in Groenlandia.

Particolari orizzonti di riferimento sia naturali sia antropici consentono datazioni assolute degli strati di ghiaccio e di nevato. In particolare notevoli concentrazioni di SO_2 possono essere correlate all'eruzione del 1815 del vulcano Tambora che ha iniettato nella stratosfera enormi quantità di anidride solforosa. Segnali antropogenici vengono forniti da alcuni radionuclidi, come il tritio, correlabile ai test nucleari del 1955 e soprattutto del 1965.

Nelle parti più profonde delle carote la compressione dovuta alla gravità e la deformazione derivante dal flusso del ghiaccio impediscono l'utilizzo delle tecniche sopra indicate. L'età dei singoli strati diviene infatti una funzione più complessa della profondità ed è quindi necessario ricorrere a modelli matematici di flusso glaciale.

Alcuni risultati (indicazioni sul clima)

Le recenti perforazioni GRIP e GISP hanno permesso per la prima volta di ottenere informazioni in Groenlandia che vanno al di là dell'ultimo periodo glaciale e consentono quindi un confronto con la *carota* di Vostok.

Vi è naturalmente ben documentata l'ultima deglaciazione che ha portato al periodo attuale, detto Olocene. La transizione dall'ultimo glaciale all'attuale post-glaciale è avvenuta attraverso fasi complesse.

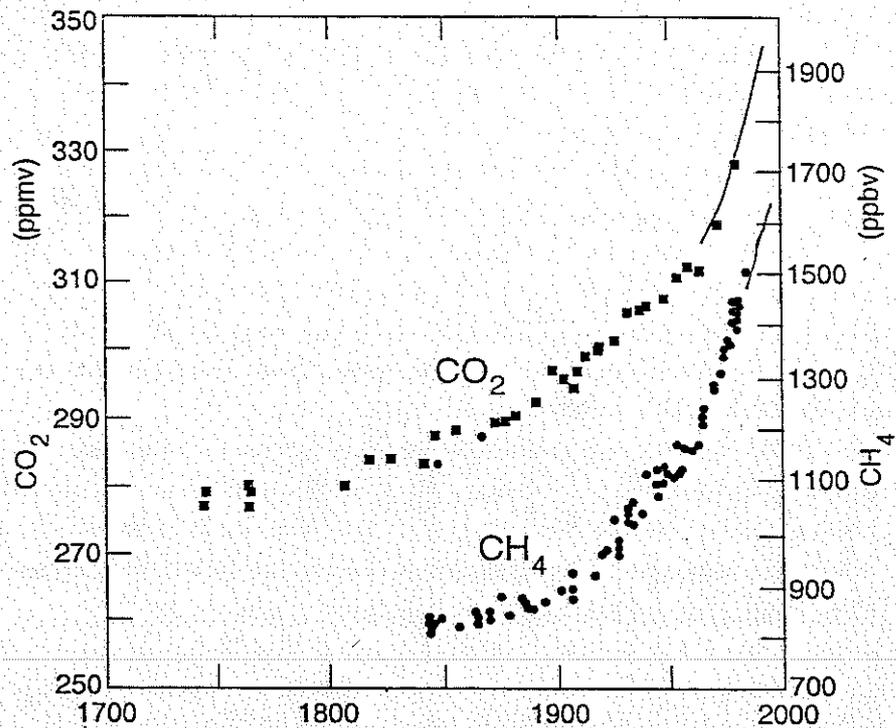


Fig. 4. - Variazioni della concentrazione di anidride carbonica (in parti per milione in volume) e di metano (in parti per bilione in volume) a partire dalla metà del XVIII secolo tratte dall'analisi delle bolle d'aria contenute nel ghiaccio polare (quadrantini e puntini neri). Con il tratto continuo sono indicati i valori misurati direttamente in atmosfera (da Raynaud et Alii, 1995).

Dapprima si è verificata una iniziale fase di riscaldamento seguita da un temporaneo ritorno a condizioni fredde (è il cosiddetto *Dryas recente*); si è poi passati rapidamente verso le condizioni climatiche attuali dell'Olocene. Le temperature hanno subito bruschi incrementi (in Groenlandia si segnalano aumenti di 7°C in 50 anni). Questa fase di transizione, che si chiude circa 11500 anni fa, è segnata anche da una rapida diminuzione della concentrazione delle polveri nel ghiaccio (5-20 anni), che indica il passaggio da una circolazione atmosferica di tipo glaciale ad una di tipo postglaciale. Durante i periodi freddi vi è in effetti un maggiore trasporto di polveri da parte dell'atmosfera, dovuto sia all'aumentata intensità dei flussi, sia alla maggiore disponibilità di materiali fini che le correnti aeree possono assumere in carico. Durante le fasi glaciali si verifica infatti un'espansione delle terre aride accompagnata da un ampliamento della superficie dei continenti dovuto all'abbassamento del livello marino. Durante questa fase di transizione dall'analisi delle carote groenlandesi emerge anche un aumento sensibile e rapido dell'accumulo nevoso, che si sarebbe raddoppiato nell'arco di pochi anni.

Variazioni climatiche rapide si sono individuate anche nell'ultimo periodo glaciale. Si tratta di fasi di incremento termico sensibile (in alcuni casi corrispondente a più della metà del riscaldamento che caratterizza la transizione glaciale-interglaciale) che si verificano in pochi decenni e che sono seguite da un altrettanto rapido ritorno verso condizioni glaciali. Questi eventi, già segnalati attraverso le perforazioni di Camp Century e Dye 3 e denominati "*interstadi di Dansgaard-Oeschger*", dal nome dei due loro maggiori studiosi, sono stati ritrovati anche nei carotaggi più recenti. Nelle carote GRIP e GISP si è rilevata infatti una ventina di interstadi di questo tipo della durata compresa fra 500 e 2000 anni.

Questi eventi richiamano con le loro caratteristiche altri indicatori di rapidi interstadi nell'ultimo glaciale. Si tratta dei cosiddetti "*strati di*

Heinrich” trovati nei sedimenti marini dell’Atlantico Settentrionale, il cui accumulo è stato prodotto da iceberg staccatisi dalla grande calotta polare settentrionale. Va anche ricordato che a ciascuno di questi interstadi si associa un incremento sensibile della concentrazione di metano nell’aria.

Da queste analisi emerge un altro dato particolarmente interessante; si è infatti constatato che l’ultimo interglaciale (detto Eemiano), collocabile fra 140.000 e 110.000 anni fa, è stato leggermente più caldo (circa 4°C) dell’Olocene. Anche in questo periodo tuttavia si assiste a una notevole variabilità con fasi fredde della durata compresa fra 70 e 5000 anni che si avvicinano alle condizioni climatiche dei periodi glaciali.

I risultati delle recenti perforazioni groenlandesi trovano riscontro nelle analisi della carota di Vostok condotte a partire dall’inizio degli Anni Settanta da équipe sovietiche, americane e francesi, anche se le varie fasi di raffreddamento e di riscaldamento in Antartide avvengono in modo più lento che in Groenlandia.

Alcuni risultati (indicazioni sui gas serra e altri composti chimici)

Oltre ai dati sulle variazioni climatiche, i ghiacci polari grazie alle loro caratteristiche fisiche possono, come si è detto, fornire informazioni essenziali sull’evoluzione dei gas serra, in particolare dell’anidride carbonica e del metano, e di altri composti chimici. Questa documentazione può essere esaminata a diverse scale temporali, che permettono sia di collocare le influenze antropogeniche sul clima nella giusta prospettiva cronologica, sia di migliorare la nostra conoscenza delle relazioni fra oscillazioni climatiche e variazioni dei gas serra.

Si possono quindi prendere in considerazione: 1) gli ultimi tre secoli, caratterizzati da una sempre crescente attività umana di altera-

zione dell'atmosfera, per i quali le osservazioni strumentali coprono solo gli ultimi decenni, 2) il periodo pre-industriale, in pratica l'ultimo millennio; 3) il ciclo glaciale-interglaciale che copre poco più degli ultimi 100.000 anni.

Per quanto riguarda l'era industriale, l'analisi dell'aria contenuta nei ghiacci polari mostra senza alcun dubbio un incremento esponenziale delle concentrazioni di CO_2 e di CH_4 soprattutto a partire dalla metà del XIX secolo (fig. 4). La crescita di anidride carbonica dal periodo preindustriale è stata del 27 %, quella del metano del 145 %. Tali incrementi sono dovuti essenzialmente all'uso dei combustibili fossili e alle trasformazioni antropiche dell'ambiente (ad esempio le deforestazioni) per la CO_2 , alle emissioni di risaie, animali, discariche per il CH_4 . Va aggiunto che le misure strumentali dirette (che per l'anidride carbonica cominciano verso la metà degli Anni Sessanta) sono in ottimo accordo con i dati indiretti ricavati dal ghiaccio polare.

Oltre ai dati sui gas serra, dalle carote polari, soprattutto groenlandesi, si possono ricavare informazioni su altri composti chimici e quindi sulla composizione dell'atmosfera degli ultimi 200 anni. È sensibile ad esempio il contrasto fra la concentrazione dei solfati in Groenlandia e in Antartide. Nella prima si registra infatti un sensibile aumento dovuto all'incremento delle emissioni di anidride solforosa in rapporto all'utilizzo dei combustibili fossili nell'emisfero settentrionale (fig. 5). Lo stesso si può dire per i nitrati, che solo in tempi recentissimi mostrano incrementi significativi in Antartide. In entrambe le aree appaiono comunque segnali chiarissimi di particolari eventi naturali, si osservano ad esempio picchi molto netti nella concentrazione di solfati attribuibili ad eruzioni vulcaniche, come quella del Laki nel 1783 o del Tambora nel 1815.

A proposito dell'ultimo millennio, nel periodo precedente lo sviluppo industriale, il clima è stato abbastanza simile a quello attuale; vi sono state tuttavia alcune limitate oscillazioni di temperatura (non

superiore a 1°C) a scala più o meno globale che hanno dato origine al Periodo Caldo Medioevale e alla Piccola Glaciazione. Nel periodo preindustriale la concentrazione di CO₂ non superava le 280 parti per milione in volume, nettamente inferiori agli oltre 300 ppmv del XX secolo, con oscillazioni massime di 10 ppmv. Anche per il metano la situazione è simile: concentrazioni inferiori all'attuale con limitate oscillazioni. I motivi di queste piccole variazioni di concentrazione non sono ancora del tutto chiariti. Si può pensare ad esempio agli effetti ambientali delle piccole oscillazioni climatiche citate, come la diminuzione della copertura vegetale durante la Piccola Glaciazione oppure all'incremento della temperatura delle acque superficiali durante i periodi caldi oppure ancora ad un impatto antropico sensibile anche prima della rivoluzione industriale (come l'intenso diboscamento delle pianure europee avvenuto durante il Medioevo).

Per quanto riguarda il ciclo glaciale-interglaciale, che ha comportato variazioni termiche globali dell'ordine di circa 5 °C, i dati provenienti dalle analisi delle carote polari coprono in modo continuo gli ultimi 200.000 anni e permettono quindi di risalire a tutto l'ultimo ciclo glacia-interglaciale e al glaciale precedente. Il confronto fra le concentrazioni attuali di CO₂ e CH₄ con quelle rilevate dalla carota di Vostok evidenziano in modo drammatico l'impatto delle attività antropiche degli ultimi secoli. Come si vede nella fig. 6, le concentrazioni di anidride carbonica e di metano degli ultimi 160.000 anni non hanno mai raggiunto livelli comparabili con quelli attuali. Si osservano tuttavia oscillazioni sensibili prima dell'epoca industriale che per la CO₂ sono comprese fra 200 e 300 ppmv e per il CH₄ fra 300 e 700 ppbv. Si osserva anche una netta relazione con le oscillazioni della temperatura; le concentrazioni più elevate sono infatti registrate durante gli interglaciali caldi, mentre le minime corrispondono ai periodi glaciali. Si pone quindi il problema delle variazioni dei gas serra in rapporto alle oscillazioni climatiche e del loro contributo all'amplifica-

zione di queste oscillazioni nell'ambito di un ciclo glaciale-interglaciale. Si può ipotizzare che le variazioni della concentrazione di CO_2 e CH_4 siano state inizialmente legate a modifiche fisiche e dimensionali dei loro grandi serbatoi, in particolare gli oceani per la CO_2 (ricordiamo che le acque fredde assorbono più anidride carbonica di quelle calde) e gli ecosistemi continentali per il CH_4 .

Queste trasformazioni devono essere state provocate da variazioni della circolazione atmosferica ed oceanica, a loro volta innescate da fenomeni esterni al sistema atmosfera-idrosfera-litosfera; si può pensare in particolare alle variazioni dei parametri orbitali del nostro pianeta che avrebbero provocato modifiche nella distribuzione e nell'intensità dell'insolazione.

Tali fenomeni non sono in grado tuttavia di giustificare totalmente l'ampiezza dei cicli termici fra un glaciale e l'interglaciale seguente. La coincidenza quindi delle variazioni più sensibili di CO_2 e CH_4 con le maggiori modificazioni climatiche fa ritenere che i gas serra siano stati importanti amplificatori di queste modificazioni. Modelli statistici e di simulazione climatica attribuiscono all'effetto dei gas serra circa il 40-50 % delle variazioni di temperatura osservate. Quindi il riscaldamento registrato al passaggio da un glaciale a un interglaciale (4-5°C) sarebbe dovuto per circa 2°C all'aumento della concentrazione dei gas serra.

Le analisi delle carote di ghiaccio hanno evidenziato anche altre modifiche nella composizione della nostra atmosfera, in particolare per quanto riguarda gli aerosol primari (sale marino e polveri) e quelli secondari (solfati), che sono aumentati durante i periodi glaciali.

Il sodio di origine marina nella carota di Vostok presenta scarse concentrazioni durante i periodi caldi e una graduale crescita durante l'ultimo glaciale. Questo nonostante la maggiore estensione del ghiaccio marino durante l'ultima espansione glaciale (oltre 1000 km più a nord), che ha provocato un aumento della distanza fra il mare aperto e la parte

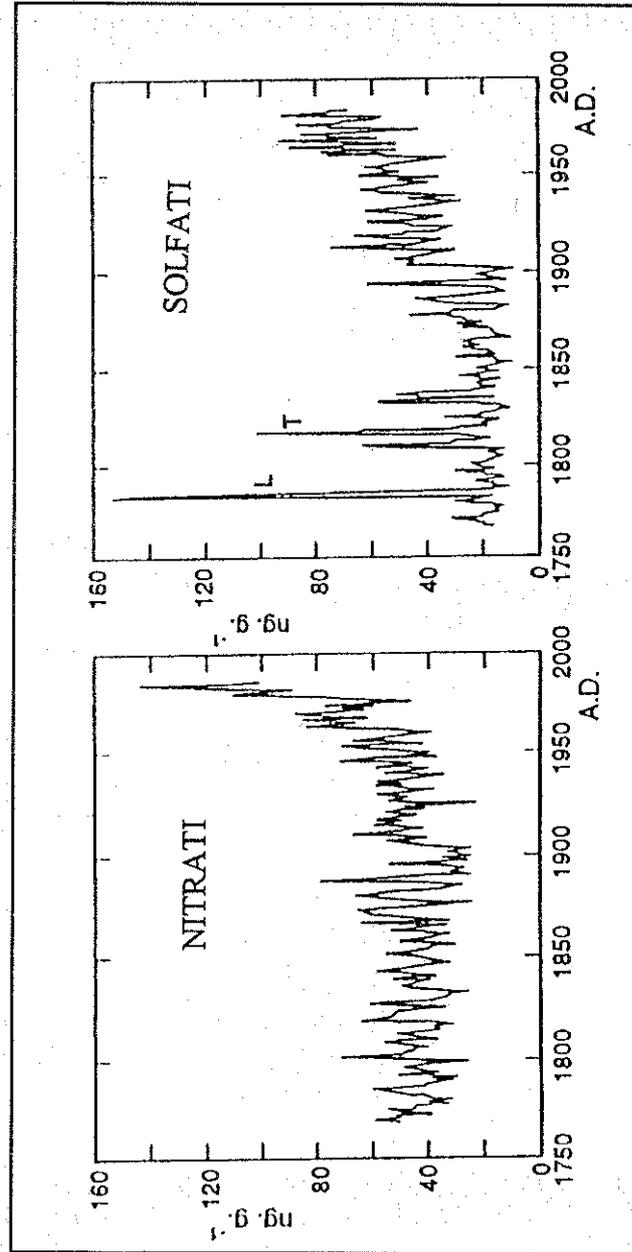


Fig. 5.- Variazioni di nitrati e solfati a partire dal 1750 nella carota di Dye 3 in Groenlandia. L e T indicano rispettivamente le eruzioni del Laki e del Tambora (da Legrand & Delmas, 1995).

centrale dell'altopiano antartico, dove è stata eseguita la perforazione di Vostok. Si ritiene quindi che l'incremento del contenuto di sali marini nell'atmosfera antartica sia dovuto ad una maggiore intensità e velocità delle correnti aeree nord-sud durante i periodi glaciali.

Conclusioni

In conclusione dallo studio delle carote estratte in questi ultimi decenni dai ghiacci freddi polari sono emersi alcuni risultati, che confermano la funzione insostituibile di queste regioni come archivi della storia del nostro pianeta, in particolare:

- la stabilità del clima degli ultimi 10.000 anni (Olocene) in contrasto con la variabilità degli ultimi 100.000 anni, che hanno evidenziato raffreddamenti durante l'ultima deglaciazione e interstadi caldi durante la glaciazione.
- temperature durante l'ultimo interglaciale più elevate di quelle attuali.
- oscillazioni di CO₂ e CH₄ in correlazione con le variazioni termiche
- concentrazioni attuali di anidride carbonica e di metano nettamente superiori a quelle dei 200.000 anni precedenti.
- coincidenza, seppur con minore accentuazione in Antartide, degli eventi verificatisi in entrambi gli emisferi, il che dimostra che si è trattato di fenomeni non a livello locale ma a livello globale.
- maggiore sensibilità della calotta groenlandese a registrare le modificazioni più recenti dell'atmosfera di origine antropica.

Ulteriori studi sulle carote già disponibili sono tuttora in corso, così come sono in fase di realizzazione progetti che dovrebbero ampliare la dimensione cronologica delle nostre conoscenze (ad esempio la perforazione EPICA di Dome C) e consentire una migliore compren-

sione dei complessi rapporti criosfera-atmosfera-idrosfera-biosfera (in quest'ultima comprendiamo anche le attività dell'uomo). Allo stato attuale delle conoscenze le previsioni non possono che stemperarsi in scenari a volte contrapposti. A medio termine si dovrebbe comunque registrare un ulteriore incremento termico globale, che dovrebbe portare ad un aumento della fusione nella Groenlandia Meridionale, compensato da un aumento di precipitazioni nella Groenlandia Settentrionale. Anche l'Antartide Orientale dovrebbe aumentare lievemente di volume a causa dell'aumento del vapore acqueo nell'atmosfera; più instabile è sicuramente la calotta antartica occidentale. Di certo sappiamo che l'*optimum climatico* del Postglaciale è ormai alle nostre spalle; ma per usare le parole dello studioso belga Roland Souchez, "a meno di fare della fantascienza, nessuno oggi può dire fin dove si estenderanno i ghiacci polari nei prossimi millenni".

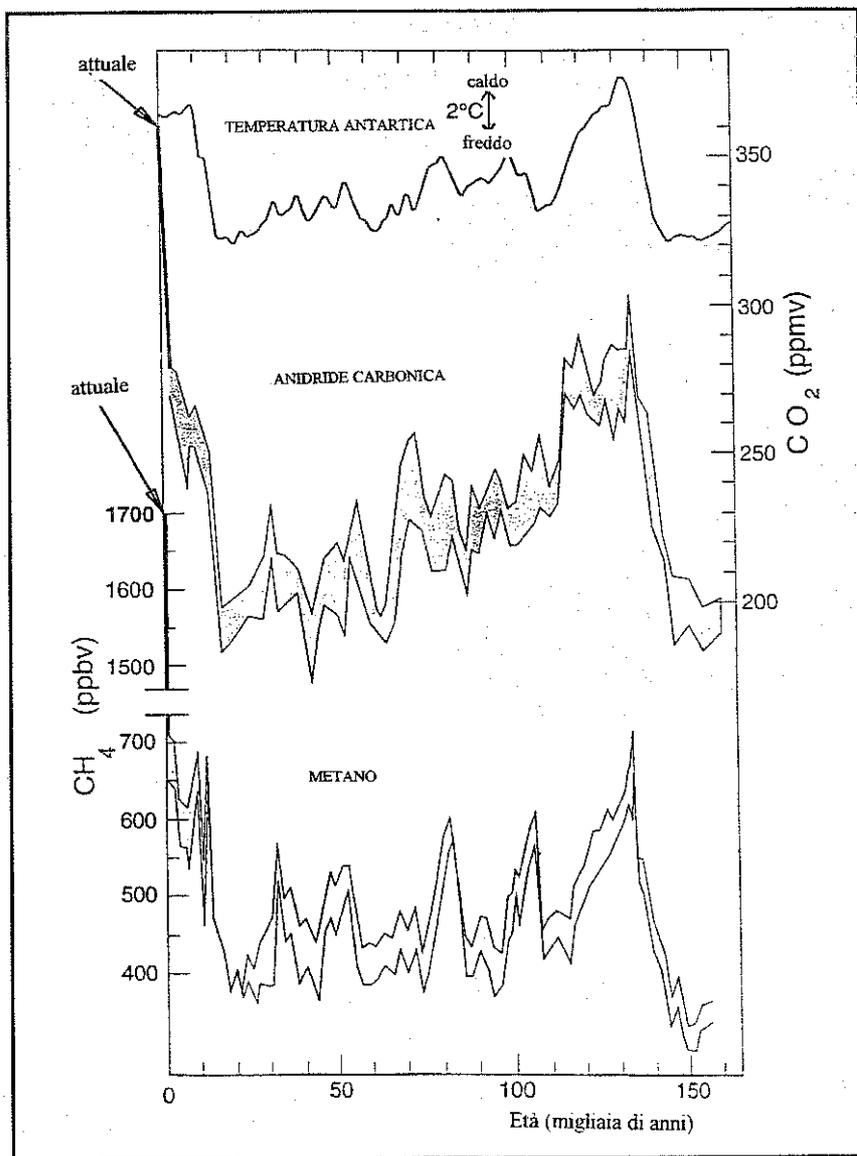


Fig. 6.- Variazioni della temperatura dell'atmosfera e della concentrazione di anidride carbonica e metano nella *carota* di Vostok (Antartide). Sono indicati anche i valori attuali (da Legrand & Delmas, 1995).

Bibliografia

- JOUZEL J. & LORIS (1995) - *Glaces polaires: variations rapides du climat*. Colloque d'Hydrotechnique, Grenoble, 15-16 février 1995 "Glaciologie et Nivologie. Etat des recherches et des connaissances à la fin du XX^e siècle", pp. 155-166.
- LEGRAND M. & DELMAS R. (1995) - *Chimie des glaces polaires: un reflet de notre atmosphère passée*. Colloque d'Hydrotechnique, Grenoble, 15-16 février 1995 "Glaciologie et Nivologie. Etat des recherches et des connaissances à la fin du XX^e siècle", pp. 189-166.
- MAGGI V. & CORAZZA E. (1994) - *Greenland Ice-Core Project (GRIP): tre anni di attività*. Memorie Società Geografica Italiana, vol. 51, pp. 135-156.
- OROMBELLI G. (1990) - *Ghiacciai, clima, equilibri ambientali*. Memorie Società Geologica Italiana, vol. 45, pp. 833-837.
- RAYNAUD D., BARNOLA J.M. & CHAPPELLAZ J. (1995) - *Les glaces polaires: une mémoire de l'évolution des gaz à effet de serre*. Colloque d'Hydrotechnique, Grenoble, 15-16 février 1995 "Glaciologie et Nivologie. Etat des recherches et des connaissances à la fin du XX^e siècle", pp. 201-206.
- SMIRAGLIA C. (1992) - *Guida ai ghiacciai e alla glaciologia. Forme, fluttuazioni, ambienti*. Zanichelli ed., Bologna, 240 pp.
- SOUCHÉZ R. (1988) - *Les glaces polaires*. Editions de l'Université de Bruxelles, 156 pp.
- SUGDEN D. & HULTON N. (1994) - *Ice volumes and climate change*. In: Roberts N. (a cura di), "The Changing Global Environment", Blackwell, Oxford.