

BARBARA GAMBINI - PERIS PERSI

UN ARCHIVIO DEL PIANETA NEI GHIACCI ANTARTICI

Il clima dell'Antartide è senza dubbio tra i più severi del mondo: chiunque si trovi a navigare oltre il parallelo di 60° S sa di avere pochissimi minuti di sopravvivenza in caso di caduta in acqua. Qualsiasi operazione nel «continente bianco» comporta, non per nulla, una preparazione burocraticamente impegnativa ed economicamente molto onerosa. Nonostante i pericoli e gli ostacoli, l'Antartide continua tuttavia a esercitare un inesauribile fascino su scienziati, governi, operatori economici di ogni genere, turisti.

Se consideriamo che l'Antartide contiene, a seconda delle stime, tra il 75% ed il 90% (1) delle riserve d'acqua dolce dell'intero pianeta, possiamo intuire che variazioni anche minime nella sua copertura glaciale avrebbero notevoli ripercussioni a livello globale: basti pensare che il solo *iceberg* che si è di recente staccato dal ghiacciaio di Pine Island - 400 m di spessore per 800 km², «relativamente scarso per gli standard antartici» (Perkins, 2001, p. 68) - basterebbe per fornire oltre 12 l di acqua al giorno a ogni abitante della Terra per cinque anni (*ibidem*). La preziosità del ghiaccio polare non sta esclusivamente nella sua massa: com'è noto, il ghiaccio non è affatto un composto monolitico e uniforme, formato di sola acqua, e non è chimicamente inerte.

L'analisi del ghiaccio rivela ad esempio che durante l'ultimo massimo glaciale (circa 20.000 anni fa) la temperatura in Groenlandia era di 20°C più bassa di quella odierna, mentre in Antartide lo scarto era di soli 6-10°C (Wolff, 2000a, p. 4); ci informa della tenacia della vita, che è forse in grado di perpetuarsi per milioni di anni in condizioni di totale isolamento e oscurità, a pressioni altissime, a temperature minime e quasi senza ossigeno (Gavaghan, 2002; Siegert e altri, 2001); ci dà ragguagli sulla deriva dei continenti, sul tasso di inquinamento antropico nelle varie epoche, su eruzioni vulcaniche infinitamente più devastanti di quella che distrusse Ercolano e Pompei.

Il ghiaccio incorpora anzitutto materiale minerale, residui di aerosol, composti solfurei e agenti inquinanti. L'acqua stessa, inoltre, contiene i diversi isotopi dei suoi due elementi in quantità variabili e direttamente legate alla temperatura: in coincidenza di temperature atmosferiche più miti si deposita infatti una maggiore quantità di isotopi pesan-

(1) Il 75% secondo Julian Priddle, del British Antarctic Survey (BAS) (1999, p. 17); l'80% per l'Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996, come riportato da Cazeneuve, Araujo e Ginzburg (2001, p. 13); il 90% secondo il *BAS Annual Report 1998-1999*, e il sito ufficiale del BAS (http://www.antarctica.ac.uk/cgi-bin/parser.pl/0005/www.antarctica.ac.uk/News/Press_Releases/index.html); il *BAS Annual Report 2000-2001*, p. 28, riferisce di recenti studi che portano a ritenere che la massa totale di ghiaccio dell'Antartico sia 25,4 milioni di km³, una cifra inferiore a quella sinora stimata.

ti (Jones, 2000, p. 34); un'analisi della concentrazione dei vari isotopi di idrogeno e ossigeno può quindi aiutare a far luce sui livelli termometrici di una regione in un determinato periodo. Durante il processo di compattazione, infine, la neve intrappola al suo interno delle bolle d'aria che conservano alcuni gas atmosferici, tra i quali anidride carbonica (CO_2) e metano (CH_4), due dei principali gas-serra. La neve caduta in estate è inoltre di solito più acida e più ricca di perossido di idrogeno (H_2O_2) di quella invernale, che contiene invece sodio in maggiore concentrazione – caratteristiche, queste, che permettono di valutare anche eventuali variazioni stagionali. I residui di acido solforico nel ghiaccio mostrano che l'eruzione più imponente del Quaternario è stata, 72.000 anni fa, quella del vulcano indonesiano Toba, durante la quale le emissioni vulcaniche ammontarono a 2.450 km³ (Jones, 2000, p. 34). L'analisi dei microscopici cristalli di zircone intrappolati nei ghiacci pare confermare che il blocco interno del continente si sia formato in epoca più remota rispetto al margine pacifico dello stesso, e probabilmente in luoghi diversi, per poi emigrare attraverso processi tettonici (*BAS Annual Report 2000-2001*, p. 16).

Esistono ovviamente altri metodi per studiare le caratteristiche paleoclimatiche del nostro pianeta, come, ad esempio, l'analisi dei sedimenti marini e degli anelli delle piante; rispetto a questi metodi, però, il ghiaccio offre una precisione maggiore per quanto riguarda sia la cronologia sia i trasferimenti. Data la loro recente formazione, alcune delle località geografiche in cui il ghiaccio è disponibile offrono dati su archi di tempo relativamente limitati: in Antartide, le informazioni giungono fino a oltre 500.000 anni fa; nell'Artico, sull'Altopiano Tibetano e nei ghiacciai di alcune montagne sudamericane oltre i 6.000 m di altitudine, almeno fino a 100.000 anni fa; in Canada e nelle Alpi, solo limitatamente a epoche più recenti.

Specialmente all'interno del continente antartico, la fusione superficiale di neve è molto modesta: quasi tutta la precipitazione nevosa, quindi, vi si trasforma in ghiaccio; i dati ricavabili da campioni anche molto antichi sono pertanto notevolmente affidabili. L'accuratezza dell'attribuzione cronologica è essenziale, soprattutto quando si esaminino epoche tanto estese; per giungere a una datazione quanto più possibile precisa, si utilizzano quindi solitamente dei sistemi incrociati: analisi stratigrafica, individuazione di orizzonti di riferimento, modelli di flusso del ghiaccio, decadimento radioattivo di certi nuclidi. L'uso combinato di tali metodi ha consentito per esempio nella località di Summit (Groenlandia) di arrivare a un'approssimazione massima di 10 anni fino a circa metà Olocene, 4.000 anni fa (Boutron, 1999, p. 46); proseguendo indietro nel tempo, aumenta ovviamente l'imprecisione.

Per una serie di motivi, tuttavia, la raccolta e soprattutto l'interpretazione dei dati non sono processi semplici né lineari; la composizione chimica del ghiaccio, per esempio, non è fedelmente rappresentativa di quella atmosferica al momento della deposizione: alcune sostanze (tra cui nitrati e perossido di idrogeno) vengono nuovamente rilasciate nell'aria, mentre altre si formano nel ghiaccio grazie a reazioni chimiche scatenate dalla luce solare; le bolle d'aria contengono inoltre informazioni relative a periodi più recenti che non il ghiaccio circostante, dal momento che nella neve semicompatta l'aria continua a circolare e a interagire con l'atmosfera finché esiste una certa porosità. Nonostante tutte le precauzioni, infine, la stessa operazione di prelievo provoca necessariamente una contaminazione chimica e batteriologica del ghiaccio.

In seguito al successo delle operazioni di estrazione e studio del ghiaccio in Groenlandia, negli anni Novanta del XX secolo si è svolta a Vostok, nell'Antartide orientale, una simile operazione di carotaggio che ha coinvolto studiosi russi, americani e francesi; l'esplorazione è giunta fino a una profondità di 3.623 m, per raccogliere campioni del più

antico ghiaccio polare che si conoscesse fino a quel momento (oltre 420.000 anni) (2). Rilevazioni RES (*radio-echo sounding*) hanno mostrato che qualche chilometro al di sotto della base russa si distende un lago subglaciale lungo oltre 240 km e largo più di 50, con spessore che varia da poche decine di metri a oltre un chilometro; alcuni biologi del BAS hanno convinto gli scienziati del progetto internazionale ad arrestare gli scavi a 120 m dalla superficie del lago, per evitare di contaminarne le acque. Gli ultimi 60 m del ghiaccio riportato in superficie sembrano comunque offrire un campione delle acque del lago stesso, anche se di epoche remote. In queste acque sono stati ritrovati microrganismi tipici dell'Antartide assieme ad altri provenienti da aree temperate e persino tropicali; questo ha subito fatto pensare che si possano tuttora trovare forme di vita nelle acque del Vostok, nonostante la totale oscurità, la bassa temperatura (-3°C), la pressione altissima (350-380 atmosfere) e l'isolamento (che potrebbe essere durato milioni di anni).

A frenare i primi facili entusiasmi, qualche biologo (Priscu e altri, 1999, p. 2142) ha ricordato che i microrganismi trovati nelle acque lacustri poi diventate parte del ghiacciaio sovrastante probabilmente non sono affatto rappresentativi di quelli che vivono sul fondo o nei sedimenti del lago stesso; qualcuno ipotizza addirittura che i microrganismi siano sprofondati nel corso dei millenni dalla superficie del ghiacciaio, senza mai aver fatto parte del lago sottostante, e Bulat ha dimostrato che almeno alcuni dei microbi rinvenuti nel ghiaccio provengono dal kerosene utilizzato nelle operazioni di carotaggio (Gavaghan, 2002). Nonostante ciò, sappiamo già che il ghiaccio che una volta fu parte del lago contiene abbastanza sostanze nutritive – organiche e inorganiche – da permettere qualche forma di vita eterotrofa (Siebert e altri, 2001, p. 608); in assenza di esposizione all'irraggiamento solare, l'energia necessaria ai processi vitali potrebbe derivare da reazioni chimiche tra solfuri e materiale organico, e quantità minime di ossigeno potrebbero respirare attraverso i 4.000 m di ghiaccio soprastante. Sono ipotesi affascinanti, che peraltro non potranno essere provate se non con una campionatura diretta delle acque del lago; e questa non sarà possibile fin quando non si sarà trovato un metodo sicuro per minimizzare la pur inevitabile contaminazione. A questo proposito, scienziati di tutto il mondo si sono incontrati nel 2001 a Bologna e poi nuovamente nel 2002 a Shanghai.

Anche quando la datazione sia accuratissima e si riesca a stabilire con precisione l'origine delle varie sostanze presenti nel ghiaccio, e un quadro termometrico dell'epoca relativa, l'elaborazione di modelli e previsioni è ovviamente assai complicata.

I *media* continuano a dare notizia del distacco di giganteschi *iceberg* o della disgregazione di enormi masse di ghiaccio dalle coste antartiche, e sembrano mettere in diretta correlazione questi eventi con l'innalzamento della temperatura, e quest'ultimo con l'accresciuta produzione di gas-serra a opera delle attività antropiche. In realtà, scoprire le cause dirette di questi fenomeni, e a maggior ragione pervenire a proiezioni e previsioni globali, è operazione ben più complicata.

Se è vero, infatti, che la temperatura in Antartide è nel complesso aumentata (secondo il BAS, di $+0,5^{\circ}\text{C}$ negli ultimi quarant'anni: si veda il sito Internet), è vero anche che la variazione è stata tutt'altro che uniforme: l'innalzamento è stato di $2,5^{\circ}\text{C}$ nella Penisola Antartica, mentre in corrispondenza del Polo si è manifestata una lieve diminuzione (*ibidem*). Non tutti gli episodi di disgregazione possono inoltre essere imputati al recente aumento di temperatura: i massicci *icebergs* che hanno recentemente preso il largo

(2) Agli inizi del 2002 un gruppo di studiosi di vari paesi europei ha scavato a Dome Concordia (Altopiano Antartico Orientale) fino ad una profondità di 2.864 m, raggiungendo un nucleo di ghiaccio formatosi 530.000 anni fa; questo è ad oggi il ghiaccio più antico mai ricavato dalla calotta polare; notizie disponibili sul sito Internet del BAS.

dalle piattaforme glaciali (3) più cospicue del continente (Ross, Amery, Ronne) non hanno fatto che riportare l'estensione dei ghiacci ai livelli dei primi anni Sessanta, dopo che la piattaforma si era spinta in mare per lunghezze inusitate (Perkins, 2001, p. 68). Le cause del distacco, inoltre, sono più probabilmente meccaniche (maree, correnti marine e venti catabatici) che termometriche (*ibidem*) e, almeno nel caso del ghiacciaio di Pine Island, potrebbero essere effetto di processi iniziati centinaia o migliaia di anni fa (BAS, sito Internet).

Anidride carbonica e metano hanno in effetti ormai raggiunto livelli senza precedenti negli ultimi 400.000 anni (Wolff, 2000b; Jones 2000), ma questi sono soltanto due tra i più diffusi gas-serra (4): a essi va aggiunto il vapore acqueo, che rimarrebbe per alcuni il principale responsabile dell'effetto-serra, e la cui produzione dipenderebbe quasi totalmente da processi naturali (Cazeneuve, Araujo e Ginzburg, 2001, p. 4); i gas-serra, inoltre, non sono che uno dei fattori delle variazioni della temperatura globale, assieme all'irraggiamento solare e all'albedo terrestre totale che a sua volta – è forse superfluo ricordarlo – varia anche in relazione alla copertura vegetale e al livello di cementificazione. Per quanto il decennio 1990-2000 sia stato il più caldo degli ultimi mille anni, esso non ha segnato un primato assoluto, ch  circa a met  Olocene (5.500-6.000 anni fa) le temperature estive dell'emisfero settentrionale erano probabilmente di 1-2°C superiori alle attuali (Wolff, 2000a, p. 4).

Con questo intendiamo solo prendere le distanze da automatismi pericolosi, non certo negare le evidenti responsabilità umane nel crescente degrado ambientale. E' sempre il ghiaccio a raccontarci infatti la storia e la cronologia dell'inquinamento da metalli pesanti: le analisi condotte a Summit hanno dimostrato che la concentrazione di piombo   aumentata di duecento volte dall'epoca preindustriale, raggiungendo l'apice attorno al 1970, per poi calare stabilmente grazie all'adozione di combustibili senza piombo. In Antartide, l'aumento nello stesso periodo   stato «solo» di 3-4 volte, a dimostrazione ulteriore del fatto che i paesi dell'emisfero settentrionale sono i maggiori responsabili di certe emissioni. Sorprendentemente, le rilevazioni hanno mostrato che gi  in epoca preindustriale l'attivit  umana aveva provocato contaminazione da piombo nei ghiacci artici: altri picchi di concentrazione si erano infatti avuti tra 2.000 e 2.500 anni fa, durante le civilt  greca e romana (Wolff, 2000b, p. 166), e nuovamente nel corso del medioevo.

E' difficile stabilire gli effetti indiretti a breve e lungo termine che le attivit  antropiche hanno sul clima globale. Pi  facile   far luce sulle responsabilit  dirette della presenza umana in luoghi rimasti fino a epoca recente totalmente anecumenici: dall'Ottocento, l'Antartide   stata meta di continue esplorazioni e spedizioni con fini economici, politici e scientifici. Il numero di turisti raddoppia annualmente (5); stime probabilmente esagerate suggeriscono che entro il 2010 il numero di visitatori potrebbe salire a 1,5 milioni all'anno (Giese e van Polanen Petel, 2001, pp. 14-15); la cifra di per s  non rende conto della gravit  del fenomeno: i turisti portano inevitabilmente grave turbamento a ecosistemi tra i pi  vulnerabili, con le loro incursioni in elicottero, gommone o veicoli

(3) Com'  noto, per piattaforma glaciale galleggiante si intende un «vasto ghiacciaio tabulare di notevole spessore, galleggiante ma unito alla costa» (Smiraglia, 1992, p. 25).

(4) Cazeneuve, Araujo e Ginzburg (2001) riferiscono di possibili bacini di assorbimento dell'anidride carbonica situati nell'emisfero settentrionale e negli oceani meridionali tra i paralleli di 30  e 50 . Tali bacini, per quanto fortemente variabili in dimensioni e intensit , sarebbero per i tre studiosi in grado di compensare la produzione di CO₂ dovuta rispettivamente alle emissioni di combustibili fossili e alla deforestazione.

(5) Si calcola che fossero 200 nel 1984, mentre sono stati 14.000 nella stagione estiva 1999-2000 (Riddle, 2001, p. 46).

da neve, con il loro comportamento non sempre consapevole e rispettoso e con la presenza stessa di navi inquinanti in acque estremamente sensibili al benché minimo cambiamento. Prodotto esclusivo dell'attività antropica sono inoltre i clorofluorocarburi (CFC), causa del buco nell'ozono che nell'area antartica ha raggiunto nel settembre 2001 la sua massima estensione (25 milioni di km²), per poi restringersi progressivamente e dirigersi verso il continente sudamericano, le Falkland e la Georgia Australe (BAS, sito Internet).

Indipendentemente dalla ricerca delle responsabilità, individuare tendenze climatiche globali può aiutare a prevenirne o almeno attenuarne gli eventuali effetti negativi che – è intuitivo oltre che scientificamente confermato – avranno impatto maggiore sui paesi del Terzo Mondo (6), contribuendo a peggiorare ulteriormente le loro condizioni e aumentando il divario economico e sociale già esistente tra paesi ricchi e paesi poveri (IPCC, 2001). Incidente e largamente imprevedibile sarà anche l'effetto dei cambiamenti climatici globali sull'economia, sull'ambiente e sulla struttura sociale dei paesi sviluppati (*ibidem*).

Per la loro bassissima capacità di adattamento, i ghiacciai e gli ecosistemi polari sono tra gli ambienti in assoluto più vulnerabili ai cambiamenti climatici: molte specie marine animali a sangue freddo della regione antartica saranno a rischio se le temperature medie estive aumenteranno anche solo di 1 o 2°C (BAS, 2000-2001, p. 12); alcune recenti macroscopiche disintegrazioni nella calotta polare sono effetto di processi avviati centinaia o migliaia di anni fa; d'altra parte, i processi azionati ora si protrarrebbero a loro volta ben oltre un'eventuale stabilizzazione dei meccanismi che li hanno ingenerati, tra i quali l'effetto-serra (IPCC, 2001).

A tutt'oggi, più incidente dell'impatto ambientale del turismo rimane quello delle basi di ricerca, che hanno ospitato nella stagione 1999-2000 circa 4.000 operatori, per periodi tuttavia molto più lunghi che non quelli delle crociere turistiche. La ricerca scientifica sta, è vero, fornendo contributi impareggiabili per la risoluzione di questioni di interesse mondiale, ma già negli anni Ottanta la commissione Brundtland avvertiva che tra i 18 paesi firmatari del Trattato Antartico erano in atto negoziati per legalizzare lo sfruttamento delle risorse minerarie e petrolifere del continente. Tra questi paesi, ben 7 hanno avanzato rivendicazioni territoriali. Come ammonisce De La Court (1990, p. 90), «La presenza di questi gruppi di ricerca non è ispirata esclusivamente alla scienza»; i criteri di selezione adottati per tutelare l'ambiente antartico esigono inoltre che un paese dimostri la serietà dei propri intenti e metodi di ricerca stanziando ingenti finanziamenti; questo, ovviamente, esclude di fatto quasi tutti i paesi del Terzo Mondo, aumentandone il risentimento verso quella che percepiscono come l'ennesima manovra di spartizione esclusiva delle ricchezze del pianeta (*ibidem*, p. 91).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

BAS [BRITISH ANTARCTIC SURVEY] *Annual Report 1998-1999*, Cambridge, 1999.

BAS *Annual Report 1999-2000*, Cambridge, 2000.

BAS *Annual Report 2000-2001*, Cambridge, 2001.

BOUTRON C.F., *Antarctic and Greenland Snow and Ice Cores: Archives of the Climate and Pollution of the Atmosphere of the Earth*, in «Korean Journal of Polar Research», Seoul, 1999, 2, pp. 45-52.

(6) Si preferisce usare questa espressione piuttosto che l'eufemistico «paesi in via di sviluppo» oppure «paesi sottosviluppati», che non è accurata dal punto di vista del carico ambientale.

- CAZENEUVE H., J. ARAUJO e M. GINZBURG, *The Climate System*, Buenos Aires, Instituto Antártico Argentino, 2001 (Contribución 532).
- DE LA COURT T., *Beyond Brundtland: Green Development in the 1990s*, New York, New Horizons Press, 1990.
- FIELDING REID H., *Antarctic Glaciers*, in «The Geographical Review», New York, 1924, pp. 603-614.
- GAVAGHAN E., *Life in the Deep Freeze*, in «Nature», Londra, 2002, 415, pp. 828-830.
- GIESE M. e T. van POLANEN PETEL, *Minimising the Disturbance to Antarctic Wildlife*, in «Australian Antarctic Magazine», Tasmania, 2001, autunno, pp. 14-15.
- IPCC, *Summary for Policymakers. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, disponibile nel sito Internet <http://www.ipcc.ch/pub/wg2SPMfinal.pdf>
- JONES A., *Icework*, in «Chemistry in Britain», Londra, 2000, 2, pp. 33-36.
- PERKINS S., *What's eating Antarctica?*, in «Antarctic», Christchurch, 2001, 3-4, pp. 57 e 68-71.
- PRIDDLE J., *Moving Towards a Synthesis of Global Change in the Antarctic*, in «Antarctic: Global Change Research», Tasmania, 1999, 4, pp. 17-18.
- PRISCU J. e altri, *Geomicrobiology of Subglacial Ice above Lake Vostok, Antarctica*, in «Science», Washington, 1999, pp. 2141-2144.
- RIDDLE M., *Human Impacts in Antarctica: What are we doing?*, in «Australian Antarctic Magazine», Tasmania, 2001, autunno, pp. 42-47.
- SIEGERT M. e altri, *Physical, Chemical and Biological Processes in Lake Vostok and Other Antarctic Subglacial Lakes*, in «Nature», Londra, 2001, 414, pp. 603-609.
- SMIRAGLIA C., *Guida ai ghiacciai e alla glaciologia: forme, fluttuazioni, ambienti*, Bologna, Zanichelli, 1992.
- Vostok Ice Core made Available*, in «Antarctic», Christchurch, 2000, 2.
- WOLFF E.W., *A Good Millennium?*, in «Weather», Reading, 2000 (a), 1, pp. 2-7.
- WOLFF E.W., *History of the Atmosphere from Ice Cores*, in «European Research Course on Atmosphere», Les Ulis, 2000 (b), pp. 147-177.
- <http://www.antarctica.ac.uk/cgi-bin/parser.pl/0005/www.antarctica.ac.uk/News/PressReleases/index.html> (sito Internet ufficiale del BAS).

AN ARCHIVE OF THE PLANET IN ANTARCTIC ICE. – Antarctica can be called an archive of the planet, because its ice contains information that are proving very useful in understanding the climatic, geological and probably even biological history of the planet. This article aims to provide updated information on the most fascinating discoveries of the international scientific community, regarding climate change, life under extreme conditions and anthropogenic pollution, with references to the issues of tourism and mineral exploitation in the Antarctic region.

Università di Urbino «Carlo Bo», Istituto Interfacoltà di Geografia

sognotncatai@yahoo.it