

GIUSEPPE OROMBELLI (*)

CAMBIAMENTI CLIMATICI

ABSTRACT: OROMBELLI G., *Climate changes*. (IT ISSN 1724-4757, 2005).

A short summary of the present knowledge on the climate variability is presented, on the basis of the geologic evidence. Ice ages, glacial/interglacial cycles, millennial and sub-millennial climate cycles and their possible causes are mentioned. Forcing factors and feedbacks operating in the climate system are briefly considered. A look into the future of climate is given, starting from the knowledge of the past climate.

KEY WORDS: Paleoclimate, Glacial cycles, Climate variability.

RIASSUNTO: OROMBELLI G., *Cambiamenti climatici*. (IT ISSN 1724-4757, 2005).

Viene proposta una breve sintesi delle conoscenze attuali sulla variabilità climatica, quali possono desumersi dallo studio del passato geologico. In particolare viene fatto riferimento ai cicli climatici alla scala delle decine di migliaia di anni ed a quelli di periodo via via minore. Sono ricordate le cause della variabilità climatica che sono state suggerite, in relazione al funzionamento del sistema climatico e viene accennato al possibile sviluppo futuro del clima, sulla base delle conoscenze del passato.

TERMINI CHIAVE: Paleoclima, Glaciazioni, Variazioni climatiche.

PREMESSA

L'umanità da sempre ha percepito i cambiamenti climatici prodottisi durante la sua storia, ma solamente a partire dal secolo XVII, con l'introduzione delle misure strumentali delle grandezze meteorologiche, ha potuto quantificare tali mutamenti, almeno a scala locale/regionale. Per una visione globale dei cambiamenti climatici, in realtà, si dispone di serie di dati strumentali, attendibili e sufficientemente distribuite e rappresentative, solamente dalla metà del XIX secolo. In questo breve intervallo di tempo si sono prodotte variazioni climatiche di modesta ampiezza e di durata da pluriennale a pluridecennale, quali quelle mo-

strate, ad esempio, dalle curve della temperatura media annua globale (fig. 1b - 9) o per grandi fasce latitudinali, diffuse dalla Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO). In queste curve è pure osservabile una tendenza al riscaldamento nell'ultimo secolo.

Negli ultimi trent'anni è in atto una fase di riscaldamento della temperatura media annua globale apparentemente più acuta, che avrebbe portato, nel decennio 1995-2004, al succedersi dei 9 anni (su dieci) più caldi dal 1861 (WMO, Press release n. 718, 15/12/2004).

Questi dati suscitano interesse ed allarme, poiché ci si chiede se si tratti di una fluttuazione climatica transitoria, nell'ambito della variabilità naturale o, come molti ricercatori ritengono, sia invece in atto un cambiamento climatico più rilevante, al quale concorrono le alterazioni prodotte dalle attività umane nel sistema climatico. Una tra le vie perseguibili per affrontare questo problema è data dallo studio della variabilità climatica nel passato, su tempi più lunghi, utilizzando le informazioni contenute nei cosiddetti «archivi naturali del clima». Questi sono successioni di materiali geologici e (paleo)biologici, nei quali sono registrati parametri in qualche modo connessi alle condizioni ambientali e climatiche esistenti all'atto della loro formazione.

Così sono note successioni di incrementi annui (anelli delle piante, bande di accrescimento di coralli, varve, ecc.) nei quali sono contenuti segnali istologici, geochimici, paleobiologici, ecc., connessi con le condizioni ambientali controllanti i caratteri di ogni singolo incremento; ove si disponga di successioni di dati meteorologici contigui e coevi, è possibile individuare la migliore correlazione tra dati meteorologici e segnali paleoclimatici. Più comunemente si dispone di successioni a minore risoluzione temporale, ma di maggiore durata, nelle quali sono contenuti analoghi segnali, utilizzabili come indicatori climatici. Questi sono anche detti *proxy data*, ad indicare che non sono segnali climatici diretti, ma «per procura», che devono pertanto essere interpretati, ripuliti da «rumore» estraneo e opportunamente tradotti (Bradley, 1999).

In questi ultimi decenni, la paleoclimatologia ha avuto un grande sviluppo ed ha compiuto notevoli progressi nel-

(*) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio (DISAT),
Università di Milano Bicocca, piazza della Scienza 1 - 20126 Milano.
Lavoro svolto con cofinanziamento MIUR 2003.

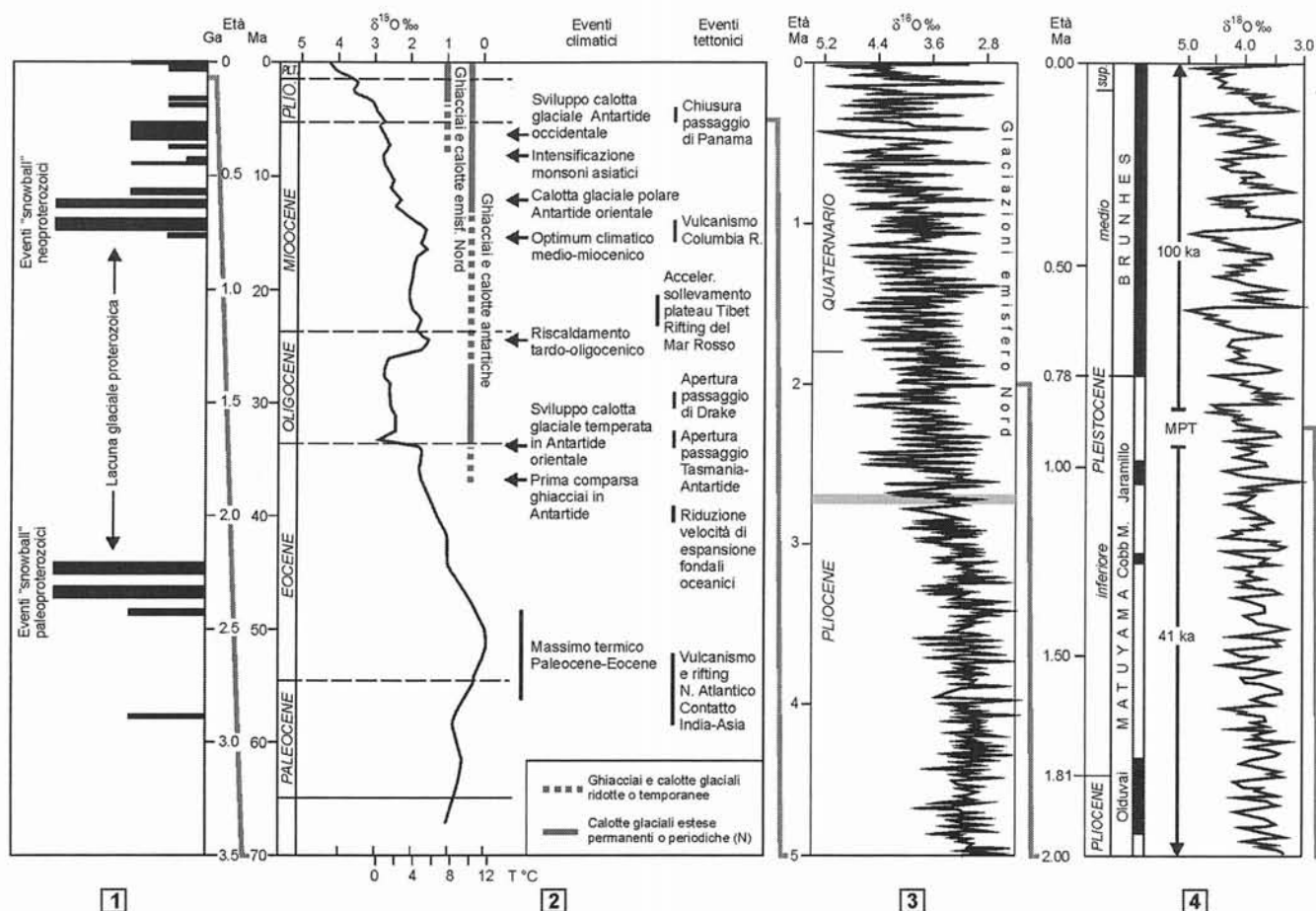


FIG. 1a - La variabilità climatica alle diverse scale temporali: dai miliardi (Ga) ai milioni di anni (Ma). 1: Principali «ere glaciali» riconosciute negli ultimi 3 miliardi di anni. Lo spessore dei segmenti indica la loro durata, la lunghezza l'estensione della copertura glaciale: i segmenti più lunghi rappresentano una copertura glaciale quasi completa, estesa anche alle basse latitudini (eventi «palla di neve»), quelli intermedi una copertura glaciale paragonabile a quella delle grandi glaciazioni pleistoceniche, con calotte alle medie-alte latitudini, quelli più brevi una copertura glaciale più limitata. Si noti il lungo intervallo di tempo (un miliardo e mezzo di anni) nel quale non sarebbero state presenti calotte glaciali sulla Terra (ridisegnato e semplificato da Hoffman & Schrag, 2002); 2: Variazioni della composizione isotopica ($\delta^{18}\text{O}$) delle acque oceaniche profonde negli ultimi 70 milioni di anni, secondo Zachos & alii, 2001. A valori più bassi di $\delta^{18}\text{O}$ corrispondono condizioni più calde e viceversa, ma la scala delle temperature (in ascisse, in basso) si applica solo da 70 a 35 milioni di anni. Sono indicate le principali tappe dello sviluppo dei ghiacciai nei due emisferi e gli eventi tettonici ritenuti possibili cause dei cambiamenti climatici (ridisegnato e semplificato da Zachos & alii, 2001); 3: Variazioni della composizione isotopica dell'ossigeno nei Foraminiferi bentonici dei sedimenti oceanici (Atlantico equatoriale, ODP 659), considerata indicativa del volume totale dei ghiacciai. Il cambiamento che si osserva intorno a 2.7 Ma è attribuito alla sviluppo delle glaciazioni nell'emisfero Nord (ridisegnato da Haug & alii, 2005); 4: Variazioni della composizione isotopica dell'ossigeno nei Foraminiferi bentonici dei sedimenti oceanici (Pacifico equatoriale, ODP 849), espressione delle variazioni del volume totale dei ghiacciai, modulate dalle variabili milankoviane. Da una ciclicità di 41 ka, si passa, intorno a 900 ka BP («transizione medio-pleistocenica» MPT) ad una ciclicità di 100 ka (ridisegnato da Pillans & Naish, 2004).

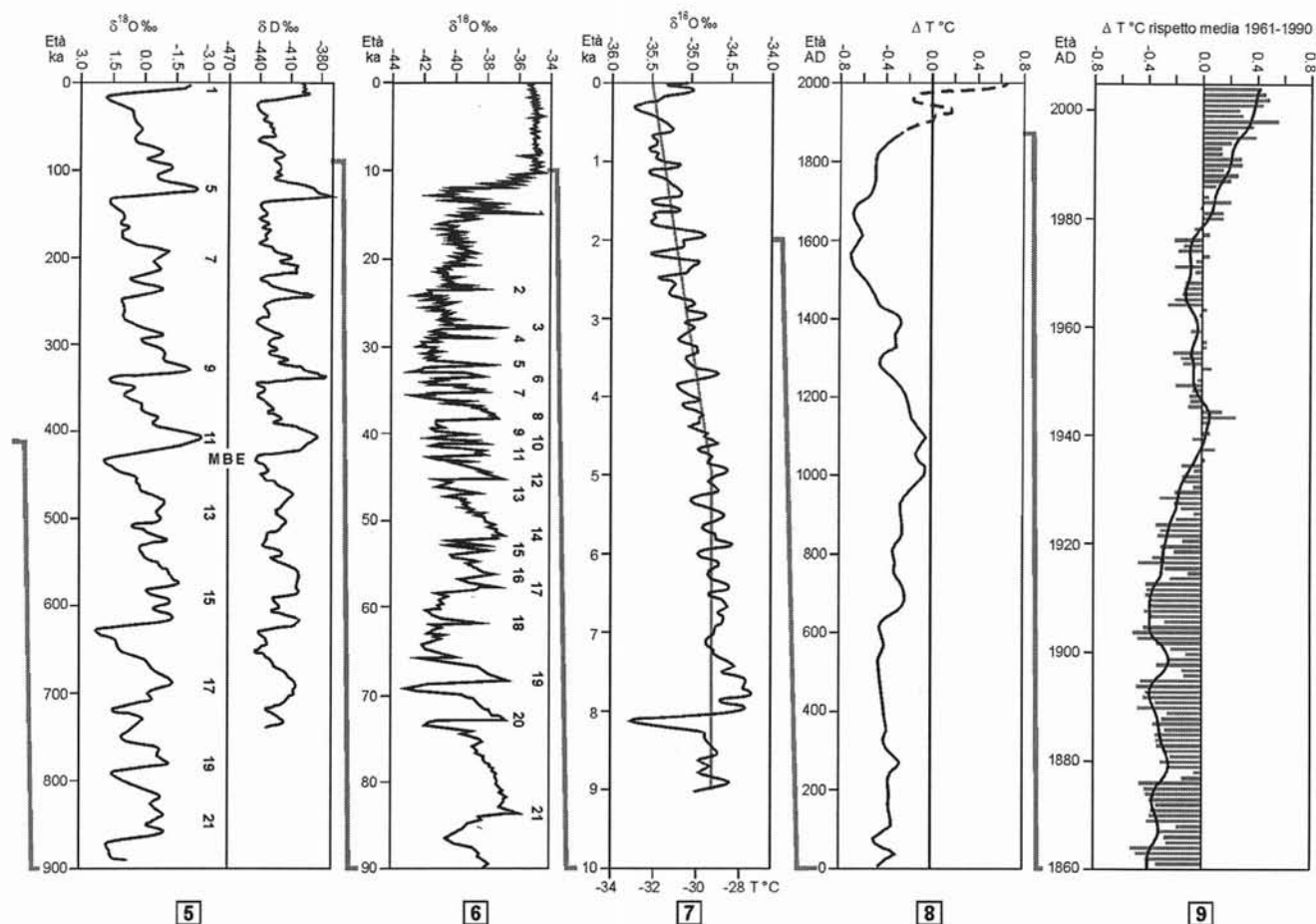


FIG. 1b - La variabilità climatica alle diverse scale temporali: dalle centinaia di migliaia di anni (ka) agli anni. 5: La curva paleoclimatica (variazioni della composizione isotopica dell'idrogeno δD) ottenuta dalla perforazione profonda nei ghiacci antartici EPICA Dome C (a destra), a confronto con la curva isotopica marina relativa all'Oceano Meridionale (a sinistra). Sono numerati i picchi degli stadi isotopici interglaciali. Si noti il cambio di ampiezza delle oscillazioni intorno a 430 ka (MBE «evento climatico medio-Bruhnes»): gli interglaciali successivi al MBE sono più caldi e di minore durata dei precedenti (ridisegnato da EPICA Community members, 2004); 6: Curva isotopica $\delta^{18}O$ ottenuta dalla perforazione in ghiaccio GISP2 in Groenlandia. Si notino: i) la variabilità climatica ad elevata frequenza, particolarmente accentuata tra 75 e 25 ka BP, la cui ampiezza è stimata da Johnsen & alii (2001) in 15-20 °C Tma; ii) la complessa storia della deglaciazione nell'emisfero settentrionale, tra 18 e 10 ka; iii) la sostanziale stabilità termica negli ultimi 10 ka. La numerazione si riferisce agli interstadiali (Greenland interstadials, GI) prodottisi durante l'ultima glaciazione (ridisegnato da Blunier & Brook, 2001); 7: Curva isotopica $\delta^{18}O$ ottenuta dalla perforazione in ghiaccio NorthGRIP in Groenlandia, relativa agli ultimi 9.000 anni, opportunamente filtrata. In ascissa, in basso, la scala della temperatura media annua proposta. Si osservi: i) il breve evento freddo a 8.200 anni dal presente; ii) le condizioni termiche circa stabili tra 8.000 e 5.000 anni; iii) il graduale declino della temperatura da 5.000 anni al presente; iv) la maggiore ampiezza delle variazioni negli ultimi 2500 anni (ridisegnato da Johnsen & alii, 2001); 8: Ricostruzione delle variazioni della temperatura media annua per l'emisfero settentrionale negli ultimi 2000 anni, derivata dall'analisi di indicatori paleoclimatici. La curva esprime lo scarto della temperatura media annua rispetto alla media del trentennio 1961-1990, fatta uguale a 0. A tratteggio il tratto finale di curva, ricavato dalle misure strumentali. In questa curva si nota un massimo termico nel «periodo caldo medievale» (secoli X-XII), un ampio e accentuato minimo nella Piccola Età Glaciale (secoli XVI-XVIII) ed il massimo, ancora in ascesa, degli ultimi decenni, in cui si sono raggiunte temperature superiori a quelle del massimo medioevale (modificato da Moberg & alii, 2005); 9: Variazioni della temperatura media annua globale dal 1861 al 2004. Le barre orizzontali indicano gli scarti rispetto alla media 1961-1990, la linea a tratto marcato è la curva smussata con un filtro binomiale. Dal 1860 al 1935 la temperatura media annua globale è stata costantemente inferiore alla media del trentennio di riferimento. A partire dal secondo decennio del secolo XX la temperatura è risalita fino ad un massimo nei primi anni '40. Quindi è seguito un ampio, ma poco profondo, minimo durato fino alla metà degli anni '70. Da allora la temperatura è in costante ascesa. Negli ultimi 10 anni si sono avuti i nove anni più caldi dell'intero periodo considerato. (Fonte WMO).

l'interpretazione numerica delle condizioni climatiche del passato, nella risoluzione temporale, grazie a nuove tecniche di datazione e correlazione, e nella modellazione delle variazioni climatiche.

GLI SVILUPPI DELLA PALEOCLIMATOLOGIA

Pur essendo già noto che nel passato geologico erano esistite condizioni climatiche differenti da quelle attuali, è dalla prima metà del secolo XIX, con lo svilupparsi della «teoria glaciale» (dell'idea cioè che nel passato i ghiacciai fossero stati più estesi che nel presente), che si pone il problema dei cambiamenti climatici globali e delle loro cause. L'identificazione, dapprima di una «Era glaciale», poi, all'interno di questa, del succedersi ciclico di periodi glaciali e interglaciali, sulla base di evidenze geomorfologiche, sta infatti alla radice degli studi sulla variabilità climatica nel passato (Flint, 1957). Per spiegare le grandiose trasformazioni ambientali, necessariamente connesse con variazioni climatiche, prodottesi sulla Terra, in particolare durante il Quaternario, sono state via via formulate numerose ipotesi e teorie: tra queste particolare rilievo ha avuto quella sulle variazioni dell'insolazione, prodotte dalle variazioni dei parametri orbitali terrestri, già avanzata da Croll (1867) e poi più compiutamente proposta da Milankovitch (1941) (si veda in proposito Imbrie & Imbrie, 1979).

Se gli studi delle evidenze geomorfologiche, necessariamente discontinue, incomplete e mal databili, per primi evidenziarono la natura ciclica delle glaciazioni, nella seconda metà del XX secolo gli studi di lunghe successioni loessiche, lacustri e soprattutto di sequenze continue di sedimenti marini profondi rivelarono più compiutamente la struttura della variabilità climatica, caratterizzata da cicli connotati da frequenze simili a quelle delle variazioni dei parametri orbitali. Un ruolo di primaria importanza, sia in campo paleoclimatico che stratigrafico, hanno avuto gli studi geochimico-isotopici sui Foraminiferi nei sedimenti oceanici, che hanno fornito le curve paleoclimatiche di riferimento. In queste curve sono stati identificati gli «stadi isotopici marini» (MIS), ora anche detti «stadi degli isotopi dell'ossigeno» (OIS), numerati progressivamente a partire dal presente, con numeri dispari (interglaciali) e pari (glaciali).

I CICLI GLACIALI/INTERGLACIALI

Le curve della composizione isotopica nei gusci dei Foraminiferi mostrano la storia della riduzione di temperatura attraverso il Cenozoico, le oscillazioni climatiche durante il Neogene e, in particolare, i cicli climatici del Quaternario (fig. 1a - 2, 3, 4). Quelle ottenute dai foraminiferi bentonici vengono interpretate come espressione delle variazioni del volume integrato dei ghiacciai sui continenti, o, all'inverso, come espressione delle variazioni glacio-eustatiche del livello del mare. È pertanto nei sedimenti marini profondi che si è trovata la documentazione più conti-

nua e di valore globale delle glaciazioni e degli interglaciali (Wilson, Drury & Chapman, 2000).

Nel Quaternario inferiore, fino a circa 1,2 Ma, prevale una ciclicità ad ampiezza contenuta e frequenza elevata, con cicli simmetrici e periodo di circa 40 mila anni. L'ampiezza delle oscillazioni rimane sostanzialmente invariata fino a 900 mila anni fa, ma il periodo diviene più irregolare e tende ad allungarsi («mid-Pleistocene transition», fig. 1a - 4). Negli ultimi 900 mila anni il periodo si allunga a circa 100 mila anni, i cicli divengono asimmetrici e la loro ampiezza si accresce, dapprima con fasi glaciali più acute, poi («mid-Brunhes event») anche con picchi interglaciali più elevati (fig. 1a - 4, 1b - 5). L'asimmetria dei cicli si manifesta con transizioni più gradualmente dai picchi interglaciali ai picchi glaciali e con transizioni più rapide da questi ultimi ai primi («terminazioni», indicate con numeri romani crescenti dall'ultima, via via alle precedenti).

Con lo studio delle carote di ghiaccio perforate nelle calotte polari in Groenlandia e in Antartide si è aperto un nuovo campo di studi paleoclimatici. I ghiacci delle calotte polari non sono altro che le successive nevicature accumulate nel tempo e trasformate in nevato e ghiaccio, in assenza di fenomeni di fusione. In questo caso i parametri chimici e fisici misurati sono direttamente legati alle condizioni dell'atmosfera (e quindi del clima) nel passato, quando non si tratti addirittura di analisi condotte su campioni d'aria rimasti intrappolati nel ghiaccio.

In Antartide la perforazione di Vostok (Petit & *alii*, 1999) ha mostrato che negli ultimi 420 mila anni si sono succeduti quattro cicli asimmetrici, durante i quali la temperatura (desunta dalla composizione degli isotopi stabili) e la concentrazione dei gas serra CO₂ e metano, sono variati in fase, entro valori limite circa costanti. La temperatura è variata, rispetto al valore olocenico, da - 8°C nelle fasi più fredde a + 2°C in quelle più calde. La CO₂ e il metano sono variati da valori minimi di 180 ppmv e 350 ppbv, nei glaciali, a valori massimi di 280/300 ppmv e 750 ppbv, rispettivamente. In antifase con la temperatura e i gas serra è variata la concentrazione delle polveri atmosferiche (fig. 2).

Pertanto risulta che le variazioni della temperatura, dei due gas serra e delle polveri siano tra loro connesse e poiché i gas serra e le polveri modificano il bilancio radiativo dell'atmosfera, ne deriva che nel sistema climatico operano retroazioni, in questo caso positive, che amplificano iniziali variazioni di temperatura prodotte da altre cause (ad esempio orbitali).

Nella curva della temperatura gli interglaciali mostrano un piccolo aguzzo (tranne l'Olocene che ha la forma di un *plateau*) e di breve durata, la temperatura poi declina irregolarmente ai valori minimi glaciali, raggiunti i quali rimbalza rapidamente ai massimi interglaciali (terminazioni). Complessivamente le condizioni interglaciali (simili o un poco più calde del presente) sono durate circa il 10% del tempo, contro il 90% delle condizioni più fredde o decisamente glaciali. L'analisi delle terminazioni ha mostrato che il primo segnale a denotare un cambiamento (riduzione) è quello delle polveri; seguono, contemporaneamente, i segnali della temperatura isotopica e dei due gas serra (au-

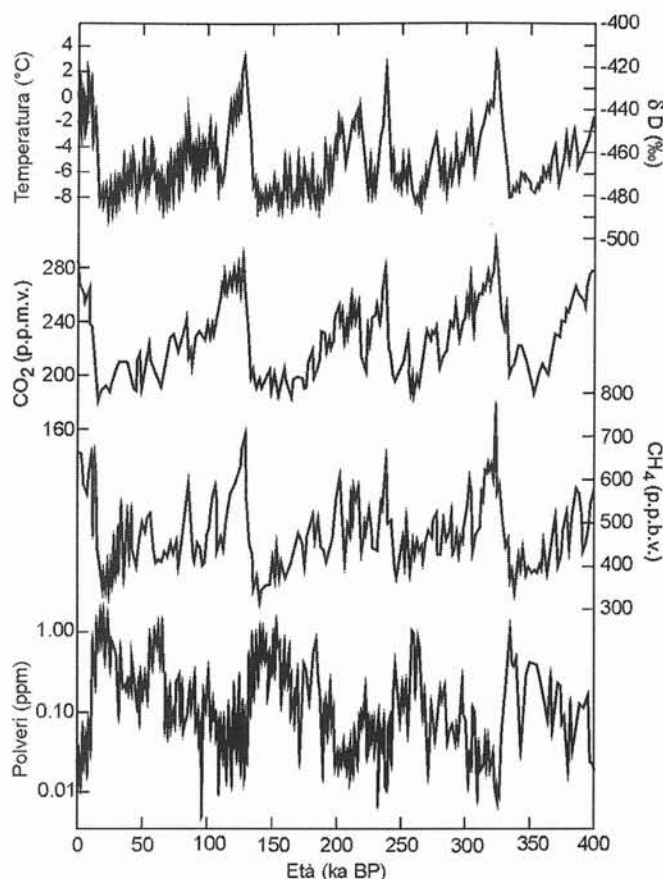


FIG. 2 - Curve climatiche di Vostok. Dall'alto, variazioni della temperatura media annua, della concentrazione di biossido di carbonio, di metano e delle polveri atmosferiche in Antartide negli ultimi 420.000 anni. L'escursione della temperatura media annua in Antartide, in un intero ciclo climatico, è valutata in circa 10 °C. CO₂ e CH₄ sono variati in fase con la temperatura, mentre le polveri atmosferiche raggiungono valori massimi nelle fasi più fredde e valori minimi in quelle più calde. Ne risultano retroazioni positive che, modificando il bilancio radiativi dell'atmosfera, tendono ad amplificare l'ampiezza delle variazioni climatiche (modificato da Raynaud & alii, 2003).

mento). Con un ritardo di alcune migliaia di anni varia la composizione isotopica dell'ossigeno atmosferico (contenuto nelle bolle d'aria incluse nel ghiaccio), ritenuta in equilibrio con quella degli oceani, e dunque indicativa del volume dei ghiacci sui continenti. Le variazioni delle grandi calotte dell'emisfero settentrionale sembrano quindi seguire le terminazioni e non determinarle.

La perforazione EPICA a Dome C, ha raggiunto la profondità di 3270 m, attraversando l'intera calotta dell'Antartide orientale (dicembre 2004). L'età del ghiaccio basale è stimata a 950 mila anni.

I risultati ottenuti sui primi 740 mila anni (EPICA Community Members, 2004), replicano per gli ultimi quattro cicli quelli di Vostok. Tra 420 mila e 740 mila anni si sono prodotti altri quattro cicli climatici (fig. 1b - 5). Intorno a 430 mila anni si colloca la terminazione V, che se-

para gli ultimi quattro cicli già descritti, dai quattro precedenti. Questi differiscono per avere ampiezza minore: in particolare gli interglaciali appaiono meno caldi e più lunghi, mentre ugualmente freddi risultano i glaciali. Quindi tra 740 e 430 mila anni fa le condizioni climatiche sopra l'Antartide sono state meno contrastate e con periodicità meno regolare. Il cambiamento di ampiezza dei cicli climatici a 430 mila anni viene anche indicato come *Mid-Bruhnes event*, cadendo circa a metà dell'intervallo di polarità magnetica normale di Bruhnes.

Le prime indagini svolte sulla terminazione V e il successivo interglaciale OIS 11 hanno mostrato che la temperatura isotopica ed i gas serra sono variati entro valori simili a quelli della terminazione I e dell'Olocene (in condizioni di forzanti orbitali molto simili), ma nel dettaglio le due curve differiscono.

LA VARIABILITÀ CLIMATICA ALLA SCALA DEL MILLENNIO

Le perforazioni in ghiaccio condotte in Groenlandia hanno esplorato gli ultimi 120 mila anni (North Greenland Ice Core Projects members, 2004). Già a partire dalla perforazione di Camp Century (1966) hanno mostrato, durante l'ultima glaciazione (da circa 110.000 a 11.500 anni fa), una variabilità climatica ad elevata frequenza, con ampiezza di poco inferiore a quella dei cicli glaciali/interglaciali. Si tratta di escursioni termiche di ampiezza stimata intorno a 15 °C (Johnsen & alii, 2001), della durata da uno a pochi millenni, delimitate da transizioni rapide, che si realizzano in pochi secoli/decenni. Anche in questo caso il decremento di temperatura dai picchi massimi è relativamente più graduale, mentre più repentina è la transizione dai minimi al massimo successivo.

I picchi caldi sono detti «eventi di Dansgaard-Oeschger» (in onore dei due scopritori), sono correlati con interstadi e numerati da 1 a 25, mentre i picchi freddi sono correlati con stadi (Greenland stadials) e numerati da 1 a 26 (North Greenland Ice Core Projects members, 2004).

La variabilità climatica ad elevata frequenza, osservata per la prima volta nei ghiacci della Groenlandia, è poi stata osservata in altre sequenze marine e continentali.

Nei sedimenti dell'Atlantico settentrionale sono stati rinvenuti livelli di detriti rilasciati da iceberg (*ice-rafted debris*), noti come «eventi di Heinrich» (dal nome dello scopritore), attribuiti a fasi di accelerato flusso glaciale e distacco di iceberg, soprattutto della Calotta Laurenziana ma pure di quella Scandinava. Gli eventi di Heinrich sono associati con fasi di raffreddamento della temperatura superficiale del mare e ricorrono ad intervalli di alcune migliaia di anni. È stata indicata una correlazione tra gli eventi di Heinrich (e sottoeventi) e i picchi freddi stadiali delle carote di ghiaccio della Groenlandia e sono stati riconosciuti cicli di graduale complessivo raffreddamento (cicli di Bond, includenti gruppi di cicli interstadiali/stadiali), che si concludono con i maggiori eventi di Heinrich (Bond & Lotti, 1995).

Nella graduale risalita del livello del mare prodottasi durante la deglaciazione, a partire da circa 19 mila anni fa, sono state individuate due fasi di risalita particolarmente rapida, attribuite ad un accresciuto tasso di rilascio delle acque di fusione glaciale dalle calotte settentrionali (melt water pulse 1A e 1B), intorno a 14.500 e 11.000 anni fa, in fase con l'evento di Heinrich H1 e con lo stadio freddo «Dryas recente» (YD), rispettivamente (Lambeck & alii, 2002).

Nelle carote di ghiaccio antartiche la variabilità climatica ad alta frequenza è stata osservata, ma in forma attenuata, cioè con ampiezza e frequenza ridotta. Solamente gli eventi più robusti osservati in Groenlandia sono stati riconosciuti in Antartide. Mediante correlazioni interemisferiche (basate sui picchi di metano atmosferico) è stato però mostrato che questi cicli climatici minori non sono sincroni, ma anzi quasi in opposizione di fase, con l'emisfero Sud che precede di un millennio o più l'emisfero Nord (Blunier et al., 1998), quasi fosse in azione una «altalena bipolare» (Broecker, 1998). Così il breve evento freddo prodottosi in Antartide durante l'ultima deglaciazione (*Antarctic cold reversal*), precede di un migliaio di anni l'analoga ma più acuta fase di raffreddamento riconosciuta nell'emisfero Nord («Dryas recente» o «superiore») e studi sull'eccesso di deuterio, parametro ritenuto indicatore dei caratteri delle aree sorgenti dell'umidità (in particolare la temperatura superficiale delle acque oceaniche), hanno mostrato che questa oscillazione climatica minore in Antartide è pure sfasata rispetto alle variazioni di temperatura superficiale dell'Oceano meridionale (Stenni & alii, 2001).

Nelle carote di ghiaccio polari la variabilità alla scala del millennio durante l'Olocene sembra assente o assai meno espressa. Studi più approfonditi hanno peraltro mostrato che, sia nelle carote di ghiaccio (Delmonte & alii, 2002) che in altri archivi naturali, anche durante l'Olocene sono presenti cicli climatici alla scala del millennio (Bond & alii, 1997).

Le analisi spettrali delle serie temporali hanno mostrato la presenza di cicli climatici della durata di ~ 6200 e 1450 anni (Mayeswsky & alii, 1997). Una periodicità di circa 1500 anni è stata pure riconosciuta da Bond & alii (2001) in indicatori della circolazione oceanica del Nord Atlantico, associati a minimi dell'attività solare dedotti dalla concentrazione di ^{14}C e di ^{10}Be .

LA VARIABILITÀ CLIMATICA SECOLARE O ALLA SCALA DEI DECENNI

Le variazioni climatiche a più elevata frequenza, già evidenti, almeno in parte, nelle serie storiche di misure strumentali relative agli ultimi secoli, vengono analizzate nel precedente passato, particolarmente durante l'Olocene, per il quale si dispone di un numero molto elevato e diversificato di informazioni paleoclimatiche e di un adeguato controllo temporale. Noti sono gli studi sulle fluttuazioni glaciali oloceniche, che hanno messo in evidenza fasi di espansione e di contrazione più volte ripetutesi, di durata da plurisecolare a pluridecennale. Tra le fasi di

avanzata, particolarmente conosciuta è la Piccola Età Glaciale che, con caratteri e con tempi differenti da regione a regione, ha interessato tutti i ghiacciai montani nei due emisferi, tra il 14° e il 19° secolo.

Altri studi significativi hanno riguardato le variazioni di livello dei laghi, le successioni polliniche nelle torbe e nei depositi lacustri, ecc. Infine particolare rilevanza hanno avuto le indagini paleoclimatiche svolte su successioni continue ad elevata risoluzione temporale, quali speleotemi, bande annue di accrescimento di coralli, sedimenti varvati, anelli delle piante, ecc. Tutti questi studi hanno mostrato un ampio spettro di variazioni climatico-ambientali, in particolare connesse a variazioni del ciclo idrologico e a variazioni della circolazione atmosferica. Cambiamenti climatici rapidi si sono prodotti ad intervalli quasi-periodici, anche in assenza di calotte glaciali, e si sono intensificati nella sonda metà dell'Olocene (Mayewski & alii, 2004). Eventi climatici grandiosi si sono prodotti durante l'Olocene, quali la desertificazione del Sahara, ma anche crisi di siccità più circoscritte, nel tempo e nello spazio, o fasi fredde e umide, o infine, periodi in cui si sono concentrati eventi alluvionali, frane, ecc., che hanno localmente interferito, anche in modo grave, nella storia delle società umane (deMenocal, 2001).

Gli studi paleoclimatici hanno rivelato periodicità climatiche da pluriannuali a plurisecolari, volta a volta messi in relazione con le periodicità riconosciute nella attività solare (Bond & alii 2001), fino a quelle proprie delle oscillazioni interne al sistema climatico (ENSO, NAO, AO, AAO, ecc.).

Partendo dall'analisi degli anelli delle piante e di successioni marine e lacustri ad alta risoluzione, sono pure state prodotte curve della temperatura media annua nell'emisfero settentrionale (ove si dispongono di maggiori informazioni paleoclimatiche); la più recente (Moberg & alii, 2005), relativa agli ultimi 2000 anni, mostra variazioni da plurisecolari a pluriannuali, di ampiezza contenuta entro 1 °C, se si escludono gli ultimi tre decenni, che appaiono i più caldi dell'intero periodo. In particolare la curva evidenzia il massimo termico medioevale, culminato nei secoli 11° e 12°, il minimo termico della Piccola Età Glaciale, culminato nei secoli 16°-18°, e il già citato picco caldo della fine del 20° secolo, attualmente ancora in aumento.

IL SISTEMA CLIMATICO ED I MECCANISMI DI FEEDBACK

Se il clima della Terra può essere definito come le condizioni caratteristiche della sua atmosfera, che si traducono localmente come il «tempo atmosferico medio» (valori medi ed estremi entro cui variano i parametri meteorologici durante l'anno, dedotti da osservazioni lungo un periodo di 10-30 anni), il sistema climatico è l'insieme di componenti e processi che, azionati dall'ineguale riscaldamento solare, ridistribuiscono il calore e l'umidità sulla Terra, tramite la circolazione atmosferica e oceanica (Wilson & alii, 2000). Componenti del sistema climatico sono l'atmosfera, l'idrosfera, la criosfera, la litosfera e la

biosfera. Ogni fattore che agisce sulle componenti del sistema climatico, producendo un cambiamento nel sistema, è detto fattore forzante. Sensibilità del clima è la dimensione della risposta del sistema a fronte della dimensione del fattore forzante.

Nel sistema climatico agiscono numerosi e complessi meccanismi di *feedback* (retroazioni) positivi e negativi, che amplificano o attenuano gli effetti dei fattori forzanti, rendendo non lineare la risposta del sistema alla causa perturbante (Stocker & alii, 2001).

Uno dei più noti è il *feedback* positivo neve-ghiaccio/albedo: se il raffreddamento climatico prodotto da una causa iniziale determina un aumento delle superfici coperte da neve e ghiaccio, aumenta l'albedo (cioè la percentuale di radiazione solare riflessa nello spazio) e quindi il raffreddamento iniziale si accentua, determinando un'ulteriore espansione dei ghiacci, e così via, fino a che si raggiungono limiti interni al sistema o intervengono fattori forzanti di segno opposto. Per questo le regioni polari e quelle di montagna hanno una sensibilità climatica maggiore, poiché in esse gli effetti dei fattori forzanti vengono amplificati.

Lo sviluppo delle grandi calotte glaciali determina un abbassamento del livello del mare che, a sua volta, consente alle calotte di espandersi ulteriormente sulle piattaforme continentali, mentre nelle regioni di montagna si ampliano le aree di accumulo ed i ghiacciai possono estendersi ulteriormente (Siebert, 2001). Numerose altre interazioni si producono tra calotte glaciali, litosfera, atmosfera ed oceani (Clark & alii, 1999).

Meccanismi di *feedback* agiscono nell'ambito del bilancio radiativo dell'atmosfera (come già citato a proposito delle polveri atmosferiche e dei gas ad effetto serra), coinvolgendo copertura nuvolosa, radiazione solare riflessa e diffusa, radiazione a onda lunga assorbita dai gas/serra, ecc. Così la quantità di vapor d'acqua in atmosfera varia in funzione diretta della temperatura: un riscaldamento causa maggiore evaporazione ed aumenta l'umidità assoluta, quindi accresce l'effetto serra ed il riscaldamento dell'atmosfera, ecc. Per altro aumenta la copertura nuvolosa, con effetto opposto. Più complesse sono le interazioni tra atmosfera, oceani e biosfera per quanto attiene alla CO₂, che si ripartisce diversamente nei tre diversi serbatoi al variare delle condizioni climatiche. Complesse interazioni collegano temperatura superficiale degli oceani, circolazione oceanica superficiale e profonda, circolazione atmosferica, ciclo idrologico e distribuzione dell'umidità, estensione dei ghiacci marini e continentali, vegetazione, rete fluvio-lacustre. Fattori forzanti e interazioni che si producono nel sistema climatico variano, infine, in funzione delle scale temporali e spaziali, dai fenomeni locali o regionali e di breve durata ai cambiamenti globali che si producono nei tempi geologici.

IL PROBLEMA DELLA CAUSE DELLA VARIABILITÀ CLIMATICA

La variabilità climatica si dispiega su un ampio spettro di durate temporali, di dimensioni spaziali e di ampiezze delle escursioni. Le cause della variabilità climatica vanno

quindi volta a volta cercate in fenomeni compatibili con le sue dimensioni temporali, spaziali e di ampiezza. Se si escludono i tempi più remoti dell'origine e dell'evoluzione della Terra, all'estremo della variabilità climatica per durata ed ampiezza si collocano l'insorgere e lo svanire, ad intervalli irregolari lungo la storia geologica (per lo meno negli ultimi tre miliardi di anni), di «ere glaciali» (fig. 1a - 1), periodi lunghi decine di milioni di anni in cui i ghiacciai erano ampiamente presenti sulla Terra, separati da lunghi periodi in cui questi erano assenti (Hambrey, 1999). Secondo l'ipotesi della Terra-palla di neve, in taluni di questi periodi, nel Proterozoico (intorno a 600-700 Ma e 2,3 - 2,4 Ga), l'estensione della copertura glaciale sarebbe stata quasi totale sulla Terra, interessando anche le basse latitudini, realizzandosi in tal modo l'estremo climatico più freddo, non più in seguito raggiunto (Kirschvink, 2002; Hoffman & Schrag, 2002).

Le ere glaciali vengono comunemente attribuite a cambiamenti climatici indotti da cause geologiche, che agiscono su questa scala di tempi. Dalla mobilità orizzontale e verticale delle placche litosferiche dipende la configurazione dei bacini oceanici, il livello del mare e la topografia dei continenti, che influenzano la circolazione oceanica ed atmosferica e quindi la distribuzione delle temperature e delle precipitazioni sulla Terra, nonché la presenza e l'estensione delle aree sulle quali si potevano sviluppare le grandi calotte glaciali. Anche l'evoluzione dell'atmosfera ed i suoi cambiamenti, indotti da cause geologiche e biologiche, si ritiene abbiano avuto un ruolo nei cambiamenti climatici a questa scala temporale.

L'ultima era glaciale è iniziata con la comparsa di ghiacciai in Antartide orientale, durante l'Eocene terminale, intorno a 36 milioni di anni fa, a seguito di un graduale declino della temperatura globale dal massimo termico prodottosi nel Paleocene terminale - Eocene basale (intorno a 50 milioni di anni fa), in parallelo a una diminuzione della CO₂ atmosferica (Pearson & Palmer, 2000; Demicco & alii, 2003). Una prima fase di rapido raffreddamento si è verificata alla base dell'Oligocene (circa 34 milioni di anni fa), con lo sviluppo di una grande calotta antartica temperata (fig. 1a - 2). Dopo un ritorno a condizioni un poco meno fredde nell'Oligocene terminale - prima metà del Miocene, una seconda fase di raffreddamento si è prodotta intorno a 14 milioni di anni fa, con il passaggio da ghiacciai temperati a ghiacciai polari e il successivo sviluppo della calotta dell'Antartide occidentale. Una ulteriore fase decisiva di raffreddamento si è prodotta 2,7 milioni di anni fa (Haug & alii, 2005), quando i ghiacciai si sono diffusi sulle montagne del globo e le calotte glaciali sono apparse anche nell'emisfero settentrionale. Per tutte queste fasi di più rapido cambiamento climatico sono state invocate cause geologiche, comportanti modificazioni nella circolazione oceanica ed atmosferica, quali l'apertura dello Stretto di Drake, il sollevamento del bastione himalayano e del Tibet, la chiusura dello Stretto di Panama, ecc., ma pure cause biologiche o cause interne al sistema climatico (Zachos & alii, 2001; Hay & alii, 2002; Ollier, 2004; Haug & alii, 2005). Mentre la calotta antartica, isolata climaticamente dalla cintura continua dell'Oceano Meridionale, ri-

sulta sostanzialmente stabile da almeno una decina di milioni di anni, o soggetta a modeste variazioni, i ghiacciai montani e le calotte dell'emisfero settentrionale nel Pliocene terminale e nel Quaternario sono andati soggetti a ripetute grandiose variazioni, o addirittura si sono formati e sono scomparsi (calotte nord-americana ed eurasiatica) nei cicli glaciali/interglaciali. Come è ampiamente noto, questi cicli appaiono modulati dalle variazioni dei parametri orbitali della Terra, da cui dipende la distribuzione latitudinale e stagionale dell'insolazione, come sostenuto da Milankovich. Il fattore critico è la durata e l'intensità della stagione estiva alle alte latitudini dell'emisfero Nord (60-80° N): in questa fascia di latitudine, particolarmente sensibile, estati brevi e fresche sono favorevoli allo sviluppo dei ghiacciai, mentre estati lunghe e calde sono sfavorevoli. Sono state calcolate variazioni fino al 20% dell'insolazione media nel mese più caldo alla latitudine di 65° N. Si ritiene che lo sviluppo delle calotte glaciali nell'emisfero Nord abbia influito sul clima globale, anche nell'emisfero opposto, modulando l'estensione della calotta antartica attraverso le variazioni del livello marino.

Il fattore forzante orbitale ha scandito il tempo dei cicli glaciali-interglaciali ma è stato amplificato e deformato da fenomeni di *feedback* positivo. Benchè la forzante orbitale durante il Quaternario abbia agito con le stesse frequenze, i cicli glaciali/interglaciali sono cambiati in ampiezza e periodo nel tempo. La «rivoluzione (o transizione) medio-pleistocenica» intorno a un milione di anni fa ha visto un cambio di passo, da un periodo di circa 40 mila ad un periodo di circa 100 mila anni. Varie ipotesi sono state fatte in proposito, che coinvolgono le interazioni tra le calotte glaciali, le deformazioni glacioisostatiche, il comportamento dinamico delle calotte in funzione della natura del substrato, del loro spessore, ecc., oppure interazioni con altre variabili, in primo luogo con i gas-serra. Le ipotesi proposte vengono controllate con modelli, con i quali si cerca di riprodurre le curve climatiche, in particolare le curve isotopiche che esprimono il volume complessivo dei ghiacci.

Per spiegare la variabilità climatica di breve periodo (millennio), non essendo note cause astronomiche orbitali con frequenza compatibile, è stato suggerito come possibile causa l'interruzione e la ripresa o comunque le variazioni nella circolazione oceanica termoalina, responsabile del trasporto di calore dalle basse alle alte latitudini (Broecker & Denton, 1989). Dapprima il settore settentrionale dell'Oceano Atlantico e il meccanismo di formazione delle acque profonde nordatlantiche sono stati visti come il punto critico del sistema, poi anche l'oceano meridionale e le aree di formazione delle acque di fondo antartiche. In questo contesto sono stati proposti modelli per spiegare il meccanismo dell'altalena bipolare (Stocker & Johnsen, 2003). Quanto alle cause della interruzione/variazione della circolazione termoalina sono state proposte varie ipotesi, quali lo svuotamento di laghi di sbarramento glaciale, l'ingresso di «flottiglie» di iceberg nel Nord Atlantico, ecc. (Broecker, 1994).

Ma pure la fascia oceanica intertropicale (in cui vi è un *surplus* di energia termica) viene ritenuta parte attiva nelle

variazioni climatiche, anche rifacendosi a modalità simili a quelle dell'ENSO nel Pacifico, i cui effetti, sia pure su tempi brevi, si fanno risentire anche a grande distanza. Infine il sistema monsonico è considerato un attore importante, in particolare per quanto attiene al ciclo idrologico ed alla distribuzione, frequenza e intensità delle precipitazioni.

La variabilità climatica a più elevata frequenza è spesso associata all'attività solare ed alle sue variazioni. Queste sono note, nel passato, attraverso gli studi sulle macchie solari e, indirettamente, attraverso la determinazione delle variazioni di produzione di ^{14}C in atmosfera, quale si può ottenere dal confronto di età ^{14}C ed età calendario negli anelli delle piante. Il problema della connessione tra le variazioni della irradianza e dello spettro solari con le variazioni del clima terrestre è ancora dibattuto, anche se sono state documentate talune correlazioni che rendono plausibili tali connessioni per il passato (Solanki, 2002). Anche l'attività vulcanica esplosiva viene considerata come possibile fattore forzante, quale sicuramente è nel caso di singoli eventi, ma con durata limitata a pochi anni. È invece incerto se una variabilità nel tempo dell'attività esplosiva globale o regionale possa essere ritenuta causa (o effetto?) di variabilità climatica.

Infine le oscillazioni interne al sistema accoppiato atmosfera/oceano trovano riscontro nelle variazioni climatiche a scala pluriennale/decennale.

Molte altre cause di variazioni climatiche sono state proposte, sia esterne alla Terra, sia interne. Tra queste merita un cenno la possibilità di rilascio di metano dai sedimenti di piattaforma (o da altri serbatoi), recentemente proposta (Maslin & alii, 2004).

IL FUTURO ED I PROBLEMI APERTI

Gli studi sulla variabilità climatica si propongono di contribuire alla comprensione del funzionamento del sistema climatico e, possibilmente, alla previsione del suo comportamento futuro. Una tra le vie seguite è quella dello studio dei precedenti interglaciali, della loro durata e della loro transizione al glaciale successivo. Mediamente negli ultimi 430 mila anni (dopo l'Evento medio-Bruhnes) gli interglaciali nelle curve isotopiche marine e dei ghiacci antartici hanno avuto una durata breve, intorno a 15 mila anni. L'interglaciale Eemiano avrebbe avuto una durata di 16 mila anni (Tzedakis & alii, 2004). L'interglaciale OIS 11, caratterizzato da condizioni del fattore forzante orbitale simili a quelle attuali, sarebbe durato 28 mila anni, con condizioni circa simili a quelle attuali (EPICA community members, 2004). Il presente interglaciale, l'Olocene, è iniziato 11.500 anni fa; potrebbe quindi prolungarsi per numerose migliaia di anni, anche se l'insolazione modulata dai parametri orbitali è attualmente declinante, dopo il picco raggiunto nella prima parte dell'Olocene (fig. 3). Tuttavia, nelle prossime decine di migliaia di anni, a causa dell'eccentricità quasi nulla, le variazioni dell'insolazione alle elevate latitudini Nord saranno molto contenute, inferiori a quelle prodottesi nel precedente ciclo interglaciale-glaciale, così che è possibi-

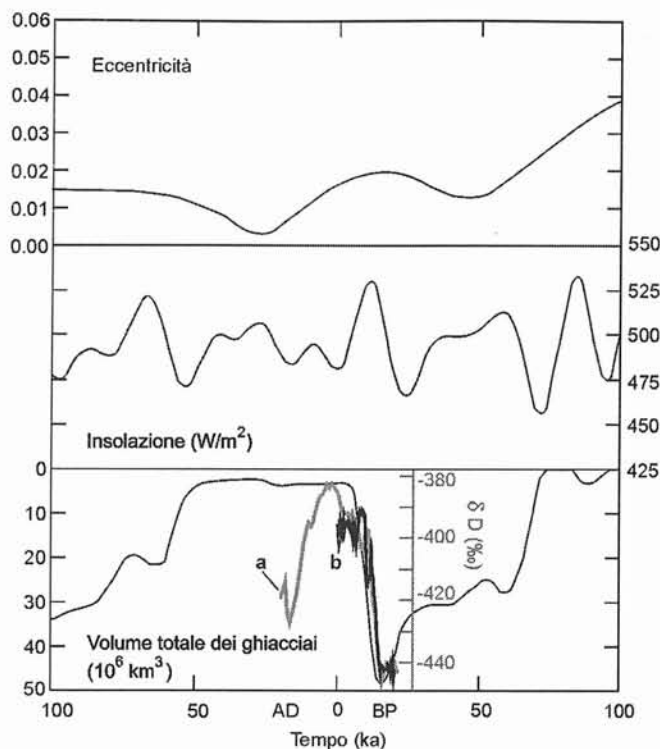


FIG. 3 - Variazioni della eccentricità, dell'insolazione nel mese di giugno a 65° Nord e simulazione del volume totale dei ghiacciai negli ultimi 100 mila anni (0 - 100 ka BP) e loro proiezione nei futuri 100 mila anni (0 - 100 ka AD). La diminuzione della eccentricità nelle prossime decine di ka fino a valori prossimi allo 0, accompagnandosi alle variazioni degli altri due fattori orbitali (precessione e obliquità), attenua la riduzione dell'insolazione alle elevate latitudini Nord. Nel riquadro inferiore, la linea sottile mostra un modello previsionale delle future variazioni del volume totale dei ghiacciai che si manterrebbe su valori circa uguali a quello attuale per oltre 50 mila anni. La curva nera a tratto più marcato (b) riproduce la variazione della composizione isotopica δD nella carota di ghiaccio di EPICA DC negli ultimi 25 mila anni: dopo il massimo a circa 10-12 ka i valori si attestano su quelli dell'attuale interglaciale olocenico. Il riscaldamento climatico in Antartide precede di alcune migliaia di anni la riduzione del volume totale dei ghiacci terrestri. Per confronto viene mostrata la curva δD dell'interglaciale OIS 11 (a) che, sviluppatosi tra circa 420 e 395 mila anni fa in condizioni di forzanti astronomiche circa simili a quelle operanti attualmente, ha raggiunto valori δD (quindi temperature) un poco più elevati ma, soprattutto, ha avuto una durata considerevolmente lunga (circa 28 mila anni). Sia il confronto con l'interglaciale OIS 11 che le proiezioni nel futuro degli effetti delle variabili milankoviane non indicherebbero l'avvento di una glaciazione nelle prossime migliaia di anni, a parità di condizioni del sistema climatico con quelle precedenti l'impatto umano (modificato da Berger & Loutre, 2002 e da EPICA Community Members, 2004).

le immaginare un lungo futuro interglaciale davanti a noi (Berger & Loutre, 2002).

Ma ogni previsione, già di per se aleatoria, diviene ulteriormente complicata dall'ingresso, nel sistema climatico, di un nuovo fattore forzante, l'uomo, che con lo sviluppo esponenziale delle sue attività, sta alterando le caratteristiche dell'atmosfera e della superficie terrestre, inconsciamente (?) praticando un esperimento climatico di cui non si conoscono gli esiti.

BIBLIOGRAFIA

- BERGER A. & LOUTRE M.F. (2002) - *An exceptionally long interglacial ahead?* Science, 297, 1287-1288.
- BLUNIER T., CHAPPELLEZ J., SCHWANDER J., DÄLLENBACH A., STAUFFER B., STOCKER T.F., RAYNAUD D., JOUZEL J., CLAUSEN H.B., HAMMER C.U. & JOHNSEN S.J. (1998) - *Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period.* Nature, 394, 739-743.
- BOND G. & LOTTI R. (1995) - *Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial timescales during the last glaciation.* Science, 267, 1005-1010.
- BOND G., SHOWERS W., CHESEBY M., LOTTI R., ALMASI P., DEMENOCAL P., PRIORE P., CULLEN H., HAJDAS I. & BONANI G. (1997) - *A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates.* Science, 278, 1257-1266.
- BOND G., KROMER B., BEER J., MUSCHELER R., EVANS M.N., SHOWERS W., HOFFMANN S., LOTTI-BOND R., HAJDAS I. & BONANI G. (2001) - *Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene.* Science, 294, 2130-2136.
- BRADLEY R.S. (1999) - *Paleoclimatology - Reconstructing Climates of the Quaternary.* Second Edition, Academic Press, London, 613 pp.
- BROEKER W.S. (1994) - *Massive Iceberg Discharges as Triggers for Global Climate Changes.* Nature, 372, 421-424.
- BROEKER W.S. (1998) - *Paleocean circulation during the last deglaciation: a bipolar seesaw?* Paleoceanography, 13, 119-121.
- BROEKER W.S. & DENTON G.H. (1989) - *The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles.* Geochim. Cosmoch. Acta, 53, 2465-2501.
- CLARK P.U., ALLKEY R.B. & POLLARD D. (1999) - *Northern Hemisphere Ice-Sheets Influences on Global Climate Change.* Science, 286, 1104-1111.
- CROLL J. (1867) - *On the eccentricity of the Earth's orbit, and its physical relations to the glacial epoch.* Philosophical Mag., 33, 119-131.
- CROLL J. (1867) - *On the change in the obliquity of the ecliptic, its influence on the climate of the polar regions and on the level of the sea.* Philosophical Magazine, 33, 426-445.
- DELMONTE B., PETIT J.R. & MAGGI V. (2002) - *LGM-Holocene changes and Holocene millennial-scale oscillations of dust particles in the EPICA Dome C ice core, East Antarctica.* Ann. Glaciol., 35, 306-312.
- DEMENOCAL P.B. (2001) - *Cultural responses to climate change during the Late Holocene.* Science, 292, 667-673.
- DEMICO R.V., LOWENSTEIN T.K. & HARDIE L.A. (2003) - *Atmospheric pCO_2 since 60 Ma from records of seawater pH, calcium, and primary carbonate mineralogy.* Geology, 31, 793-796.
- EPICA community members (2004) - *Eight glacial cycles from an Antarctic ice core.* Nature, 429, 623-628.
- FLINT R.F. (1957) - *Glacial and Pleistocene Geology.* John Wiley & Sons, New York, 553 pp.
- HAMBREY M.J. (1999) - *The record of Earth's glacial climate during the last 3000 Ma.* Terra Antarctica Reports, 3, 73-107.
- HAUG G.H., GANOPOLSKI A., SIGMAN D.M., ROSELL-MELE A., SWANN G.E.A., TIEDEMANN R., JACCARD S.L., BOLLMANN J., MASLIN M.A., LENG M.J. & EGLINTON G. (2005) - *North Pacific seasonality and the glaciation of North America 2.7 million years ago.* Nature, 433, 821-825.
- HAY W., SOEDING E., DECONTO R.M. & WOLD C.N. (2002) - *The Late Cenozoic uplift - climate change paradox.* Int. J. Earth Sci., 91, 746-774.
- HOFFMAN P.F. & SCHRAG D.P. (2002) - *The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change.* Terra Nova, 3, 129-155.
- IMBRIE J. & IMBRIE K.P. (1979) - *Ice ages: solving the mystery.* MacMillan, London.
- JOHNSEN S., DAHL-JENSEN D., GUNDESTRUP N., STEFFENSEN J., CLAUSEN H., MILLER H., MASSON-DELMOTTE V., SVEINBJÖRNSDÓTTIR A. & WHITE J. (2001) - *Oxygen isotope and paleotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, Renland and NorthGRIP.* Jour. Quarter. Sci., 16, 299-307.

- KIRSCHVINK J.L. (2002) - *Quand tous les oceans étaient gelés*. La Recherche, 355, 26-30.
- LAMBECK K., ESAT T.M. & POTTER E.K. (2002) - *Links between climate and sea levels for the past three million years*. Nature, 419, 199-206.
- MASLIN M., OWEN M., DAY S. & LONG D. (2004) - *Linking continental-slope failures and climate change: Testing the clathrate gun hypothesis*. Geology, 32, 53-56.
- MAYEWSKI P.A., MEEKER L.D., TWICKLER M.S., WHITLOW S., YANG Q., LYONS W.B. & PRENTICE M. (1997) - *Major features of forcing of high-latitude northern hemisphere atmospheric circulation using a 110,000-year-long glaciochemical series*. Jour. Geophys. Res., 102, 26-345-26-366.
- MAYEWSKI P.A., ROHLING E.E. & all. (2004) - *Holocene climate variability*. Quaternary Res., 62, 243-255.
- MILANKOVITCH M. (1941) - *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Royal Serbian Sciences, Spec. Publ. 132, section Mathematical and Natural Sciences, 33, 633 pp.
- MOBERG A., SONECHKIN D.M., HOLMGREN K., DATSENKO N.M. & KARLÉN W. (2005) - *Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data*. Nature, 433, 613-617.
- NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECTS MEMBERS (2004) - *High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period*. Nature, 431, 147-151.
- OLLIER C.D. (2004) - *Mountain building and climate: mechanism and timing*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 27, 139-149.
- PEARSON P.N. & PALMER M.R. (2000) - *Atmospheric carbon dioxide concentration over the past 60 million years*. Nature, 406, 695-699.
- PETTIT J.R., JOUZEL J., RAYNAUD D., BARKOV N.I., BARNOLA J.M., BASILE I., BENDERS M., CHAPPELLAZ J., DAVIS M., DELAYGUE G., DELMOTTE M., KOTLYAKOV V.M., LEGRAND M., LIPENKOV V.Y., LORIS C., PEPIN L., RITZ C., SALTZMAN E. & STIEVENARD M. (1999) - *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*. Nature, 399, 429-436.
- RAYNAUD D., BLUNIER T., ONO Y. & DELMAS R.J. (2003) - *The Late Quaternary history of atmospheric trace gases and aerosols: interactions between climate and biogeochemical cycles*. In: Alverson K.D., Bradley R.S. & Pedersen T.F. (eds.), «Paleoclimate, global change and the future». Springer, Berlin, 13-31.
- SIEGERT M.J. (2001) - *Ice Sheets and Late Quaternary Environmental Change*. John Wiley & Sons, Chichester, 231 pp.
- SOLANKI S.K. (2002) - *Solar variability and climate change: is there a link?* Astronomy & Geophysics, 43, 5.9-5.13.
- STENNI B., MASSON-DELMOTTE V., JOHNSEN S., JOUZEL J., LONGINELLI A., MONNIN E., ROTHLISBERGER R. & SELMO E. (2001) - *An oceanic cold reversal during the last deglaciation*. Science, 293, 2074-2077.
- STOCKER T.F. & JOHNSEN S.J. (2003) - *Paleoceanography*, 18, 1087-1097.
- STOCKER T.F. & alii (2001) - *Physical climate processes and feedbacks*. In: Houghton J.T. & alii, (eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 417-470.
- TZEDAKIS P.C., ROUCOUX K.H., DE ABREU L. & SHACKLETON N.J. (2004) - *The duration of forest stages in Southern Europe and interglacial climate variability*. Science, 306, 2231-2235.
- WILSON R.C.L., DRURY S.A. & CHAPMAN J.L., (2000) - *The Great Ice Age*. Routledge, London, 267 pp.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2004) - *WMO statement on the status of the Global Climate in 2004*. Press release WMO - No. 718.
- ZACHOS J., PAGANI M., SLOAN L., THOMAS E. & BILLUPS K. (2001) - *Trends, Rhythms and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present*. Science, 292, 686-693.