



El passat és una de les claus del futur

Antoni Rosell i Melé

*Institut de Ciències i Tecnologies Ambientals, Universitat Autònoma de Barcelona
Institució Catalana de Recerca i d'Estudi*

Des de la paleoclimatologia —l'estudi del clima de períodes geològics i històrics anteriors a la invenció dels aparells de mesures meteorològiques— l'autor descriu els principals aspectes de l'evolució del clima durant els darrers 500.000 anys. Ens mostra com canvia el clima sense que hi intervinguin els humans i també dóna una perspectiva històrica sobre canvis més recents que sí que estan relacionats amb l'activitat humana.

Qui no ha fet, llegit o sentit algú expressar interrogants com aquests: «Són normals aquests canvis de temps? Les pedregades, les llevantades, les sequeres...? Realment està canviant el clima de tal manera que el temps de la nostra infància ja no el veurem més? Aquelles nevades copioses o aquells estius balsàmics...? A partir d'ara agafem-nos fort, qui sap què pot passar! I si és així, per què canvia el clima i qui en té la culpa? És l'increment dels gasos amb efecte d'hivernacle? Per tant, els americans, amb la benzina tan barata i uns cotxes tan grossos, allò sí que és disbauxa! O el veí que cada dia va a la feina en cotxe i contamina més que jo, quina barra! I qui ho arreglarà tot això? Els polítics no fan mai res i els científics només demanen diners per no entendre res... I Kyoto, quin xou! Els que van a aquestes coses només volten per tot el món fent reunions, i després ningú no fa res! Això del clima és molt complicat.» Amb això últim, tothom sembla que hi està d'acord.

Totes aquestes preguntes són de difícil resposta. La raó és que sabem realment ben poc per què el clima canvia. Però més fonamentalment, entenem ben poc la raó per la qual tenim el clima que tenim actualment a qualsevol lloc del món. Em refereixo exactament a saber per què, per exemple, les temperatures mitjanes a Barcelona, o al planeta, no són 2,5 o 10 graus més altes o més baixes, com han estat en diversos períodes del passat recent de la Terra. O per què Groenlàndia i l'Antàrtida estan quasi totalment cobertes de gel de manera, en aparença, permanent, quan no ha estat sempre així? O per què el Sàhara és ara un desert, i no ho era fa més de 6.000 anys? O per què cada pocs anys té lloc el fenomen d'El Niño i les temperatures del mar vora Perú augmen-

ten amb conseqüències que se senten a tot el món? O per què respirem un aire amb una quantitat determinada de gasos amb efecte d'hivernacle, i no la meitat o el doble de concentració com passava fa milers o milions d'anys? És a dir, des que la Terra es va formar, què ha dut el planeta a ser tal com és ara, particularment a tenir el clima actual? I si el clima ha canviat sense haver-hi hagut humans pel mig, per què no pot continuar fent-ho? De fet, segur que canviarà el clima, però exactament el perquè i quan canviarà, no s'entén del tot bé.

Obtenir respostes a aquestes i altres preguntes semblants és necessari, però no només per satisfer la curiositat dels acadèmics. Cal respondre-les per adreçar les qüestions que es plantejaven al començament de l'article, i per poder sospesar la influència de les nostres activitats sobre el clima. Si no sabem d'on venim, podem saber on som i cap a on anem? Molts científics creuen que no, i per això s'esmercen diners i esforços en estudiar el paleoclima (definit al *Gran Diccionari de la Llengua Catalana* com a clima de períodes geològics i històrics anteriors a la invenció dels aparells destinats a les mesures meteorològiques), i en esbrinar com aquest ha canviat i per què ho ha fet d'una manera natural. En aquest article s'exposen, breument, alguns aspectes de l'evolució del clima durant gairebé els darrers 500.000 anys i una mica més enllà, sobretot pel que fa als canvis de temperatura i d'un dels gasos principals en l'efecte d'hivernacle: el diòxid de carboni. La meua intenció és mostrar com canvia el clima sense que hi intervinguin els humans, i donar una perspectiva històrica sobre els canvis que han ocorregut recentment, i per tant potencialment relacionats amb les activitats humanes. En paraules de

Winston Churchill: *The further backward you can look, the further forward you are likely to see*, «com més enrere pots mirar, més cap endavant és probable que hi vegis».

Com s'estudia els paleoclimes

Però, primer de tot, què és el clima? Senzillament, la mitjana del temps meteorològic en un lloc determinat del planeta. O dit d'una altra manera, el temps que esperem que faci durant un mes, any, dècada, segle, etc. Per exemple, les variacions de temperatura, pressió atmosfèrica, humitat, vent, precipitacions i altres variables meteorològiques durant els últims 50 anys a Catalunya definirien el clima del país. Canvis en els valors d'aquestes variables ahir o la setmana passada no representen canvis en el clima sinó la variabilitat atmosfèrica o del temps meteorològic. Cal també distingir entre el que és una variable que caracteritza el clima, com la temperatura, i un factor de canvi del clima (*forcing*, en anglès), com la composició en gasos amb efecte d'hivernacle de l'atmosfera. Canvis en la temperatura ens donaran indicis que el clima pot estar canviant. Els canvis en el diòxid de carboni atmosfèric no necessàriament indiquen que el clima ha de canviar. Cal primer establir relacions causa-efecte. Una manera de fer-ho és mirar la relació a través del temps de variables que caracteritzin el clima directament (p. e., la temperatura) o indirectament (p. e., la presència de glaç en el continent depèn en part de la temperatura, però també de variables com la precipitació), amb factors de canvi com la composició de l'atmosfera. Com que fa pocs anys que es prenen aquests tipus de mesures, les sèries temporals disponibles són massa curtes per mostrar la variabilitat real del clima, especialment a escala planetària. Estudiant com era el clima anys enrere, fa milers o desenes de milions d'anys, podem estendre aquestes sèries temporalment i espacialment, i també podem provar de buscar èpoques anàlogues a l'actual i veure com les variables del sistema climàtic van anar evolucionant mentre diversos factors de canvi variaven.

Sabem realment ben poc per què el clima canvia. Però més fonamentalment, entenem ben poc la raó per la qual tenim el clima que tenim actualment a qualsevol lloc del món

Per exemple, fa 400.000 anys, durant l'anomenat estadi isotòpic 11, es creu que les condicions del sistema climàtic eren força semblants a les del període actual. Alternativament, es pot provar d'identificar un període del passat en què els valors de diòxid de carboni fossin tan o més alts que els actuals per veure quins són els valors de les variables climàtiques en un món amb un fort efecte d'hivernacle (els anomenats *greenhouse worlds* en anglès). Es creu que aquestes condicions han ocorregut diverses vegades durant el fanerozoic (els darrers 550 milions d'anys), l'última de les quals probablement fou durant la transició entre els períodes geològics del paleocè i l'eocè, tot plegat fa uns 57 milions d'anys...

Ara bé, això està més aviat dit que fet ja que és molt difícil reconstruir els climes del passat, i especialment d'una manera quantitativa. Està bé saber que a l'últim període glacial feia més fred que ara (el seu màxim va ser fa entre 18.000 i 24.000 anys enrere), però és més útil esbrinar quant més fred feia a les diferents àrees del planeta, ja que no totes responen igualment als factors de canvi. Per exemple, una erupció volcànica a la zona equatorial pot contribuir al refredament dels dos hemisferis de la Terra per l'efecte dels aerosols que es formen, i s'escampen arreu i reflecteixen la llum del sol. Però, si l'erupció és a Islàndia, en gran mesura només afectarà l'hemisferi nord, ja que a causa de la circulació atmosfèrica, els aerosols volcànics no arribaran a l'hemisferi sud. La reconstrucció paleoclimàtica quantitativa és, de fet, un camp de recerca molt nou, que s'ha anat desenvolupant ràpidament des dels anys setanta. Com que els aparells per mesurar la temperatura, la humitat, etc., fa relativament molt poc que s'han inventat i utilitzat, ha calgut trobar mètodes indirectes (les *proxy*) per estimar aquestes variables en temps passats. El que cal primer de tot és trobar un registre temporal d'on es pugui extreure alguna mena d'informació climàtica, com els sediments marins o lacustres, els quals s'han dipositat d'una manera constant durant milers o milions d'anys. Però també

s'estudien els anells de creixement dels arbres, coralls, el gel de glaceres i casquets polars, entre altres materials o dipòsits, uns més exòtics que d'altres. Per a mi, la palma de la imaginació se l'endú un estudi de mesura d'isòtops de clor en restes d'orina fòssil en caus de rates del desert de Nevada, als Estats Units, per reconstruir canvis en raigs còsmics, la qual cosa serveix per datar arxius sedimentaris (Plummer *et al.*, 1997). Val a dir que com més enrere en el temps volem anar, més difícil resulta l'estudi ja que és més complicat de trobar registres continus vàlids, les propietats dels quals puguem interpretar d'una manera precisa, per exemple, a causa del dinamisme de la Terra que eventualment destrueix els registres paleoclimàtics, mentre se'n creen de nous. Així, encara que l'Antàrtida faci desenes de milions d'anys que està coberta de gel, l'antiguitat màxima d'aquest gel no sobrepassa el mig milió d'anys a causa del dinamisme glacial, que fa que el casquet polar estigui en constant moviment i s'acabi abocant a l'oceà. Els sediments marins també acaben esdevenint «destruïts» o transformats en les zones de subducció dels marges continentals. Molts llacs de grans dimensions són també de formació «recent», com per exemple el llac Baikal a Sibèria, l'antiguitat dels sediments del qual és probable que no sobrepassi els 25.000.000 d'anys. A més a més, com més antigues són les mostres que s'estudien més difícil resulta datar-les d'una manera precisa. El mètode utilitzat més vastament i més precís, la datació per carboni 14, només és aplicable per datar mostres que continguin carboni, evidentment, però amb una antiguitat no superior a 55.000-60.000 anys. Per datar materials més antics hi ha una diversitat de tècniques, però o bé no mesuren l'antiguitat exacta o bé el seu error fa que no es puguin resoldre canvis climàtics de menys d'uns quants milers d'anys. En comparació, l'error del mètode del carboni 14 se situa al voltant d'unes desenes d'anys.

Els mètodes de paleoreconstrucció també tenen unes limitacions intrínseques. Per exemple, una manera de reconstruir les temperatures de l'aire és associant la distri-

bució actual de les plantes i el seu pol·len amb els règims climàtics i els marges de temperatura dominants de la Terra. Si s'analitza el pol·len d'una mostra antiga, llavors se n'intenta relacionar la composició amb una distribució semblant que es trobi actualment en alguna zona del planeta, i d'això deduir-ne els valors de temperatura més probables dels llocs on vivien les plantes que van produir aquell pol·len fòssil. No obstant això, si es va molt enrere en el temps, s'arriba a un punt en què cap de les plantes que avui es troben en el planeta existien. Sovint les *proxy* climàtiques responen a més d'una variable ambiental. Una de les més utilitzades és la mesura de la relació entre la quantitat d'isòtops d'oxigen (expressada com $\delta^{18}O$) en els esquelets de carbonat d'organismes marins. Aquesta mesura representa primordialment dos senyals climàtics combinats. Un és un senyal local, que és la temperatura del mar on els organismes analitzats vivien. L'altre és un senyal global, que és el volum de gel continental, i per tant el nivell del mar. Així que, en la interpretació de les dades, cal resoldre ambdós efectes d'alguna manera. Això també implica que un altre punt clau és que les reconstruccions són aproximades, amb uns marges d'error que a vegades no es coneixen. Per exemple, es fa difícil d'entendre com les relacions ecològiques poden afectar la distribució de pol·len en un lloc, o com aquest pol·len s'ha traslladat des de la planta que l'ha produït fins al lloc on s'ha dipositat, com podria ser el fons de l'oceà. Per tant, és molt important que en els estudis paleoclimàtics s'empri més d'un mètode de paleoreconstrucció per confirmar els resultats d'una tècnica i de l'altra. Per últim, cal adonar-se que majoritàriament les variables climàtiques que es reconstrueixen només són d'abast local. Els canvis en la temperatura a Harare, Tarragona o Nova York seran normalment força diferents per la localització d'aquestes ciutats en el planeta. Això vol dir que cal estudiar molts registres d'arreu del món per tenir una imatge precisa de canvis globals en el clima. D'altra banda, canvis en el diòxid de carboni o del nivell del mar sí que tenen

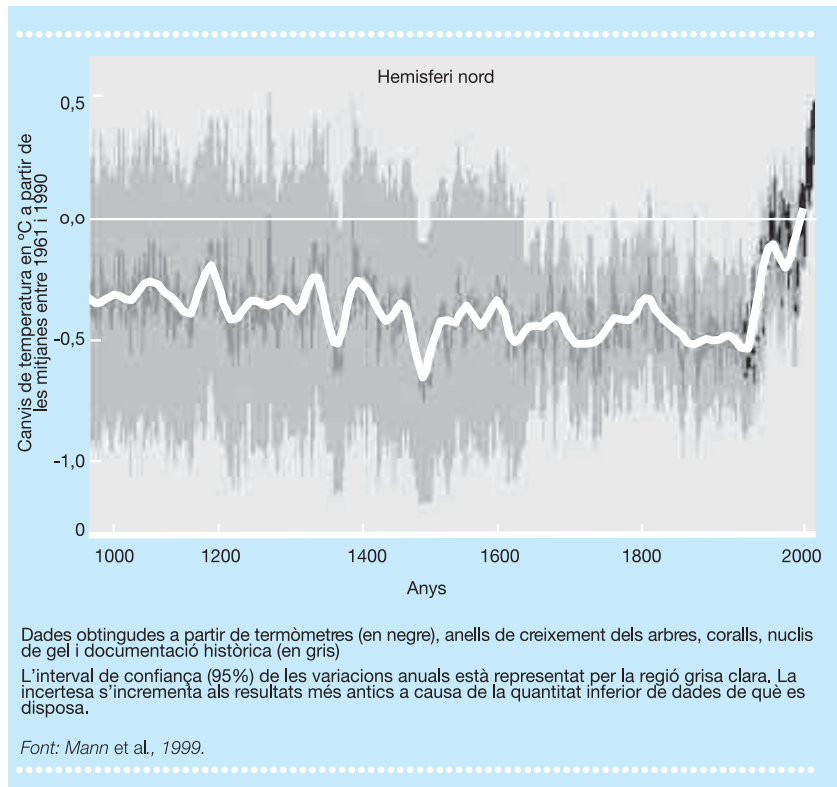


lloc simultàniament, a efectes pràctics, i a escala mundial, ja que els gasos de l'atmosfera es barregen relativament ràpid, i els mars i oceans, és clar, la majoria estan interconnectats.

L'estabilitat dels darrers 1.000 anys i l'escalfament del segle XX

En els últims anys hi ha hagut un gran avenç en la nostra comprensió de l'evolució «global» dels canvis de temperatura de l'aire durant els darrers 10 segles. Un dels estudis de referència és el de Mann i altres (1999) recollit al gràfic 1, obtingut gràcies a la combinació de dades de temperatures derivades de l'estudi d'anells d'arbres, testimonis de gel, coralls i documents històrics, a més a més de termòmetres per als darrers 140 anys (vegi'n d'altres a <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/recons.html>). Sembla bastant clar que les temperatures del segle XX, a l'hemisferi nord, han estat les més altes dels últims 1000 anys, i la dècada dels noranta ha estat la més càlida de totes i l'any 1998 el més càlid del mil·lenni. És més, la magnitud d'escalfament del segle XX és única durant aquest període ($0,6 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$), especialment durant els períodes de 1919 a 1945, i de 1976 a 2000, en què les temperatures es van incrementar a un ritme mai experimentat com a mínim des del segle XI al XIX. Les dades per a l'hemisferi sud d'abans de 1861 (des que hi ha mesures instrumentals) són molt escasses, i per tant no se sap ben bé com les temperatures van evolucionar des de l'any 1000 a la meitat sud del món. El registre del gràfic 1 ha esdevingut emblemàtic i així l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) el menciona vastament en el seu darrer informe de 2001 (IPCC, 2001). Per què es produeix aquest escalfament? No està del tot clar, però és probable que no sigui causat per un sol factor, tant natural com antropogènic. Els canvis en el clima es poden donar per la variabilitat interna del sistema climàtic i per factors externs. La influència dels factors externs es pot comparar utilitzant el concepte de *radiative forcing* (energia radiant d'un factor de canvi).

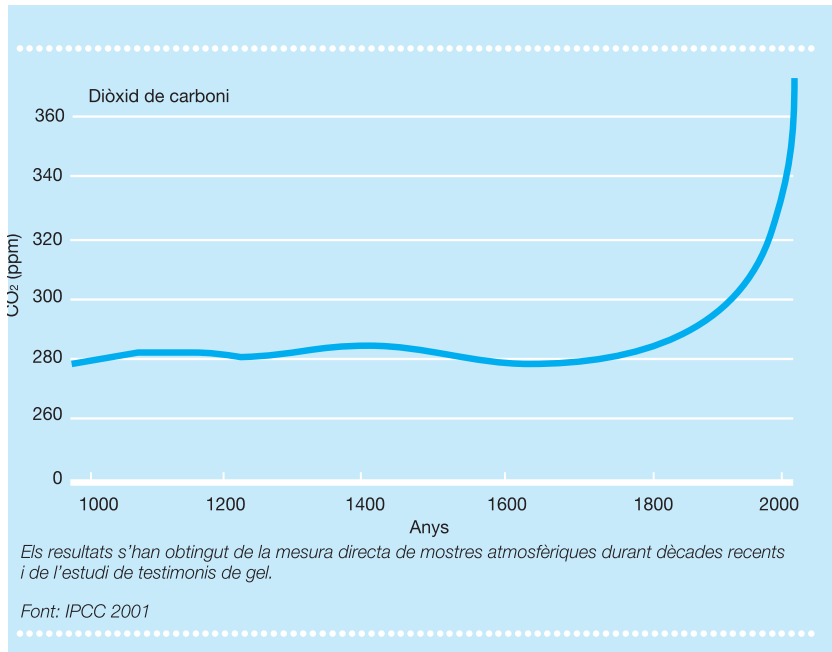
Gràfic 1. Reconstrucció anual (corbes negra i grisa) i de la mitjana de cada any (corba blanca) de les variacions de la temperatura de la Terra durant l'últim mil·lenni a l'hemisferi nord



Aquesta serà positiva si fa que s'escalfi la superfície de la Terra, o negativa si fa que es refredi. Canvis en l'increment de la concentració dels gasos amb efecte d'hivernacle, de l'energia del sol, el vulcanisme i la concentració d'aerosols atmosfèrics afecten l'energia radiant ja sigui positivament o negativament. Per exemple, la concentració de gasos amb efecte hivernacle (vegeu per al diòxid de carboni el gràfic 2) a l'atmosfera durant els últims 1.000 anys s'ha incrementat en els últims 200 anys d'una manera semblant a la de la temperatura de l'hemisferi nord (gràfic 1). Aquest increment reflecteix el progressiu ús dels combustibles fòssils a la nostra societat. Els gasos amb efecte d'hivernacle tenen un

efecte positiu en l'increment de l'energia radiant. Per tant, en els darrers 200 anys podria haver augmentat d'una manera progressiva la capacitat de l'atmosfera per absorbir l'energia del Sol, que pot haver comportat a l'escalfament gradual de la superfície del planeta. Però val a dir que hi ha molts altres factors de canvi que també han variat durant aquest mateix període. Per exemple, la concentració d'aerosols a l'atmosfera s'ha incrementat d'una manera anàloga a la temperatura, fet causat pel progressiu ús de combustibles fòssils i combustió de biomassa (p. e. boscos, escombraries) (IPCC, 2001). El seu efecte sobre el clima, però, és de refredar la superfície, encara que són molt menys entesos

Gràfic 2. Concentració de diòxid de carboni a l'atmosfera en els darrers 1000 anys



que els gasos amb efecte d'hivernacle, i per tant és difícil de jutjar el seu pes relatiu en el canvi climàtic. Com que tot plegat ara comencem a entendre la influència relativa en l'energia radiant dels diversos factors, es fa difícil de demostrar d'una manera concloent que l'escalfament del segle xx és causat només per l'increment del diòxid de carboni i gasos similars. Per exemple, amb models matemàtics que simulin les variacions de temperatura de la Terra, i comparant els resultats amb canvis que s'han mesurat, es poden començar a entreveure les causes dels canvis principals. A l'informe de l'IPCC de 2001 es fa especial menció d'un estudi on es va simular matemàticament la variabilitat de les temperatures durant els darrers 140 anys, tenint en compte només factors de canvi naturals (variabilitat solar i vulcanisme), o només factors antropogènics (gasos amb efecte d'hivernacle i una estimació d'aerosols),

o tots alhora (Crowley, 2000). La seva conclusió, segons com, no és gaire sorprenent: la inclusió de factors antropogènics en el model pot explicar una gran part dels canvis de temperatura dels últims 140 anys, però la correlació entre els resultats del model i les temperatures reals és encara millor si es tenen en compte factors tant naturals com antropogènics. És més, es conclou que, encara que els factors de canvi considerats poden explicar la majoria de canvis, no s'exclou la possibilitat que n'hi hagi d'altres que també han contribuït a l'escalfament del segle xx. Així que el debat continua, sobretot per aclarir el pes relatiu de diferents factors de canvi, i els mecanismes pels quals actuen sobre el sistema. Per exemple, quant exactament incrementarà la temperatura quan es dobli el contingut atmosfèric del diòxid de carboni? O com respondran els ecosistemes a canvis en el clima i la composició de l'atmosfera?



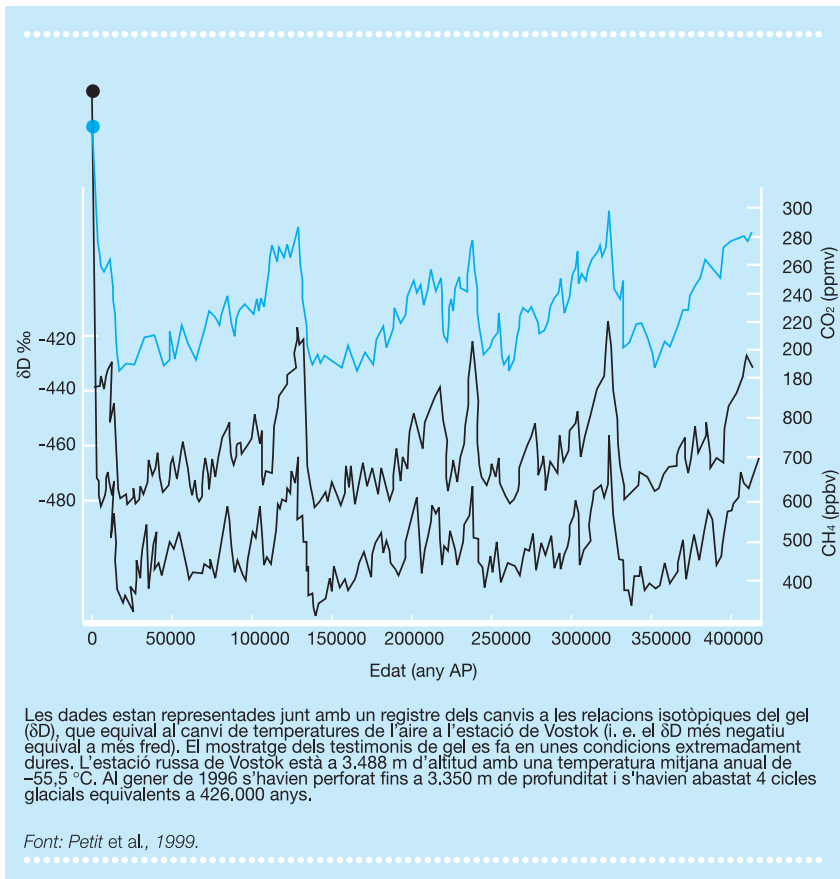


La inestabilitat dels darrers 400.000 anys

Independentment del canvi natural, l'IPCC preveu que les temperatures mitjanes mundials s'incrementin entre 1,4 i 5,8 °C de 1990 a 2100. Si és així, el ritme en què es preveu que les temperatures pugin no tindria paral·lel durant els últims 10.000 anys. Aquesta és una època geològica que anomenem l'holocè, en la qual els humans estem tenint la nostra edat d'or. Climàticament parlant, però, aquest període de temps és força inusual ja que ha estat, i continua sent, molt estable i llarg. Alguns han apuntat que aquesta estabilitat climàtica és relativa, i de canvis significatius n'hi ha hagut, i així les civilitzacions humanes han pogut florir o se n'han anat en orris depenent de si les condicions ambientals els han estat propícies (deMenocal, 2001). La norma en el sistema climàtic és el canvi, la inestabilitat. Canvis de temperatures locals o globals de 2 o més graus de temperatura, a escales de temps lentes (per sobre de milers d'anys) o molt ràpides (dins el que és la vida mitjana d'una persona o durant un parell de generacions), han estat molt freqüents fins ara, i res no fa pensar que en el futur les coses hagin de ser diferents. Mitjançant l'estudi dels registres fòssils, en qualsevol escala de temps, es fa ben palès que el clima de la Terra d'estable no en té res. Aquesta afirmació fa unes dècades hauria estat profundament debatuda. Fins a la dècada dels noranta es pot ben dir que el consens general entre científics era que la Terra oscil·la entre èpoques relativament fredes (glacials) i més càlides (interglacials) d'una manera progressiva i constant, a un ritme de desenes a centenars de milers d'anys sense cap perturbació notable a curt termini. Aquests canvis se succeixen al mateix ritme en què varia la insolació (variacions en la radiació de calor del sol) que és funció de paràmetres astronòmics recollits dins la teoria de Milankovitch. Aquest matemàtic serbi va demostrar d'una forma convincent com l'aparició de les èpoques glacials depèn de l'excentricitat de l'òrbita de la Terra, i de la inclinació i

precessió del seu eix de rotació. Aquests canvis astronòmics són molt constants i s'han anat repetint des de fa molts milions d'anys en uns cicles primordialment de 23.000, 41.000 i 100.000 anys. Fent servir aquesta teoria com a base, ara es pot predir, en principi, que l'actual període interglacial s'acabarà d'aquí 50.000 anys, i que el proper màxim glacial serà d'aquí 100.000 anys, si no es tenen en compte efectes antropogènics (Loutre and Berger, 2000). Fins fa poc, tot semblava bastant controlat, quasi de rel·lotgeria. A la dècada dels 60 als 70, la preocupació era saber quan seria la següent edat glacial, i poca gent pensava en l'escalfament global (Kukla *et al.*, 1972). De fet, des de fa uns 6.000 anys les temperatures del mar i la terra han anat davallant, i això ja és perceptible en el registre del gràfic 1. La tendència ha estat interrompuda, de moment, per l'escalfament del segle xx. Es pot dir, generalitzant, que fins a la dècada dels 90 la majoria de treballs se centraven en l'estudi de registres climàtics que no podien desxifrar canvis climàtics de curta durada, d'uns pocs centenars o desenes d'anys. Si es veia alguna variabilitat a aquestes escales s'atribuïa a l'error analític, o soroll d'alguna mena, o la comunitat científica en general no li donava importància. L'estudi dels testimonis de gel a l'Antàrtida i a Groenlàndia, junt amb l'anàlisi detallada dels sediments marins i dels llacs amb taxes elevades d'acumulació de sediments, han revolucionat la nostra manera d'entendre l'evolució del clima. Primer, per mostrar l'estreta relació entre l'abundància dels gasos amb efecte d'hivernacle i el clima en escales de milers d'anys, i segon, per revelar la freqüència amb què es donen episodis de canvi climàtic abrupte, a escales inferiors a un segle, tema que es discutirà a la següent secció. El gel dels casquets polar és, en efecte, l'atmosfera congelada. A l'Antàrtida hi ha els rastres de l'atmosfera de gairebé l'últim mig milió d'anys (gràfic 3; Petit *et al.*, 1999). A Groenlàndia, els testimonis de gel recuperats «només» abasten els últims 110.000 anys. En part, això es deu al fet que hi neva més, fet que comporta que els registres de gel de Groenlàndia

El canvi en el nivell de gasos amb efecte d'hivernacle, així com el metà i el diòxid de carboni, són els darrers quatre cicles climàtics obtinguts a partir de l'anàlisi del testimoni de gel de Vostok, a l'Antàrtida



siguin de resolució més alta i que fins i tot es pugui mesurar la variabilitat anual en la composició de l'atmosfera. En el registre de l'atmosfera de Vostok (amb referència a l'estació russa d'on s'obtingueren les mostres) a l'Antàrtida, els valors més alts de gasos amb efecte d'hivernacle (diòxid de carboni i metà) es troben durant els períodes interglacials, i els més baixos durant els glacials (gràfic 3). La correlació entre els valors de metà i diòxid de carboni amb les temperatures sobre l'Antàrtida (estimades mitjançant la mesura de les relacions

isotòpiques de l'hidrogen del gel) assenyalava un estret lligam entre aquests gasos i el clima, i demostra el dinamisme dels embornals de carboni oceànics i continentals en resposta als canvis climàtics. Ara bé, encara no s'entén ben bé com els gasos amb efecte d'hivernacle interaccionen amb el sistema climàtic. Les concentracions dels gasos augmenten milers d'anys abans que els grans casquets polars de les èpoques glacials es desglacin totalment o parcialment. Així, no està totalment clar si és el canvi en els gasos amb efecte d'hivernacle

o la insolació, o tots dos factors, la causa del pas d'una època glacial a una d'interglacial i a l'inrevés. Sigui quin sigui el mecanisme iniciador, tampoc no està clar què fa que el metà i el diòxid de carboni fluctuïn d'una manera natural a escales de milers d'anys. De tota manera, en el context actual de l'increment de gasos amb efecte d'hivernacle, queda ben palès mirant el gràfic 3, que les concentracions actuals de diòxid de carboni són les més altes dels darrers 420.000 anys i, per tant, no tenen cap precedent natural en tot aquest temps. La concentració de diòxid de carboni actual és de 365 ppm, mentre que els màxims dels darrers tres períodes interglacials no ha sobrepassat les 300 ppm, encara que normalment els valors assolits en èpoques anàlogues a l'actual són al voltant de 280 ppm, el mateix que les concentracions preindustrials d'aquest gas. Al ritme actual de creixement del contingut de diòxid de carboni a l'atmosfera, d'aquí pocs anys, el creixement d'aquest gas, des del segle XIX, haurà ultrapassat l'increment que s'observa entre èpoques glacials (200 ppm) i interglacials (280 ppm) de llarg. Pel que fa al metà, els seus valors actuals (1600 ppb) ja són més del doble dels valors normals dels períodes interglacials (700 ppb), i el seu creixement des de l'època preindustrial ha més que duplicat (900 ppb) el creixement normal des de la màxima edat glacial fins a l'interglacial (350 ppb). Per tant, encara que no es prevegin exactament les conseqüències que es puguin derivar d'això, o no es puguin demostrar, no és d'estranyar que hi hagi tanta gent preocupada arreu del món pels nivells creixents de gasos amb efecte d'hivernacle.

Els canvis sobtats: per al clima, 2 i 2 no sempre fan 4

Un dels paleoclimatòlegs internacionalment més reconeguts (Wallace Broecker, de la Columbia University, als Estats Units) ha descrit el comportament més aviat inoperant de la nostra societat envers l'increment de gasos amb efecte d'hivernacle com a *poking the angry beast with a stick*

(«burxant l'animal enrabiada amb un bastó»; <http://www.earthinstitute.columbia.edu/library/earthmatters/spring2000/pages/page7.html>). El bastó serien les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle, i la bèstia, el sistema climàtic, que no sabem com ni quan reaccionarà, però tard o d'hora ho farà. Així, mentre científics com Richard Lindzen, del Massachusetts Institute of Technology, creuen que les preocupacions per l'escalfament mundial són foc d'encenalls, d'acord amb alguns models climàtics (vegeu la seva declaració al senat dels Estats Units el maig de 2001, http://www.senate.gov/~epw/lin_0502.htm), científics com Broecker són part d'un grup de científics —que a mi em sembla molt considerable— que estan convençuts que el comportament del sistema climàtic durant l'últim període glacial ens ensenya que l'increment del diòxid de carboni pot causar ja no un canvi gradual del clima, sinó una reorganització completa del sistema climàtic (Broecker, 1997). Una de les coses que s'han après aquests últims anys és que una relació causa-efecte no ha d'estar lligada per una relació lineal. El sistema climàtic no ha de respondre necessàriament d'una manera immediata a una perturbació. Així, un factor de canvi pot començar a variar, però les variables climàtiques poden continuar inalterades o mostrar poca variació. Això és així fins que es creua un llindar a partir del qual tot el sistema es reorganitza ràpidament fins a arribar a una altra situació de relatiu equilibri, o el canvi de sobte s'accelera sense motiu aparent fins a arribar a una nova situació. Els models climàtics han demostrat que el sistema climàtic es pot comportar de forma no lineal (Stocker, 2000). Fins i tot el sistema climàtic pot tenir diversos modes estables de funcionament, encara que els factors de canvi no variïn gaire. Ja fa anys que se sap que la circulació oceànica pot variar entre diferents modes estables molt ràpidament si, per exemple, la salinitat superficial de l'Atlàntic Nord davalla per sota d'uns certs valors (Stommel, 1961). Per exemple, també hi ha científics que han demostrat amb models que el Sàhara tant és estable climàticament com a desert o



verd, situació que s'ha donat durant els darrers 10.000 anys (Claussen, 1998). Això també és rellevant per explicar per què tan sovint en els registres paleoclimàtics es poden observar, si s'estudien les mostres escaients i un s'hi fixa, situacions de canvi climàtic extremadament ràpid, en qüestió de poques desenes o centenes d'anys. Troballes emblemàtiques sobre això pertanyen a l'àrea de l'Atlàntic Nord.

El 1988, un oceanògraf alemany, Hartmut Heinrich, va publicar un estudi que mostrava com 6 vegades durant l'últim període glacial enormes armades d'icebergs van envair l'Atlàntic Nord, sobretot procedents del Canadà (Heinrich, 1988). En fondre's els icebergs, els materials rocosos que portaven van dipositar-se en el fons marí en una àrea de 3.000 km de banda a banda de l'Atlàntic. El motiu d'aquestes «invasions» és el periòdic col·lapse dels casquets glacials, a l'hemisferi nord, sobretot a Amèrica del Nord, per causes que encara es discuteixen. Un dels molts elements interessants d'aquests episodis de Heinrich, així s'anomenen, és que permeten veure com el sistema climàtic va respondre a una perturbació de molt curta durada i localitzada, i com se n'esdevingueren canvis climàtics arreu del món. Així, la gran quantitat d'aigua dolça que es va escampar per l'oceà quan els icebergs es van fondre, va fer disminuir la salinitat superficial de l'Atlàntic Nord i en va alterar la circulació superficial i de fondària a tots els oceans del món. Una de les conseqüències va ser que el transport de calor de baixes latituds cap al pol, representat pel Corrent del Golf, s'aturés, amb la consegüent baixada de temperatures a la regió de l'Atlàntic Nord, per exemple a Europa. Un cop la salinitat oceànica va pujar a valors normals, va haver-hi un punt en què la circulació es va restablir de sobte tal com era abans de cada episodi de Heinrich. Ensenys, glaceres als Andes i Nova Zelanda creixeren i minvaren, el que dóna una idea de la magnitud i l'abast dels episodis. Aquests canvis tingueren lloc en qüestió de dècades i així ho indiquen les oscil·lacions de temperatura de l'aire als testimonis de gel de Groenlànd-

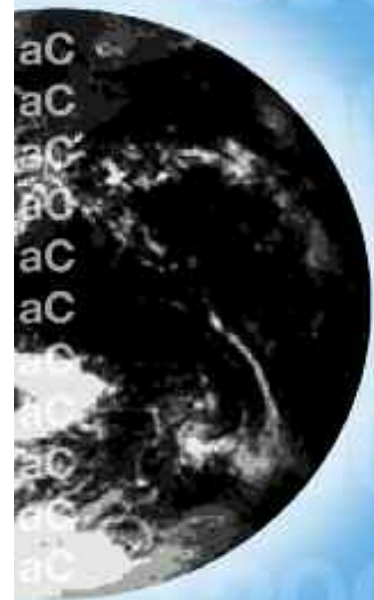
dia, canvis en el pol·len a Itàlia o canvis de la velocitat del vent a la Xina, per citar-ne uns exemples (Dansgaard *et al.*, 1993; Allen *et al.*, 1999). El fet és que tant els models climàtics com les reconstruccions paleoclimàtiques apunten que aquesta perturbació va fer oscil·lar el sistema climàtic, en aquest cas representat pel sistema oceà-atmosfera entre diversos modes estables de funcionament en qüestió de dues a quatre dècades. A més, especialment l'estudi dels testimonis de gel de Groenlàndia mostren com aquestes oscil·lacions són molt freqüents (Dansgaard *et al.*, 1993). S'anomenen els cicles de Dansgaard-Oeschger, un component dels quals serien els episodis de Heinrich (Bond i Lotti, 1995). Així, s'ha demostrat vastament com la variabilitat de les temperatures durant l'època glacial va ser molt elevada, seguint cicles de gairebé 11.000, 6.000 i 1.500 anys. Encara s'ha d'aclarir la naturalesa precisa d'aquests cicles, que podrien ser semitons dels cicles astronòmics de l'òrbita de la Terra, o podrien estar relacionats amb la dinàmica interna dels casquets polars, amb la variabilitat solar o la circulació atmosfèrica i oceànica. Particularment important és que s'ha demostrat que a l'holocè i durant altres cicles glacials/interglacials anteriors també s'ha trobat que les temperatures o producció d'icebergs varien en cicles de 1.500 anys (Bond *et al.*, 1997). Wallace Broecker i d'altres creuen que tots aquests cicles es deuen a la variabilitat de l'anomenada circulació termohalina oceànica (Ganapolski and Rahmstorf, 2001). Molt simplificadament, es pot descriure com si els corrents oceànics fossin una cinta contínua, que es mou des del sud cap al nord de l'Atlàntic per la superfície, i a l'inrevés pel fons d'aquest oceà. El final de la cinta es trobaria cap al nord del mar d'Islàndia, i l'altre extrem a la vora de l'Antàrtida. La velocitat de la cinta ve donada pel gradient de salinitat a l'Atlàntic Nord, des de la superfície cap al fons, que fa que l'aigua de la superfície sigui més densa que la de sota i, seguint amb un símil simple, s'enfonsi. La cinta transporta calor des del sud cap al nord del planeta. Avui dia la cinta està

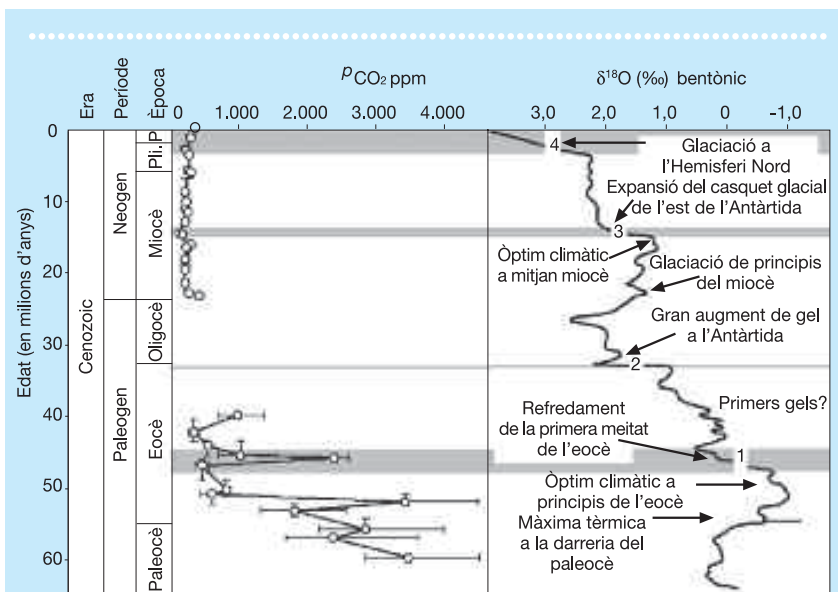
en funcionament, cosa que fa que al nord d'Europa hi hagi unes condicions molt més favorables per viure-hi que al Canadà (i. e. a causa del Corrent del Golf). Si s'atura la cinta, l'Atlàntic Nord i Europa es refreden. Molts paleoceanògrafs creuen que periòdics canvis en la salinitat superficial de l'oceà Atlàntic, causats per icebergs o increments de la precipitació, són normals. Si tenen lloc en períodes interglacials, el canvi climàtic que se'n deriva és menys important en comparació amb els derivats d'una successió de períodes glacials. Quina és la implicació de tot això actualment? S'ha proposat que, com a conseqüència de l'escalfament global, les aigües polars superficials esdevindrien més càlides, la qual cosa podria alentir la circulació termohalina en fer disminuir la densitat de l'aigua superficial. A més, s'incrementaria el transport atmosfèric de vapor d'aigua en incrementar-se l'evaporació, que en precipitar faria baixar la salinitat de l'aigua polar. Tot això podria comportar una aturada de la circulació termohalina i una reorganització de la circulació oceànica, amb conseqüències difícils de predir. A països com el Regne Unit, Noruega, els Estats Units i Canadà, entre d'altres, hi ha prou gent preocupada per aquest escenari, que es considera força plausible, com perquè recentment s'estiguin finançant programes de recerca de desenes de milions d'euros per investigar específicament aquest tema (p. e., <http://www.merc.ac.uk/funding/tbematics/rcc>).

Conclusions: Per què és tan complicat el clima i el seu estudi?

Els canvis climàtics no depenen només de l'increment o la davallada dels gasos amb efecte d'hivernacle, sinó que també depenen de la interacció d'elements interns (p. e. atmosfera, hidrosfera, biosfera i criosfera) i externs (p. e. variabilitat de la irradiació solar, insolació, vulcanisme) del planeta, d'una manera que tot just ara estem començant a entendre. És clar, també cal comptar amb l'impacte dels humans sobre l'entorn. A part del gran nombre d'elements

Els canvis climàtics no depenen només de l'increment o la davallada dels gasos amb efecte d'hivernacle, sinó que també depenen de la interacció d'elements interns i externs del planeta





Els valors de diòxid de carboni s'han estimat a partir de la mesura d'isòtops de bor en esquelets de foraminífers, la qual cosa dona una idea del pH de les aigües on aquests organismes marins vivien, atès que a partir d'aquest es poden estimar les concentracions de diòxid de carboni. El registre de canvi global està representat per les variacions de $\delta^{18}\text{O}$ en foraminífers. La tendència cap a valors més positius és el resultat de la combinació del refredament del mar i de l'increment del volum de gel continental. Hi ha indicades quatre transicions principals de $\delta^{18}\text{O}$.

Font: Pearson and Palmer, 2000.

de què el sistema està compost, molts d'ells interaccionen a través de processos de realimentació (*feedbacks* en anglès) negatius o positius, i sovint relacionats d'una manera no lineal. Per tant, per unes condicions donades, pot haver-hi més d'un estat d'equilibri, i la transició entre ells pot ser reversible o irreversible, i sovint ràpida. La sensibilitat del sistema a variacions de qualsevol factor de canvi tampoc no està ben establerta, i no és la mateixa per a tots. Francament, ens falta encara molta informació per poder comprendre la mecànica del sistema. Donada aquesta complexitat, l'ús de models matemàtics resulta imprescindible per sopesar el pes relatiu dels

diversos components del sistema i per poder predir-ne l'evolució més probable. La veracitat d'aquests models depèn de la contrastació dels seus resultats amb dades reals. Un objectiu de l'article era mostrar com els estudis de reconstrucció paleoclimàtica contribueixen d'una manera important a entendre el sistema climàtic, ja que aporten la informació que ens manca per construir-ne una representació de l'estructura i del comportament. Veient com el clima ha evolucionat al llarg del temps, estem aprenent quina és la naturalesa veritable del seu dinamisme i podem començar a comprendre quins són els factors que fan que el sistema canviï a diferents escales

de temps i espai. Per tant, podem tenir una certa perspectiva sobre els canvis que estan tenint lloc avui dia. Un exemple més seria el següent. Estudis recents han demostrat que les variacions de diòxid de carboni des del miocè fins ara (els darrers 24 milions d'anys) han romàs relativament constants (gràfic 4), malgrat el marcat refredament que la Terra ha experimentat durant aquest període de temps, tal com demostren el creixement dels casquets polars, els canvis ecològics i les davallades de temperatura del mar (Pagani *et al.*, 1999; Pearson and Palmer, 2000). Això demostraria que el diòxid de carboni, per si sol, no és un factor clau que controli el canvi climàtic mundial en llargues escales de temps. Aquests resultats ja han estat utilitzats per alguns per defensar la inacció davant l'increment actual dels gasos amb efecte d'hivernacle (per exemple, vegeu el comentari sobre l'article de Pearson i Palmer a càrrec del Center for the Study of Global Change and Carbon Dioxide, a <http://www.co2science.org/journal/2000/v3n23c1.htm>, obviant en part que l'estudi valora canvis a llarg termini). No obstant això, si que podria ser que en relativament baixes concentracions de diòxid de carboni, el sistema climàtic esdevingui més sensible a altres factors de canvi com podria ser la circulació oceànica (Pagani, 2002). En canvi, quan la Terra ha tingut continguts de diòxid de carboni a l'atmosfera més de 6 vegades superiors als nivells actuals (*super-greenhouse world* durant el paleocè/eocè), el clima mundial ha estat extremadament càlid i l'efecte d'altres factors de canvi podien haver quedat amortits. En definitiva, ens queda bastant camí per recórrer abans no entenguem prou bé els canvis actuals i passats del nostre entorn. A mi em sembla clar, tot i així, que els registres paleoclimàtics mostren que el clima actual està canviant, i que amb la modificació del nostre entorn s'està fent un experiment de resultat incert, ja que les condicions actuals no s'han donat al planeta com a mínim durant els darrers 420.000 anys, i possiblement durant els darrers 25 milions d'anys. Es pot discutir si aquest experiment

compta amb el vistiplau de la gent, ja que la majoria continua les seves activitats quotidianes amb ben poca diferència de quan no se sabia gran cosa sobre aquests temes, independentment de la posició pública dels governs. Les possibles conseqüències i els riscos potser no són tan ben entesos per tothom, però de tota manera, ara per ara, aquests tampoc no es poden demostrar d'una manera concloent. Per fer-ho cal continuar investigant d'una manera estratègica, i internacionalment ja hi ha iniciatives per convèncer científics, gestors científics, polítics i la societat en general, que cal modificar les prioritats de la recerca (vegeu, per exemple, documents de l'International Geosphere-Biosphere Programme, com la declaració d'Amsterdam a <http://www.sciconf.igbp.kva.se/fr.html>). Sembla paradoxal que es doni tan poca importància a investigar la «salut» del planeta, en comparació amb altres temes, quan el nostre benestar en depèn totalment. A més a més, un repte que cal superar per comprendre el sistema climàtic és que els plantejaments tradicionals de recerca són incapaçs de copsar la seva veritable complexitat, ja que el sistema climàtic transcedeix els límits en què les ciències naturals estan encara dividides, seguint patrons tradicionals. Per tant, calen nous plantejaments que fomentin la multidisciplinarietat dels científics i la composició dels equips de recerca. A casa nostra és difícil encara de trobar suficients institucions preparades per afrontar aquests reptes, i desenvolupar espais de recerca que eventualment es puguin emmirallar amb centres de referència com el Tyndall Centre for Climate Change Research del Regne Unit o el Potsdam Institute for Climate Impact Research d'Alemanya. En tot cas cal ser optimistes, i l'actual promoció de xarxes de recerca d'excel·lència dins de l'espai català i europeu permeten formar equips de treball amb suficient diversitat de coneixements per anar avançant en aquest camp. ●

Bibliografia

- Allen, J. R. M., Brandt, U., Brauer, A., Hubberten, H.-W., Huntley, B., Keller, J., Kraml, M., Mackensen, A., Mingram, J., Negendank, J. F. W., Nowaczyk, N. R., Oberhansli, H., Watts, W. A., Wulf, S., and Zolitchka, B., 1999: Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period. *Nature* 400, 740–743.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. and Bonani, G., 1997: A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial climates. *Science* 278, 1257–1266.
- Bond, G. C. and Lotti, R., 1995: Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science* 267, 1005–1010.
- Broecker, W. S., 1997: Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: will man-made CO₂ upset the current balance? *Science* 278, 1582–1589.
- Claussen, M., 1998: On multiple solutions of the atmosphere—vegetation system in present-day climate. *Global Change Biology* 4, 549–559.
- Crowley, T. J., 2000: Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289, 270–277.
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdóttir, A. E., Jouzel, J. and Bond, G., 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218–220.
- deMenocal, P. B., 2001: Cultural responses to climate change during the Late Holocene. *Science* 292, 667–673.
- Ganapolski, A. and Rahmstorf, S., 2001: Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature* 409, 153–158.
- Heinrich, H., 1988: Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research* 29, 143–152.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: the scientific basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kukla, G. J., Matthews, R. and Mitchell, M., 1972: Present Interglacial: How and When Will it End? *Quaternary Research*, 261–269.
- Loutre, M. F. and Berger, A., 2000: Future climatic changes: Are we entering an exceptionally long interglacial? *Climatic Change* 46, 61–90.
- Mann, M., Bradley, R. and Hughes, M., 1999: Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. *Geophysical Research Letters* 26, 759.
- Pagani, M., 2002: *The alkenone-CO₂ proxy and ancient atmospheric carbon dioxide*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 360, 609–632.
- Pagani, M., Freeman, K. H. and Arthur, M. A., 1999: Late Miocene atmospheric CO₂ concentrations and the expansion of C₄ grasses. *Science* 285, 876–879.
- Pearson, P. and Palmer, M., 2000: Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature* 406, 695–699.
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J. M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., P. pin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stevenard, M., 1999: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436.
- Plummer, M. A., Phillips, F. M., FabrykaMartin, J., Turin, H. J., Wigand, P. E. and Sharma, P., 1997: Chlorine-36 in fossil rat urine: An archive of cosmogenic nuclide deposition during the past 40,000 years. *Science* 277, 538–541.
- Stocker T. F., 2000: Past and future reorganizations in the climate system. *Quaternary Science Reviews* 19, 301–319.
- Stommel, H., 1961: Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus* 13, 224–230.