

Un tast de canvi global  
(Cèlia Marrasé i Josep Enric Llebot, ed.)

*Treballs de la SCB. Vol. 54 (2003) 13-28*

## **CANVIS CLIMÀTICS SOBTATS: LA RECERCA MÉS DINÀMICA SOBRE EL CLIMA**

JOSEP ENRIC LLEBOT

*Departament de Física i Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals. Universitat Autònoma de Barcelona. Membre de la Secció de Ciències i Tecnologia de l'Institut d'Estudis Catalans.*

Adreça per a la correspondència: Josep Enric Llebot. Departament de Física i Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals. Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra.

### **RESUM**

En aquest treball es presenta la importància de l'anàlisi dels canvis ràpids en el clima, especialment pel que fa a la seva aplicació en l'estudi del canvi climàtic d'origen antròpic. S'analitzen els canvis sobtats més pròxims en el temps i dels quals es té més informació experimental i es fa referència als possibles mecanismes que porten a aquests tipus de transformacions climàtiques. Finalment, s'acaba discutint la relació entre l'escalfament global i els canvis climàtics ràpids.

### **SUMMARY**

This work is devoted to the analysis of the importance of abrupt climatic changes in the context of the research on human induced climatic change. The most recent abrupt climatic changes from which we have a great deal of experimental information are analyzed and also it is discussed what are the possible mechanisms that induce such rapid changes in climate. Finally some discussion is done about the relationship between global warming and abrupt climatic changes.

### **INTRODUCCIÓ: LA VARIABILITAT CLIMÀTICA**

Quina és la variabilitat natural del clima? Aquesta qüestió tan simple és, de fet, molt difícil de contestar, tant des del punt de vista teòric com des del punt de vista ex-

perimental o de les observacions. De manera ràpida i sense matisos podem dir que s'anomenen *variabilitat natural* les variacions del clima respecte dels seus valors mitjans associades als canvis en les condicions externes, és a dir, en els paràmetres orbitals i en l'activitat solar, i en les fluctuacions in-

ternes naturals del sistema climàtic. Si volem detectar i predir les conseqüències de les perturbacions que les activitats humanes produeixen sobre els diferents components del clima, entre els quals el més remarcable és el canvi de la composició atmosfèrica pel que fa a alguns gasos causants de l'efecte hivernacle, és de la màxima importància conèixer amb tota l'exactitud que sigui possible quina és aquesta variabilitat.

El sistema climàtic és complex perquè està format de diversos components. Estrictament, i seguint Peixoto-Oort (Peixoto i Oort, 1984) està format per cinc subsistemes: atmosfera, litosfera, hidrosfera, criosfera i biosfera, que interaccionen entre si, cadascun amb els seus temps de resposta característics i amb les seves propietats termodinàmiques característiques. Les interaccions entre aquests subsistemes són no lineals i, a la vegada, estan relacionades mitjançant complexos balanços que tenen una dinàmica pròpia. Exemples d'aquests balanços són el cicle del carboni, el cicle de l'aigua o el cicle del nitrogen. El sistema climàtic també està influenciat per dinàmiques externes, com la del Sol, l'activitat del qual evoluciona amb escales de temps que van des de les desenes d'anys fins a milers d'anys (Willson i Mordvinov, 2003), o amb l'evolució de les característiques de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol (Milankovitch, 1920). Un problema molt important, però que no tractarem en aquest article, és determinar com les característiques internes i les ressonàncies del sistema climàtic el porten a un estat d'equilibri, el qual serà interessant de poder caracteritzar en funció de paràmetres macroscòpics (Pujol i Llebot, 1999; Pujol *et al.*, 2000a; Pujol *et al.*, 2000b). Realment, l'estat estacionari del sistema climàtic està caracteritzat per una gran quantitat de soroll i d'oscil·lacions que no fa fàcil distingir els canvis climàtics reals d'aquelles evolucions transitòries característiques de la mateixa dinàmica del sistema.

## ELS CANVIS CLIMÀTICS SOBTATS

Fins a la darrera dècada, el punt de vista dominant sobre els canvis climàtics que s'han donat en el passat es plantejava considerant que el clima variava lentament, en escales de temps de milers d'anys. S'interpretaven els canvis associant-los amb les variacions lentes de l'energia del Sol rebuda a la Terra produïdes per les variacions de l'activitat de l'astre, amb la deriva continental, però, sobretot, amb les oscil·lacions periòdiques de les característiques de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol, la precessió, l'excentricitat de l'òrbita i l'angle de l'eix terrestre amb el pla de l'òrbita (Milankovitch, 1920). No obstant això, durant els anys noranta s'han realitzat nombrosos estudis paleoclimàtics que aporten proves geològiques sobre com ha canviat el clima de manera sobtada, és a dir, com s'ha produït en el decurs d'una o dues dècades la variació de la temperatura superficial de l'aire d'aproximadament una o dues desenes de graus o d'un factor 2 en la precipitació en una o dues dècades (Alley i Clark, 1999).

En el passat, el sistema climàtic ha experimentat grans canvis entre diferents estats que caracteritzen comportaments típics. Els que es coneixen d'una manera una mica més precisa corresponen als que s'han donat durant els darrers cent mil anys, durant l'establiment i la recuperació d'un període glacial. Mirant cap al futur, és interessant poder entendre el potencial de futurs canvis climàtics sobtats que es podrien donar, atesos els fenòmens que els han provocat en el passat; no obstant això, hi ha un gran buit en la comprensió dels processos que els controlen ja que, fins ara, alguns mecanismes que s'han proposat per a explicar-los no són capaços de descriure de manera completa els canvis sobtats del registre paleoclimatològic ni del registre històric.

Malgrat la definició fenomenològica que d'alguna manera hem donat abans, podem

definir un canvi climàtic sobtat quan el canvi en el clima és forçat per una causa que supera un cert llindar i que desencadena una transició fins a una nova situació d'equilibri del sistema climàtic que es produeix amb una rapidesa superior a la dinàmica d'evolució de la causa. Com a causa possible d'un canvi climàtic sobtat s'ha proposat la variació de la temperatura que indueix, per exemple, la fusió de determinades capes de glaç que, quan arriben al mar, disminueixen la salinitat de l'aigua, tot produint l'aturada de la circulació termohalina actual i el corresponent canvi del clima. També els processos caòtics que es donen en el sistema climàtic poden produir que sigui impossible determinar l'existència d'una única causa com la inductora d'un canvi important en les propietats ambientals.

### LA CIRCULACIÓ TERMOHALINA

Per les fortes no-linealitats i per les contínues relacions entre els diferents subsistemes, s'estudia teòricament amb gran intensitat el sistema climàtic, especialment pel que fa a l'anàlisi de l'acoblament dels dos subsistemes més importants pel que fa a la seva dinàmica, l'oceà i l'atmosfera. D'acord amb múltiples simulacions que abasten des de models simples fins a complicats models de circulació general, ara es pot dir que el sistema oceà-atmosfera sotmès als mateixos forçaments externs pot assolir diferents règims d'equilibri estables. La transició entre aquests estats estables es dona de manera molt ràpida quan determinats paràmetres climàtics assoleixen uns valors llindars. Aquest comportament, que necessàriament és no lineal, s'acostuma a descriure mitjançant la imatge d'un cicle d'histeresi, cicle que es dona en altres disciplines de la física i que visualitza de manera molt clara l'existència de dos estats d'equilibri estables

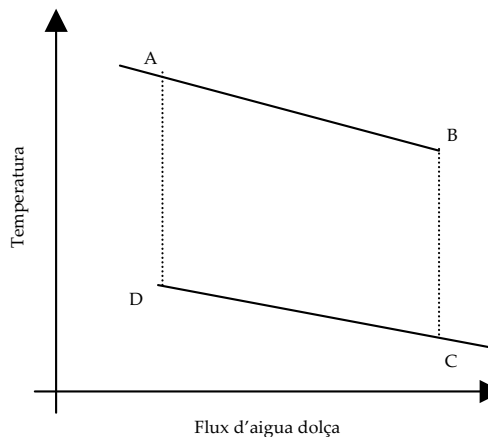


FIGURA 1. Esquema del funcionament d'un procés no lineal que caracteritza els canvis climàtics sobtats. La branca que va de A a B simbolitza el corrent termohalí actual de l'aigua, caracteritzat per una temperatura de l'aigua superficial relativament alta. Quan el flux d'aigua dolça supera un cert llindar (B), el sistema passa a ser descrit per la línia CD, característica d'un estat d'equilibri caracteritzat per una temperatura baixa i per una circulació de l'aigua del mar diferent de l'actual. La tornada al règim actual es produiria si el flux de l'aigua dolça assolís el valor caracteritzat pel punt D. Les transicions de B a C i de D a A corresponen a canvis climàtics ràpids.

diferents. Aquest cicle s'acostuma a representar mitjançant la temperatura de l'aigua a l'Atlàntic nord i del flux d'aigua dolça procedent dels rius, la pluja i la fusió dels blocs de gel (vegeu la figura 1).

El flux d'aigua dolça a l'Atlàntic nord afecta la densitat de les aigües superficials procedents de latituds baixes. La diferència de densitats controla la convecció que es dona a la major part de l'Atlàntic nord. Als mars del nord, actualment, l'aigua superficial procedent de les latituds baixes es torna molt densa, perquè té una gran salinitat i assoleix temperatures molt baixes, i s'enfonsa. Pel fons de la conca oceànica va cap al sud, on acaba tornant a pujar, a poc a poc, a la superfície en zones tropicals. Aquest cicle és força lent i, mitjançant el moviment de les aigües superficials, transporta

calor a les latituds altes i ventila les aigües profundes, tot fixant CO<sub>2</sub> de l'atmosfera a les aigües profundes de l'oceà. Aquest procés forma part de la convecció general de l'aigua a l'oceà terrestre que es coneix amb el nom de *circulació termohalina*.

Els mecanismes d'histèresi com els que hem mostrat a la figura 1 no són els únics comportaments no lineals que caracteritzen la variabilitat climàtica. Els processos de retroacció en són un altre exemple i són molt comuns en els intercanvis materials entre els diferents subsistemes que formen el sistema climàtic. Per exemple, en zones humides, l'aigua de pluja és capturada per les arrels de les plantes, absorbida per les plantes i retornada a l'atmosfera. Una temperatura més alta de l'atmosfera fa créixer la capacitat de contenir vapor d'aigua procedent de l'evaporació de les plantes i dels oceans, la qual cosa propicia, en haver-hi més vapor d'aigua, un augment addicional de la temperatura atmosfèrica, ja que l'aigua té bandes d'absorció a la regions infraroges de l'espectre. Així, la causa que produeix la modificació dels balanços, a la vegada, creix addicionalment, a causa dels efectes que produeix.

L'escala de temps dels canvis climàtics sobtats és tan petita que la societat i els ecosistemes naturals poden tenir problemes d'adaptació. Per tant, des d'una perspectiva actual, una de les qüestions fonamentals, ara per ara sense resposta, és saber si les activitats humanes poden desencadenar un canvi climàtic sobtat i, en el cas de resposta afirmativa, saber a quina distància temporal estem del desencadenament del procés de canvi. La idea dominant fins ara sobre el canvi climàtic d'origen antròpic era que els canvis serien graduals i que, per tant, la possibilitat d'adaptar-se era alta. Així, es pensa que la societat actual (les infraestructures, les persones, els habitatges, els usos del sòl, els processos industrials, etc.) té mecanismes d'adaptació gradual a situa-

cions ambientals canviants. També els ecosistemes durant la història geològica de la Terra s'han adaptat majoritàriament a situacions de canvi ambiental gradual. Naturalment, no tots; n'hi ha d'especialment vulnerables que no s'adapten i desapareixen. La història de la biosfera, en escales de temps geològiques, contínuament ha experimentat aquests tipus de processos i la capacitat d'adaptació de la biosfera s'ha mostrat amb la seva supervivència, certament, en formes i amb característiques diferents. El problema sorgeix, però, si les condicions ambientals varien tan ràpidament que posen en perill majoritàriament aquesta capacitat d'adaptació. Els sistemes vegetals són particularment sensibles i vulnerables als canvis sobtats perquè el seu temps característic de resposta a condicions ambientals canviants és lent, a causa, sobretot, de la seva immobilitat. A més, actualment aquests ecosistemes són encara més vulnerables per les alteracions que sobre aquests han produït les activitats humanes, tot reduint l'abundància de les espècies i mitigant la migració. La vulnerabilitat de les societats humanes antigues a condicions climàtiques adverses té dos exemples, la desaparició de la cultura maia aparentment per secades persistents (Hodell *et al.*, 1995) i el collapse de la civilització mesopotàmica a causa de canvis climàtics ràpids (Weiss, 1993).

## ELS MÈTODES DE LA PALEOCLIMATOLOGIA

El registre experimental de les variables climàtiques és molt escàs i es redueix, en el millor dels casos, a tres segles. Per tant, no hi ha una mesura directa de les variables atmosfèriques i oceanogràfiques com la temperatura, la coberta de gel, la precipitació o els corrents oceanogràfics. La paleoclimatologia ha desenvolupat enginyoses tècniques per obtenir informació experimental

que pot calibrar-se per aconseguir informació sobre valors d'aquestes variables en el passat. Aquestes dades s'anomenen *proxy data* o *dades assimilades*, ja que a partir de la informació experimental s'obté informació sobre dades d'interès climàtic. Les tècniques que utilitza la paleoclimatologia es basen en les anàlisis químiques, en la física i en la biologia d'arxius geològics com els sediments de determinats jaciments en el fons de llacs i de l'oceà, en cales de glaç de geleteres i en grans plaques de glaç continentals, en l'aigua profunda d'alguns aquífers, en les estalagmites de les coves o en els anells d'alguns arbres (Bard, 2002).

Per tal d'obtenir una informació climàticament rellevant un requisit previ és que es tingui la capacitat de datar de manera exacta el registre. Les datacions més precises s'obtenen quan la mostra conté capes estacionals, tal com passa a les soques dels arbres, a les geleteres i als coralls. No obstant això, no totes les mostres que es poden extreure contenen aquesta informació, la qual cosa fa que la datació amb resolució anual es limiti a pocs mil·lennis. Per a la resta de mostres la resolució és inferior, ja que s'utilitzen mètodes de datació basats en la desintegració d'isòtops radioactius.

La determinació de les temperatures en registres de gel utilitza la tècnica de la mesura de les proporcions relatives d'isòtops estables, tenint en compte que la temperatura de l'atmosfera afecta les abundàncies relatives de diversos isòtops en la fase líquida, sòlida i gasosa de l'aigua. La neu caiguda a Grenlàndia, per exemple, mostra una variació dinàmica de la proporció  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  i de  $^2\text{H}/^1\text{H}$ , a partir de la qual es pot extreure informació sobre les temperatures passades. Sovint aquestes paleotemperatures han de comprovar-se usant altres tècniques físiques o químiques.

En els àmbits marins, s'utilitzen tècniques químiques i biològiques per a esbrinar la temperatura superficial d'una conca ocea-

nogràfica. Les tècniques químiques utilitzen les proporcions de diferents marcadors (metalls traça, isòtops estables i molècules orgàniques) i els procediments biològics comporten comptatges i estratègies estadístiques de la quantitat de microfòssils. El nombre d'enllaços dobles en determinades molècules lipídiques presents en alguns tipus d'algues s'usa també per a determinar la temperatura superficial de l'aigua del mar, ja que el nombre dels enllaços dobles és proporcional a la temperatura imperant durant el creixement de l'alga. Per al coneixement de la temperatura també s'ha utilitzat la determinació de la proporció relativa dels isòtops d'oxigen  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  o d'elements traça com la relació estronci/calci, urani/calci i magnesi/calci als esquelets de coralls, de microfòssils o a les closques d'alguna espècie planctònica foraminífera. La propietat que s'utilitza es basa en el fet que la proporció relativa dels isòtops de l'oxigen o d'aquests elements traça depèn de la temperatura en els moments de creixement de l'organisme.

La força de la ventilació marina pot avaruar-se també amb mètodes semblants, com són les proporcions d'elements traça com el cadmi, d'isòtops radioactius estables com el  $^{14}\text{C}$ , el  $^{13}\text{C}$  o el proactini 231. També les relacions que s'utilitzen són empíriques i depenen de processos biològics que fraccionen les espècies químiques i isotòpiques durant el lent moviment de les masses d'aigua. Per exemple, la fotosíntesi i l'activitat biològica a la superfície de l'aigua utilitzen l'isòtop  $^{12}\text{C}$ . Quan la matèria biològica s'enfonsa progressivament va perdent  $^{12}\text{C}$  a favor de  $^{13}\text{C}$ . Així, l'aigua superficial té una proporció superior de  $^{12}\text{C}$ , contràriament de l'aigua que porta algun temps lluny del contacte amb la superfície, que progressivament va guanyant  $^{13}\text{C}$ . Finalment, si les aigües romanen al fons molt de temps acaben perdent també aquest isòtop, com es mostra en la diferent proporció que tenen les aigües

fondes actuals de l'Atlàntic i del Pacífic. Altres mètodes basats en processos biològics que fraccionen els isòtops utilitzen el fet que els bacteris marins típics de zones amb poc d'oxigen utilitzen els nitrats marins ( $\text{NO}_3^-$  dissolt) amb l'isòtop  $^{14}\text{N}$  quan es converteixen en compostos de nitrogen gasosos ( $\text{N}_2\text{O}$  i  $\text{N}_2$ ), i deixen la resta de  $\text{NO}_3^-$  rica en l'isòtop  $^{15}\text{N}$ . Així, la mesura de la fracció entre els isòtops del nitrogen  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  a la matèria orgànica fòssil pot donar indicis dels canvis dels processos de desnitrificació que habitualment s'associen amb eliminació de part de l'oxigen de l'oceà. Altres mètodes més simples utilitzen l'avaluació de la quantitat de minerals i grans procedents d'origen continental en mostres de gel d'icebergs per tal de conèixer l'extensió de la cobertura de glaç.

En general, tots els mètodes tenen la dificultat que no sempre la variació dels paràmetres indicadors en una variable d'interès ambiental depèn únicament d'aquesta, sinó que està influïda per altres processos i, a més, sempre hi ha l'assumpció que les proporcions vigents actualment són les que es donaven fa milers o fins i tot milions d'anys, la qual cosa no deixa de ser una hipòtesi més o menys justificada.

### LES PROVES DELS CANVIS CLIMÀTICS SOBTATS

Probablement, es pot afirmar que el canvi climàtic sobtat més estudiat del passat és l'anomenat *Younger Dryas* (el jove Dryas), que consisteix en un període molt fred que abasta des de fa 12.800 anys fins que va acabar, també de manera molt ràpida, fa uns 11.600 anys. Aquest episodi de la història climàtica de la Terra pot seguir-se molt bé a partir dels registres geològics d'arreu. Altres canvis climàtics sobtats que s'estudien amb el màxim interès són els que s'han produït durant l'holocè, el període més recent i

en què les condicions físiques que es varen donar sobre la Terra eren més semblants a les actuals.

El Younger Dryas bàsicament consisteix en un episodi extremament fred que interromp el ritme d'escalfament de la Terra, que estava en transició des d'un episodi glacial fins a un període interglacial. Les dades que es tenen d'aquest període indiquen que el refredament sobtat es va produir, aproximadament, en tres etapes d'uns deu anys cadascuna, mentre que l'escalfament al final de l'episodi (fa uns 11.600 anys) es va donar amb un augment de la temperatura d'uns 8 °C també en uns deu anys (vegeu la figura 2). Però la temperatura no és l'única dada climàtica disponible sobre aquest episodi. La taxa d'acumulació de neu durant la fase d'escalfament es va doblar en tres anys, tot i que la major acumulació es va produir en un any. Aquest procés està correlacionat amb els canvis en l'aflorament de l'aigua del mar impulsada pel vent en una conca veneçolana, que també es va donar en uns deu anys. Durant els mateixos períodes es varen donar, de ben segur, variacions substancials del règim de vents, ja que durant l'episodi els materials transportats pel vent, que es dipositen al gel i que ara es poden analitzar, varen ser entre tres i set vegades més abundants que quan l'episodi ja havia acabat. De fet, hi ha alguns investigadors que han trobat indicis que poden portar a concloure que la major part dels canvis del final del Younger Dryas es varen donar en cinc anys, tot configurant un escenari ambiental d'intensos canvis i perturbacions climàtiques. L'estudi de la composició de les bombolles d'aire atrapades en el gel també aporta informació sobre l'extensió global de zones d'aiguamolls durant aquell període.

Moltes d'aquestes dades han estat obtingudes a partir de l'anàlisi del registre de gels a Grenlàndia, tot i que també hi ha dades corresponents a altres localitats de jaciments procedents del Canadà, Bolívia, Perú

i l'Antàrtida. El comptatge anual de capes en les mostres de glaç a Grenlàndia permet, en aquest cas, la determinació de la durada i la rapidesa dels canvis que s'han donat durant aquest episodi, de manera que l'error en la datació dels registres és molt petita, al voltant de l'u per cent (vegeu la figura 2). Les dades obtingudes al jaciment de Byrd Station a l'Antàrtida indiquen un comportament diferent durant l'episodi del Younger Dryas, on sembla mesurar-se un escalfament, és a dir, un comportament del qual podríem dir que és *en oposició de fase* respecte de l'hemisferi nord. Aquesta característica s'ha mantingut en la història climàtica de la Terra en alguns altres episodis, tot i que recentment s'ha qüestionat que aquest fet sigui de caire general.

L'episodi del Younger Dryas va ser descobert a partir de l'estudi dels sediments terrestres, els quals revelen la magnitud global de l'episodi (vegeu, per exemple, Mercer, 1969). La dificultat de relacionar la datació mitjançant les tècniques de carboni amb les dates del calendari que s'obtenen de les mostres de gel no permet establir diferències de comportament en diferents localitzacions. Mentre sembla que a la major part del món els canvis haurien hagut de coincidir en el temps per a explicar els registres obtinguts del gel en el metà, la pols i restes materials, les condicions a Grenlàndia, en canvi, no permeten assegurar si han estat simultanis o seqüencials.

Durant l'holocè (els darrers deu mil anys) també s'han produït canvis climàtics sobtats que s'estudien amb molt d'interès perquè, d'una banda, les condicions de la Terra eren semblants a les actuals i, per tant, poden il·lustrar situacions semblants a les que es donen actualment, i de l'altra, serveixen com a prova dels models que s'utilitzen per a realitzar prospeccions climàtiques envers el futur pròxim. Entre els fenòmens que es creuen detectar figuren canvis ràpids en la precipitació (secades i inundacions), en la

grandària i la freqüència de tempestes tropicals i en la freqüència dels episodis d'El Niño i de La Niña. L'anàlisi d'aquestes importants perturbacions del sistema climàtic també serveixen per a avaluar els mecanismes que els desencadenen.

Entre els fenòmens que s'han donat durant els darrers 2.000 anys en destaquen dos que varen tenir lloc al voltant de fa 8.200 anys i entre 4.000 i 5.000 anys, respectivament. El primer s'ha detectat de manera més extensa a Grenlàndia, l'Atlàntic nord, Europa, Amèrica del Nord i l'Àfrica, i té molt d'interès, ja que s'associa a una reducció substancial de la circulació termohalina generada per la fusió d'extenses zones de gel a Amèrica del Nord que varen abocar grans quantitats d'aigua dolça a l'Atlàntic nord, amb la corresponent disminució de la densitat de l'aigua i, per tant, la interrupció substancial de l'enfonsament d'aigua a l'Atlàntic polar. Com a conseqüència de la gran quantitat de dades que hi ha sobre aquest esdeveniment climàtic, aquest episodi s'utilitza per a documentar i provar la sensibilitat dels models climàtics actuals. Un fet que fa especialment interessant aquest episodi és que mostra com l'assoliment de temperatures semblants a les actuals no és garantia d'estabilitat climàtica.

Un altre episodi de canvi climàtic ràpid relativament recent es donà fa uns cinc mil anys, quan en algunes zones del món es va passar d'un ambient de clima humit a les condicions de clima sec. Es té informació d'aquest episodi sobretot a l'Àfrica, a l'Atlàntic nord, a l'Euràsia i a l'Orient Mitjà. Les causes d'aquest episodi no s'entenen tan bé com les de l'episodi anterior, tot i que se'n plantegen quatre de possibles: un afèbliment de la circulació termohalina, l'oscil·lació de mil cinc-cents anys de la variabilitat atlàntica, un canvi sobtat de l'oscil·lació d'El Niño o un canvi bruscat d'algun paràmetre orbital de la Terra (Alley, 2002).

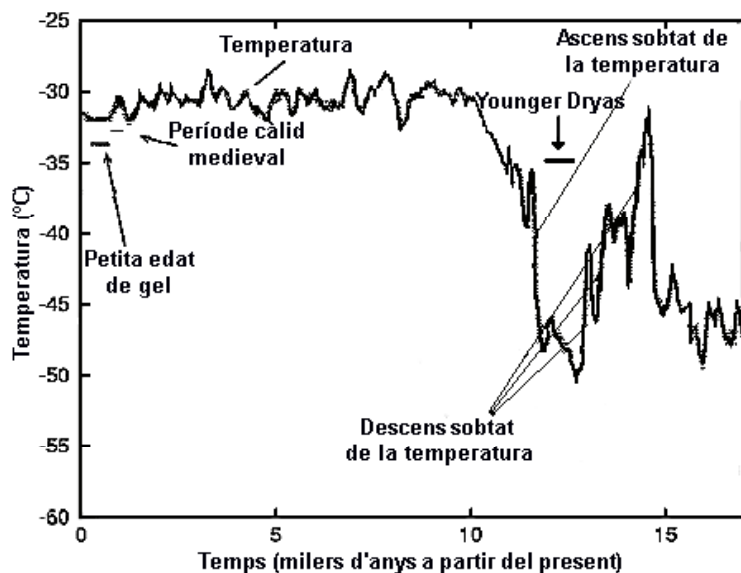


FIGURA 2. Reconstrucció de la temperatura a Grenlàndia segons les mostres del gel obtingudes en jaciments de Grenlàndia. S'assenyalen les tres etapes del descens de la temperatura de l'episodi del Younger Dryas i l'ascens al final de l'episodi d'uns deu graus en uns cinc anys. També apareixen marcats com a referència la temperatura assolida durant la petita edat de gel (segle XVI-XVII) i el període càlid medieval. (Figura elaborada per l'autor a partir de la figura 1.2 d'Alley, 2002.)

Altres fenòmens que es poden classificar dins la categoria de canvis sobtats estan menys estudiats, però actualment, s'hi dediquen nombrosos esforços de caracterització i interpretació. En aquesta categoria podem esmentar els canvis en el patró de variabilitat de l'ENSO (El Niño Southern Oscillation). El que està més ben documentat és el que es va donar l'any 1976, atès que es disposa de registre instrumental. Així mateix, tot i que encara no hi ha un acord sobre quan es va assolir el patró actual d'aquest fenomen es creu que durant l'holocè l'ENSO va experimentar canvis durant els quals es donava una variabilitat inferior i el fenomen mostrava una intensitat inferior. Fa uns mil anys es varen produir canvis en el règim hídric a l'Amèrica Central i del Nord que propiciaren canvis substancials també en la intensitat de les tempestes tropicals (Liu i Fearn, 2000; Forman *et al.*, 2001). Les variacions climàtiques durant l'últim mil·lenni estan, en general, més ben enteses temporalment i espacial. Això és lògic, ja que es disposa de registres procedents de documents històrics, dels anells dels ar-

bres del creixement del corall, a banda de l'anàlisi tradicional dels sediments i de mostres de gel. En aquest sentit, l'augment de temperatura que es va produir durant la segona meitat del segle XIX i que va acabar l'anomenada *petita edat de gel* s'estudia com un episodi de canvi climàtic bruscat. El canvi, singular aleshores comparat amb el comportament climàtic des del segle XVI, ja es pot dir que va tenir causes naturals (activitat solar i volcànica) i humanes (alliberament de gasos causants de l'efecte hivernacle a l'atmosfera). Si bé el final de la petita edat de gel és sobtat, el seu inici es pensa que va ser gradual, amb un refredament que va començar al voltant de l'any 1000.

L'anàlisi del registre dels darrers mil anys mostra que la variabilitat natural pot produir anomalies en la temperatura tant regional com global suficients per a afectar les societats humanes. També l'anàlisi del registre dels canvis hidrològics durant els darrers dos mil anys suggereix fins i tot efectes majors, com secades d'una dècada o fins i tot d'un segle complet, sense la concurrència d'un escalfament global. Malgrat



l'extens registre d'aquests episodis, no es té una comprensió exacta de quins mecanismes els han desencadenat. El mateix passa en els episodis d'inundacions en les conques hidrogràfiques.

Naturalment, l'anàlisi dels canvis climàtics sobtats quan s'ha disposat, en major o menor mesura, de registres instrumentals, afegeix un senyal més precís i amb una major cobertura espacial que els registres procedents de dades assimilades. El problema, no obstant això, rau en el limitat abast temporal d'aquest registre. On es posa la màxima intensitat d'estudi en aquest cas és en la identificació de patrons de la variabilitat climàtica que han pogut induir canvis climàtics sobtats en el passat i potser en el futur. L'esforç dels investigadors se centra sobretot a millorar el coneixement sobre el paper que tenen els patrons de circulació i els seus canvis en escales de temps de dècades o, com a molt, de segles. Així, durant el període instrumental s'analitzen canvis en el clima de magnitud molt més inferior als del registre paleoclimàtic amb l'objectiu d'extreure'n la significació, per tal d'aconseguir informació sobre a quines pressions ambientals, pel que fa al clima, estarà sotmesa la societat del futur.

## PATRONS DE VARIABILITAT DEL CLIMA

Una alternativa a la descripció del clima mitjançant complicats models tridimensionals o de circulació general, ara per ara l'eina més precisa però també la més cara i complexa, consisteix en l'anàlisi dels patrons o modes de variabilitat climàtica. Aquesta manera de descriure el clima consisteix en la identificació de regularitats o diferents fases que es donen en el comportament de l'atmosfera i de l'oceà i que caracteritzen el clima de moltes regions del globus. Aleshores, una hipòtesi seria que els

canvis climàtics sobtats podrien ser deguts a canvis en les fases d'aquests patrons, la qual cosa portaria a establir una mena de mecanismes universals en els canvis climàtics sobtats experimentats durant la història geològica de la Terra. Tanmateix, aquesta hipòtesi no està completament acceptada, sinó ben al contrari: està molt qüestionada per experts que argumenten que és impossible reduir la complexitat del sistema climàtic a uns quants paràmetres que caracteritzen un patró climàtic determinat (Dymnikov i Gritsoun, 2001).

Tampoc no hi ha una unanimitat en la classificació d'aquests patrons climàtics, tot i que podem dir que, a l'engròs, es classifiquen en dos grups: els modes anulars i l'ENSO. Hi ha dos modes anulars, l'*oscil·lació àrtica* (AO) i l'*oscil·lació antàrtica* (AAO), que de manera directa descriuen les variacions climàtiques que es donen en les regions polars i de latituds mitjanes en ambdós hemisferis. Els modes AO i AAO caracteritzen el vigor de la transferència de massa atmosfèrica entre les regions subtropicals, caracteritzades pel cinturó d'altres pressions, i la zona polar, caracteritzada per les baixes pressions. Un valor positiu de l'índex que caracteritza aquests modes significa que la diferència entre la pressió al cinturó d'altres pressions i la zona polar de baixes és gran, la qual cosa implica que es produeixi una circulació atmosfèrica intensa, mentre que valors baixos o, fins i tot, negatius, de l'índex, indueixen una circulació atmosfèrica feble.

Com passa de manera general en la circulació atmosfèrica, l'AAO mostra una bona simetria respecte al pol, mentre que l'AO, en canvi, atesa la peculiar distribució de zones continentals i oceàniques al voltant del pol, té valors de l'índex més grans sobre l'Atlàntic nord que en altres zones. Aquest mode es coneix habitualment amb el nom de *North Atlantic Oscillation* (NAO). L'índex NAO habitualment es calcula a partir de la diferència de la pressió atmosfèrica a Por-

tugal i Islàndia. Quan la diferència és gran, és a dir, per a valors grans de l'índex, les tempestes i pertorbacions atlàntiques arriben al nord d'Europa, produeixen temps relativament temperat i humit, mentre que al sud d'Europa es dona una gran estabilitat atmosfèrica. Quan, en canvi, el valor de l'índex NAO és negatiu, el nord d'Europa té un temps estable però fred i les pertorbacions atlàntiques incideixen als països del sud d'Europa i del nord d'Àfrica.

L'episodi d'El Niño es dona quan els vents alisis del Pacífic equatorial s'afebleixen i la superfície de l'oceà s'escalfa anòmalament, tot interrompent l'aflorament de l'aigua del fons que s'acostuma a donar enfront de les aigües del Perú i de l'Equador. Aquest règim de circulació s'alterna amb l'anomenada *situació de La Niña*, on els vents alisis són intensos, i la superfície de l'oceà és freda a causa de l'aflorament de les aigües fondes enfront de les costes occidentals de l'Amèrica del Sud equatorial. L'oscil·lació entre aquests dos estats és el que es coneix amb el nom d'*ENSO*. Aquesta oscil·lació climàtica és important a escala global a tot el planeta, ja que caracteritza fenòmens que s'estenen més enllà de les regions on es produeix originàriament. S'especula també que l'escalfament global és suficient per a posar el clima del món sempre en un estat d'El Niño, però no hi ha, ni molt menys, unanimitat sobre això (Philander, 1998).

Un altre patró és l'anomenat patró *pacífic-nord-americà* (PNA), que exerceix una forta influència en la distribució de la pluja i en la temperatura superficial a la costa oest d'Amèrica del Nord. Igual com l'AO, el PNA fluctua de manera aparentment caòtica d'un mes a un altre però també exhibeix un comportament sistemàtic a una escala temporal més llarga.

Un darrer patró, proposat recentment, fa referència sobretot a la climatologia del sud d'Euràsia, Orient Mitjà i nord d'Àfrica. S'anomena *oscil·lació de la Mediterrània occi-*

*dental* (OMO) (Martín Vide, 2003). Aquest índex està constituït per un centre d'acció atlàntic pròxim a la península Ibèrica i un altre de localitzat al centre d'Europa, al nord de la península Itàlica. Quan aquest índex és positiu, hi ha altes pressions a les Açores i baixes pressions al nord de la península Itàlica, i es produeix un flux de component nord a l'àrea mediterrània, mentre que per a índexs negatius, la relació de pressions quedaria canviada i es produiria una advecció de component est a la conca mediterrània occidental. Per les dades instrumentals que es tenen sembla que durant el segle XIX aquest índex va assolir una fase negativa, mentre que des dels anys deu fins als setanta del segle passat l'índex fou positiu. La proposta d'aquest índex i la seva anàlisi és d'interès especialment a casa nostra, ja que fins ara no s'havien proposat patrons de teleconnexió pròpiament mediterranis que puguin donar indicis de canvis climàtics en aquesta zona climàtica de la Terra.

### CANVIS RÀPIDS DELS PATRONS CLIMÀTICS EN EL REGISTRE INSTRUMENTAL

Durant el període instrumental s'han produït variacions del clima susceptibles d'anàlisi dins de la perspectiva dels canvis climàtics ràpids. A continuació en fem esment d'alguns. El procés més interessant i també més rellevant del passat pròxim que està a cavall del període instrumental i del període en què s'han d'utilitzar dades assimilades és la petita edat de gel. La major part de registres instrumentals data del segle XIX i del segle XX. Un dels més antics és una sèrie de mesures de la temperatura al Regne Unit que daten de mitjan segle XVII. Aquesta i altres sèries capturen les temperatures baixes, és a dir, llargs períodes de fred, sobretot a Europa. Durant aquest període es varen donar episodis de gana, especialment

a Irlanda i França, on l'alimentació estava basada en el conreu de patates i de blat, conreus amb poca adaptació a canvis tèrmics sobtats, i dels quals va quedar l'anomenada *fam de la patata* a Irlanda, al voltant de 1840. Aquest període va estar caracteritzat per augments sobtats de temperatura, com el que es va produir al voltant de 1730, o el darrer, durant la segona meitat del segle XIX, que va posar fi, estrictament parlant, a aquest període. Indicis documentals addicionals situen episodis com l'any sense estiu (1816) als Estats Units d'Amèrica, lligat a l'erupció del volcà indonesi Tambora, o a nevades a l'estiu en determinades regions dels Estats Units. No obstant això, de tot aquest període el que compleix la condició d'episodi climàtic ràpid és la transició vers el període càlid actual (Alley, 2002).

Pel que fa als índexs AO i NAO, s'ha observat durant les últimes dècades que la pressió mitjana al nivell del mar ha disminuït 6 hPa, amb la qual cosa l'índex NAO ha augmentat i, per tant, el règim de vents de l'oest subpolar s'ha fet més fort. Les correlacions d'aquest canvi amb el règim climàtic en zones més o menys properes porta a relacionar el canvi en la pressió amb hiverns més suaus a Rússia, la Xina i el Japó i amb episodis de sequera en extenses regions del sud d'Europa i de l'Orient Mitjà. Altres fenòmens correlacionats són la retirada de les geleres, l'escalfament del sòl gelat i la disminució de l'extensió de la coberta de gels a Alaska, on les temperatures augmentaren sobtadament durant els anys setanta. De manera anàloga s'observen fenòmens semblants a l'hemisferi sud, cosa que aparentment indica que aquests canvis climàtics estan impulsats per les variacions de l'AO o, en el seu cas, de l'AAO.

En aquest punt sorgeix una interessant font de discussió i controvèrsia científica. Alguns experts (Shindell, 1999) mantenen que aquests canvis són conseqüència del contingut cada vegada major de gasos cau-

sants de l'efecte hivernacle a l'atmosfera, els quals escalfen la troposfera i refreden l'estratosfera. Un reforçament indirecte a aquesta hipòtesi es dóna quan la simulació duta a terme amb models de l'atmosfera en què s'introdueix una concentració creixent d'aquests gasos porta a les situacions descrites anteriorment. Així mateix, s'ha proposat que la pèrdua de l'ozó estratosfèric i els canvis de la temperatura de l'aigua del mar també poden induir els canvis descrits en els índexs AO/NAO. No obstant això, en no disposar encara d'un coneixement d'aquests fenòmens a partir dels principis bàsics que regeixen el funcionament del sistema climàtic, aquesta relació no deixa de ser una hipòtesi.

Durant el segle XX hi ha hagut dos escalfaments ràpids, un que es va donar entre 1920 i 1930, concentrat sobretot en latituds situades molt al nord, i el darrer que es va iniciar a partir de 1970, general en pràcticament tot el planeta, que encara no s'ha aturat. El primer sembla que podria explicar-se per causa del forçament produït pel Sol i per les partícules emeses pels volcans, i el segon s'atribueix a l'escalfament global, tot i que pot haver-hi també una part deguda a forçaments naturals (Houghton, 2001; Willson i Mordvinov, 2003).

Hi ha altres episodis ràpids en el passat recent que tenen, encara, explicacions molt controvertides. Entre aquests és rellevant esmentar el refredament i la pèrdua de salinitat de les aigües polars a l'Atlàntic nord des de 1972 fins a 1996, diferents canvis de la salinitat durant els anys seixanta, la interacció canviant de les aigües de l'Àrtic amb les de l'Atlàntic durant els noranta i els canvis experimentats a l'Antàrtida i als oceans boreals (Alley, 2002).

## ELS MECANISMES QUE CAUSEN ELS CANVIS CLIMÀTICS SOBTATS

Els diferents components del sistema climàtic tenen diferents temps característics de resposta a les pertorbacions. L'atmosfera, que caracteritza els meteors que es donen a la superfície terrestre i que determinen la meteorologia, té temps de resposta ràpids i constitueix el subsistema climàtic de resposta més ràpida (Peixoto i Oort, 1984). La hidrosfera o la criosfera tenen, en canvi, respostes molt més lentes. Els mecanismes fonamentals que caracteritzen els processos de canvi climàtic sobtat no són pas diferents dels que caracteritzen els canvis climàtics lents, però han de tenir una característica addicional que superi la inèrcia i el comportament característic i «lent» d'un element fonamental per al sistema climàtic: els fluxos d'aigua als oceans. Per tant, un mecanisme que mení a canvis climàtics sobtats ha de reunir les condicions següents (Alley, 2002): *a*) un mecanisme que desencadeni el procés o una pertorbació caòtica que mení a superar el valor llindar d'una variable del sistema climàtic que desencadena l'esdeveniment; *b*) un amplificador o un globalitzador que intensifiqui i estengui la influència dels canvis locals i *c*) una font de persistència que permeti l'estat del clima alterat mantenir-se per desenes, centenars o milers d'anys. Per a estudiar els mecanismes que a continuació esmentarem s'utilitzen els canvis sobtats que hem presentat en els apartats anteriors.

Molts canvis del clima s'han descrit com a petites desviacions a partir d'un estat de referència, sovint en equilibri amb els forçaments externs. La idea habitual i més senzilla és suposar que si els forçaments externs o el comportament intern del sistema climàtic varia lleugerament respecte a la situació d'equilibri, la resposta del sistema serà proporcional a la causa, és a dir, el sistema assolirà un estat d'equilibri molt pròxim al

de partida, que és el que s'anomena *model lineal*. No obstant això, el model lineal no és aplicable al cas dels canvis sobtats en els quals una petita pertorbació pot produir un canvi molt més gran en les variables característiques del sistema. Per tant, en analitzar aquestes situacions s'han de tenir en compte consideracions no lineals i processos transitoris que habitualment no es tenen en compte. En aquestes situacions la utilització dels models computacionals ha tingut un gran paper; tanmateix, hi ha tres tipus de models analítics que han configurat el camí que pot conduir als canvis climàtics sobtats.

El primer és el model de dues caixes formulat per Henry Stommel (Stommel, 1961; Marotzke, 2000). El model de Stommel fou publicat l'any 1961 però pràcticament no fou reconegut per ningú fins passats vint-i-cinc anys. El model mostra com els diferents temps de resposta a la calor absorbida, de la superfície de l'oceà i de l'aigua dolça, dona lloc a diferents estats d'equilibri. Això fa que els forçaments i les condicions de contorn, per si mateixes, no defineixin l'estat d'equilibri del sistema (vegeu la figura 1). La no-linealitat del model de Stommel sorgeix perquè el camps de fluxos de l'aigua als oceans que transporten la calor i la salinitat són a la vegada funció de la temperatura i de la salinitat. Així, les no-linealitats i els equilibris múltiples són els conceptes fonamentals darrere la gènesi dels canvis climàtics sobtats (vegeu la figura 3). La circulació d'aigua marina,  $q$ , és proporcional a la diferència de la densitat de l'aigua entre les latituds altes i baixes. Així, si la densitat al voltant de les aigües àrtiques és més gran que la densitat a latituds baixes, el flux d'aigua és positiu ( $q > 0$ ) i a l'inrevés. Les aigües tropicals guanyen calor i perden aigua, a causa de l'evaporació. Les aigües polars, en canvi, perden calor cap a l'atmosfera i guanyen aigua dolça del desglaç dels gels continentals. Per tant, tant la temperatura com la salinitat són més grans a les latituds baixes que a les

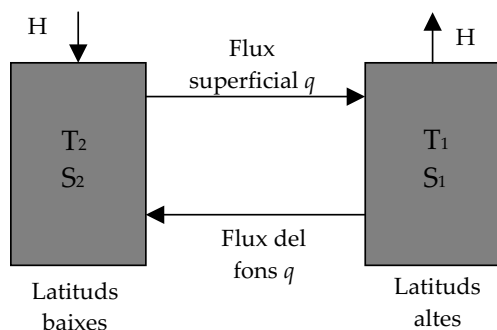


FIGURA 3. Representació esquemàtica del model de Stommel.  $T$  és la temperatura i  $S$  la salinitat.  $H$  és el flux de salinitat produït per l'evaporació o barreja amb aigua dolça. Al voltant de l'equador, l'evaporació de l'aigua del mar és elevada i augmenta la salinitat, mentre que a latituds altes els vessaments d'aigua dolça producte de la fusió dels gels la disminueixen. Els fluxos d'aigua estan moguts per la diferència de densitats entre les diferents masses d'aigua.

latituds altes. Les dues variables, doncs, tenen efectes oposats sobre la densitat. Quan  $q > 0$ , és la temperatura la que domina el comportament de la densitat, mentre que si  $q < 0$ , domina la salinitat. Els valors de  $q$  en el model són, per tant, petits i, en conseqüència, la transició entre  $q > 0$  (circulació de sud a nord) i  $q < 0$  (circulació de nord a sud) pot ser molt ràpida.

El segon és el model de Sellers (Sellers, 1969), que és un model senzill de balanç d'energia. En aquest model es mostra que per a una determinada quantitat de radiació solar s'aconsegueix un planeta càlid en equilibri o un planeta fred. Les no-linealitats aquí s'introdueixen mitjançant la descripció d'un acoblament neu-albedo que s'aplica únicament en un determinat interval de temperatures. Quan el planeta és fred i la neu reflecteix la radiació solar, el sistema es manté fred. Una terra més càlida té menys neu, absorbeix més llum del Sol i està en equilibri també amb la radiació incident. L'element desencadenant del canvi entre un estat i l'altre és la radiació solar o altres paràmetres que influeixen en el balanç radiatiu, com la cobertura de neu.

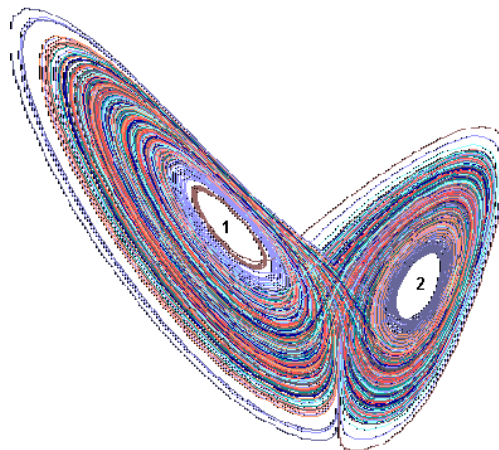


FIGURA 4. Atractor de Lorentz. Els dos cercles blancs simbolitzen els dos estats estacionaris del sistema climàtic. L'evolució del sistema climàtic real entre aquests dos estats és aleatòria, la qual cosa significa que el clima pot estar al voltant del cercle 1 durant un temps determinat i, sobtadament, passar a moure's al voltant del cercle 2. El nombre de voltes al voltant de cada cercle és aleatori, la qual cosa significa que no hi ha capacitat per a predir quant de temps el clima s'estarà al voltant de l'estat 1 i quant de temps estarà al voltant de l'estat 2.

El model de Lorentz (Lorentz, 1963) proporciona una descripció simplificada de la circulació atmosfèrica. A banda dels equilibris múltiples en què es poden situar els sistemes en funció dels valors dels paràmetres, aquests models exhibeixen oscil·lacions autosostingudes. Un sistema oscilla entre un o dos centres preferits de l'espai de fases, els anomenats *attractors*, que correspondrien a dos estats del sistema climàtic. En el model de Lorentz, la transició entre un estat i l'altre es dona espontàniament i de manera no previsible (vegeu la figura 4).

### L'ESCALFAMENT GLOBAL: UNA POSSIBLE CAUSA DELS CANVIS CLIMÀTICS SOBTATS?

Tal com s'ha dit abans, la naturalesa no lineal o les característiques caòtiques del sis-

tema climàtic unides al forçament produït per la variació de la composició atmosfèrica de gasos causants de l'efecte hivernacle, segons alguns experts, augmenta considerablement les probabilitats perquè es doni un canvi climàtic sobtat, és a dir, en una escala inferior a l'escala de temps característica del sistema econòmic o dels ecosistemes globals. Sembla fora de dubte que la temperatura de l'aire superficial està augmentant i que la temperatura subsuperficial de l'oceà augmenta també i, ateses les característiques peculiars dels canvis climàtics sobtats, sembla molt important estudiar-los, així com fer simulacions mitjançant els models de circulació general que puguin reproduir canvis ràpids del passat i puguin fer també una anàlisi prospectiva amb vista al futur.

No obstant això, el canvi climàtic sobtat més rellevant i al qual s'ha dedicat una major atenció és el que fa referència als canvis en la circulació termohalina a l'Atlàntic nord. La qüestió fonamental d'importància científica i de rellevància social és saber si aquest mode de transport convectiu d'energia i de salinitat és estable sota els condicionants del canvi climàtic d'origen antròpic i, en el cas que no ho sigui, a quina distància ens trobem de la inestabilitat i quins impactes tindria, en el cas que es donés un canvi substancial en aquest procés. Clarament, es pot dir que la interrupció de la circulació termohalina a l'Atlàntic nord no produiria el desencadenament d'un nou període glacial, però en canvi, de ben segur, sí que induiria canvis substancials en els patrons de circulació de l'aigua als oceans, canvis de les regions on es donen els afloraments i les subsidències, variacions substancials de la distribució estacional del gel, del nivell del mar, dels camins de les tempestes, del cicle hidrològic, dels esdeveniments meteorològics extrems, etc. En definitiva, d'un canvi climàtic ràpid. Naturalment, aquest canvi no es donaria arreu

igual i les zones més afectades serien les que corresponen a l'Atlàntic nord.

L'IPCC resumeix (Houghton, 2001) l'ús dels models acoblats atmosfera-ocèa que s'han fet funcionar amb els diferents escenaris per als propers cent anys sobre el contingut atmosfèric dels gasos causants de l'efecte hivernacle. La major part dels models mostra una reducció en la circulació termohalina com a resposta a l'escalfament global, la qual cosa induirà, probablement, l'escalfament de la superfície del mar a altes latituds i, per tant, un transport d'humitat cap a les zones polars superior a l'actual, amb la producció, en conseqüència, de precipitacions majors a l'Atlàntic nord. Aquest efecte reduiria substancialment la salinitat marina, la qual cosa a la vegada disminuiria la quantitat d'aigua superficial que s'enfonsaria. La magnitud d'aquests processos no es coneix amb precisió i és incerta, però tots els models donen resultats qualitativament semblants.

Aquest escenari, si bé és el majoritari, no està exempt de discussions i de dubtes. D'un costat, alguns models suggereixen canvis en la freqüència i en l'amplitud del fenomen ENSO. Això podria fer que l'Atlàntic tropical n'alterés la salinitat, i comportaria que l'aigua que es desplaça cap al nord portés més salinitat i, per tant, tingués una tendència major a enfonsar-se. No obstant això, l'especulació més rellevant es basa a saber si la taxa de l'escalfament de l'atmosfera i, per tant, de la superfície del mar, és una magnitud rellevant. Efectivament, la quantitat de calor que pot absorbir l'oceà està limitada pels processos de mescla. Un escalfament molt ràpid de l'atmosfera portaria gradients verticals importants a l'oceà i, per tant, una reducció de la tendència de l'aigua a enfonsar-se. Així, segons sembla (Stocker i Schmittner, 1997), la taxa d'escalfament més ràpida fa la circulació termohalina menys estable a les pertorbacions.

A banda d'aquestes consideracions, l'efecte de l'escalfament global és previst que es manifesti sobre el gel, tant continental com marítim, sobre el sòl gelat; canvis biològics i geològics en les conques de drenatge poden augmentar la rapidesa dels canvis en el cicle de l'aigua dolça. S'ha mesurat un increment en la precipitació i, en conseqüència, en els cursos fluvials, un increment d'un 7-12 %, sobretot a la zona situada entre els paral·lels 30 °N i 85 °N, justament aquesta última una regió crucial per al balanç i la salinitat de l'aigua dels oceans Àrtic i Atlàntic. En qualsevol cas i encara que no s'aturi completament la circulació termohalina, sí que sembla bastant probable que les aigües dels oceans Àrtic i Atlàntic nord seran més dolces, amb els canvis en la circulació marina que aquesta característica pot produir.

## CONCLUSIONS FINALS

Poques coses més, doncs, es poden dir sobre els efectes de l'escalfament global sobre els canvis sobtats i, naturalment, menys sobre els possibles impactes sobre els ecosistemes i el sistema econòmic. Malgrat els esforços humans i de recursos fets durant la dècada dels noranta, encara es té un coneixement imprecís de molts aspectes que caracteritzen els sistemes físics, ecològics i humans relacionats amb els processos de canvi ambiental, especialment en la seva dinàmica, la descripció i comprensió de la seva complexitat i de les no-linealitats. Certament, la descripció i el coneixement que es té de variables climàtiques no té prou abast temporal i la modelització encara no té prou resolució espacial. Per això, l'anàlisi dels esdeveniments climàtics d'evolució ràpida pot donar pistes per al millor coneixement dels processos que caracteritzen la variabilitat climàtica i dels trets fonamentals que desencadenen els processos no lineals que la caracteritzen. Per a assolir aquest objec-

tiu sembla recomanable intensificar l'anàlisi dels episodis de canvis de propietats climàtiques ràpids que tinguin condicions que siguin més properes a les actuals i a la vegada obtenir-ne simulacions. És especialment interessant l'estudi dels corrents termohalins a l'oceà, ja que sembla molt probable que aquest sigui un dels processos més sensibles als mecanismes de canvi climàtic o bé que, fins i tot, la seva variació sigui el motor més ràpidament perceptible del canvi climàtic a l'hemisferi nord.

## REFERÈNCIES

- ALLEY, R. B.; CLARK, P. U. (1999). «The deglaciation of the Northern Hemisphere: A global perspective». *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, vol. 27, pàg. 149-182.
- ALLEY, R. B. [et al.] (2002). *Abrupt climate change: Inevitable surprises*. Washington: National Academy Press.
- BARD, E. (2002). «Climate shock: Abrupt changes over millennial time scales». *Physics Today*, pàg. 32-38.
- DYMNIKOV, V. P.; ANDREI, G. (2001). «Climate model attractor: Chaos, quasi-regularity and sensitivity to small perturbations of external forcing». *Nonlinear processes in Geophysics*, vol. 8, pàg. 201-209.
- FORMAN, S. L.; OGLEBY, R.; WEBB, S. R. (2001). «Temporal and spatial patterns of Holocene dune activity of the great plains of North America: megadroughts and climate links». *Global and Planetary Change*, vol. 29, pàg. 35-55.
- HODELL, D. A.; CURTIS JASON, H.; MARK, B. (1995). «Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization». *Nature*, vol. 375, pàg. 1367-1370.
- HOUGHTON, J. T. (ed.) (2001). *Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Third Assessment Report: The scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LIU, K.; FEARN, M. L. (2000). «Reconstruction of prehistoric landfall frequencies of catastrophic hurricanes in northwestern Florida from lake sediments records». *Quaternary Research*, vol. 54, pàg. 238-245.
- LORENTZ, E. N. (1963). «Deterministic non-periodic flow». *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 20, pàg. 130-141.
- MAROTZKE, J. (2000). «Abrupt climate change and thermohaline circulation: Mechanisms and predictability». *PNAS*, vol. 97, pàg. 1347-1350.

- MARTÍN VIDE, J. (2003). «Analysis of daily precipitation irregularity by means of a concentration index». *International Journal of Climatology*. [En premsa]
- MERCER, J. H. (1969). «The Allerod oscillation: A European climate anomaly?». *Arctic and Alpine Research*, vol. 1, pàg. 227-234.
- MILANKOVITCH, M. (1920). *Theorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*. París: Gauthier-Villars.
- PEIXOTO, J. P.; O., A. H. (1984). «Physics of climate». *Reviews of Modern Physics*, vol. 56, pàg. 365-429.
- PHILANDER, S. G. (1998). *Is the temperature rising? The uncertain science of global warming*. Princeton: Princeton University Press.
- PUJOL, T.; LLEBOT, J. E. (1999). «Greenhouse gases and climatic states of minimum entropy production». *Journal of Geophysical Research*, vol. 104D, pàg. 24 257-24 263.
- PUJOL, T.; LLEBOT, J. E.; FORT, Q. (2000a). «Extremal climatic states simulated by a 2-dimensional model. Part I: Sensitivity of the model and present state». *Tellus*, vol. 52A, pàg. 422-439.
- PUJOL, T.; LLEBOT, J. E.; FORT, Q. (2000b). «Extremal climatic states simulated by a 2-dimensional model. Part II: Different Climatic Scenarios». *Tellus*, vol. 52A, pàg. 440-454.
- SELLERS, W. D. (1969). «A global climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system». *Journal of Applied Meteorology*, vol. 8, pàg. 392-400.
- SHINDELL, D. T.; MILLER, R. L.; SCHMIDT GAVING, A.; PANDOLFO, L. (1999). «Simulation of recent northern winter climate change trends by greenhouse gas forcing». *Nature*, vol. 399, pàg. 452-455.
- STOCKER, T. F.; SCHMITTNER, A. (1997). «Influence of CO<sub>2</sub> emission rates on the stability of the thermohaline circulation». *Nature*, vol. 388, pàg. 862-865.
- STOMMEL, H. (1961). «Thermohaline convection with two stable regimes of flow». *Tellus*, vol. 13, pàg. 224-230.
- WEISS, H.; MARIE-AGNÈS, C.; WETTERSTROM, W.; SENIOR, L.; MEADOW, R. H.; GUICHARD, F.; CURNOW, A. (1993). «The genesis and collapse of third millennium North Mesopotamian civilization». *Science*, vol. 261, pàg. 995-1004.
- WILLSON, R. C.; MORDVINOV, A. C. (2003). «Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23». *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, núm. 5, pàg. 1199.