

El canvi climàtic: Veiem el que és important però ignorem algunes coses fonamentals

Josep Enric Llebot

**DEPARTAMENT DE FÍSICA I INSTITUT DE CIÈNCIA I TECNOLOGIA AMBIENTALS, UAB
MEMBRE DE LA SECCIÓ DE CIÈNCIES I TECNOLOGIA DE L'INS. D'ESTUDIS CATALANS**

Introducció La Terra existeix des de fa uns 4600 milions d'anys. Les restes minerals més antigues datades tenen una antiguitat de 4200 milions d'anys: la roca ígnia més antiga té uns 3900 milions d'anys i els fòssils més antics daten de 3800 milions d'anys. La història climàtica de la terra és molt complexa i la major part s'ha produït sense la presència humana, la qual representa un petit instant de tot el registre geològic del planeta. Així, la mesura instrumental de la temperatura, la pressió, la humitat la precipitació i altres variables climàtiques data de menys de dos cents anys. A banda dels registres dels instruments, la recerca del clima del passat utilitza mètodes històrics convencionals, com els documents dipositats en ajuntaments, en parròquies o en arxius que registren les collites, les riuades i d'altres fenòmens naturals. Quan no existeix registre històric escrit, la creativitat científica ha permès poder conèixer indicis del clima del passat a partir de l'anàlisi de sediments terrestres i del fons de l'oceà, dels gels dels pols i dels arbres dels boscos, del pol·len, etc. configurant una interessant i curiosa exploració del passat.

L'aportació d'energia que fa el Sol és fonamental pel clima de la Terra. A mitjans del segle XIX, el matemàtic francès Joseph A. Adhémar, motivat per l'estudi de les glaciacions i llur causes, va formular la hipòtesi que aquestes podrien ésser degudes a les variacions de la intensitat de les estacions provocades per factors astronòmics. L'astrònom Melutin Milankovitch va refinar i formalitzar la hipòtesi entre els anys 1920-1930. El mecanisme astronòmic que va proposar constava de tres components: la inclinació de l'eix de rotació de la terra, la forma de l'òrbita terrestre i la precessió de l'eix de rotació de la Terra.

Actualment l'eix de rotació de la Terra està desviat respecte la perpendicular al pla de l'òrbita terrestre al voltant del sol 23,5. Durant un any, la orientació de l'eix roman pràcticament constant. Al llarg del temps, però, aquesta inclinació fluctua poc a poc des de 21,5 fins a 24,5 amb un període de 41000 anys. La inclinació de l'eix de rotació

amb el pla de l'òrbita és la causa de que hi hagin estacions. Com més gran és aquesta inclinació més grossos són els canvis estacionals, és a dir, els estius són més càlids i els hiverns més rigorosos. El segon factor que també afecta a les característiques de les estacions és la forma de l'òrbita terrestre. Amb un període de 100.000 anys, l'òrbita es fa més el·líptica o més circular. Si l'excentricitat de l'òrbita creix, augmenta la diferència de distàncies entre la Terra i el Sol en els seus punts més pròxim i més allunyat, intensificant-se les estacions en el cas de creixement de l'excentricitat i moderant-se en l'altre. Actualment la Terra arriba al punt més allunyat del Sol a l'hivern de l'hemisferi sud, per tant, els hiverns australs són una mica més freds i els estius una mica més càlids que els corresponents de l'hemisferi nord. El tercer factor astronòmic introduït per Milankovitch és la interacció entre els efectes de la inclinació i l'excentricitat: la precessió orbital que correspon a la rotació al voltant de l'eix perpendicular al pla de l'òrbita amb un període de 23.000 anys. La precessió és el moviment que determina si l'estiu en un hemisferi correspon a un punt proper o allunyat de l'òrbita al voltant del Sol.

Els càlculs de Milankovitch sobre l'acció combinada d'aquests tres factors el portaren a preveure que induïen variacions en la radiació solar que arriba a la Terra suficients com per fer que les grans masses de gels avancin o retrocedeixin i, per tant, configurin allò que es coneix com a períodes glacials. En el moment de formular aquesta hipòtesi mancava tenir constància d'un registre independent de les glaciacions que pogués confirmar aquesta hipòtesi, registre que avui existeix gràcies a mètodes de datació i caracterització dels períodes climàtics independents. Per tant, avui es creu que les variacions astronòmiques són un dels factors essencials per a entendre l'evolució dels climes del passat.

Hi ha un altre factor que afecta l'evolució del clima si bé en una escala temporal diferent, molt més petita, que les variacions associades als canvis orbitals proposats per Milankovitch. Aquest factor és la variació de la radiació emesa pel Sol com a conseqüència de l'activitat de l'estrella. Les primeres indicacions sobre una activitat solar canviant i cíclica daten de 1843 quan un farmacèutic alemany, observador astronòmic aficionat, va anunciar que el nombre de taques fosques visibles al disc solar semblava seguir un cicle de 10 anys. Richard Wolf, director de l'observatori de Zuric va seguir l'evolució diària del nombre de taques solars i compilà la història recent del nombre de taques solars basada en els arxius històrics d'uns dos segles. Les variacions regulars del cicle de taques solars experimenten un comportament

singular justament al començament, entre 1645 i 1715. Durant aquest període és notable l'absència de taques, la qual cosa s'associa a un mínim d'activitat solar i, en conseqüència, a una davallada en l'energia procedent del Sol. Aquest període històric, des del punt de vista climàtic s'anomena el mínim de Maunder, en honor de l'astrònom britànic E. Walter Maunder que en va fer notar la seva existència. Aquest mínim va tenir lloc durant un període de temps caracteritzat per temperatures notablement baixes, l'anomenada "Petita edat de gel", que va abastar algunes dècades compreses entre el segle XVI i l'inici del segle XVIII. Tot i que la relació causa - efecte entre ambdós fenòmens no és del tot clara, no deixa de ser una bonica hipòtesi que confirma la correlació entre variacions de la radiació solar i alguns episodis climàtics. A més, s'ha pogut constatar que aquest episodi d'activitat solar especialment baixa no ha estat únic: un altre episodi, el mínim de Spörer, va tenir lloc entre 1450 i 1550. Així mateix, es va produir un llarg període d'activitat solar entre 1100 i 1250 que va coincidir amb un clima càlid que probablement va possibilitar les emigracions dels vikings entre Groenlàndia i Amèrica del nord. Si aquestes variacions regulars de l'activitat solar són certes i continuen, probablement durant el segle XX s'hauria d'haver produït un altre període de calma en l'activitat solar i, per tant, un període de refredament del clima i per això fa tan sols trenta anys es considerava que possiblement ens encaminàvem cap a una nova glaciació. Naturalment, aleshores, no es parlava ni es pensava del canvi climàtic d'origen antròpic. Ara en canvi no es parla d'altra cosa.

**Canvia la
composició
atmosfèrica?**

La composició de l'atmosfera no canvia a l'engròs però, en canvi, sí que canvia si ens fixem en alguns dels components que la formen i que tenen una concentració molt petita. El canvi climàtic d'origen antròpic es fonamenta justament pel lliurament continu a l'atmosfera de gasos d'efecte hivernacle com a conseqüència, sobretot, de l'ús de combustibles fòssils dels quals la societat desenvolupada moderna no en pot prescindir. La característica comuna dels gasos d'efecte hivernacle és la seva capacitat d'absorbir la radiació d'ona llarga emesa per la Terra. La quantitat de gasos a l'atmosfera que absorbeixen la radiació terrestre és gran, però a la pràctica els que s'estudien amb detall, atesa la seva importància a l'hora d'absorbir radiació, són només sis. A banda del vapor d'aigua, aquests sis gasos d'efecte hivernacle que més directament influencien el balanç energètic de l'atmosfera són el diòxid de carboni, el metà, l'ozó, l'òxid nítrós, l'hexafluorur de sofre i els clorofluorcarburs (CFC). Altres ens presents a l'atmosfera que també

s'han de tenir en compte, pel que fa al balanç energètic terrestre, són els aerosols, partícules materials en suspensió a l'atmosfera de grandària diversa, d'origen natural i productes de les combustions, sobre els quals encara no es té del tot clar el seu paper en l'evolució del clima. En general les emissions dels gasos i dels aerosols a l'atmosfera creixen lligades a l'evolució de l'economia. La bonança econòmica i el desenvolupament tradicionalment comporten taxes d'emissions grans i, en canvi, les crisis econòmiques es caracteritzen per menys emissions.

El diòxid de carboni a l'atmosfera es mesura des de l'any 1958 quan es va instal·lar, a l'observatori de Mauna Loa a Hawaii, un instrument que des d'aleshores ha enregistrat la concentració contínuament creixent d'aquest gas a l'atmosfera. Aquesta tendència és comuna a la major part de gasos causants de l'efecte hivernacle, els quals actualment tenen concentracions a l'atmosfera més grans que en períodes preindustrials¹. Per tant, que la concentració de gasos d'efecte hivernacle augmenta a causa de les activitats humanes està fora de dubte. Hi ha però encara incerteses sobre a on va a parar tot el CO₂ emès a l'atmosfera, ja que el que es mesura que es queda a l'atmosfera aproximadament és la meitat de tot el que hi ha entrat. Tampoc està del tot clar quin és l'efecte global dels aerosols, sobretot els sulfats i el sotge. Es creu que la seva capacitat de reflectir la radiació solar els conforma un efecte esmoreïdor del efecte d'hivernacle, ja que actuen com un escut respecte la radiació del sol. També s'observa que el ritme de creixement de les emissions va disminuint, és a dir, no creix tant com es pensava. Això pot ser conseqüència de la transformació de molts sistemes de producció d'energia elèctrica, de la transformació que passa de l'ús de carbó al d'altres combustibles fòssils amb menys emissions de carboni i a les transformacions de determinades pràctiques agrícoles, ramaderes i industrials.

Quina és, doncs, la variabilitat natural del clima i quina és la variabilitat induïda per l'activitat humana? Aquesta qüestió tan simple és, de fet, molt difícil de contestar tant des del punt de vista teòric com des del punt de vista experimental o de les observacions. De forma ràpida i sense matisos podem dir que la variabilitat natural correspon a

**La
variabilitat
climàtica**

¹ En el cas dels CFC, aquesta afirmació no té sentit ja que la primera síntesi d'un gas d'aquests és de 1928 i la majoria han estat desenvolupats i utilitzats durant la segona meitat del segle XX.

les variacions del clima respecte dels seus valors mitjans associades, fonamentalment, als canvis en les condicions externes, és a dir, en els paràmetres orbitals i en l'activitat solar, i en les fluctuacions internes naturals del sistema climàtic. Si volem detectar i predir les conseqüències de les perturbacions que les activitats humanes estan produint sobre les diferents components del clima, entre les quals la més remarcable és el canvi de la composició atmosfèrica pel que fa a alguns gasos causants de l'efecte d'hivernacle, és de la màxima importància conèixer amb tota la exactitud que sigui possible quina és aquesta variabilitat.

El sistema climàtic és complex perquè està format de diversos components. Estrictament està format per cinc subsistemes atmosfera, litosfera, hidrosfera, criosfera i biosfera que interaccionen entre ells, cadascun amb els seus temps de resposta característics i amb les seves propietats termodinàmiques característiques. Les interaccions entre ells comporten 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. Com ja s'ha dit, el sistema climàtic 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, o amb l'evolució de les característiques de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol.

***Els canvis
climàtics
sobtats***

Fins fa pocs anys, el punt de vista dominant sobre els possibles canvis del clima que s'han donat en el passat es plantejava considerant que el clima variava lentament, en escales de temps de l'ordre de milers d'anys. S'interpretaven els canvis associant-los amb les variacions lentes de l'energia del sol rebuda a la Terra ja esmentades. No obstant, durant els anys 1990 s'han realitzat nombrosos estudis paleoclimàtics que aporten evidències geològiques sobre esdeveniments que mostren com en el passat ha canviat el clima de forma sobtada, és a dir, sobre com s'ha produït en el decurs d'una o dues dècades, la variació de la temperatura superficial de l'aire, de l'ordre aproximat d'una o dues desenes de graus o d'un factor 2 en la precipitació, en una o dues dècades.

El sistema climàtic en el passat ha experimentat grans canvis, alguns de lents com l'alternança de glaciacions i de períodes interglacials, i d'altres de ràpids com els esmentats en el paràgraf anterior. Els que es coneixen d'una manera una mica més precisa corresponen als que s'han donat durant els darrers 100.000 anys durant l'establiment i la recuperació d'un període glacial. Mirant cap al futur, i pel que fa a

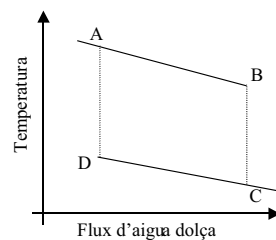
l'anàlisi d'allò que ens pot passar com a conseqüència de l'efecte de les activitats humanes sobre el clima, és interessant poder entendre el potencial de futurs canvis climàtics ràpids que es podrien donar. Per això cal entendre els fenòmens que els han provocat en el passat ja que hi ha un gran buit en la comprensió dels processos que els controlen. Fins ara, alguns mecanismes que s'han proposat per explicar els canvis climàtics ràpids no són capaços de descriure de forma completa el comportament del clima que s'albira del registre paleoclimatològic.

Es pot 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, per exemple, l'augment variació de la temperatura que indueix la fusió de capes de glaç que, quan arriben al mar, disminueixen la salinitat de l'aigua, produint un canvi en la circulació de l'aigua dels oceans i, en particular, l'aturada de la circulació termohalina actual i el corresponent canvi del clima.

Per la importància que té conèixer l'evolució futura del clima 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. En base a

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 clima actual caracteritzat per una temperatura relativament alta. Quan el flux d'aigua dolça supera un cert llindar (B) els corrents oceànics canvien i el clima passa a ser descrit per la línia CD, característica d'un estat d'equilibri amb una temperatura baixa. 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.



múltiples simulacions que abasten des de models simples fins arribar als 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 forma 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'allò que tècnicament s'anomena cicle d'histeresi, cicle que es dona en altres disciplines de la física i que visualitza de forma molt clara l'existència de dos estats d'equilibri estables diferents, que podrien correspondre per un costat a l'estat del clima actual, és a dir a un període interglacial i, per l'altre, a un estat fred del clima o un període glacial. Aquest cicle i aquests estats es poden representar mitjançant la temperatura de l'aigua a l'Atlàntic Nord que està controlada pel flux d'aigua dolça procedent dels rius, la pluja i de la fusió dels blocs de gel, que representaria el paràmetre de control.

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 equatorials es torna molt densa, perquè té una salinitat gran i, a la vegada, assoleix temperatures baixes, i s'enfonsa. Pel fons de la conca oceànica aquesta aigua va cap al sud on acaba tornant a pujar, poc a poc, a la superfície. Aquest cicle és força lent i mitjançant el flux d'aigua cap al Nord transporta calor a les latituds altes i ventila les aigües profundes, fixant CO_2 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. Si l'escalfament global augmentava la quantitat d'aigua dolça a l'oceà àrtic, la densitat de l'aigua superficial no seria tan gran i l'enfonsament de l'aigua es podria interrompre.

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 fins ara s'ha pensat que la societat actual (les infraestructures, les persones, els habitatges, els

usos del sòl, els processos industrials, etc.) té mecanismes d'adaptació gradual a situacions 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, però 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. El problema sorgeix ara, però, si les condicions ambientals varien tan ràpidament que posen en perill majoritàriament aquesta capacitat d'adaptació.

Per tant s'ha de seguir en dos fronts: per un costat intentant esbrinar amb detall les condicions i les característiques dels canvis climàtics sobtats del passat per tal de saber amb el màxim grau de confiança si el que fins ara són especulacions dels experts poden ser realitats en un futur més o menys proper i per l'altre costat les incerteses en l'esdevenidor climàtic no han de ser una excusa per evitar l'actuació

Aquest escrit és un resum de la presentació duta a terme a Mataró el dia 26 de març de 2004 durant les "X Trobades Pedagògiques i d'Intercanvi. I Jornades Científiques de Mataró"