

Geologia i clima: una aproximació a la reconstrucció dels climes antics des del registre geològic

Ramon Salas Roig



Reial Acadèmia de Doctors



Dr. Ramon Salas Roig

(Tarragona 1945). Enginyer Tècnic Agrícola (1969), Llicenciat en Ciències Geològiques (1977), Professor Agregat de Batxillerat en Ciències Naturals (1980), Doctor el Ciències Geològiques (1987), Professor Titular d'Universitat (1988). Premi Ramon Bataller a la millor Tesi Doctoral de Geologia escrita en Català, Institut d'Estudis Catalans (1988).

Secretari (1989-1991) i President (1991-1993) del *Grupo Español de Estudio del Mesozoico* de la *Sociedad Geológica de España*. Membre del Comitè Espanyol del *International Geological Correlation Programme, UNESCO* (1994-1998). Investigador Principal de vuit projectes d'investigació de R+D+i del Plan Nacional (1990-2012), per estudiar el NE d'Iberia sobre temes d'anàlisi de conca [interacció entre la tectònica, canvis del nivell del mar, clima i sedimentació] i d'estructura de l'escorça terrestre. Durant aquesta etapa va liderar un grup de treball de trenta investigadors de les universitats de Saragossa, Complutense i Barcelona. Coordinador del Grup de Recerca Consolidat de Geologia Sedimentària [SGR 1451] (2009-2013). Líder del Grup de Treball d'Iberia i la Mediterrània Occidental del projecte internacional: *IGCP 369 on Comparative Evolution of Perithetyan Rift Basins* (1994-1998). Ha participat en més de trenta projectes de recerca nacionals i internacionals i de col·laboració amb empreses d'hidrocarburs sobre temes de la seva especialitat (1980-2015).

Ha publicat cent-quarantena articles i capítols de llibres, la major part en revistes científiques internacionals (SCI). Editor de varis números monogràfics de revistes científiques internacionals. Membre del Comitè Científic de diversos congressos i reunions internacionals: *American Association of Petroleum Geologists* (2003, 2015), *The International Association of Sedimentologists* (2010, 2011).

Geologia i clima: una aproximació a la reconstrucció dels climes antics des del registre geològic

Excm. Sr. Dr. Ramon Salas Roig

Geologia i clima: una aproximació a la reconstrucció dels climes antics des del registre geològic

Discurs d'ingrés en la Reial Acadèmia de Doctors, com
Acadèmic Numerari, a l'acte de la seva recepció
el 26 de març de 2015

Excm. Sr. Dr. Ramon Salas Roig
Doctor en Geologia

I en contestació de l'acadèmic numerari

Excm. Sr. Dr. Enrique Tierno Pérez-Relaño
Doctor en Física Nuclear

COL·LECCIÓ REIAL ACADÈMIA DE DOCTORS



Reial Acadèmia de Doctors
www.reialacademiadoctors.cat

© Ramon Salas Roig
© Reial Acadèmia de Doctors.

La Reial Acadèmia de Doctors, bo i respectant com a criteri d'autor les opinions exposades en les seves publicacions, no se'n fa responsable ni solidaria.

Queden rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del «Copyright», sota les sancions establertes en les lleis, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol mitjà o procediment, compresos la reprografia i el tractament informàtic i la distribució d'exemplars d'ella mitjançant lloguer o préstecs públics.

Producció Gràfica: Ediciones Gráficas Rey, S.L.

Imprès en paper offset blanc Superior per a la Reial Acadèmia de Doctors.

ISBN: 978-84-606-6912-8

Dipòsit Legal: B 9017-2015

Imprès a Espanya - Printed in Spain - Barcelona

Data de publicació: març 2015

En l'obra de la ciència només pot estimar-se allò que es destrueix, només es pot continuar el passat negant-lo, només pot venerar-se al mestre contradient-lo. Llavors, sí, l'Escola continua al llarg de tota una vida. Una cultura detinguda en un període escolar és la total negació de la cultura científica. No hi ha ciència sinó mitjançant una escola permanent. Aquesta escola és la que ha de fundar la ciència. Llavors, els interessos socials s'invertiran: la Societat es farà per a l'Escola i no l'escola per a la Societat.

*La formation de l'esprit scientifique, 1938
Gastón Bachelard (1884-1962)*

ÍNDIX

DISCURS D'INGRES	7
Presentació	11
1.- PALEOCLIMATOLOGIA I CLIMA	13
Paleoclimatologia	13
Clima i sistemes climàtics	15
<i>L'atmosfera</i>	15
<i>La hidrosfera</i>	18
<i>La criosfera</i>	20
<i>La litosfera</i>	23
<i>La biosfera</i>	25
Balanç de la radiació solar global, realimentacions i forçaments	26
Forçament radiatiu, canvi climàtic i escalfament global	37
2.-PALEOGEOGRAFIA, TEMPS GEOLÒGIC I CORRELACIÓ	41
3.- INDICADORS PALEOCLIMÀTICS	45
Indicadors biòtics de paleoclima.....	45
Indicadors litològics de paleoclima	46
Isòtops estables i paleoclima	48
4.- EL CLIMA DEL PRECAMBRIÀ	55
5.- ELS CLIMES DEL PALEOZOIC I EL MESOZOIC	59
6.- EL CLIMA DEL CENOZOIC	65
7.- EL CLIMA DEL QUATERNARI	69
8.- RESUM I CONCLUSIONS.....	75
Bibliografia.....	95
 DISCURS DE CONTESTACIÓ	 101
 Publicacions de la Reial Acadèmia de Doctors	 119

❧ PRESENTACIÓ

*Excel·lentíssim Senyor Degà-President,
Excel·lentíssims i il·lustríssims Senyors Acadèmics,
Autoritats, amigues i amics*

Voldria dedicar les meves primeres paraules per agrair l'acollida amb generositat dels membres d'aquesta docta institució, i en particular del Degà-President de l'Acadèmia, el Dr. Alfredo Rocafort Nicolau. En aquest acte, a més, em sento molt acompanyat pels meus padrins, el Dr. Josep Gil Ribas i el Dr. Joan Francesc Pont Clemente. Fa uns quants anys, el Dr. Josep Gil va ser el meu professor a l'Institut de Batxillerat de Tarragona, i he de confessar que m'ha fet una gran il·lusió haver-lo retrobat a l'Acadèmia. Amb el Dr. Joan Francesc Pont ens uneix l'amor a la ciència i l'exercici de la tolerància, com a remeis realistes per un món que mereix descobrir un futur millor. I vull agrair-li, a més, que hagi promogut la meva candidatura a l'Acadèmia. I finalment, he de manifestar que em sento molt honorat de que el Dr. Enrique Tierno Pérez-Relaño hagi acceptat donar una resposta al meu discurs.

Una de les grans preocupacions actuals ve de considerar l'anomenat canvi climàtic i l'escalfament global, i sobretot, tractar de saber el que pot passar en els climes del futur. A partir d'aquí, és conseqüent fer dues preguntes. Primera, aquests canvis han succeït abans en la història de la Terra? I, segona, quines són les causes d'aquests canvis? En els capítols que segueixen s'examinen els paleoclimes -els climes del passat-, els mètodes de recerca, els indicadors paleoclimàtics i les forces que han causat els canvis climàtics. La informació que ens proporcionen serà el fonament per preguntar-se si les mateixes forces que van causar

els canvis del passat estan causant l'escalfament del clima d'avui en dia, i per fer prediccions sobre el que succeirà en el futur.

A partir de moltes evidències paleoclimàtiques i geològiques, avui podem saber que fa menys de dos-cents anys la Terra va sofrir una llarga etapa freda anomenada la “Petita Edat del Gel” (1350-1850), la qual va persistir durant gairebé 500 anys. Que fa vint mil anys, durant l'última glaciació, grans mantells de gel a escala continental recobrien gran part d'Amèrica del Nord, el nord d'Europa, i nord d'Àsia. I, per contra, que fa noranta milions d'anys, durant el Cretaci superior, el clima era tan càlid que no permetia que hi haguessin casquets de gel sobre els pols, mentre el nivell del mar assolía cotes de fins 250 m per sobre del nivell del mar actual. Els climes del passat van experimentar grans canvis.

La rapidesa amb la qual el clima pot canviar també ha quedat bastant aclarida recentment, les transicions entre climes ben diferents poden succeir en només algunes dècades. Per entendre aquestes variacions, cal fer reconstruccions climàtiques que abastin un ampli rang d'escala temporal i geogràfica. El clima és un sistema complex i caòtic, i de forma semblant com passa en molts altres sistemes complexos, la clau per predir el futur està en l'estudi i la comprensió del passat.



❧ 1. PALEOCLIMATOLOGIA I CLIMA

Paleoclimatologia

La litosfera és la part sòlida més externa de la Terra i que interacciona amb l'atmosfera, la hidrosfera i la biosfera, segons les condicions climàtiques de cada àrea geogràfica determinada. Així, la Geologia i la Climatologia, convergeixen en la Paleoclimatologia, la qual té cura de l'estudi dels climes antics i d'entendre quan, com i perquè aquests climes han variat. Utilitza una gran varietat de mètodes de les ciències de la Terra i de la vida, els anomenats indicadors naturals o *proxies*, per obtenir les dades conservades a les roques, per exemple: els sediments, les capes de gel, els anells d'arbres, i els fòssils. A partir de l'anàlisi i la interpretació d'aquests registres es pot reconstruir el clima de diverses regions de la Terra en èpoques antigues i el seu sistema atmosfèric, èpoques de les quals no es disposa de dades de mesures instrumentals.

La paleoclimatologia és una disciplina que es remunta almenys a la primera meitat del segle XIX. Agassiz (1822) i Darwin (1842) es van interessar per l'estudi dels glacials antics desapareguts a l'actualitat i de quines van ser les seves implicacions climàtiques. La glaciació que interpretaven que va produir aquelles glaceres fou bastant recent en el context de la història geològica, atès que datava del Pleistocè (2,59 - 0,0117 Ma). Fins a la dècada dels seixanta, a part d'algunes poques excepcions, la paleoclimatologia va ser considerada com un sinònim de la climatologia del Quaternari. A partir dels seixanta els geòlegs van començar a prendre's seriosament que els continents havien anat canviant de posició sobre la superfície de la Terra. La teoria de la Tectònica de Plaques neix a partir de les idees de la deriva continental, proposades per Wegener a la dècada

de 1910, i del model d'expansió dels fons oceànics, proposat i acceptat a la dècada de 1960. La teoria de la Tectònica de Plaques representa en geologia un model de gran poder integrador que ha revolucionat les ciències de la Terra, amb un impacte comparable al que van tenir les teories de la gravetat de Newton i de la relativitat d'Einstein en el camp de la Física o les lleis de Kepler en l'Astronomia. Amb aquest gran avenç, la paleoclimatologia va trobar el seu camp com una disciplina pròpia. Des de llavors, i especialment des de 1980, el camp de la paleoclimatologia ha crescut ràpidament. Sobretot des de quan les reconstruccions continentals van començar a fer-se per a un passat llunyà.

El creixement del camp de la paleoclimatologia s'ha produït en dos fronts, els models i les dades. La utilització sistemàtica i generalitzada de models climàtics, per entendre la distribució dels indicadors paleoclimàtics, va començar amb els models numèrics per al Cretaci de Barron & Washington (1982), i amb els models conceptuals per tot el Fanerozoic de Parrish (Parrish, 1982; Parrish i Curtis, 1982). La utilització de models numèrics es va accelerar als finals dels anys vuitanta, quan altres grups, a més de Barron, van començar a publicar models per a climes pre-quaternaris. Paral·lelament al creixement i els esforços dedicats a la modelització, s'han anat desenvolupant els mètodes per comprendre la importància climàtica de les roques i fòssils com indicadors paleoclimàtics. Per exemple, amb els treballs de Retallack (1983), la comprensió del significat paleoclimàtic de diversos paleosòls terciaris es va ampliar a partir d'estudis anteriors, els quals s'havien centrat gairebé exclusivament en els aspectes litològics de la bauxita, laterita i el carbó. En els darrers trenta anys s'ha escrit tota una extensa literatura sobre de com els paleoclimes s'interpreten des del registre geològic a partir de l'anàlisi de diversos tipus d'indicadors paleoclimàtics (Parrish, 1998; Bradley, 1999; Saltzman, 2001; Gornitz,

2009; Uriarte, 2009; Cronin 2013). A manera de síntesi, cal dir que, les interpretacions paleoclimàtiques, per a qualsevol temps i indret, es veuen reforçades per l'ús de la major quantitat d'indicadors diferents com sigui possible i per la consideració d'aquests indicadors en els seus contextos regionals i globals.

Clima i subsistemes climàtics

El clima és un promig, a una escala de temps determinada, del temps atmosfèric i ve definit pel conjunt de condicions atmosfèriques que caracteritzen una regió determinada. El clima, o millor dit el sistema climàtic, està format per cinc components o subsistemes climàtics: i) l'atmosfera, ii) la hidrosfera, iii) la criosfera, iv) la litosfera, i v) la biosfera. Aquests sistemes intercanvien contínuament matèria i energia entre ells, es tracta de sistemes oberts. A continuació es descriuen breument cadascun d'aquests components.

L'atmosfera

L'atmosfera constitueix el component principal del sistema climàtic. La interacció dels gasos atmosfèrics amb la radiació solar i la radiació terrestre defineix els fluxos energètics del sistema climàtic. Segons l'altitud, la temperatura i la composició de l'aire, l'atmosfera terrestre es divideix en quatre capes: troposfera, estratosfera, mesosfera i termosfera. A major altitud disminueixen la pressió i el pes de l'aire. L'aire de la troposfera intervé en la respiració i en estat sec està format essencialment per una mescla de nitrogen (78,08%) i de oxigen (20,94%). El tercer gas més abundant és l'argó (0,93%). La capa de la troposfera es troba a 7 km d'altura en els pols i 16 km en els tròpics, i es la capa on hi ha els núvols i gairebé tot el vapor d'aigua. En ella es generen tots els fenòmens atmosfèrics que originen el clima. Per sobre i aproximadament a 25 quilòmetres d'altura,

a l'estratosfera, hi ha la capa d'ozó, que protegeix la Terra dels raigs ultraviolats.

La composició de l'atmosfera terrestre no roman estacionària, sinó que varia amb el pas del temps per diverses causes. A més, els elements lleugers s'escapen contínuament de la gravetat terrestre. En l'actualitat se'n van uns tres quilograms d'hidrogen i cinquanta grams d'heli cada segon, xifres que en temps geològics (milions d'anys) resulten decisives, encara que compensen en gran part la matèria rebuda del sol en forma de energia. Aquesta compensació també tendeix a equilibrar-se en el temps, d'acord amb la major o menor energia solar rebuda (generant un cicle complex, diari, estacional i de cicles més llargs d'acord amb la major o menor activitat solar) i una resposta equivalent de l'atmosfera en l'emmagatzematge d'aquesta energia i el seu posterior alliberament a l'espai. Per exemple, la formació de l'ozó (O_3) a la capa anomenada ozonosfera, absorbeix la major part de la radiació ultraviolada rebuda del sol, però cedeix aquesta energia al tornar-se a transformar durant la nit en oxigen (O_2).

L'origen de l'atmosfera cal anar a cercar-la fa uns 4.500 milions d'anys (Ma), amb la gènesi del sistema solar a partir de la galàxia espiral que anomenem Via Làctia. L'atmosfera més primigènia es va formar per la pèrdua de gasos de la nebulosa original, principalment hidrogen (H) i heli (He). L'augment de la massa de la Terra per acreció planetària va donar lloc augmenta de la gravetat. El refredament del planeta i la desgasificació de l'escorça terrestre recent formada van generar una capa de gasos que va constituir l'atmosfera primitiva. Aquesta atmosfera tenia una constitució semblant a les actuals emissions volcàniques, on dominen el nitrogen (N_2), diòxid de carboni (CO_2), l'àcid clorhídric (HCl) i el diòxid de sofre (SO_2). La força d'atracció de la gravetat terrestre va ser capaç de retenir aquesta atmosfera primitiva.

Abans de l'aparició de la vida terrestre, l'atmosfera va experimentar uns canvis significatius. Amb la condensació del vapor d'aigua es van formar els oceans i va tenir lloc la dissolució dels gasos en les seves aigües (CO_2 , HCl , SO_2). El principal gas de l'atmosfera era el nitrogen (N_2) i encara no hi havia oxigen (O_2). Els indicis de les primeres formes de vida són de fa uns 3.500 Ma, del començament dels temps paleoarqueans. Al final de l'eó Arqueà (2.700 Ma) es començà a desenvolupar una atmosfera que contenia oxigen, el qual procediria de l'activitat fotosintètica dels cianobacteris, representats pels estromatòlits. La glaciació Huroniana (2.400-2.100 Ma) va tenir lloc durant els períodes Siderià i Riasià de l'era Paleoproterozoica i va ser una de les glaciacions més intenses del registre geològic. Alguns autors (Cavalier-Smith, 2006) pensen que podria haver estat desencadenada per la desestabilització del clima causada pel metabolisme dels cianobacteris primitius. Aquests microorganismes fotosintètics alliberarien grans quantitats d'oxigen molecular a l'atmosfera, produint l'anomenat Gran Esdeveniment d'Oxygenació (*Great Oxygenation Event*). Aquest mecanisme desencadenant va trencar l'equilibri dels gasos d'efecte hivernacle que existia en aquells temps.

Recapitulant, a aquesta etapa de l'evolució atmosfèrica també s'ha l'anomenada microbiològica, atès que hi va haver l'aparició dels primers bacteris anaeròbics que utilitzaven H_2 i H_2S i fotosintètiques, com els bacteris del sofre i els cianobacteris. Aquesta etapa es caracteritza per l'inici de la producció d'oxigen a l'oceà, el qual va ser utilitzat per a l'oxidació de les substàncies reduïdes de l'oceà, amb la formació de les formacions de ferro en bandes (*banded iron formations*). Una vegada oxidades aquelles substàncies va començar la producció d'oxigen per a l'atmosfera, i l'oxigen alliberat va ser utilitzat per oxidar les substàncies reduïdes de l'escorça terrestre, com és el cas de les capes roges (*red beds*) d'origen continental.

El següent episodi de l'evolució atmosfèrica va començar amb l'eó Fanerozoic, que s'inicià fa 541 Ma, durant el qual van començar a aparèixer les formes de vida dels metazous que respiren oxigen. Durant aquesta etapa, que algun autors anomenen com l'etapa biològica, van sorgir els organismes eucariotes amb fotosíntesi més eficient i va augmentar la concentració de l'oxigen atmosfèric fins l'actual del 21%. També es va formar la capa d'ozó (O_3), la qual actua com a protecció de la radiació ultraviolada de la llum del sol, permetent la colonització de les terres emergides pels éssers vivents.

La circulació atmosfèrica es produeix pel moviment de l'aire atmosfèric a gran escala i, juntament amb la circulació oceànica, és el medi mitjançant el qual la calor és distribuïda sobre la superfície de la Terra. No obstant això, cal tenir en compte que l'eficàcia dels corrents oceànics és més gran que el de la circulació atmosfèrica, malgrat que el volum de l'aire sigui molt més gran que el de les aigües oceàniques. La notable diferència de densitat entre l'aire i les aigües oceàniques fa que la calor específica transportada per un m^3 d'aigua oceànica sigui molt superior al que pot desplaçar un m^3 d'aire. Encara que la circulació atmosfèrica variï lleugerament d'un any a l'altre, a escala detallada, l'estructura bàsica roman sempre constant. La mitjana dels sistemes atmosfèrics individuals, es a dir dels tipus de clima concrets, és molt estable.

Es distingeixen diversos tipus de circulació atmosfèrica: 1) circulació latitudinal, 2) circulació meridional, i 3) circulació monsonica.

La hidrosfera

La hidrosfera està formada per tota l'aigua del planeta que està en estat líquid i compren els oceans, els llacs, els rius i les aigües subterrànies. La hidrosfera representa l'altre component

significatiu del sistema climàtic, doncs té la capacitat d'absorbir la major part de la radiació solar, el que fa que sigui una gran reserva d'energia solar, atesa la seva gran massa i la capacitat calorífica. El cicle terrestre de l'aigua, també anomenat cicle hidrològic, juga un rol cabdal en el clima global, regional i local.

Els oceans són factors climàtics de primera magnitud, pràcticament la meitat de l'energia calorífica que es transporta de l'equador als pols prové del moviment de l'aigua dels oceans. Es tracta de la circulació termohalina, el terme termohalí fa referència a la temperatura i el contingut en sal de les aigües marines, paràmetres que plegats determinen la densitat de l'aigua. Aquest tipus de circulació oceànica global està formada per un flux de corrents superficials, que depenen dels vents dominants, i corrents profunds, impulsats pels gradients globals de densitat relacionades amb diferències de temperatura i salinitat.

Així, els corrents superficials càlids, com el Corrent del Golf, pugen des de l'equador de l'oceà Atlàntic i es van refredant poc a poc fins a arribar a latituds altes, entre Groenlàndia i el Labrador, on s'enfonsen a causa de l'alta salinitat i baixa temperatura, i donen lloc a les aigües profundes del nord-atlàntic. Aquesta aigua densa flueix cap al fons fins a les aigües més pregones, per arribar a fins a ressorgir, 1200 anys després, al nord de l'oceà Pacífic. La actual disposició geogràfica dels continents i el oceà, resultat de la deriva continental i la tectònica de plaques, controla els camins de la circulació oceànica.

Aquest moviment de masses d'aigua també produeix un transport global d'energia calorífica i de matèria: sòlids en suspensió, substàncies dissoltes i gasos, homogeneïtzant les conques oceàniques. Aquesta circulació manté els climes del nostre planeta, de manera que els oceans actuen com a reguladors de la temperatura global del planeta.

La criosfera

La criosfera abasta les parts de la superfície de la Terra on l'aigua es troba en estat sòlid. Inclou el gel del mar, el dels llacs, el dels rius, la superfície de neu, les glaceres, els casquets polars i les capes de gel i terrenys congelats. Per consegüent, hi ha un indefugible encavalcament amb la hidrosfera. Les capes de gel actuen com a aïlladors tèrmics a causa de la seva baixa conductivitat tèrmica i eviten l'emissió a l'atmosfera de quantitats significatives de radiació tèrmica.

Actualment, el Pol Nord de la Terra està cobert per una banquisa glacial que flota a l'oceà Àrtic. Les parts del gel que no es fonen a l'estiu poden esdevenir molt gruixudes i fer més de vint metres de gruix. El gel d'un any sol fer un metre de gruix. L'àrea coberta pel casquet polar varia entre 9 i 12 milions de quilòmetres quadrats. L'Antàrtida, situada al Pol Sud de la Terra, és un continent cobert per una capa de glaç, el qual cobreix una extensió de gairebé 14 milions de km^2 i conté uns 25-30 milions de km^3 de gel, que representen un 70% de l'aigua dolça del planeta.

A través de la història la Terra, el clima del planeta ha fluctuat entre dos tipus dominants d'escenaris climàtics: *greenhouse* i *icehouse*, els quals representarien llargues etapes de climes més càlids amb efecte "hivernacle" alternant amb climes freds de tipus "nevera", amb casquets polars de gel i glaciers. Aquestes dues situacions climàtiques van perdurar durant milions d'anys i no s'han de confondre amb els períodes glacials i interglacials que tenen lloc dins les etapes *icehouse*, amb unes tendències de durada de menys d'un milió d'anys.

Les etapes de la Terra amb efecte hivernacle (*greenhouse*) són uns llargs períodes en els quals no hi ha glaciers continentals sobre el planeta. Els nivells de diòxid de carboni i altres gasos

d'efecte hivernacle, com el vapor d'aigua i metà, són alts i les temperatures superficials del mar oscil·len entre 28°C en els tròpics a 0°C a les regions polars. A diferència d'una Terra afectada per condicions atmosfèriques de tipus hivernacle, una Terra amb clima fred, de tipus nevera (*icehouse*), presenta casquets de gel als pols i glaciars, els quals avancen o retrocedeixen al llarg dels temps d'acord amb els períodes coneguts com glacials i interglacials. Durant aquestes etapes fredes, els gasos d'efecte hivernacle tendeixen a ser menys abundants i les temperatures tendeixen a ser més fredes a nivell mundial. La Terra es troba actualment en una etapa *icehouse* i concretament en un període interglacial, atès que hi ha casquets de gel presents en ambdós pols i s'han succeït diversos períodes glacials i interglacials durant els últims 2, 58 milions d'anys a intervals regulars.

Al llarg de la història climàtica de la Terra es coneixen cinc grans etapes de climes freds amb períodes glacials, dues al Proterozoic i tres al Fanerozoic. Els principals factors que intervinrien per produir aquests grans canvis del paleoclima es creu que es deuen a la concentració de diòxid de carboni a l'atmosfera, els canvis en l'òrbita de la Terra i els canvis oceànics i orogènics produïts per la dinàmica de la tectònica de plaques litosfèriques. Les alternances de grans etapes d'efecte hivernacle i nevera han modelat profundament l'evolució de la vida sobre la Terra.

La glaciació Huroniana és la primera glaciació coneguda en la història de la Terra i es va produir en els inicis del Proterozoic (Paleoproterozoic), entre 2400 i 2100 Ma, mentre que la glaciació Criogènia va tenir lloc entre 850 i 635 Ma, als finals del Proterozoic (Neoproterozoic). Durant el Fanerozoic hi va haver tres grans glaciacions, dues al Paleozoic i una al Quaternari. La primera glaciació paleozoica va ser l'Andino-Sahariana, que abasta una part del període Ordovicià i el Silurià (450–420

Ma). A finals del Paleozoic tingué lloc la glaciació de Karoo, que compren el període Carbonífer i una bona part del Pèrmic (360–260 Ma). La glaciació del Quaternari és l'etapa glacial actual, que va començar fa 2.58 Ma i de la qual ens trobem en un període interglacial, amb una fase de millora climàtica i retrocés dels casquets de gel polars.

En els darrers anys hi ha un nombre creixent d'evidències que donen suport a la presència de masses de gel polar volumètricament significatiu durant etapes càlides d'efecte hivernacle, com és el Mesozoic (Miller, 2009). Aquestes evidències poden ser de tres tipus: i) l'evidència directa, en forma d'evidència física dins els sediments (per exemple, *dropstones*, til·lites, paviments estriats, i glendonites), ii) la prova de *proxy*, en general en forma de dades isotòpiques, iii) l'evidència indirecta en la freqüència i l'amplitud dels canvis del nivell del mar. Això suggereix que a la història de la Terra i en concret la del Fanerozoic, no respon únicament a un model dual i rígid de dues situacions extremes: *icehouse* / *greenhouse* com s'ha proposat (Fisher, 1984), amb períodes amb glaciacions polars pronunciades alternant amb períodes en els quals es pensava que els gels polars han estat absents o insignificants. Cal pensar en un model que permeti moltes situacions intermèdies, on predominarien determinades tendències segons les circumstàncies.

Fa més de 20 anys, Plint (1991) ja va suggerir temptativament un control glacioeustàtic per als cicles del nivell del mar del Cretaci Superior de la conca d'avantpaís d'Alberta (Canadà). Més recentment, Bover-Arnal et al. (2009, 2014) han identificat, a l'Aptià de la conca del Maestrat (Cadena Ibèrica), caigudes de desenes de metres del nivell del mar (115 i 65 m) en menys de un milió d'anys, les quals s'han interpretat conseqüentment com glacioeustàtiques. Això està d'acord en que durant el Juràssic superior i Cretaci inferior

hi va haver una etapa freda amb diversos períodes amb gel als pols. Aquest períodes estarien relacionats amb la presència de sediments, estructures sedimentàries i minerals indicadors, segons es desprèn de la primera compilació de proves directes relacionada amb la presencia de gel polar al Mesozoic feta per Price (1999).

La litosfera.

La litosfera està constituïda per la capa més externa de la Terra que té comportament mecànic rígid i compren l'escorça i la part superior del mantell. L'escorça, el mantell i el nucli de la terra són les zones de divisió composicional de la Terra i que no són equivalents a la divisió reològica. L'escorça es distingeix del mantell superior pel canvi en la composició química que té lloc a la discontinuïtat del Moho. La litosfera es subdivideix en diverses plaques tectòniques, les quals han anat canviant la seva posició al llarg de la història de la Terra. La part superior de la litosfera, que reacciona químicament amb l'atmosfera, la hidrosfera i la biosfera, mitjançant els processos de la formació dels sòls, es anomenada la pedosfera. L'estudi de la formació, antiga i actual, dels paisatges s'anomena geomorfologia.

La litosfera és suprajacent a l'astenosfera, la qual correspon a la part més feble, més calenta i més profunda del mantell superior, amb una densitat mitjana de $3,3 \text{ g/cm}^3$. El límit entre la litosfera i l'astenosfera subjacent es defineix per la seva diferent resposta als esforços. La litosfera roman rígida durant llargs períodes de temps geològic, en el qual es deforma elàsticament i per mitjà de la fractura fràgil. Mentre que l'astenosfera es deforma viscosament i acomoda la tensió a través de la deformació plàstica. El límit entre la litosfera i l'astenosfera també es determina per la velocitat de propagació de les ones sísmiques P (primàries i longitudinals). Així, les ones P experimenten un mínim de velocitat a uns 100 km de profunditat

i no torna a incrementar-se significativament fins els 350 km. Aquest segment constitueix l'anomenat "Canal de Baixa Velocitat".

Hi ha dos tipus de litosfera: la oceànica i la continental. La litosfera oceànica està associada a l'escorça oceànica i es troba a les conques oceàniques. Està formada per roques màfiques de l'escorça (basalts) i ultramàfiques del mantell (peridotites), amb una densitat mitjana de $2,9 \text{ g/cm}^3$. La litosfera continental està associada a l'escorça continental i presenta una densitat mitjana de $2,7 \text{ g/cm}^3$ i està formada per roques fèlsiques (granitoides). L'espessor mitjà de la litosfera continental varia entre 40 i 280 km, dels quals l'escorça pot correspondre a 30-50 km de gruix. Mentre que la litosfera oceànica és més prima, amb gruixàries mitjanes de 50 a 140 km.

La distribució de les masses continentals i les oceàniques ha anat canviant al llarg de la història de la Terra degut a la dinàmica de la tectònica de les plaques litosfèriques. Així, la Pangea va ser l'únic supercontinent que va existir al final de l'era paleozoica i començaments de la mesozoica, fa uns 300 Ma, el qual agrupava la majoria de les terres emergides del planeta. Posteriorment, a l'inici del Mesozoic, fa uns 250 Ma, va començar a fracturar-se i disgregar-se durant el període Triàsic fins arribar a la situació actual dels continents en un procés que encara continua. Actualment, les terres emergides dels continents ocupen el 30% de la superfície terrestre. A més, el 70% de la terra emergida està a l'hemisferi nord, aquesta asimetria de distribució de les masses continentals entre l'hemisferi nord i el sud és la causa de diferències considerables en el clima, atès que la disposició paleogeogràfica dels continents i els oceans controla els camins de la circulació oceànica. La litosfera és el subsistema climàtic que presenta el temps de resposta més llarg, de milions d'anys.

La biosfera.

La biosfera és la capa virtual de la Terra que contindria tots els éssers vivents, és on es desenvolupa la vida i abastaria la suma de tots els ecosistemes. La biosfera és molt sensible als canvis del clima, el qual permet obtenir molta informació dels climes antics a partir de l'estudi de les restes fòssils. Va ser el geòleg austríac Eduard Suess (1831-1914) qui va utilitzar el terme biosfera per primera vegada el 1875, en el seu treball sobre l'estructura geològica dels Alps. Més tard, el cristal·lògraf i ecòleg rus Vladimir I. Vernadsky (1863-1945) va desenvolupar la idea i des de 1911 la va utilitzar amb el seu significat actual. Vernadsky deia: "La biosfera és l'embolcall de la vida, es a dir, l'àrea ocupada per la matèria viva... es pot considerar la biosfera com l'àrea de l'escorça terrestre ocupada per organismes transformadors que converteixen les radiacions còsmiques en energia terrestre efectiva: elèctrica, química, mecànica, tèrmica, etc."

Arribats en aquest punt no es pot deixar de parlar de la teoria Gaia formulada fa uns quaranta anys per James Lovelock, la qual considera a la Terra com un sistema autoregulat. La teoria Gaia (Lovelock, 1979, 1988) considera que les múltiples formes de vida no només influeixen col·lectivament en el seu medi ambient per obtenir-ne condicions més favorables per a la seva existència, sinó que la vida mateixa actua de tal manera que veritablement és ella qui regula i controla el seu medi ambient. Gaia significaria el planeta viu. Gaia no és un sinònim de biosfera. La biosfera es defineix com la part de la Terra en què normalment existeixen els éssers vivents. Tampoc Gaia és el mateix que biota, que simplement es refereix al conjunt de tots els organismes vius. El biota i la biosfera presos conjuntament formen part de Gaia. Gaia té una continuïtat que es remunta al passat fins als orígens de la vida i que s'estén en el futur en la mesura que la vida persisteixi.

La teoria Gaia diu que la temperatura, l'estat d'oxidació, d'acidesa i alguns aspectes de les roques i les aigües es mantenen constants en qualsevol època, i que aquesta homeòstasi (la tendència a mantenir l'equilibri i l'estabilitat interns en els diferents sistemes biològics) s'obté per processos cibernètics duts a terme de manera automàtica i inconscient pel biota. L'energia solar sustenta aquestes condicions favorables per la vida. Aquestes condicions són només constants a curt termini i evolucionen en sincronia amb els canvis requerits pel biota a llarg de la seva evolució. La vida i el seu entorn estan tan íntimament associats que l'evolució afecta a Gaia, i no als organismes o al medi ambient per separat.

Balanç de la radiació solar global, realimentacions i forçaments

L'energia que mou el sistema climàtic és la radiació solar. La composició de l'atmosfera terrestre i els fluxos d'energia entrants, sortints i interns a ella són els principals factors que controlen el clima terrestre. Amb una aproximació de primer ordre, el clima de la Terra es troba en un estat estacionari, de manera que tots els fluxos energètics del sistema estan en equilibri. Es a dir, hi ha d'haver un balanç entre la radiació solar incident i la radiació emesa per la Terra. L'equilibri entre l'energia absorbida i emesa determina la temperatura mitjana. Els anomenats factors, causes o forçaments interns o externs del sistema poden pertorbar aquest equilibri energètic i produir canvis climàtics.

L'atmosfera conté els anomenats gasos amb efecte hivernacle, els quals absorbeixen part de la radiació infraroja procedent de la superfície del planeta i de l'atmosfera. Aquests gasos també emeten radiació infraroja en totes direccions i especialment cap a la superfície planetària, causant el seu escalfament.

D'altra banda, les respostes del sistema climàtic no són lineals, sinó que hi intervenen també nombroses realimentacions o retroaccions que poden amplificar o atenuar aquestes respostes. En un determinat sistema, es diu que hi ha realimentació quan una part del senyal de sortida se suma al senyal d'entrada, produint la pertorbació del senyal net de sortida. La realimentació és positiva si hi ha una amplificació del procés i negativa, si hi ha una atenuació. En el primer cas, una pertorbació creixeria i, en el segon disminuiria. Els mecanismes de realimentació són molt importants en la resposta del sistema climàtic a les possibles pertorbacions dels seus components. Els mecanismes més importants de realimentació són: 1) realimentació positiva gel-albedo, 2) realimentació positiva de l'efecte hivernacle del vapor d'aigua, 3) realimentació negativa temperatura-radiació d'ona llarga, 4) realimentació dels núvols, 5) realimentació atmosfera-oceà.

Es denominen mecanismes de forçament els processos que alteren o pertorben l'equilibri energètic del sistema climàtic global o a una part del mateix, i poden ser de tipus intern o extern. Els mecanismes de forçament externs, operen des de fora del sistema climàtic i actuen de forma sistemàtica, inclouen: 1) les variacions solars, 2) les variacions orbitals, i 3) els impactes de meteorits. Els mecanismes de forçament interns, operen des de dins del sistema climàtic i actuen de manera no sistemàtica o caòtica, els principals són: 4) la deriva dels continents, 5) l'activitat volcànica, 6) la composició atmosfèrica, 7) els corrents oceànics, 8) les radiacions còsmiques i el camp magnètic terrestre, i 9) els efectes antropogènics. En aquest segon grup de processos externs és on es troben els factors amplificadors i moderadors del clima que actuen en resposta als canvis introduint una variable més al problema, atès que no tan sols s'han de tenir en compte els factors que actuen, sinó també les respostes que aquestes modificacions puguin produir. Per tot això, el cli-

ma se l'ha de considerar com un sistema complex. Segons quins tipus de factors dominin, la variació del clima serà sistemàtica o caòtica. Per això depèn molt l'escala de temps en la qual s'observi la variació, atès que, a l'analitzar un determinat senyal de registre climàtic, es poden quedar amagats els patrons regulars de baixa freqüència dins de variacions regulars caòtiques d'alta freqüència i viceversa.

Les variacions solars

Les taques i els cicles solars tenen influència sobre el clima. Les taques solars són zones fosques i relativament més fredes de la superfície del sol. Corresponen a zones en les quals hi ha forts camps magnètics que retenen temporalment el calor que flueix de l'interior del sol cap a la fotosfera. Emeten menys energia de la normal, però les àrees que les rodegen apareixen com zones més brillants. D'aquesta forma, resulta que, en conjunt, el sol emet més energia quantes més taques solars hi hagi en un moment determinat.

El nombre de taques solars varia en cicles d'aproximadament 11 anys. Existeix una clara relació entre el nombre variable de taques solars i la intensitat de flux de radiació solar que arriba a la Terra, que se l'anomena "insolació solar total" o "constant solar". A l'actualitat aquest flux és d'uns 1.370 W/m^2 i oscil·la aproximadament $1,2 \text{ W/m}^2$ entre el màxim i mínim del cicle. Encara que la radiació solar incident a la Terra hagi canviat lleugerament al llarg de l'últim mil·lenni, el seu senyal, reconstruït a partir del ^{14}C de la fusta dels arbres i del ^{10}Be dels gels, es correlaciona molt bé amb dues etapes de millorament i empitjorament climàtics històrics: l'Òptim Medieval (950-1250) i la Petita Edat del Gel (1350-1850). Així doncs, els canvis climàtics de l'últim mil·lenni sembla ser que estant molt relacionats amb la variabilitat de la insolació solar total. El màxim d'activitat solar contemporani, que s'inicià a partir de 1850,

també es correlaciona bé amb l'augment de les temperatures globals entre 1850 i 2010, i es podria interpretar com la recurrència a una nova etapa de millorament climàtic semblant a la del màxim d'activitat solar medieval.

Les variacions orbitals

Les influències gravitatòries d'altres planetes del Sistema Solar fa que es vagin modificant cíclicament diversos paràmetres astronòmics del moviment de la Terra al llarg dels mil·lennis, són els anomenats cicles de Milankovitch. Aquests cicles són: i) la relació del moment dels equinoccis i dels solsticis en relació al moment de major o menor allunyament de la Terra al Sol, és la precessió dels equinoccis, amb cicles de 20 quilo-anys (ka), ii) les variacions de la forma lleugerament el·líptica de l'òrbita de la Terra, amb els cicles d'excentricitat de l'òrbita de 400-100 ka, iii) les modificacions de la inclinació de l'eix de la Terra, amb els cicles d'obliqüitat de l'eix de 41 ka. Al combinar-se els tres cicles de variació, amb les seves diferents periodicitats i intensitats, es produeixen variacions complexes en la quantitat de radiació solar interceptada per a cada latitud i en cada estació de l'any. Cadascun dels tres cicles de Milankovitch pot produir efectes climàtics que són diferents en cada latitud.

Milutin Milankovitch (1879-1958,) va publicar les seves conclusions més importants l'any 1941, en les quals afirmava que els canvis en el repartiment estacional de la insolació, deguts a factors astronòmics, són els responsables de l'expansió i retirada dels grans mantells glaciars durant el Pleistocè (2,59 - 0,0117 Ma).

El clima és un dels factors al·locíclics que controla la ciclicitat de les successions sedimentàries. Els canvis climàtics que es produeixen com conseqüència de les modificacions orbitals poden causar ciclicitat en el registre sedimentari dins del segment ano-

menat com “banda de freqüència de Milankovitch”, compresa entre 400 i 20 Ka. Un exemple el tenim en la sedimentació del Quaternari superior dels marges continentals del mar Adriàtic i del Golf de Cadis, on s’han detectat cicles de 100 ka i 20 ka, en relació a canvis climàtics relacionats amb l’excentricitat curta i la precessió dels equinoccis, respectivament (Lobo i Ridente, 2013). Un altre exemple és en roques més antigues, del trànsit Juràssic-Cretaci (Titià-Berriasià) de la Conca del Maestrat (Cadena Ibèrica). Les successions de somització d’ordre mètric, depositades en ambients marins costaners i soms, mostren una duració mitjana de 100 ka, la qual cau dins de la banda de freqüència de Milankovitch i correspon a cicles de l’excentricitat curta (Bádenas et al., 2004).

Impactes de meteorits

Ocorren en rares ocasions, però n’hi ha que aconseguen arribar a la superfície de la Terra malgrat l’efecte protector de l’atmosfera. Els impactes poden provocar un efecte devastador sobre el clima a l’alliberar grans quantitats de CO₂, pols i cendres a l’atmosfera. Hi ha la hipòtesi generalitzada de que totes les grans extincions d’éssers vivents que hi ha hagut a la Terra durant el Fanerozoic són degudes a grans impactes meteorítics. Una extinció massiva és un tipus d’extinció terminal en la qual desapareixen sense descendència un 10% o més de les espècies al llarg d’un any o un 50% o més de les espècies en un període comprès entre u i tres milions d’anys.

S’ha estimat estadísticament que aproximadament cada cent milions d’anys de mitjana impacta un asteroide quilomètric a la Terra. Tenint en compte que la vida pluricel·lular va aparèixer fa uns 600 milions d’anys, hi hauria d’haver hagut entre cinc i sis grans extincions en tot aquest temps transcorregut fins ara. I precisament són cinc les grans extincions globals que han estat reconegudes durant el Fanerozoic, que varien en rangs del

76 al 96 % d'espècies extingides. Les altres causes possibles, com grans glaciacions globals o erupcions volcàniques massives, també podrien ser considerades entre els efectes secundaris que un gran impacte meteorític podria haver produït, pel que, en aquest cas, no serien més que sinergies de una mateixa catàstrofe còsmica.

La deriva continental

La Terra ha sofert molts canvis des del seu origen fa uns 4.500 Ma. Fa 250 Ma tots els continents estaven units formant la Pangea. Aquesta disposició va afavorir l'augment dels corrents oceànics i va provocar que la diferència de temperatura entre l'Equador i el Pol fos molt més petita que a l'actualitat. La deriva continental és un procés molt lent i la posició dels continents condiciona el comportament del clima durant milions d'anys, sobretot pel que fa als models de circulació dels corrents oceànics.

Així, els canvis en la circulació oceànica van ser probablement determinants al final de l'Eocè i començament de l'Oligocè (34-32 Ma), quan els gels van recobrir l'Antàrtida. L'Antàrtida, tot i haver estat centrada en el Pol Sud des de principis del Cretaci, s'havia mantingut fins llavors lliure de gel, però, quan es va aïllar de Sud-Amèrica i d'Austràlia, va quedar envoltada per un corrent marí fred. L'aïllament definitiu del continent austral es va produir després de l'obertura de l'estret de Drake, que el va separar de Sud-Amèrica, i després de l'obertura de la mar al sud de Tasmània, que el va separar d'Austràlia (Exon, 2002; Sher & Martin, 2006). Llavors, es va formar el corrent fred circumpolar a l'antàrtica que va començar a impedir a que arribés fins allà la influència tèrmica moderadora de les aigües de les latituds mitjanes i tropicals. Això va ajudar a que es formés una extensa banquisa hivernal de gel marí i posteriorment a que comencés a acumular gel al continent.

A més, a principis de l'Oligocè el joc de la tectònica de plaques en el marge meridional de la mar de Tetis va anar estrenyent la separació entre Àfrica i Euràsia, reduint a poc a poc l'extensió de les plataformes costaneres. En conseqüència, va anar minvant el cabal de la massa d'aigua salada i càlida que s'enfonsava allà i que després emergia en latituds australs (Robert & Chamley, 1992).

L'Activitat volcànica

Les erupcions volcàniques són completament imprevisibles i són la causa més important de les variacions aleatòries del clima a curt termini, i van ser també significatives en els canvis climàtics dels temps geològics. L'efecte immediat és la injecció massiva a l'atmosfera de partícules minerals i gasos. En la majoria d'erupcions, aquest material és emès a la troposfera entre els 5 i els 8 km d'altura, el qual s'acaba dipositant sobre la superfície terrestre al cap d'uns quants mesos. En aquests casos els efectes no són importants. Però algunes vegades la violència de les explosions pot fer que aquest material arribi a l'estratosfera, on el gradient de temperatura augmenta amb l'altura i pràcticament no es produeix mescla vertical. Els materials emesos es mantenen en el nivell al qual han estat projectats i són dispersats horitzontalment pel vent en forma de plomall. Així es forma una mena de vel o pantalla que disminueix l'entrada de part de la radiació solar per reflexió.

Perquè un volcà tingui efectes atmosfèrics importants, és necessari que el contingut de sílice de les emissions sigui alt i ric en gasos sulfurosos: diòxid de sofre (SO_2) i sulfur d'hidrogen (H_2S). Aquests gasos reaccionen a l'estratosfera amb el vapor d'aigua per efecte de la llum del Sol i formen l'àcid sulfúric. El núvol estratosfèric, format així per un aerosol que conté gotetes d'àcid sulfúric, és arrossegat per la circulació atmosfèrica. Unes quantes setmanes després de l'erupció, pot haver donat la volta

al globus i cobrir tota una franja estrat de la latitud, atès que la circulació general és bàsicament zonal. A l'estratosfera, el temps de residència de les partícules és gran, des de un any, per a les partícules més grans (2-5 μm) fins a 12 anys per a les més petites (0,5-1 μm).

La conseqüència sobre el clima és que poden produir disminucions de la temperatura d'algunes dècimes de grau, ja que augmenten l'albedo de l'atmosfera, tot i que també n'augmenten l'efecte hivernacle. Sembla ser que predomina el primer efecte de disminuir la temperatura. En aquest sentit, va ser molt notable el descens de temperatura que va tenir lloc en relació amb l'erupció del volcà Pinatubo, situat a l'illa de Luzon a les Filipines. L'erupció més recent va ocórrer al juny de 1991, després de 500 anys d'inactivitat, produint una de les més grans i més violentes erupcions del segle XX. El mínim de temperatura relacionat es va registrar a l'agost de 1992.

L'estudi de Prohom (2003) analitza la resposta del clima de la Península Ibèrica i les illes Balears a les influències del vulcanisme dels darrers 250 anys, i conclou que la temperatura mitjana mensual presenta un descens significatiu durant els dos o tres anys posteriors a les erupcions volcàniques.

La composició atmosfèrica

Com ja s'ha comentat, l'atmosfera primitiva de la terra tenia una composició semblant a la de la nebulosa inicial i va perdre els seus components més lleugers, l'hidrogen (H) i heli (He), per a ser substituïts per pels gasos procedents de les emissions volcàniques, especialment diòxid de carboni CO_2 , el qual va donar lloc a una atmosfera de segona generació. En aquesta atmosfera són importants els efectes dels gasos hivernacle emesos de forma natural pels volcans. Però els òxids de sofre i altres aerosols emesos pels volcans contribueixen també a refredar la

Terra. De l'equilibri entre l'efecte hivernacle i l'efecte de refredament, resulta un equilibri radiatiu determinat.

Amb l'aparició de la vida sobre la Terra es van sumar com agent incident el total d'éssers vivents de la biosfera. Inicialment, els organismes autòtrofs mitjançant la fotosíntesi o la quimiosíntesi, van capturar gran part de l'abundant CO_2 de l'atmosfera primitiva. Al mateix temps es començava a acumular oxigen a partir del procés abiòtic de la fotòlisi de l'aigua. L'aparició de la fotosíntesi oxigènica, que realitzen els cianobacteris i els seus descendents els cloroplasts, va donar lloc a una presència massiva d'oxigen com la que caracteritza l'atmosfera actual, i encara superior.

Aquesta modificació de la composició de l'atmosfera va afavorir l'aparició de formes de vida noves. Formes aeròbiques que s'aprofitaven de la nova composició de l'aire. Així va augmentar el consum d'oxigen i va disminuir el consum net de CO_2 arribant-se a l'equilibri o clímax, i formant-se així l'atmosfera de tercera generació actual. Aquest delicat equilibri entre el que s'emet i el que s'absorbeix es fa palès en el cicle del CO_2 , el qual fluctua al llarg de l'any segons les estacions de creixement de les plantes.

Els corrents oceànics

Els corrents oceànics o marins són un factor regulador del clima que actua com moderador. L'estructura dels corrents marins és tridimensional, amb moviments horitzontals on el vent juga un paper important i amb moviments verticals, en els qual la salinitat i les temperatures són les forces impulsores. Per tant, els corrents superficials coneguts des de fa segles estan lligats, per moviments convectius de l'aigua, a corrents profunds.

Actualment, casi tota l'aigua profunda dels oceans, molt més freda, es forma en mars de latituds altes, on l'aigua es fa més densa al refredar-se i perquè es salinitza al formar-se el gel esta-

cional. Durant el Cretaci (145-66 Ma) es probable que l'aigua profunda dels oceans es formés en àrees tropicals. Allí l'aigua s'enfonsava per la forta salinitat que adquiria degut a l'evaporació. Quelcom semblant al que passa avui en el Mediterrani, però a més petita escala.

Un dels exemples més típics són els corrents principals de l'Atlàntic Nord, les quals formen circuits d'aigües càlides. Aquests corrents dibuixen el seu gir principal (gir subtropical) bordejant l'anticicló de les bermudes, que està compost per al trio del corrent del Golf (*Gulf Stream*), el corrent de Portugal i Canàries, i la deriva Nordequatorial, que tanquen el gir al arribar al Carib.

Els corrents marins, i en especial el corrent del Golf (*Gulf Stream*) juguen un paper molt important en la distribució latitudinal del calor. La distribució de les masses continentals condiciona la circulació dels corrents oceànics. Els continents han anat variant la seva posició al llarg de la història de la Terra d'acord amb la deriva continental, impulsada per els moviments de les plaques litosfèriques.

Les radiacions còsmiques i el camp magnètic terrestre

Els raigs còsmics galàctics són partícules molt energètiques, fonamentalment protons, que s'originen en supernoves de la nostra galàxia, fora del sistema solar. Es possible que la radiació solar que entra en el sistema terrestre ajudi, per processos ionitzants, a que augmenti la concentració de nuclis de condensació a l'aire i, en conseqüència, a la formació de més nuvolositat. S'ha pogut comprovar que a major activitat solar hi correspon menor radiació còsmica i menor nuvolositat. I el contrari, a menor activitat solar hi ha més radiació còsmica i major nuvolositat.

Recentment, els resultats del treball de Svensmark et al. (2013) conclouen que els raigs còsmics provinents de la galàxia estan

directament involucrats en el clima de la Terra. Els experiments de simulació realitzats al laboratori han provat que la presència de raigs ionitzants, que simulen l'afecte dels raigs còsmics, faria que els clústers moleculars de l'atmosfera creixin el suficient per produir una quantitat de nuclis de condensació de més de 50 nm (nanòmetres) de diàmetre ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$). D'aquesta manera els clústers haurien crescut molt més vigorosament a les mides adequades per ajudar a que es formin les minúscules gotes d'aigua i que produeixin núvols.

La informació climàtica mostra que els refredaments cíclics de la Terra durant les etapes nevera (*greenhouse*) del Fanerozoic, coincideixen en cada vegada que el sol va creuar el pla mitjà galàctic de la Via Làctia, on els rajos còsmics són localment més intensos. Això va fer que la temperatura de la Terra baixés al augmentar la cobertura de núvols. Durant el Fanerozoic, Svensmark (2007) correlaciona l'alternança de quatre etapes càlides i quatre etapes fredes amb la corba de variació de les temperatures dels mars tropicals i la corba de de la variació del flux relatiu dels rajos còsmics. Les quatre etapes fredes corresponen a els quatre encontres de la Terra amb els braços espirals de la Via Làctia, amb l'augment resultant del flux relatiu dels rajos còsmics. Aquestes quatre etapes fredes es correlacionen molt bé amb les tres grans glaciacions reconegudes del Fanerozoic, dues al Paleozoic i una al Quaternari, afegint-hi la del Juràssic Superior-Cretaci Inferior (163,5-100,5 Ma), admesa més recentment.

Les variacions del camp magnètic terrestre poden afectar al clima de manera indirecta, atès que segons sigui el seu estat i intensitat, interfereix més o menys les partícules emeses per la radiació solar. Actualment els pols magnètics de la terra es troben situats pròxims als pols geogràfics, però en èpoques geològiques passades la seva situació va anant canviant moltes vegades, amb polaritats normals, semblants a l'actual, i inverses.

Els efectes antropogènics

Els éssers humans són actualment un dels agents climàtics importants i que s'han incorporat a la llista dels forçaments externs fa relativament poc temps. La seva influència va començar amb la desforestació dels boscos per convertir-los en terres de cultiu o de pastura. Però a l'actualitat la seva influència sobre el clima pot arribar a ser molt més gran al provocar les emissions de gasos d'efecte hivernacle, com el diòxid de carboni (CO_2) o el metà (CH_4), resultat de les activitats industrials.

Forçament radiatiu, canvi climàtic i escalfament global

El forçament radiatiu és una mesura de la influència que té un factor per alterar l'equilibri de l'energia entrant i sortint en el sistema atmosfèric terrestre, i també és un índex de la importància del factor com a mecanisme potencial del canvi climàtic. El forçament radiatiu del sistema climàtic es defineix com el canvi de la irradiància neta en la tropopausa. La irradiància neta és la diferència entre l'energia de la radiació entrant i l'energia de radiació sortint en un sistema climàtic concret, i es mesura en Watts per m^2 (W/m^2). El canvi es calcula sobre la base de valors que s'anomenen com a impertorbats. En el cas del GIECC (Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic) les mesures fan servir com a base l'any 1750. Un forçament positiu, implica més energia entrant i tendeix a escalfar el sistema, mentre que un forçament negatiu, involucra més energia sortint, i tendeix a refredar-lo. Les causes possibles del forçament radiatiu són els canvis en la insolació, la radiació solar incident, o els efectes de les variacions en l'atmosfera de la quantitat de gasos radiativament actius, com el diòxid de carboni (CO_2), Metà (CH_4) i l'òxid nitrós (N_2O).

Els canvis climàtics deriven tant de la variabilitat interna del sistema climàtic com de factors externs, tant naturals com an-

tropogènics. La influència dels factors externs sobre el clima es pot comparar àmpliament fent servir el concepte de forçament radiatiu. Un forçament radiatiu positiu, com el que es produeix amb concentracions creixents de gasos amb efecte d'hivernacle, té tendència a escalfar la superfície. Un forçament radiatiu negatiu, que pot derivar d'un increment d'alguns tipus d'aerosols, té tendència a refredar la superfície. Factors naturals, com ara els canvis en la sortida solar o l'activitat volcànica, també poden provocar un forçament radiatiu. Segons els informes del Grup Intergovernamental sobre el Canvi Climàtic (IPCC) [*Intergovernmental Panel on Climate Change*], és necessari caracteritzar aquests agents de forçaments del clima i els seus canvis al llarg del temps per poder entendre el canvis climàtics del passat en el context de les variacions naturals i per projectar quins canvis climàtics es poden produir en el futur.

Per obtenir estimacions i prediccions globals acurades de les dades del passat els informes del IPCC fan models climàtics complexos basats en la física i mitjançant el càlcul numèric (IPC, 2007; Salomon et al., 2007). No obstant això, aquests models no poden simular tots els aspectes del clima. Per exemple, encara no poden donar explicacions completes de la tendència observada en la diferència de la temperatura de la superfície de la troposfera des del 1979 i hi ha incerteses concretes associades als núvols i a la seva interacció amb la radiació i els aerosols, entre altres. Les prediccions dels models climàtics indiquen que les temperatures de la superfície s'incrementaran d'1,1 a 6,6 °C durant el segle XXI. Mentre que el que hi ha de cert és que, pel que fa tant als últims 140 anys com pels darrers 100, la millor estimació apunta que la temperatura global mitjana de la superfície de la Terra ha augmentat $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

El procés d'augment gradual de la temperatura del planeta Terra per la intensificació de l'efecte hivernacle es coneix com l'es-

calfament global. El Grup Intergovernamental sobre el Canvi Climàtic (IPCC) declara que gran part de l'augment de la temperatura de la Terra des de mitjans del segle XX és degut a l'augment de concentracions antropogèniques de gasos d'efecte hivernacle. En els seus informes l'IPCC conclou que “la major part de l'escalfament observat durant els últims 50 anys és atribuïble a les activitats humanes”.

Si és cert que hi ha hagut un lleuger increment de les temperatures mitjanes en el darrer segle ($0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$), també és indefugible acceptar que en èpoques passades de la història de la Terra hi ha hagut oscil·lacions naturals de la temperatura mitjana terrestre molt més importants. A més, que no hi ha encara seguretat absoluta de si els canvis actuals són deguts a l'activitat de l'home, o si es poden explicar pels cicles naturals, com els canvis orbitals, l'activitat solar i les emissions volcàniques. La controvèrsia, doncs, està en saber quines són les causes d'aquest escalfament.

Sembla ser que l'augment de les temperatures ha estat localitzat només a algunes regions, mentre que en altres les temperatures han assenyalat un descens important els últims anys, el qual ens indicaria que l'escalfament no es tractaria d'un fenomen global. En aquest sentit, per exemple, cal comentar que, a partir de dades de satèl·lits durant els anys 1979-2002, les masses de gel de l'Antàrtica han crescut en el sector del Pacífic central i han minvat en el sector Bellingshausen/western Weddell en un 4–10% per dècada (Lui et al., 2004). Això suggereix que els models climatològics són molt més complexos del que es pensa i que l'escalfament depèn de moltes més variables que les activitats antropogèniques.

Les principals hipòtesis alternatives que s'han proposat sobre les causes de l'escalfament global antropogènic es basen en els següents punts:

- 1) Les variacions del flux de la radiació solar i les causes dels volcans.
- 2) L'escalfament global seria la conseqüència de la sortida del període de refredament de la Petita Edat del Gel (1350-1850) i l'entrada a un nou període càlid similar a l'Òptim Medieval (950-1250).
- 3) L'escalfament està dins el rang de variació natural d'un règim atmosfèric de tipus hivernacle (*Icehouse*), com el que ara ens trobem, amb alternança de períodes glacials més freds i períodes de millora climàtica interglacials, controlats pels cicles de variacions orbitals de La Terra.
- 4) La tendència global de l'escalfament no estat establerta amb claredat i els models numèrics no poden simular tots els aspectes i expressions del clima, atès que el clima és un sistema molt complex i caòtic.



❧ 2. PALEOGEOGRAFIA, TEMPS GEOLÒGIC I CORRELACIÓ

L'objecte de la paleogeografia és la reconstrucció de les condicions geogràfiques que hi va haver a la superfície terrestre al llarg dels temps geològics. De cara a la comprensió dels paleoclimes es necessària una comprensió de la configuració paleogeogràfica. Els elements paleogeogràfics més importants per al estudi paleoclimàtic són: la posició dels continents i de les línies de costa i les situacions, altituds i orientacions de les cadenes muntanyoses. A més, per a la interpretació del paleoclima a partir del registre geològic, també és important el coneixement de la geografia de l'entorn més immediat de la localitat estudiada, com poden ser: cadenes de muntanyes, valls, peu de muntanya, plana litoral, badia, estuari, delta, etc.

A gran escala, com ja s'ha comentat abans, la deriva continental i la tectònica de plaques serien els principals motors de la dinàmica litosfèrica, pel que fa a la posició dels continents i les línies de costa, i respondria a causes geodinàmiques globals internes. En canvi, el modelat del relleu de la superfície de la Terra està condicionat per l'anomenat cicle geogràfic o cicle de Davis, el qual explica l'evolució de la superfície terrestre a través del temps geològic mitjançant els agents externs. Aquest cicle compren el conjunt de canvis soferts pel relleu d'una regió determinada, des de que és aixecada per sobre del nivell de mar fins que queda novament reduïda al nivell del mar per la acció dels agents del modelat terrestre. El cicle geogràfic pot ser accelerat, desaccelerat o inclús interromput per l'acció dels canvis climàtics que pot sofrir una regió. Clima i relleu estan íntimament relacionats, les característiques del cicle d'erosió de les regions varien d'acord amb l'evolució climàtica que les ha afectat.

Les variacions globals del nivell del mar es coneixen com eustatisme. Les variacions eustàtiques són importants en el cicle d'evolució el relleu, atès que poden produir canvis significatius del nivell de base. Al llarg de la història geològica hi ha hagut diverses etapes de variacions importants del nivell del mar. Les causes de l'eustatisme poden ser de dos tipus: tectòniques (tectonoeustatisme) i glacials (glacioeustatisme), bé siguin determinades per les variacions dels volums de les conques oceàniques per causes tectòniques o per les variacions del volum de les masses de gel. En ambdós casos el control, ve exercit per la geotectònica i el clima.

S'han reconegut cinc ordres de magnitud en cicles de canvis del nivell del mar, amb duracions que van des de 10^8 a 10^4 anys. Hi ha dos cicles de primer ordre (10^8 anys) durant el Fanerozoic, que són el resultat de la fragmentació del supercontinent i de l'obertura i tancament dels oceans. Els cicles de segon ordre (10^7 anys) corresponen al resultat de la subsidència dels metres passius. L'origen dels cicles de tercer ordre (10^6 anys) és un assumpte que porta molta discussió, per saber si són tectònics o eustàtics. Aquests cicles són importants en sedimentologia, doncs controlen la sedimentació i l'establiment dels grans sistemes deposicionals, com plataformes de carbonats, sistemes deltaics, estuaris i esplanades litorals, entre altres. Finalment, els cicles de cinquè i quart ordre (10^5 - 10^4 anys) responen en sedimentologia amb la repetició d'unitats sedimentàries d'escala mètrica, constituint la característica de molts sistemes deposicionals carbonàtics, les conegudes com successions de somització (*Shallowing upwards successions*). Aquests cicles poden ser el resultat de les variacions orbitals i de la banda de freqüències de Milankovitch.

La Paleogeografia proporciona el context espacial necessari per als estudis paleoclimàtics, però de la mateixa importància és

també el context temporal en el qual esdevenen les variacions climàtiques. Atès que els registres paleoclimàtics han d'estar ben datats per tal de poder-los relacionar entre ells i poder establir la seqüència i la successió temporal dels canvis climàtics. La resolució temporal dels registres sedimentaris d'abans del Cretaci Superiors és sovint relativament molt pobre, i rarament varia entre unes poques desenes de milers d'anys per arribar a ser tant pobre com d'uns quants milions d'anys al Paleozoic inferior. A partir, aproximadament, del Cretaci Superior, la resolució temporal és millor.

L'escala de temps geològics o taula cronostatigràfica és el marc de referència temporal utilitzat per representar els esdeveniments de la història de la Terra i de la vida ordenats cronològicament. Seria un model temporal que estableix divisions i subdivisions de les roques sedimentàries segons una doble dimensió: estratigràfica i cronològica, es a dir, segons les seves edats relatives i dels temps absoluts de la seva formació. Aquestes divisions es basen en els canvis faunístics i florístics del registre fòssil, resultants de l'evolució dels éssers vivents, els quals han pogut ser datats, en molts cassos, mitjançant mètodes radiomètrics. Des de fa més de quaranta anys la Comissió Internacional d'Estratigrafia (*International Commission on Stratigraphy, ICS*) és la encarregada de revisar i elaborar l'escala de temps geològics, l'última versió de la qual és de fa tres anys. (Gradstein et al., 2012)

Un dels reptes de la interpretació paleoclimàtica feta a partir del registre sedimentari de roques més antigues que el Quaternari és la comprensió de com s'ha pogut conservar el senyal climàtic. Els canvis a curt termini poden ser difícils de resoldre, no només perquè el model temporal que utilitzem no té prou resolució, sinó també perquè el senyal estigui distorsionat, per exemple en el cas d'haver bioturbació (procés de pertorbació,

remenament i degradació posterior de les estructures primàries d'un sediment). D'altra banda, els canvis a curt termini poden ser observables però difícil de posar en context. Per exemple, moltes successions cícliques del registre geològic més antic semblen reflectir ciclicitat de la banda de Milankovitch, sobretot el cicle de 400 Ka d'excentricitat. Però saber si la ciclicitat observada està realment relacionada amb els cicles de Milankovitch o simplement passa a encaixar més o menys en un marc de 400 Ka, pot ser degut a la manca de resolució i ser difícil de provar. Però fins i tot en el registre geològic més jove, diferents mètodes de datació poden donar resultats discrepants. En poques paraules, la interpretació del senyal climàtic, tal com es troba en el registre geològic, està subjecte a les mateixes fonts d'error que altres tipus d'interpretació del registre estratigràfic.



❧ 3. INDICADORS PALEOCLIMÀTICS

Els indicadors paleoclimàtics es poden dividir en tres grans grups, entre els quals hi ha una certa superposició: 1) indicadors paleontològics o biòtics, 2) indicadors litològics, i 3) indicadors geoquímics. Els indicadors paleontològics o biòtics i els litològics poden estar vinculats a medis sedimentaris marins o terrestres.

Indicadors biòtics

Els indicadors biòtics o paleontològics són les restes fòssils d'animals i plantes. Els animals i les plantes poden ser extremadament sensibles al clima, i per tant els fòssils poden ser uns excel·lents indicadors paleoclimàtics. Aquests indicadors es poden dividir en quatre tipus. I) indicadors directes, ii) indicadors tipus del parent vivent més proper, iii) indicadors empírico-morfològics i iv) biogeografia. Els indicadors directes es poden considerar com taxons índex paleoclimàtics, es dir, els taxons que tenien toleràncies climàtiques molt específiques. Els indicadors tipus del parent vivent més proper són aquells en que el valor com a indicadors paleoclimàtics ve de la seva relació evolutiva amb el taxó modern i que té toleràncies climàtiques específiques. Els Indicadors empírico-morfològics són aquells en els quals la morfologia que s'ha determinat empíricament es correlaciona amb el clima.

Els organismes responen al clima de quatre formes, el qual es pot aplicar als registres geològics del clima. Primer, la distribució dels organismes està controlada normalment, o almenys en part, pel clima, i per tant la biogeografia d'organismes extints s'utilitza comunament per interpretar patrons paleoclimàtics

generals. Segon, la relació dels organismes amb seu ambient físic i biològic pot estar controlada principalment pel clima, d'aquesta manera l'estudi de la paleoecologia ha demostrat ser d'utilitat. En tercer lloc, les adaptacions dels organismes a certs climes poden conservar-se en el registre fòssil, i per tant la morfologia d'un fòssil pot donar pistes importants al tipus de paleoclima. Finalment, tot i que la fisiologia d'un organisme, és a dir, l'ambient químic intern, no es conserva, de vegades es pot inferir, i les característiques interpretades de la fisiologia de certs organismes han jugat un paper important en la seva utilització com a indicadors paleoclimàtics.

Indicadors litològics

Casi tots els indicadors litològics de paleoclima són roques sedimentàries, amb l'única excepció, potser, dels sòls que es formen a la interfase roca/aire i amb una dinàmica microbiana/mineral molt particular. Els indicadors litològics presenten diferents significats climàtics depenent del domini terrestre o marí de que es tracti. Els indicadors litològics marins registren les temperatures oceàniques, les variacions en la productivitat biològica i la química de l'aigua, en particular el contingut d'oxigen. Tots ells estan influenciats en certa mesura pel clima atmosfèric. En medis terrestres, els indicadors litològics proporcionen una informació més directa sobre el clima atmosfèric, atès que la superfície de la terra està en contacte directe amb l'atmosfera. Els Indicadors paleoclimàtics terrestres subministren informació principalment relacionada amb la temperatura i la humitat, però alguns cassos també donen informació sobre la direcció i força del vent.

La informació sobre el paleoclima obtinguda a partir de les roques sedimentàries que s'utilitzen com indicadors prové dels

seus ambients deposicionals de formació i de la seva distribució a l'espai i el temps a escala global i local. Els medis sedimentaris en els quals es formen els indicadors determina la seva significació paleoclimàtica i la seva distribució s'utilitza per interpretar els patrons espacials i temporals del paleoclima.

Els indicadors litològics del paleoclima estan subjectes a la major part de les mateixes limitacions que els indicadors biòtics, incloent el mostreig, la datació i els capricis del registre geològic. Un problema que es sol presentar amb la interpretació dels indicadors litològiques, particularment a escala global, és la seva absència. L'absència de dades d'indicadors litològics, de vegades ha estat interpretada com de que no van existir les condicions favorables per a la seva formació, el qual porta a una interpretació paleoclimàtica equivocada. Així doncs, utilitzar la absència de dades per interpretar el paleoclima no és gens recomanable.

La potència (gruixària) i l'abundància de les roques indicadores del paleoclima estan controlades normalment per factors que no tenen relació amb el clima, tals com les taxes de subsidència de la conca sedimentaria. Només en el context de l'anàlisi de conques, on es documenten tots els aspectes de la història de la conca, les dades d'abundància i gruixària de les successions de roques indicadores poden ser utilitzats amb precaució per interpretar els canvis en els antics climes. No obstant això, en aquests cassos, també cal ser curós pel que fa a la interpretació paleoclimàtica.

Els mètodes més utilitzats per quantificar la sedimentació en els estudis d'indicadors litològics marins del clima són: i) la taxa de sedimentació, ii) la taxa d'acumulació de massa i, iii) la taxa d'acumulació de massa d'un component determinat. La taxa de sedimentació consisteix senzillament en dividir l'espes-

sor o potència de la roca considerada pel temps que representa aquesta gruixària, és dir, la velocitat de sedimentació. La taxa de sedimentació és un indicador pobre dels processos sedimentològics, atès que la millor resolució de temps possible en una successió estratigràfica és normalment molt més gran que l'escala de temps dels processos deposicionals que la van formar. Per tant moltes variacions de la sedimentació, i fins i tot de l'ambient deposicional, poden haver succeït dins un interval de temps més petit que el discernible per la majoria de tècniques de datació. A més, la sedimentació, en la majoria dels ambients deposicionals és discontinua en relació al temps.

Isòtops estables i paleoclima

Els isòtops estables d'oxigen, carboni, estronci, hidrogen i nitrogen han estat utilitzats en estudis paleoclimàtics o en estudis paleoecològics que tinguin implicacions paleoclimàtiques. De tots ells, els isòtops estables d'oxigen i de carboni han estat, amb molt, els més importants, i en molts tipus d'estudis les anàlisis i interpretacions d'aquests isòtops s'ha convertit en gairebé una rutina. Les dades d'isòtops estables proporcionen informació quantitativa sobre la paleotemperatura, la paleoprecipitació i la paleoevaporació, el volum del gel glacial, la seva producció i l'enterrament, la meteorització del carboni orgànic, i altres processos relacionats amb els canvis paleoclimàtics. Amb l'excepció de l'estronci, tots els isòtops registren directament processos paleoclimàtics o paleoecològics. L'estronci, d'altra banda, reflecteix la composició de roques a la superfície de la Terra i està relacionat amb el clima indirectament, atès que la relació isotòpica de l'estronci de l'aigua és afectada per la meteorització. La relació des composicions isotòpiques d'estronci $87 / 86$ s'utilitza per fer la datació de roques d'origen marí, per comparació amb la corba secular de variació de l'estronci en aigües marines.

L'aplicació més clàssica dels isòtops en estudis geoquímics, ha estat la seva utilització com eines de datació. Així, s'han desenvolupat una gran quantitat de mètodes, que es basen en la desintegració dels isòtops radioactius o en l'acumulació del isòtops fills. Aquests mètodes permeten determinar l'edat de les aigües subterrànies, del gel, roques i sediments, entre altres. En paleoclimatologia es poden aplicar nombrosos tipus de mètodes de datació isotòpica per tal d'establir una escala temporal dels esdeveniments climàtics del passat. A part dels isòtops estables, també s'utilitzen radioisòtops, tant naturals (cosmogènics) com antropogènics.

La concentració d'isòtops estables en compostos naturals varia d'acord al seu comportament lleugerament diferent en els processos fisicoquímics naturals, el qual té que veure amb les seves diferències de massa. La magnitud d'aquests processos o fraccionaments isotòpics, és una funció dels paràmetres que els caracteritzen, entre els quals la temperatura és el més important. Això permet d'obtenir informació sobre les condicions ambientals en el moment del fraccionament a partir de la composició isotòpica de l'aigua, del gel o de les roques. Les determinacions d'isòtops estables que més s'acostumen a utilitzar en paleoclimatologia són les dels isòtops ^{18}O i ^{13}C i també ^2H (hidrogen-2) o deuteri en la investigació d'aigües.

L'oceà és un medi d'una gran homogeneïtat i registra les principals variacions climàtiques a llarg termini. La seva gran massa i la conseqüent inèrcia tèrmica, química i isotòpica fan que els efectes de les variacions climàtiques a curt termini siguin sovint insignificants. Els sediments marins constitueixen la primera font important de dades isotòpiques utilitzades en paleoclimatologia. La relació $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en les closques dels foraminífers dels sediments marins del Pleistocè mitjà-Holocè, és una funció del valor d'aquesta relació a l'aigua del mar i de la seva temperatura

quan es van formar les conquilles. Les variacions d'aquesta relació isotòpica es correlacionen molt bé amb les variacions climàtiques de la banda de freqüències de Milankovitch, induïdes pels canvis cíclics dels paràmetres orbitals de la Terra.

Els grans casquets de gel que existeixen a les altes latituds (Grenlàndia i l'Antàrtida) han resultat ser uns arxius excel·lents per estudiar el clima del Pleistocè. Una gran part del que es coneix sobre el clima quaternari ha estat gràcies als estudis de la composició isotòpica dels gels polars. Els casquets de gels polars s'han format per la precipitació i l'apilament de neu sobre regions molt extenses i gairebé planes. Les successives capes de neu es van compactant amb el temps i es transforma primer en gel granular i després en gel compacte.

A l'estació soviètica Vostok de l'Antàrtida es va aconseguir l'any 1998 arribar a una profunditat de 3.623 m. El registre de gel perforat abasta l'etapa que compren els dos últims períodes glacial i l'últim interglacial (420 ka) del Pleistocè (Petit, 1999). Més recentment, en el sondeig Dome C de l'Antàrtida es van arribar a perforar els 3.000 m de profunditat, travessant capes de gel d'un registre temporal de 740 ka, els quals corresponen a pràcticament tot el Pleistocè mitjà i superior.

A Groenlàndia el primer sondeig del gel el va fer l'exercit del EEUU a 1966 a la base de Camp Century. Es van arribar a perforar fins a uns 3.000 m de profunditat de gel depositats fa uns 150 ka. A partir dels nivells que corresponen a fa uns 100 ka, la gran compactació del gel ha distorsionat molt les dades, de manera que és fa molt difícil estudiar l'interglacial Eem i l'inici de l'última glaciació.

Les relacions o fraccionaments isotòpics $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ i $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ en les precipitacions nivoses depenen de la

temperatura en que es van formar i reflecteixen les variacions de temperatures. En el cas de l'oxigen, és pot mesurar tant el fraccionament isotòpic de l'oxigen del gel, com el de l'aire que ha quedat atrapat en bombolles dins del gel. Els casquets de gel conserven bé aquestes relacions isotòpiques estacionals fins una profunditat d'entre 1-1,5 km, a majors profunditats hi pot haver pertorbacions del senyal. A partir de l'estudi dels perfils de testimonis continus de sondatges de gel, el mètode de datació dels gels i del càlcul de les taxes d'acumulació consisteix en el recompte dels cicles isotòpics anuals. La correlació entre temperatura i composició isotòpica també permet identificar el gel dipositat durant els períodes glacials, atès que té una concentració molt reduïda d'isòtops pesats en relació a la precipitació d'èpoques més recents.

En síntesi, es pot dir que el mètode de les anàlisis isotòpiques de l'oxigen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) del gel ens indica les tendències d'escalfament o refredament. Però no és massa rigorós quan es tracta de determinar quantitativament les temperatures reals de la superfície durant els cicles glacials. Les variacions de la relació $^2\text{H}/^1\text{H}$ no coincideixen amb les de l'oxigen. La diferència s'anomena la corba d'excés del deuteri, que donaria informació sobre les variacions tèrmiques de les fonts d'humitat d'on provindria la neu.

Pel que fa a oxigen atrapat en el gel, cal considerar que l'aire atmosfèric i l'aigua del mar intercanvien àtoms d'oxigen en cicles que duren entre 2 i 3 ka, i ho fan a través dels processos de fotosíntesi i respiració del plàncton. En aquests cicles s'acaba produint un enriquiment de ^{18}O en l'oxigen de l'atmosfera, de forma que resulta que la relació de fraccionament $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$) de l'aigua de l'atmosfera és superior en un 23,5 ‰ al valor de $\delta^{18}\text{O}$ de l'aigua de l'oceà. Encara que amb un desfasetament temporal de uns pocs milers d'anys, l'oxigen atmosfèric va experimentant un canvi en el seu fraccionament isotòpic

bastant semblant al sofert per l'aigua de mar. Per això les variacions de $\delta^{18}\text{O}$ de les conquilles de carbonat càlcic dels foraminífers marins, dependents de les variacions de $\delta^{18}\text{O}$ de l'aigua oceànica, es correlacionen bé amb les variacions de $\delta^{18}\text{O}$ de l'atmosfera.

No obstant això, les variacions de $\delta^{18}\text{O}$ del carbonat càlcic dels foraminífers marins depenen del $\delta^{18}\text{O}$ de l'aigua marina, la qual depèn de la massa de gel acumulada en el continent y que ha estat sostreta al mar, i també de la temperatura de les aigües on es van formar aquestes closques calcàries. Per contra, el fraccionament isotòpic de l'oxigen de l'aire atrapat a les bombolles del gel, només depèn del contingut isotòpic de l'aigua marina, és a dir, del volum de gel retengut en els casquets. A partir d'aquestes diferències i comparant els dos registres, és possible separar els canvis deguts a la temperatura de l'aigua dels deguts a les variacions del volums de gel acumulats en els continents.

Els canvis de temperatura en la columna de gel poden tenir com efecte el fraccionament isotòpic dels isòtops del nitrogen $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ i de l'argó $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ de l'aire. Dels estudis recents del fraccionament del nitrogen de l'aire atrapat en els gels de Groenlàndia, s'ha pogut deduir que els canvis de temperatura en els diversos episodis de l'última glaciació, van ser més sobtats del que indicaven les mesures dels isòtops d'oxigen del gel. Les avantatges d'utilitzar el mètode del nitrogen es que s'eviten les distorsions que en el mètode de l'oxigen del gel pot provocar un canvi en l'origen de la font d'humitat i en l'estacionalitat de les precipitacions.

El medi oceànic i el polar resulten ser ideals per a les investigacions climàtiques amb tècniques isotòpiques. El marí per la seva gran homogeneïtat que permet detectar efectes de relativament poca amplitud, i el dels casquets polars, per les seves variacions

climàtiques més dràstiques. No obstant això, també hi ha un gran interès en poder detectar isotòpicament les variacions climàtiques de les regions continentals de latitud mitjana i baixa, pel qual han estat utilitzats els sediments lacustres, les aigües subterrànies i els espeleotemes depositats en els coves, principalment.

Els sediments lacustres són uns dels materials més valuosos per efectuar reconstruccions paleoclimàtics. Aquests materials acostumen a incloure fàcies carbonàtiques, en les quals la $\delta^{18}\text{O}$ està controlada per la de l'aigua del llac. En llacs "oberts", amb una ràpida renovació d'aigua, la composició isotòpica d'aquesta aigua coincideix amb la precipitació sobre la conca del llac, la qual depèn de la temperatura. Així, els valors mínim i màxim en el $\delta^{18}\text{O}$ del carbonat dipositat reflecteixen els períodes de clima fred i més temperat. Més complex és el cas dels llacs casi "tancats", on l'evaporació i l'intercanvi amb la humitat atmosfèrica determinen en gran part la composició isotòpica de l'aigua. En aquest cas, els canvis en el balanç hídric són els que defineixen les variacions isotòpiques de l'oxigen registrades pel carbonat dipositat. Els períodes secs es caracteritzen per l'alt contingut $\delta^{18}\text{O}$ a causa de l'augment de l'evaporació, procés en el qual l'aigua isotòpicament més lleugera se'n va del llac.

Els estudis isotòpics realitzats fins ara en regions continentals de latitud mitjana i baixa han permès reconstruir en detall les condicions climàtiques i hidrològiques regnants durant l'última transició glacial / interglacial i l'Holocè inicial a Europa Central, Àfrica Septentrional i Amèrica del Nord. En aquestes regions es van trobar diferències substancials pel que fa a l'estructura de l'esmentada transició i el moment en què es va produir. Per exemple, en els dipòsits lacustres del Sàhara i el Sahel s'han registrat diverses oscil·lacions de períodes humits i secs. En el Sàhara, els últims episodis humits importants van tenir lloc entre 14,5 - 11 ka, i entre 9,3 - 7,5 ka anys enrere.

Les aigües subterrànies també constitueixen una font de informació paleoclimàtica. En general, la composició isotòpica de les aigües subterrànies està relacionada amb la composició isotòpica mitjana de la precipitació a la regió de recàrrega. Per tant, la composició isotòpica de les aigües subterrànies reflecteix les variacions isotòpiques de la precipitació vinculades als canvis climàtics. També els gasos nobles de l'atmosfera dissolts en les aigües subterrànies (neó, argó, criptó, xenó) poden facilitar una valuosa informació paleoclimàtica. No obstant això, la utilització de les aigües subterrànies com indicador del clima planteja algunes dificultats, atès que poques vegades les aigües subterrànies poden considerar-se un sistema tancat.

També el carbonat de calci dipositat en coves càrstiques en formes de diferents espeleotemes (estalactites, estalagmites, etc.) pot resultar d'utilitat en la paleoclimatologia isotòpica. Aquests dipòsits carbonàtics es formen lentament a partir de les aigües subterrànies filtrades durant llargs períodes i gairebé assoleixen l'equilibri termodinàmic en un mitjà on s'atenuen les variacions estacionals de temperatura, humitat, atmosfèrica i composició isotòpica de l'aigua i del diòxid de carboni dissolt. Per tant, només les variacions climàtiques a llarg termini haurien de ser responsables de la composició isotòpica del carbonat de calci i de l'aigua atrapada en aquests dipòsits, la datació dels qual, d'altra banda, sol realitzar-se amb el mètode basat en el desequilibri de les sèries de l'urani.



❧ 4. EL CLIMA DEL PRECAMBRIÀ

El precambrià compren el lapse de temps més llarg de la història de la Terra, d'uns 4.000 Ma de durada. Aquest super eó informal abasta els temps que van des del naixement de la Terra, estimada en uns 4.600 Ma, al començament de l'eó Fanerozoic, fa 541 Ma.

Per estudiar el clima de la Terra durant els primers 4.000 Ma de la seva història, s'ha de confiar en estimacions indirectes. Per exemple, la presència de sediments glacials durant un període en particular indica glaciació, almenys en una escala regional. Les condicions específiques que es requereixen per a la formació de diversos tipus de roques també proporcionen indicacions addicionals dels canvis climàtics del passat. No obstant això, les incerteses són molt grans i les reconstruccions climàtiques, que són qualitatives en el millor dels cassos, es van modificant a mesura que es té nova informació disponible.

Les evidències del clima de la Terra primitiva són particularment escasses. Quan la Terra es va formar fa uns 4.600 Ma, la irradiància solar era un 30% inferior a l'actual. Si s'assumeix que les condicions (albedo, la composició de l'atmosfera, la distància entre la Terra i el sol, etc.) havien estat les mateixes d'ara, s'ha calculat que la temperatura mitjana de la superfície terrestre va ser de 30°C per sota de l'actual. Durant els primers 700-800 Ma d'existència de la Terra el continu bombardeig de petits planetesimals i meteorits hauria escalfat el clima.

Malgrat això, es pensa que la Terra hauria estat congelada durant una gran part de la seva història primitiva, durant la glaciació Huroniana. La glaciació Huroniana (2.400-2.100 Ma), com ja s'ha comentat, va tenir lloc durant els períodes Siderià i Riasià de l'era Paleoproterozoica i va ser una de les glaciacions més inten-

ses del registre geològic. Alguns autors (Cavalier-Smith, 2006) pensen que podria haver estat desencadenada per la desestabilització del clima causada pel metabolisme dels cianobacteris primitius. Aquests microorganismes fotosintètics alliberarien grans quantitats d'oxigen molecular a l'atmosfera, produint l'anomenat Gran Esdeveniment d'Oxigenació (*Great Oxygenation Event*). Aquest mecanisme desencadenant va trencar l'equilibri dels gasos d'efecte hivernacle que existia en aquells temps. Això contrasta amb l'evidència geològica d'un oceà líquid fa almenys 4.000 Ma i l'aparent discrepància es coneix com: “*the faint early Sun paradox*”, la paradoxa del sol dèbil jove.

La principal causa d'aquesta paradoxa es pensa que és que hi havia un repercussió molt més forta d'efecte hivernacle durant la vida primitiva de la Terra. L'ambient era molt diferent al d'avui, amb una concentració molt més gran de CO_2 , probablement arribant a més del 10%, és a dir, més de 100 vegades el valor actual, i gairebé no hi havia oxigen. En absència d'oxigen, el metà no s'oxida ràpidament, com ho fa ara, i la seva concentració va ser molt més elevada que l'actual. El metà hauria estat el gas dominant d'efecte hivernacle en aquests temps.

Però, amb el temps, la composició de l'atmosfera es va anar modificant, i en particular per l'oxigen alliberat per la fotosíntesi. Aquest oxigen es va utilitzar primer per oxidar els minerals exposats a l'atmosfera. Posteriorment, entre 2.400 i 2.200 Ma (Paleoproterozoic inferior) s'acumulà en l'ambient, donant lloc a un gran augment en la concentració d'oxigen atmosfèric, així com a la formació d'una capa d'ozó a l'estratosfera. A causa d'aquestes concentracions d'oxigen més altes, l'oxidació del metà es va fer més eficient i la seva concentració va disminuir notablement. Igual com l'augment de la quantitat d'oxigen va ser concurrent amb una glaciació, també s'ha suggerit que la reducció de la concentració de metà podria ser responsable de

la refrigeració. No obstant això, encara falten més l'evidències per confirmar aquesta hipòtesi.

La glaciació Criogènia va tenir lloc entre 850 i 635 Ma, als finals de l'eó Proterozoic, a l'era Neoproterozoica i es creu que va provocar una gran extinció en massa. La hipòtesi de la Terra bola de neu (*Snowball Earth*) fa referència als efectes que aquesta grandiosa glaciació va provocar sobre tot el planeta, la més gran que mai ha ocorregut a la Terra, com es dedueix dels registres de dades geològiques que ens han arribat. Aquesta hipòtesi intenta donar explicació, sobretot, als grans dipòsits sedimentaris d'origen glacial del període Criogenià que s'han trobat en latituds tropicals.

Segons les idees actuals, la causa d'aquesta gran glaciació cal buscar-les en la formació del supercontinent Rodínia, localitzat en la zona de l'equador terrestre. Els processos biològics i geològics, activats per un clima humit als continents i uns extensos mars càlids i poc profunds, van fer baixar molt el nivell de diòxid de carboni de l'atmosfera, de manera que el conseqüent efecte hivernacle es va reduir, baixant les temperatures i formant-se extensos casquets glacials. Com que el gel reflecteix la radiació solar molt més que els oceans, va augmentar l'albedo de la Terra prou perquè les temperatures baixessin encara més i el gel seguís avançant fins a cobrir tot el planeta.

Durant els episodis de "bola de neu" la capa de gel i la manca de precipitacions van aturar els mecanismes que retiren el diòxid de carboni de l'atmosfera, com la fotosíntesi i la formació de roques carbonàtiques. Lentament, però de manera contínua, el CO₂ alliberat per les erupcions volcàniques, al llarg dels 215 milions d'anys que va durar l'episodi, es va anar acumulant a l'atmosfera fins a assolir nivells prou elevats com per provocar un efecte hivernacle que va fa pujar la temperatura fins a fondre

el gel.

Aquesta hipòtesi de la “bola de neu” encara és objecte de debat, atès que han aparegut diferents estudis que semblen contradir-la i reduir l’extensió de la glaciació Criogènia. Entre els arguments considerats està que el registre geològic no confirma una aturada total de l’activitat biològica en aquest període, sinó que més aviat sembla indicar que es va mantenir una important activitat fotosintètica.



❧ 5. ELS CLIMES DEL PALEOZOIC I EL MESOZOIC

A escales de temps de milions d'anys, el cicle del carboni està controlat principalment pels intercanvis entre les roques i els magatzems de la superfície de la Terra, com l'oceà, l'atmosfera, la biosfera. La manera com aquest cicle del carboni determina a llarg termini la concentració de diòxid de carboni atmosfèric ($[CO_2]$) i el seu canvi en el temps es pot representar d'una forma molt simplificada per l'expressió (Goosse et al., 2015):

$$\frac{\partial[CO_2]}{\partial t} = Volc(t) - (Weath(t) + Org(t))$$

El primer terme del costat dret d'aquesta equació (*Volc*) descriu la desgasificació del CO_2 procedent de metamorfisme durant la subducció de les plaques litosfèriques i les erupcions volcàniques. El segon terme (*Weath*) representa la influència combinada de la meteorització dels silicats i la sedimentació del carbonat de calci a l'oceà, processos que eliminen el carboni de l'atmosfera i l'oceà. L'últim terme (*Org*) s'associa amb l'enterrament a llarg termini de la matèria orgànica. El desequilibri entre aquests tres termes ha estat el responsable dels canvis en la concentració de CO_2 a l'atmosfera i el clima durant milions d'anys. Desafortunadament, la informació sobre els diversos processos no és prou precisa per estimar la seva magnitud dins l'eó precambrià, però la resolució és millor per l'eó Fanerozoic, en els últims 541 milions anys.

En primer lloc, quan l'activitat tectònica és intensa, les altes taxes de producció de l'escorça oceànica a les dorsals oceàniques fa que les plaques oceàniques empenyin l'aigua de mar cap amunt. Això dona lloc a la inundació de les zones baixes dels continents per canvis en els volums del contenidor oceànic de

l'aigua marina. Atès que aquesta important activitat tectònica està relacionada amb les grans taxes de subducció i les erupcions volcàniques més freqüents / més fortes, s'ha suggerit que les reconstruccions de les variacions de segon ordre del nivell del mar es podrien utilitzar per derivar l'evolució en el temps de l'alliberament de gasos de CO_2 . La desgasificació del CO_2 de l'interior de la Terra produïda pel vulcanisme ha estat fonamental en els canvis climàtics, quan es consideren els processos a escales llargues de temps. Durant els últims 541 Ma del Fanerozoic hi ha una bona correlació entre les etapes de clima càlid (*greenhouse*) i les èpoques de major abundància de roques ígnies i volcàniques, que són unes bones indicadores d'un augment de la expulsió de CO_2 a l'atmosfera.

En segon lloc, l'enterrament de la matèria orgànica es pot estimar a partir de la composició isotòpica del carboni en l'aigua de mar. Durant la fotosíntesi, el ^{12}C és utilitzat preferentment pels organismes autòtrofs, atès que en el procés d'absorció fotosintètica de CO_2 , la vegetació terrestre i el fitoplàncton marí practiquen una discriminació en contra de les molècules pesades, preferint el ^{12}C al ^{13}C . Això implica que la matèria orgànica té un menor contingut de ^{13}C que l'atmosfera o l'oceà. La composició isotòpica es mesura comunament per valor $\delta^{13}\text{C}$, que és la relació isotòpica $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ de la mostra, en comparació amb un estàndard de referència.

Els valors antics de $\delta^{13}\text{C}$ de l'oceà, que estan relacionats amb els de l'atmosfera del mateix període, queden registrats en els sediments carbonàtics i d'aquesta manera es poden mesurar. Això proporciona estimacions de la taxa d'enterrament de matèria orgànica. Així, una transferència orgànica més gran cap els sediments s'associa amb una disminució en la quantitat relativa de ^{12}C i per tant a un augment en $\delta^{13}\text{C}$. Sobre la base d'aquestes mesures, s'ha pogut determinar que l'enterrament

de la matèria orgànica va ser particularment elevat durant la transició del Carbonífer al Pèrmic, fa uns 300 Ma. Una etapa caracteritzada per una proporció relativament gran de producció de combustibles fòssils, roques generadores d'hidrocarburs i concentració atmosfèrica relativament baixa de CO_2 .

Però també hi hagut altres etapes més puntuals d'enterrament de la matèria orgànica, com són els anomenats esdeveniments d'anòxia oceànica (EAO), com és el cas del període Aptià del Cretaci Inferior (126,3-113 Ma) amb l'EAO1a. L'Aptià és una etapa fascinant de la història de la Terra: importants episodis volcànics a l'Oceà Pacífic, nivells elevats de CO_2 a l'atmosfera, canvis climàtics, esdeveniments d'anòxia oceànica, grans fluctuacions eustàtiques, crisis de plataformes carbonatades i canvis biòtics. En essència, aquest fou l'estatge geològic en el qual diversos processos naturals d'abast global van coexistir amb les extenses plataformes carbonatades desenvolupades per tot el domini de l'antic mar del Tetis (Skelton, 2006).

L'expressió sedimentària de la part baixa de l'esdeveniment d'anòxia oceànica de l'Aptià inferior (EAO1a) representa la manifestació global de l'enterrament a llarg termini de la matèria orgànica. Aquest esdeveniment, en ambients oceànics, es caracteritza per horitzons estratigràfics de lutites negres riques en carboni orgànic que van ser depositades en fons oceànics sota condicions anòxiques (Menegatti et al., 1998). En general, s'interpreta com una conseqüència de les elevades concentracions de CO_2 atmosfèric que s'acumularen a causa de l'emplaçament de grans províncies ígnies a l'Oceà Pacífic, com la d'Ontong Java o l'altiplà Manihiki (Larson & Erba, 1999), així com de l'augment de les taxes d'obertura de les dorsals oceàniques (Larson 1991), amb vulcanisme submarí molt actiu i la creació d'escorça oceànica, que totes plegades donarien lloc a temperatures elevades de l'aigua de mar i l'acidificació dels oceans.

D'altra banda, els mecanismes de retroalimentació d'aquestes altes concentracions atmosfèriques de CO_2 , com l'enterrament dels inventaris de carboni, hauria induït una tendència progressiva de refredament durant tot l'interval de temps de l'EAO1a. Aquesta tendència de refredament quedà registrada amb una excursió positiva coetània a l'EAO1a de la corba d'isòtops d'oxigen obtinguda dels materials de l'Aptià inferior a la Conca del Maestrat (Cadena Ibèrica) i pel contingut pol·línic del registre sedimentari (Solé de Porta & Salas, 1994; Cors et al., 2014).

Un dels esdeveniments més enigmàtics i poc estudiats que van ocórrer durant l'Aptià és l'existència de dues caigudes del nivell del mar de magnitud i freqüència glacio-eustàtica durant la part superior de l'Aptià inferior, que, segons estudis recents (Bover-Arnal et al., 2009) podria haver afectat tot el marge del Tethys. L'existència de glacio-eustatisme durant l'Aptià és un tema controvertit a la llum d'evidències geològiques contradictòries, i a la idea generalitzada de l'existència de condicions d'efecte hivernacle prolongades durant el període Cretaci (Price, 1999; Immenhauser, 2005), com ja s'ha comentant més amunt. No obstant això, hi ha evidències geològiques clares de caigudes del nivell del mar originades per causes glacioeustàtiques, a la placa Ibèrica (Conca del Maestrat, Cadena Ibèrica) i a la placa Àrabica oriental (Bover-Arnal et al., 2014).

A partir dels conceptes que s'han presentat anteriorment i les estimacions de les taxes de meteorització dels diferents tipus de roques, és possible construir models del cicle del carboni a llarg termini. Aquests models poden ser molt complexos, atès que han d'estimar la influència de diversos processos. També poden incloure, a més del cicle del carboni, els cicles d'altres elements com ara oxigen o sofre. No obstant això, encara tenen grans incerteses i algunes de les hipòtesis que s'utilitzen són discutibles. Un d'aquests models més acceptat actualment és el

GEOCARB III, que presenta la corba de variacions de les concentracions del CO_2 atmosfèric durant el Fanerozoic (Berner & Kothavala. 2001) i la seva comparació amb la corba de les reconstruccions de CO_2 a partir d'indicadors (*proxies*) geoquímics i directes de Royer et al. (2004).

Segons les prediccions del model GEOCARB III, durant la major part del Fanerozoic les concentracions atmosfèriques de CO_2 van estar majoritàriament per sobre de 1.000 ppm (parts per milió). Sobretot a l'etapa Cambrià-Devonià Mitjà (541-382 Ma), que presenta concentracions de CO_2 atmosfèric entre 7.000 i 4.000 ppm. Aquestes concentracions minven dramàticament durant el període Devonià Superior-Permià Inferior (382-272 Ma) fins a menys de 500 ppm, tornant a augmentar a valors compresos entre 1.000 i 2.000 ppm durant el Permià Superior-Juràssic Superior (382-163 Ma), per finalment, decaure dràsticament fins els valors actuals de 282 ppm (etapa preindustrial) i 385 ppm (al 2009).

A la corba GEOCARB III s'identifiquen tres etapes amb concentracions de CO_2 relativament més baixes. La primera, a finals del Paleozoic, coincideix amb l'interval fred conegut com la glaciació de Karoo, que compren el període Carbonífer i una bona part del Pèrmic (360–260 Ma). La segona va ser durant el Juràssic superior i Cretaci inferior (163,5-100,5 Ma), quan hi van haver diversos períodes amb gel als pols, amb l'inici d'una forta davallada de la corba de concentració de CO_2 i la gran caiguda de la corba dels *proxies* (indicadors) geoquímics. Finalment, la tercera etapa freda que abasta l'interval Paleogen Superior-Quaternari, va començar a l'Oligocè (33,9 Ma). La glaciació del Quaternari és l'etapa glacial actual, que es va iniciar fa 2.58 Ma i de la qual ens trobem actualment en un període interglacial, una fase de millora climàtica amb retrocés dels casquets de gel polars.

La comparació entre la corba d'evolució de les temperatures mitjanes durant en Fanerozoic i la corba GEOCARB III de variacions de concentració del CO_2 ens mostra que no hi ha massa bona correlació entre les dues. Atès que hi ha trams amb la temperatura mitjana global alta i la concentració de CO_2 atmosfèric baixa o en clara tendència de caiguda, com passa entre el Silurià i el Carbonífer o durant el Triàsic-Juràssic Mitjà. Mentre que, per contra, a l'interval Cretaci-Paleogen (Terciari inferior) la temperatura mitjana global es mantenia alta i la corba de temperatura mitjana global mostra una dràstica davallada fins els valor actuals. A més, les concentracions de CO_2 en el passat de la Terra gairebé sempre han estat molt superiors a l'actual. D'acord amb el efecte d'hivernacle potencial del CO_2 , la Terra hauria d'haver estat extremadament calenta. En comptes d'això, les temperatures no van ser més altes que les actuals. Conseqüentment, hi ha d'haver altres factors, a més del CO_2 atmosfèric, que influencien a les temperatures de la Terra.

❧ 6. EL CLIMA DEL CENOZOIC

Durant els últims 66 milions d'anys, la concentració de CO_2 va anar disminuït gradualment de més de 1.000 ppm, durant el Paleocè i el començament de l'Eocè, a menys de 300 ppm durant el Pleistocè. Aquesta disminució a llarg termini es deguda en part a les emissions volcàniques, que van ser especialment grans durant el Paleocè i l'Eocè, i als canvis en les taxes d'erosió de les roques silicatades. La disminució de la concentració de CO_2 s'associa amb un refredament de les condicions càlides del clima de principis de l'Eocè, una fase d'escalfament global coneguda com l'òptim tèrmic del Paleocè-Eocè (fa uns 55 Ma). Aquest canvi representa l'inici d'una etapa de transició des d'un clima càlid de tipus l'hivernacle a un clima de fred de tipus nevera, amb la conseqüent instal·lació de casquets de gel sobre l'Antàrtida a partir del voltant de 34 Ma (límit Eocè-Oligocè) i sobre Groenlàndia, fa uns 3 Ma.

Les reconstruccions climàtiques per al Cenozoic sovint es basen en la composició isotòpica de l'oxigen de la closca dels foraminífers bentònics. La temperatura influeix el fraccionament isotòpic $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ entre aigua de mar i els ions de carbonat que formen la conquilla. Per a algunes espècies la relació temperatura-fraccionament és ben coneguda i sembla romandre estable amb el temps. Així que la mesura de la composició isotòpica de les restes de closques dels sediments marins, proporciona bones estimacions de les temperatures del passat.

Fa 60 Ma la posició dels continents era bastant semblant a l'actual. No obstant això, hi havia un gran estret que separava Nord i Sud Amèrica, mentre que l'Antàrtida encara estava connectada a Amèrica del Sud. Posteriorment, l'aixecament de Panamà i el tancament del braç de mar d'Amèrica Central pro-

bablement va modificar la circulació a l'Oceà Atlàntic, influint possiblement en la glaciació sobre Groenlàndia. Més important encara va ser l'obertura, aprofundiment i ampliació del Passatge de Drake, entre Amèrica del Sud i l'Antàrtida. Igual com l'obertura del Passatge de Tasmània, entre Austràlia i l'Antàrtida, que va permetre la formació d'un intens corrent circumpolar antàrtic que va aïllar l'Antàrtida de la influència climàtica de latituds mitjanes i afavorí l'augment de les condicions fredes. Finalment, l'aixecament de la serralada de l'Himàlaia i l'altiplà tibetà, va modificar fortament la circulació del monsó en aquestes regions.

A més dels canvis a llarg termini del Cenozoic, també es van produir esdeveniments relativament breus i que han deixat registre en els arxius geològics. Un dels més espectaculars és el suposat impacte d'un gran meteorit que es va produir fa 66 milions d'anys en el límit entre el Cretaci i Terciari (límit KT). Aquest cataclisme hauria estat la causa d'haver causat l'extinció de moltes espècies de plantes i animals, incloent-hi els dinosaures, però el seu impacte climàtic no és ben conegut i la seva influència a llarg termini no està clara, a part de que les estructures geològiques del suposat impacte han estat també molt discutides.

L'escalfament durant el Màxim Tèrmic del Paleocè-Eocè de fa uns 55 Ma (MTPE), que també va tenir un gran impacte en la vida a la Terra, està més ben documentat. Durant aquest esdeveniment, que va durar menys de 170 ka anys, la temperatura global va augmentar en més de 5°C en menys de 10 ka anys. Aquest període es caracteritza per una injecció massiva de carboni en el sistema atmosfera-oceà, tal com es registra en les variacions de $\delta^{13}\text{C}$ mesurat en sediments. La font d'aquestes entrades massives de carboni segueix sent encara incerta. Podria haver estat relacionada amb el vulcanisme, o per l'alliberament

del metà emmagatzemat en els sediments dels marges continentals, els anomenats catrats (Zachos et al., 2001).

Des de l'inici de l'Eocè fins al Miocè mitjà (55-15 Ma) les temperatures del planeta van anar minvant, d'acord amb la tendència de baixada que s'observa en la corba de $\delta^{18}\text{O}$ per aquesta etapa. Durant el Miocè mitjà (15 Ma) va tenir lloc una altra fase de millora climàtica coneguda com l'Òptim del Miocè mitjà, durant el qual van pujar les temperatures. A partir d'aquest òptim climàtic el planeta va sofrir una evolució climàtica general cap un refredament global.



❧ 7. EL CLIMA DEL QUATERNARI

El període Quaternari va començar fa 2,58 Ma, amb el creixement del casquet de gel sobre l'hemisferi nord que s'havia iniciat durant el Pliocè, fa uns 3 Ma. El període Quaternari es divideix en dues èpoques el Pleistocè i l'Holocè, el qual abasta els últims 11,7 ka i correspon a una etapa de millora climàtica. Durant el Quaternari els dos hemisferis de la terra han tingut casquets de gel permanents als pols, però la seva extensió ha anat canviant segons es tracti de cicles glacials i interglacials. L'alternança de períodes glacials i interglacials, pel que fa a la seva duració i freqüència, com ja s'ha comentat, està condicionada per la variació dels paràmetres astronòmics, d'excentricitat, inclinació i precessió de l'òrbita de la Terra, la denominada banda de Milankovitch (Hays et al., 1976). Durant el Període Quaternari va tenir lloc l'aparició del primer representant conegut del gènere *Homo* (*Homo habilis*) a l'Àfrica Oriental fa aproximadament 2,4 Ma.

Al llarg del Quaternari s'han identificat més de cent cicles glacials-interglacials, que s'han caracteritzat per diversos estadis de valors de $\delta^{18}\text{O}$ dels sediments dels sondatges fets en els fons marins. Es coneixen per l'acrònim de MIS (*Marine Isotopic Stages*), Lisiecki & Raymo (2005), els quals s'anomenen per un número, numerats de més modern a més antic, començant per l'actual amb el número 1. Els estadis freds tenen un número parell i els càlids senar. Tots aquests estadis s'agrupen en quatre grans períodes climàtics freds, anomenats períodes glacials, entre els quals s'intercalen amples períodes de millora climàtica dits interglacials. Actualment, des de fa 11,7 ka, estariem en un període interglacial que correspon a l'època de l'Holocè. Durant la major part del Quaternari hi ha hagut un major desenvolupament dels estadis freds glacials, un 90% més, que d'estadis càlids interglacials.

Els gels dels casquets polars de Groenlàndia i de l'Antàrtida han proporcionat les informacions paleoclimàtiques més rellevants pel que fa a les últimes glaciacions. La neu acumulada i compactada any rere any es converteix en gel dur, que s'ha conservat durant mil·lennis en capes successivament apilades. Aquest gel guarda moltes pistes de la química atmosfèrica i del clima dels últims cicles glacials. Així, es disposa de molts registres de CO_2 , mesurats directament a partir de les bombolles d'aire atrapades en els gels (Petit et al., 1997; Siegenthaler et al., 2005). Durant els períodes glacials els valors de CO_2 a l'atmosfera són baixos, mentre que durant els interglacials de millora climàtica els valors atmosfèrics de CO_2 augmenten. Quantitativament, aquesta variabilitat natural representa uns valors mínims de 180 ppm de CO_2 durant els mínims glacials i uns màxims de 280 ppm durant els interglacials.

Aquestes dades ens estarien indicant que els nivells de CO_2 atmosfèric dels últims 250 ka estan per sota dels valors de 385 ppm de la era industrial. Arribar a identificar quina era la causa d'aquests canvis ha estat un dels grans objectius de la paleoclimatologia quaternària. S'han elaborat moltes hipòtesis fins ara, per tal d'explicar aquesta variabilitat, i el que es pot concloure és que no existeix un únic procés causant de la variació del CO_2 en els cicles glacial-interglacial.

Els registres de gel de Groenlàndia i més concretament els procedents del sondeig NGRIP, han permès identificar cicles climàtics d'alta freqüència durant l'últim període glacial. Es tracta de cicles de climes càlids i freds d'una durada d'1 ka, els qual s'han descrit com cicles de *Dansgaard-Oeschger* (D-O). Els cicles D-O són un conjunt de 25 canvis climàtics bruscos observats en els últims 120 ka. Durant aquests esdeveniments, la temperatura va augmentar generalment de 5-10°C durant períodes que van des de 10 a 50 anys. Aquests cicles també

han pogut ser interpretats els registres de darrers 120 ka de bona part del planeta, especialment les pulsacions més fredes conegudes com *Heinrich Events* (Cacho et al., 1999). L'esdeveniment més recent D-O va ocórrer al final del Dryas Recent (*Younger Dryas*). L'evidència mostra que els esdeveniments d'aquest tipus no s'han produït durant els últims 10.000 anys.

L'última glaciació va acabar fa uns 11,7 ka anys, amb la baixada sobtada de la temperatura del final del període Dryas Recent. Amb aquest escenari finalitza l'època del plistocè i s'inicia l'època de l'Holocè, l'última fase interglacial del període Quaternari. Fa uns 8 ka la Terra va entrar en una etapa climàtica càlida, el període l'Hipsitermal, que es va acabar fa uns 5 ka. Aquesta etapa d'òptim climàtic es va produir per causes orbitals del Sol i la Terra i no per les concentracions del CO₂ atmosfèric. Durant aquesta etapa, una major insolació estival formava baixes pressions tèrmiques al Sàhara, més profundes que les actuals, que atreïen als vents humits de l'Atlàntic. A la zona dels massissos del Hoggar i del Tu-bestí, al centre del Sàhara, es conserven milers de figures en pintures rupestres d'aquella època que mostren escenes amb girafes i altres mamífers de la sabana. Les famoses pintures rupestres a l'altiplà de Tassili, al cor del Sàhara algerià, indiquen que en àrees avui super àrides i recobertes de dunes pasturava la fauna.

Els registres dels últims 5 ka anys assenyalen que les temperatures van ser més baixes que durant l'òptim climàtic del l'Holocè del període Hipsitermal. Aquest refredament general es conegut com el període Neoglacial, i va tenir lloc entre 5 i 2,5 ka per causes astronòmiques de tipus orbital. El límit entre els períodes Hipsitermal i Neoglacial, coincideix amb el començament la civilització de l'Edat del Bronze a Europa. Fa uns 5 ka, el règim de pluges va començar a disminuir, i el Sàhara ja tenia un clima semblant a l'actual. Sens dubte això va ajudar a

la migració de la població cap a les ribes del Nil i a l'establiment de la civilització faraònica d'Egipte.

A Europa, durant l'últim mil·lenni, han existit dos períodes amb diferències de temperatura notables, el Període Càlid Medieval i la Petita Edat del Gel, seguits de l'escalfament recent. L'òptim climàtic medieval va ser una etapa climàtica relativament càlida a la regió del nord de l'Atlàntic, tot i que també es produí en altres llocs com la Xina i Nova Zelanda, que va durar des de l'any 950 al 1250. El clímax d'aquest període es pensa que es va assolir cap a l'any 1100 i el clima tan suau va permetre que la vinya es cultivés al sud d'Anglaterra. Alguns historiadors medievalistes pensen que la població d'Europa es va multiplicar per tres o quatre vegades entre els anys 1000 i 1300. Històricament, potser el tret més notable va ser l'expansió vikinga per Europa.

Cap a finals de l'any 1.300 el clima es va anar refredant novament, per acabar entrant en la Petita Edat del Gel (1350-1850), de la qual no se'n va sortir fins la segona meitat del segle XIX. Durant aquests cinc segles de condicions fredes les baixes temperatures van sofrir unes oscil·lacions. Al menys es distingeixen tres màxims de pulsacions més fredes: Sooyer (1650), Maunder (1770) i Dalton (1850). Les dades que ho evidencien s'han obtingut de les anàlisis dels gels polars de Groenlàndia i dels foraminífers dels sediments marins. Encara que es consideri que la Petita Edat del Gel no va ser un fenomen global, cal considerar que va tenir àmplies repercussions als dos hemisferis terrestres, la documentació escrita més completa de l'època està conservada a Europa i Amèrica del Nord. La Petita Edat del Gel va deixar també la seva empremta en la pintura de l'època. Per exemple, el pintor flamenc Pieter Brueghel el Jove (1564 a 1638), dona testimoni en els seus quadres que la neu dominava en molts paisatges.

Encara que la radiació solar incident a la Terra hagi canviat lleugerament al llarg de l'últim mil·lenni, el seu senyal, reconstruït a partir del ^{14}C de la fusta dels arbres i del ^{10}Be dels gels, es correlaciona molt bé amb dues etapes de millorament i empitjorament climàtics històrics de l'Òptim Medieval (950-1250) i la Petita Edat del Gel (1350-1850). Així doncs, els canvis climàtics de l'últim mil·lenni sembla ser que estant relacionats amb la variabilitat de la insolació solar total. A part de les variacions de l'activitat solar, també s'han atribuït com a possibles causes la interacció oceà-atmosfera i a un augment de l'activitat volcànica. El màxim d'activitat solar contemporani, que s'inicià a partir de 1850, també es correlaciona bé amb l'augment de les temperatures globals entre 1850 i 2010, i es podria interpretar com la recurrència a una nova etapa de millorament climàtic semblant a la del màxim d'activitat solar medieval.



❧ 8. RESUM I CONCLUSIONS

Al llarg de la història la Terra, el clima del planeta ha fluctuat entre dos tipus dominants d'escenaris climàtics: *greenhouse* i *icehouse*, els quals representarien llargues etapes de climes més càlids, amb efecte “hivernacle”, alternant amb climes freds de tipus “nevera”, amb desenvolupament de casquets polars de gel i glaciers. Aquestes dues situacions climàtiques van perdurar durant milions d'anys i no s'han de confondre amb els períodes glacials i interglacials que tenen lloc dins les etapes fredes (*icehouse*), amb unes tendències de durada de menys d'un milió d'anys. Les alternances de grans etapes climàtiques d'efecte hivernacle i nevera han modelat profundament l'evolució de la vida sobre la Terra.

Hi ha un gran nombre d'evidències que donen suport a la presència de masses volumètricament significatives de gel polar durant les etapes fredes d'efecte hivernacle, com és el Mesozoic (252,2-66 milions d'anys, Ma). Això suggereix que la història de la Terra i en concret la del Fanerozoic (els últims 541 Ma), no respon únicament a un model dual i rígid de dues situacions extremes: *icehouse* / *greenhouse* com s'ha proposat. S'ha de pensar, doncs, en un model més flexible que admeti diverses situacions intermèdies, on predominarien determinades tendències segons les circumstàncies. Un exemple és l'interval Juràssic Superior-Cretaci Inferior (163,5-100,5 Ma), on hi ha evidències de l'existència de diversos períodes freds amb gel als pols.

A la història climàtica de la Terra es coneixen sis grans etapes de climes freds (*greenhouse*) amb períodes glacials, dues al Proterozoic i quatre al Fanerozoic. La glaciació Huroniana és la primera glaciació coneguda en la història de la Terra i es va produir en els inicis del Proterozoic (Paleoproterozoic), entre 2400 i 2100

Ma, mentre que la glaciació Criogènia va tenir lloc entre 850 i 635 Ma, als finals del Proterozoic (Neoproterozoic). Durant el Fanerozoic hi va haver quatre grans etapes fredes amb glaciacions, dues al Paleozoic, una al Juràssic Superior-Cretaci Inferior i la darrera al Paleogen Superior-Quaternari. La primera glaciació paleozoica va ser l'Andino-Sahariana, que abasta una part del període Ordovicià i el Silurià (450–420 Ma). A finals del Paleozoic tingué lloc la glaciació de Karoo, que compren el període Carbonífer i una bona part del Pèrmic (360–260 Ma). Durant el Juràssic superior i Cretaci inferior (163,5-100,5 Ma) hi van haver diversos períodes amb gel als pols. Finalment, vingué l'etapa freda que abastà el Paleogen Superior-Quaternari, i que va començar a l'Oligocè (33,9 Ma). La glaciació del Quaternari és l'etapa glacial actual, que es va iniciar fa 2.58 Ma i de la qual ens trobem actualment en un període interglacial, una fase de millora climàtica i retrocés dels casquets de gel polars.

Els principals factors que haurien intervingut per produir aquests grans canvis del paleoclima han estat els mecanismes de forçament de tipus astronòmic, geològic i de composició de l'atmosfera. Entre els forçaments astronòmics calen destacar: 1) les radiacions còsmiques, 2) les variacions solars, i 3) les variacions orbitals. Els forçaments geològics més significatius serien: 1) la tectònica de plaques i la deriva dels continents, i 2) l'activitat volcànica. Pel que fa als forçaments relacionats amb la composició atmosfèrica, són importants les etapes de concentració de gasos d'efecte hivernacle, com el diòxid de carboni (CO_2) o el metà (CH_4).

Els canvis en la intensitat de dels raigs còsmics galàctics alteren la nuvolositat de la Terra. Un experiment recent ha demostrat com els electrons alliberats pels raigs còsmics ajuden a la producció d'aerosols, els quals constitueixen els elements bàsics dels nuclis de condensació dels núvols. Per altra banda, les ten-

dències climàtiques anòmales observades a l'Antàrtida confirmen la funció dels núvols per ajudar a conduir el canvi climàtic. Les variacions en l'aflluència de raigs còsmics, procedents de les explosions d'estrelles i del Sol, expliquen bé les fluctuacions climàtiques a escales de temps de desenes, centenes i milers d'anys sobre la Terra, encara que aquest és un tema bastant controvertit entre els astrofísics.

En els últims 600 Ma, que comprenen el final del Proterozoic i el Fanerozoic, el nostre sistema solar va passar a través de quatre braços en espiral de la Via Làctia, on els rajos còsmics són localment més intensos. Això va fer que la temperatura de la Terra baixés al augmentar la cobertura de núvols. Els estudis paleoclimàtics estimen que la temperatura mitjana fora dels braços en espiral era de 22°C, però que disminuïa fins al voltant de 12°C quan el sistema planetari estava dins de cada braç de la galàxia. Així es van produir quatre etapes climàtiques fredes que es correlacionen molt bé amb les quatre grans etapes fredes amb períodes glacials reconegudes durant el Fanerozoic.

El nombre de taques solars varia en cicles d'aproximadament 11 anys. Existeix una clara relació entre el nombre variable de taques solars i la intensitat de flux de radiació solar que arriba a la Terra: la "insolació solar total" o "constant solar". A l'actualitat aquest flux és d'uns 1.370 W/m² i oscil·la aproximadament 1,2 W/m² entre el màxim i mínim del cicle. Encara que la radiació solar incident a la Terra hagi canviat lleugerament al llarg de l'últim mil·lenni, el seu senyal, reconstruït a partir del ¹⁴C de la fusta dels arbres i del ¹⁰Be dels gels, es correlaciona molt bé amb dues etapes de millorament i empitjorament climàtiques històriques: l'Òptim Medieval (950-1250) i la Petita Edat del Gel (1350-1850). Així doncs, els canvis climàtics de l'últim mil·lenni sembla ser que estant molt relacionats amb la variabilitat de la insolació solar total. El màxim d'activitat solar

contemporani, que s'inicià a partir de 1850, també es correlaciona bé amb l'augment de les temperatures globals entre 1850 i 2010, i es podria interpretar com la recurrència a una nova etapa de millorament climàtic semblant a la del màxim d'activitat solar medieval.

Les variacions orbitals són degudes a les influències gravitatòries d'altres planetes del Sistema Solar, les quals fa que es vagin modificant cíclicament diversos paràmetres astronòmics del moviment de la Terra al llarg dels mil·lennis, són els anomenats cicles de Milankovitch. Aquests cicles són: i) la relació del moment dels equinoccis i dels solsticis en relació al moment de major o menor allunyament de la Terra al Sol, és la precessió dels equinoccis, amb cicles de 20 quilo-anys (ka), ii) les variacions de la forma lleugerament el·líptica de l'òrbita de la Terra, amb els cicles d'excentricitat de l'òrbita de 400-100 ka, iii) les modificacions de la inclinació de l'eix de la Terra, amb els cicles d'obliqüïtat de l'eix de 41 ka. Al combinar-se els tres cicles de variació, amb les seves diferents periodicitats i intensitats, es produeixen variacions complexes en la quantitat de radiació solar interceptada per a cada latitud i en cada estació de l'any.

Cadascun dels tres cicles de Milankovitch pot produir efectes climàtics que són diferents en cada latitud. Els canvis en el repartiment estacional de la insolació, deguts a factors astronòmics, són els responsables de l'expansió i retirada dels grans mantells glaciaris durant el Pleistocè (2,59 - 0,0117 Ma). El clima és un dels factors al·locíclics que controla la ciclicitat de les successions sedimentàries de forma significativa. Els canvis climàtics que es produeixen com conseqüència de les modificacions orbitals poden causar ciclicitat en el registre sedimentari dins del segment anomenat "banda de freqüències de Milankovitch", compresa entre 400 i 20 Ka.

Aquestes oscil·lacions climàtiques de la banda de Milankovitch han estat modernament afinades notablement gràcies a estudis isotòpics de mostres de sediments perforats en fons marins de tot el món i sondejos en els gels polars. Tot i que aquests estudis, malgrat la seva enorme rigor i sofisticació metodològica i instrumental, poden presentar problemes de soroll del registre i incerteses de datació que emmascarin els resultats. Actualment es disposa de moltes corbes isotòpiques de $\delta^{18}\text{O}$, CO_2 i de variacions de temperatures, en les quals s'han identificat diverses desenes d'episodis alternants de clima fred i càlid.

La teoria de la Tectònica de Plaques representa en geologia un model de gran poder integrador que ha revolucionat les ciències de la Terra, amb un impacte comparable al que van tenir les teories de la gravetat de Newton i de la relativitat d'Einstein en el camp de la Física o les lleis de Kepler en l'Astronomia. Amb aquest gran avenç, la paleoclimatologia va trobar el seu camp com una disciplina pròpia. Des de llavors, i especialment des de 1980, el camp de la paleoclimatologia ha crescut ràpidament. Sobretot des de quan les reconstruccions continentals van començar a fer-se per a un passat llunyà.

L'actual disposició geogràfica dels continents i el oceans, resultat de deriva continental i la tectònica de plaques, controla els camins de la circulació oceànica. Aquest moviment de masses d'aigua produeix un transport global d'energia calorífica i de materials sòlids en suspensió, substàncies dissoltes i gasos, homogeneïtzant les conques oceàniques. Aquesta circulació manté els climes del nostre planeta, de manera que els oceans actuen com a reguladors de la temperatura global del planeta.

A escala de temps de milions d'anys, el cicle del carboni està controlat principalment pels intercanvis entre les roques i els magatzems de la superfície de la Terra, com l'oceà, l'atmosfera i la biosfera. La manera com aquest cicle del carboni determina a llarg termini la concentració de diòxid de carboni atmosfèric i el seu canvi en el temps depèn de tres paràmetres: i) la desgasificació del CO_2 procedent de metamorfisme durant la subducció de les plaques litosfèriques i les erupcions volcàniques, ii) la influència combinada de la meteorització dels silicats i la sedimentació de les roques carbonàtiques marines, processos que eliminen el carboni de l'atmosfera i l'oceà, iii) l'enterrament a llarg termini de la matèria orgànica. El desequilibri entre aquests tres termes ha estat el responsable dels canvis en la concentració de CO_2 a l'atmosfera i el clima durant milions d'anys. Desafortunadament, la informació sobre els diversos processos no és prou precisa per estimar la seva magnitud dins l'eó precambrià, però la resolució és millor per a l'eó Fanerozoic dels últims 541 Ma.

La desgasificació del CO_2 de l'interior de la Terra produïda pel vulcanisme ha estat fonamental en els canvis climàtics, quan es consideren els processos a escales llargues de temps. Durant els últims 541 Ma del Fanerozoic hi ha una bona correlació entre les etapes de clima càlid (*greenhouse*) i les èpoques de major abundància de roques ígnies i volcàniques, que són unes bones indicadores d'un augment de la expulsió de CO_2 a l'atmosfera.

L'Aptià (126,3-113 Ma, Cretaci Inferior) és una etapa fascinant de la història de la Terra: importants episodis volcànics a l'Oceà Pacífic, nivells elevats de CO_2 a l'atmosfera, canvis climàtics, esdeveniments d'anòxia oceànica, grans fluctuacions eustàtiques, crisis de plataformes carbonatades i canvis biòtics. En essència, aquest fou l'estatge geològic en el qual diversos processos naturals d'abast global van coexistir amb les extenses

plataformes carbonatades desenvolupades per tot el domini de l'antic mar del Tetis.

L'expressió sedimentària de la part baixa de l'esdeveniment d'anòxia oceànica de l'Aptià inferior (EAO1a) representa la manifestació global de l'enterrament a llarg termini de la matèria orgànica. Aquest esdeveniment, en ambients oceànics, es caracteritza per horitzons estratigràfics de lutites negres riques en carboni orgànic que van ser depositades en fons oceànics sota condicions anòxiques. En general, s'interpreta com una conseqüència de les elevades concentracions de CO_2 atmosfèric que s'acumularen a causa de l'emplaçament de grans províncies ígnies a l'Oceà Pacífic, com la d'Ontong Java o l'altiplà Manihiki, així com de l'augment de les taxes d'obertura de les dorsals oceàniques, amb vulcanisme submarí molt actiu i la creació d'escorça oceànica, que totes plegades donarien lloc a temperatures elevades de l'aigua de mar i l'acidificació dels oceans. D'altra banda, els mecanismes de retroalimentació d'aquestes altes concentracions atmosfèriques de CO_2 , com l'enterrament dels inventaris de carboni, hauria induït una tendència progressiva de refredament durant tot l'interval de temps de l'EAO1a. Aquesta tendència de refredament quedà registrada amb una excursió positiva coetània a l'EAO1a de la corba d'isòtops d'oxigen obtinguda dels materials de l'Aptià inferior a la Conca del Maestrat (Cadena Ibèrica) i pel contingut pol·línic del registre sedimentari.

Un dels esdeveniments més enigmàtics i poc estudiats que van ocórrer durant l'Aptià és l'existència de dues caigudes del nivell del mar de magnitud i freqüència glacio-eustàtica durant la part superior de l'Aptià inferior, que, segons estudis recents podria haver afectat tot el marge del Tetis. L'existència de glacio-eustatisme durant l'Aptià és un tema controvertit a la llum d'evidències geològiques contradictòries, i a la idea generalitza-

da de l'existència de condicions d'efecte hivernacle prolongades durant el període Cretaci, com ja s'ha comentant més amunt. No obstant això, hi ha evidències geològiques clares de caigudes del nivell del mar originades per causes glacioeustàtiques, a la placa Ibèrica (Conca del Maestrat, Cadena Ibèrica) i a la placa Aràbiga oriental.

L'evolució de les concentracions de CO_2 a les atmosferes del Fanerozoic (els darrers 541 Ma) s'ha estimat mitjançant diversos models de simulació i reconstrucció, validats amb *proxies* (indicadors) geoquímics i directes com els intervals climàtics freds i/o amb gel, interpretats a partir d'indicadors geològics (corba GEOCARB III). Durant la major part del Fanerozoic les concentracions atmosfèriques de CO_2 van estar majoritàriament per sobre de 1.000 ppm (parts per milió). Sobretot a l'etapa Cambrià-Devonià Mitjà (541-382 Ma), que presenta concentracions de CO_2 atmosfèric entre 7.000 i 4.000 ppm. Aquestes concentracions minven dramàticament durant el període Devonià Superior-Permià Inferior (382-272 Ma) fins a menys de 500 ppm, tornant a augmentar a valors compresos entre 1.000 i 2.000 ppm durant el Permià Superior-Juràssic Superior (382-163 Ma), per finalment, decaure dràsticament fins els valors actuals de 282 ppm (etapa preindustrial) i 385 ppm (al 2009).

A la corba GEOCARB III s'identifiquen tres etapes amb concentracions de CO_2 relativament més baixes. La primera, a finals del Paleozoic, coincideix amb l'interval fred conegut com la glaciació de Karoo, que compren el període Carbonífer i una bona part del Pèrmic (360–260 Ma). La segona va ser durant el Juràssic superior i Cretaci inferior (163,5-100,5 Ma), quan hi van haver diversos períodes amb gel als pols, amb l'inici d'una forta davallada de la corba de concentració de CO_2 i la gran caiguda de la corba dels *proxies* (indicadors) geoquímics. Finalment, la tercera etapa freda que abasta l'interval Paleogen

Superior-Quaternari, va començar a l'Oligocè (33,9 Ma). La glaciació del Quaternari és l'etapa glacial actual, que es va iniciar fa 2.58 Ma i de la qual ens trobem actualment en un període interglacial, una fase de millora climàtica amb retrocés dels casquets de gel polars.

La comparació entre la corba d'evolució de les temperatures mitjanes durant en Fanerozoic i la corba GEOCARB III de variacions de concentració del CO_2 ens mostra que no hi ha massa bona correlació entre les dues. Atès que hi ha trams amb la temperatura mitjana global alta i la concentració de CO_2 atmosfèric baixa o en clara tendència de caiguda, com passa entre el Silurià i el Carbonífer o durant el Triàsic-Juràssic Mitjà. Mentre que, per contra, a l'interval Cretaci-Paleogen (Terciari inferior) la temperatura mitjana global es mantenia alta i la corba de temperatura mitjana global mostra una dràstica davallada fins els valor actuals. A més, les concentracions de CO_2 en el passat de la Terra gairebé sempre han estat molt superiors a l'actual. D'acord amb el efecte d'hivernacle potencial del CO_2 , la Terra hauria d'haver estat extremadament calenta. En comptes d'això, les temperatures no van ser més altes que les actuals. Conseqüentment, hi ha d'haver altres factors, a més del CO_2 atmosfèric, que influencien a les temperatures de la terra.

Durant els últims 66 milions d'anys del Cenozoic, la concentració de CO_2 va anar disminuint gradualment de més de 1.000 ppm, durant el Paleocè i el començament de l'Eocè, a menys de 300 ppm durant el Pleistocè. Aquesta disminució a llarg termini es deguda en part a les emissions volcàniques, que van ser especialment grans durant el Paleocè i l'Eocè, i als canvis en les taxes d'erosió de les roques silicatades. La disminució de la concentració de CO_2 s'associa amb un refredament de les condicions càlides del clima de principis de l'Eocè, una fase d'escalfament global coneguda com l'òptim tèrmic del Paleocè-

Eocè (fa uns 55 Ma). Aquest canvi representa l'inici d'una etapa de transició des d'un clima càlid de tipus l'hivernacle a un clima de fred de tipus nevera, amb la conseqüent instal·lació de casquets de gel sobre l'Antàrtida a partir del voltant de 34 Ma (límit Eocè-Oligocè) i sobre Groenlàndia, fa uns 3 Ma.

Les reconstruccions climàtiques per al Cenozoic sovint es basen en la composició isotòpica de l'oxigen de la closca dels foraminífers bentònics. L'escalfament durant el Màxim Tèrmic del Paleocè-Eocè de fa uns 55 Ma (MTPE), que també va tenir un gran impacte en la vida a la Terra, està ben documentat. Durant aquest esdeveniment, que va durar menys de 170 ka anys, la temperatura global va augmentar en més de 5°C en menys de 10 ka anys. Aquest període es caracteritza per una injecció massiva de carboni en el sistema atmosfera-oceà, tal com es registra en les variacions de $\delta^{13}\text{C}$ mesurat en sediments. La font d'aquestes entrades massives de carboni segueix sent encara incerta. Podria haver estat relacionada amb el vulcanisme, o per l'alliberament del metà emmagatzemat en els sediments dels marges continentals, els anomenats catrats.

Des de l'inici de l'Eocè fins al Miocè mitjà (55-15 Ma) les temperatures del planeta van anar minvant, d'acord amb la baixada que s'observa en la corba de $\delta^{18}\text{O}$. Durant el Miocè mitjà (15 Ma) va tenir lloc una etapa de millora climàtica coneguda com l'Òptim del Miocè mitjà, durant el qual van pujar les temperatures. A partir d'aquest òptim climàtic el planeta va sofrir una evolució climàtica general cap un refredament global.

Fa 66 Ma (Paleocè) la posició dels continents era bastant semblant a l'actual. No obstant això, hi havia un gran estret que separava Nord i Sud Amèrica, mentre que l'Antàrtida encara estava connectada a Amèrica del Sud. Posteriorment, l'aixecament de Panamà i el tancament del braç de mar d'Amèrica

Central probablement va modificar la circulació a l'Oceà Atlàntic, influint possiblement en la glaciació sobre Groenlàndia. Més important encara va ser l'obertura, aprofundiment i ampliació del Passatge de Drake, entre Amèrica del Sud i l'Antàrtida. Igual com l'obertura del Passatge de Tasmània, entre Austràlia i l'Antàrtida, que va permetre la formació d'un intens corrent circumpolar antàrtic que va aïllar l'Antàrtida de la influència climàtica de latituds mitjanes i afavorí l'augment de les condicions fredes. Finalment, l'aixecament de la serralada de l'Himàlaia i l'altiplà tibetà, va modificar fortament la circulació del monsó en aquestes regions.

El període Quaternari va començar fa 2,58 Ma, amb el augment del casquet de gel sobre l'hemisferi nord que s'havia iniciat durant el Pliocè, fa uns 3 Ma. El període Quaternari es divideix en dues èpoques el Pleistocè i l'Holocè, el qual abasta els últims 11,7 ka i correspon a una etapa de millora climàtica. Durant el Quaternari els dos hemisferis de la terra han tingut casquets de gel permanents als pols, però la seva extensió ha anat canviant segons es tracti de cicles glacials i interglacials. L'alternança de períodes glacials i interglacials, pel que fa a la seva duració i freqüència, com ja s'ha comentat, està condicionada per la variació dels paràmetres astronòmics, d'excentricitat, inclinació i precessió de l'òrbita de la Terra, la denominada banda de Milankovitch. Durant el Període Quaternari va tenir lloc l'aparició del primer representant conegut del gènere Homo (*Homo habilis*) a l'Àfrica Oriental fa aproximadament 2,4 Ma.

Es disposa de molts registres de CO₂, mesurats directament a partir de les bombolles d'aire atrapades en els gels polars quaternaris. Durant el Quaternari, la concentració de CO₂ ha oscil·lat entre unes 200 i 300 ppm, amb l'alternança de períodes glacials i períodes interglacials de millora climàtica. En els períodes glacials del Quaternari, la concentració de CO₂ a l'at-

mosfera baixava fins a les 200 ppm, la meitat que l'actual, les selves i sabanes es reduïen i els deserts s'expandien. S'arribava a un límit de CO_2 tan baix que a molta més baixa altitud que ara desapareixia la vegetació arbòria a causa de la dificultat de les fulles per fer la fotosíntesi.

Aquestes dades ens estarien indicant que els nivells de CO_2 atmosfèric dels últims 250 ka estan per sota els valors de 385 ppm de la era industrial. Arribar a identificar quina va ser la causa d'aquests canvis ha estat un dels grans objectius de la paleoclimatologia quaternària. S'han elaborat moltes hipòtesis fins ara, per tal d'explicar aquesta variabilitat, i el que es pot concloure es que no existeix un únic procés causant de la variació del CO_2 en els cicles glacial-interglacial.

Al llarg del Quaternari s'han identificat més de cent cicles glacials-interglacials, que s'han caracteritzat per diversos estadis de valors de $\delta^{18}\text{O}$ dels sediments dels sondatges fets en els fons marins. Es coneixen per l'acrònim de MIS (*Marine Isotopic Stages*). Durant els períodes glacials el nivell del mar va caure desenes de metres en menys d'un milió d'anys per causes glacioeustàtiques. Per exemple, en el Pleniglacial superior (19-25,5 ka) corresponent a l'estadi isotòpic MIS 2 (*oxygen isotope stage 2*) del $\delta^{18}\text{O}$, el nivell del mar Mediterrani va caure 130 m per sota del nivell actual. La investigació dels gels polars també ha permès identificar cicles climàtics d'alta freqüència durant l'últim període glacial. Es tracta de cicles de climes càlids i freds d'una durada d'1 ka, els qual s'han descrit com cicles de *Dansgaard-Oeschger* (D-O). Els cicles D-O són un conjunt de 25 canvis climàtics bruscos observats en els últims 120 ka.

És ben palès que les condicions climàtiques dels períodes glacials freds van tenir efectes catastròfics sobre flora i fauna que van desaparèixer d'àmplies zones, i de vegades van quedar relegades

a refugis per tornar després a expandir-se. Encara que resulta difícil imaginar, durant el màxim de l'última glaciació (25-19-5 ka), el casquet àrtic s'estenia gairebé fins a Londres i la Península Escandinava estava coberta per diversos milers de metres de gel, i el nivell del mar estava entre 100 i 150 metres per sota del seu nivell actual. Aquesta expansió del gel va crear ponts entre Àsia i Amèrica del Nord, permetent el pas dels primers nadius americans. Mentre que a zones tropicals i subtropicals, com la major part d'Àfrica on no hi va haver glacialisme quaternari, les alternances de períodes pluvials i interpluvials van ser el motor de l'evolució humana i de les gran migracions arreu del món.

L'última glaciació va acabar fa uns 11,7 ka anys, amb la baixada sobtada de la temperatura del final del període *Younger Dryas*. Amb aquest escenari finalitza l'època del Pleistocè i s'inicia l'època de l'Holocè, l'última fase interglacial del període Quaternari. Fa uns 8 ka la Terra va entrar en una etapa climàtica càlida, el període l'Hipsitermal, que es va acabar fa uns 5ka. Aquesta etapa d'òptim climàtic es va produir per causes orbitals del Sol i la Terra i no per les concentracions del CO₂ atmosfèric. Durant aquesta etapa, una major insolació estival formava baixes pressions tèrmiques al Sàhara, més profundes que les actuals, que atreïen als vents humits de l'Atlàntic. A la zona dels massissos del Hoggar i del Tu-bestí, al centre del Sàhara, es conserven milers de figures en pintures rupestres d'aquella època que mostren escenes amb girafes i altres mamífers de la sabana. Les famoses pintures rupestres a l'altiplà de Tassili, al cor del Sàhara algerià, indiquen que en àrees avui super àrides i recobertes de dunes pasturava la fauna.

Els registres dels últims 5 ka anys indiquen que les temperatures van ser més baixes que durant l'òptim climàtic del l'Holocè del període l'Hipsitermal. Aquest refredament general es conegut com el període Neoglacial, i va tenir lloc entre 5 i 2,5

ka per causes astronòmiques de tipus orbital. El límit entre els períodes Hipsitermal i Neoglacial, coincideix amb el començament la civilització de l'Edat del Bronze a Europa. Fa uns 5 ka, el règim de pluges va començar a disminuir, i el Sàhara ja tenia un clima semblant a l'actual. Sens dubte això va ajudar a la migració de la població cap a les ribes del Nil i a l'establiment de la civilització faraònica d'Egipte.

A Europa, durant l'últim mil·lenni, han existit dos períodes amb diferències de temperatura notables, el Període Càlid Medieval i la Petita Edat del Gel, seguits de l'escalfament recent. L'òptim climàtic medieval va ser una etapa climàtica relativament càlida a la regió del nord de l'Atlàntic, tot i que també es produí en altres llocs com la Xina i Nova Zelanda, que va durar des de l'any 950 al 1250. El clímax d'aquest període es pensa que es va assolir cap a l'any 1100 i el clima tan suau va permetre que la vinya es cultivés al sud d'Anglaterra. Alguns historiadors medievalistes pensen que la població d'Europa es va multiplicar per tres o quatre vegades entre els anys 1000 i 1300. Històricament, potser el tret més notable va ser l'expansió vikinga per Europa.

Cap a finals de l'any 1.300 el clima es va anar refredant novament, per acabar entrant en la Petita Edat del Gel (1350-1850), de la qual no se'n va sortir fins la segona meitat del segle XIX. Durant aquests cinc segles de condicions fredes les baixes temperatures van sofrir unes oscil·lacions, al menys es distingeixen tres màxims de pulsacions més fredes: Sooyer (1650), Maunder (1770) i Dalton (1850). Les dades que ho evidencien s'han obtingut de les anàlisis dels gels polars de Groenlàndia i dels foraminífers dels sediments marins. Encara que es consideri que la Petita Edat del Gel no va ser un fenomen global, cal considerar que va tenir àmplies repercussions als dos hemisferis terrestres, la documentació escrita més completa de l'època està

conservada a Europa i Amèrica del Nord. La Petita Edat del Gel va deixar també la seva empremta en la pintura de l'època. Per exemple, el pintor flamenc Pieter Brueghel el Jove (1564 a 1638), dóna testimoni en els seus quadres que la neu dominava en molts paisatges.

Encara que la radiació solar incident a la Terra hagi canviat lleugerament al llarg de l'últim mil·lenni, el seu senyal, reconstruït a partir del ^{14}C de la fusta dels arbres i del ^{10}Be dels gels, es correlaciona molt bé amb dues etapes de millorament i empitjorament climàtics històrics de l'Òptim Medieval (950-1250) i la Petita Edat del Gel (1350-1850). Així doncs, els canvis climàtics de l'últim mil·lenni sembla ser que estant relacionats amb la variabilitat de la insolació solar total. A part de les variacions de l'activitat solar, també s'han atribuït com a possibles causes la interacció oceà-atmosfera i a un augment de l'activitat volcànica. El màxim d'activitat solar contemporani, que s'inicià a partir de 1850, també es correlaciona bé amb l'augment de les temperatures globals entre 1850 i 2010, i es podria interpretar com la recurrència a una nova etapa de millorament climàtic semblant a la del màxim d'activitat solar medieval.

El promig anual de les temperatures globals de la superfície de la Terra ha augmentat els darrers 140 anys (1860-2000). La millor estimació apunta que la temperatura global mitjana de la superfície de la Terra ha augmentat $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$. La pujada es va produir en dos trams: 1910-1944 i 1978-1998. Entre aquests trams, durant el període 1944-1978, la temperatura mitjana global de la superfície de la Terra mostra una lleugera tendència a la baixa. Aquesta evolució desigual suggereix que probablement han existit factors desencadenants naturals, i no únicament antròpics, com a inductors de les variacions tèrmiques observades, sobretot durant el primer tram de pujada, des de 1910 a 1944

En els darrers 18 anys (1990-2006) una anàlisi més detallada, mes per mes, de l'evolució de la temperatura mitjana global de la superfície terrestre indica, com a trets més rellevants, una baixada de temperatura de 0,6 °C després de l'erupció del volcà Pinatubo (juny de 1991) i una pujada durant l'episodi del Niño de 1997-1998.

El procés d'augment gradual de la temperatura del planeta Terra per la intensificació de l'efecte hivernacle es coneix com l'escalfament global. El Grup Intergovernamental sobre el Canvi Climàtic (IPCC) declara que gran part de l'augment de la temperatura de la Terra des de mitjans del segle XX és degut a l'augment de concentracions antropogèniques de gasos d'efecte hivernacle. En els seus informes l'IPCC conclou que "la major part de l'escalfament observat durant els últims 50 anys és atribuïble a les activitats humanes".

El forçament radiatiu és una mesura de la influència que té un factor per alterar l'equilibri de l'energia entrant i sortint en el sistema atmosfèric terrestre, i també és un índex de la importància del factor com a mecanisme potencial del canvi climàtic. Les causes possibles del forçament radiatiu són els canvis en la insolació, la radiació solar incident, o els efectes de les variacions en l'atmosfera de la quantitat de gasos radiativament actius, com el diòxid de carboni (CO₂), Metà (CH₄) i l'òxid nitrós (N₂O).

Per obtenir estimacions i prediccions globals acurades de les dades del passat els informes del IPCC fan models climàtics complexos basats en la física i mitjançant el càlcul numèric. No obstant això, aquests models no poden simular tots els aspectes del clima. Per exemple, encara no poden donar explicacions completes de la tendència observada en la diferència de la temperatura de la superfície de la troposfera des del 1979 i hi ha

incerteses concretes associades als núvols i a la seva interacció amb la radiació i els aerosols, entre altres. Les prediccions dels models climàtics indiquen que les temperatures de la superfície s'incrementaran d'1,1 a 6,6 °C durant el segle XXI.

Si bé és cert que hi ha hagut un lleuger increment de les temperatures mitjanes en el darrer segle ($0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$), també és indefugible acceptar que en èpoques passades de la història de la Terra hi ha hagut oscil·lacions naturals de la temperatura mitjana terrestre molt més importants. A més, que no hi ha encara seguretat absoluta de si els canvis actuals són deguts a l'activitat de l'home, o si es poden explicar pels cicles naturals, com els canvis orbitals, l'activitat solar i les emissions volcàniques. La controvèrsia, doncs, està en saber quines són les causes d'aquest escalfament.

Sembla ser que l'augment de les temperatures ha estat localitzat només a algunes regions, mentre que en altres les temperatures han assenyalat un descens important els últims anys, el qual ens indicaria que l'escalfament no es tractaria d'un fenomen global. En aquest sentit, per exemple, cal comentar que, a partir de dades de satèl·lits durant els anys 1979-2002, les masses de gel de l'Antàrtica han crescut en el sector del Pacífic central i han minvat en el sector Bellingshausen/western Weddell en un 4–10% per dècada. Això suggereix que els models climatològics són molt més complexos del que es pensa i que l'escalfament depèn de moltes més variables que les activitats antropogèniques.

Les principals hipòtesis alternatives que s'han proposat sobre les causes de l'escalfament global antropogènic es basen en els següents factors:

1. Les variacions del flux de la radiació solar, rajos còsmics, la tectònica de plaques i l'activitat volcànica.

2. L'escalfament global seria la conseqüència de la sortida del període de refredament de la Petita Edat del Gel (1350-1850) i l'entrada a un nou període càlid similar a l'Òptim Medieval (950-1250).
3. L'escalfament està dins el rang de variació natural d'un règim atmosfèric de tipus hivernacle (*Icehouse*), com el que ara ens trobem, amb alternança de períodes glacials més freds i períodes interglacials de millora climàtica, controlats pels cicles de les variacions orbitals de La Terra.
4. La tendència global de l'escalfament no ha estat establerta amb claredat i els models numèrics no poden simular tots els aspectes i expressions del clima, atès que el clima és un sistema molt complex i caòtic.

No obstant això, el lleuger escalfament mitjà de l'atmosfera dels últims 140 anys és un fet, i és probable que tingui una part d'influència humana, atès que s'ha passat de ser 2.000 milions d'éssers humans, a principis de segle, a ser-ne més de 6.500 milions a finals. És possible que l'atmosfera també hagi notat els efectes de la nostra proliferació, però és poc plausible i ingenu pensar que d'ara endavant, simplement controlant el CO₂ i els gasos d'efecte hivernacle, podem gestionar l'evolució del clima.

Els resultats dels estudis paleoclimàtics dels darrers 541 Ma de la història de la Terra (Fanerozoic) ens ensenyen que els dos grans motors de l'evolució del clima a gran escala han estat l'astronomia i la geologia, a través dels processos vinculats a la radiació còsmica espacial, les variacions solars, les variacions orbitals de la Terra, la tectònica de plaques i l'activitat volcànica. Les concentracions de CO₂ en el passat de la Terra gairebé sempre han estat molt superiors a les actuals. D'acord amb l'efecte d'hivernacle potencial del CO₂, la Terra hauria d'haver estat

extremadament calenta al llarg dels 541 Ma de l'eó Fanerozoic. Però en comptes d'això, les reconstruccions de les temperatures indiquen que no eren gaire més altes que les actuals. Conseqüentment, doncs, hi ha d'haver hagut altres factors, a més dels gasos d'efecte hivernacle, que hagin influenciat les temperatures de la Terra dels climes antics.



❧ BIBLIOGRAFIA

- Agassiz, L. (1822). On the erratic blocks of the Jura. *Edinburgh New Philosophical Journal*, 24: 176-179.
- Bádenas, B., Salas, R., Aurell, M. (2004). Three orders of regional sea-level changes control facies and stacking patterns of shallow platform carbonates in the Maestrat Basin (Tithonian-Berriasian, NE Spain) *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)* 93:144–162
- Barron, E. J., Washington, (1982). Cretaceous climate: A comparison of atmospheric simulations with the geologic record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 40: 103.133.
- Berner, R.A., Kothavala, Z. (2001). GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 301:182–204.
- Bover-Arnal, T., Salas, R., Guimerà, J., Moreno-Bedmar, J.A. (2014). Deep incision on an Aptian carbonate succession indicates major sea-level fall in the Cretaceous. *Sedimentology* 61: 1558-1593
- Bover-Arnal, T., Salas, R., Moreno-Bedmar, J.A. and Bitzer, K. (2009). Sequence stratigraphy and architecture of a late Early-Middle Aptian carbonate platform succession from the western Maestrat Basin (Iberian Chain, Spain). *Sedimentary Geology*, 219: 280-301.
- Bradley, R.S. (1999). *Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary*
- Cacho, I., Grimalt, J.O., Pelejero, C., Canals, M., Sierro, F.J., Flores, J.A., Shackleton, N. (1999). Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in the Alboran Sea paleotemperatures. *Paleoceanography*, 14: 698-705.

- Cavalier-Smith, T (2006). Cell evolution and Earth history: stasis and revolution: *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* , 361 (1470): 969-1006.
- Cors, J., Heimhofer, U., Adatte, T., Hochuli, P. A., Huck, S., Bover-Arnal, T. (2014). Climatic evolution across oceanic anoxic event 1a derived from terrestrial palynology and clay minerals (Maestrat Basin, Spain). *Geological Magazine*. doi:10.1017/S0016756814000557
- Cronin, TM (2013). *Principles of paleoclimatology*.
- Darwin, C. R. (1842). Notes on the effects produced by ancient glaciers of Caernarvonshire, and on the boulders transported by floating ice. *London, Edinburg, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21: 180-188.
- Exon, N., Kennett, J., Nürnberg, D., (2002). Drilling reveals climatic consequences of Tasmanian gateway opening, *Eos*, 83 (23): 253-259
- Fisher, A.G. (1984). Two Phanerozoic supercycles. In: Berggren, W.A., Van Couvering, J.A. (Eds.), *Catastrophes and Earth History*. Princeton University Press, Princeton, pp. 129-150.
- Goosse, H., Barriat, P.Y., Lefebvre, W., Loutre, M.F., Zunz, V. (2015). Introduction to climate dynamics and climate modeling. Online textbook available at <http://www.climate.be/textbook>.
- Gornitz, V. (2009). *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments*
- Gradstein, F., Ogg, J. G., Hilgen, F. J. (2012). On The Geologic Time Scale. *Newsletters on Stratigraphy*, 45(2):171-188.
- Hays, J.D.; Imbrie, J.; Shackleton, N. J. (1976). Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194: 1121-1132.

- Immenhauser, A. (2005). High-rate sea-level change during the Mesozoic: New approaches to an old problem. *Sedimentary Geology*, 175, 277-296.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Larson, R.L. (1991). Geological consequences of superplumes. *Geology*, 19: 963-966.
- Larson, R.L. and Erba, E. (1999). Onset of the mid-Cretaceous greenhouse in the Barremian-Aptian: Igneous events and the biological, sedimentary, and geochemical responses. *Paleoceanography*, 14: 663-678.
- Lisiecki, L.E., Raimo, M.E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $d^{18}O$ records. *Paleoceanography*, 20, PA2007. DOI 10.1029/2005PA001164.
- Lobo, F. J., Ridente, D. (2013). Milankovitch cyclicity in modern continental margins: stratigraphic cycles in terrigenous shelf settings. *Boletín Geológico y Minero*, 124(2):169-185.
- Lovelock, J. E. (1983). *Gaia: una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. Hermann Blume, Barcelona. *Gaia: A New Look at Life on Earth* 1979.
- Lovelock, J. E. (1993). *Las edades de Gaia*. Tusquets Editores. Barcelona. *Ages of Gaia* 1988.
- Lui, J., Curry, J. A., Martinson, D.G. (2004). Interpretation of recent Antarctic sea ice variability", *Geophysical Research Letters*, L02205.

- Menegatti, A.P., Weissert, H., Brown, R.S., Tyson, R.V., Farimond, P., Strasser, A. and Caron, M. (1998). High-resolution $\delta^{13}\text{C}$ stratigraphy through the early Aptian "Livello Selli" of the Alpine Tethys. *Paleoceanography*, 13: 530-545.
- Milankovitch, M. (1941). *Kanon der Erdbestrahlungen und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Belgrade.
- Miller, K.G., (2009). Palaeoceanography: Broken greenhouse windows. *Nature Geoscience* 2: 465-466.
- Parrish, J. T. (1982). Upwelling and petroleum source beds, with reference to the Paleozoic. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66: 750-774.
- Parrish, J. T. (1998). *Interpreting Pre-Quaternary Climate from the Geologic Record*. Columbia University Press, 388 pp.
- Parrish, J. T., Curtis, R. L. (1982). Atmospheric circulation, upwelling, and organic-rich rocks in the Mesozoic and Cenozoic Eras. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 40: 31-66.
- Petit, J. R. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 343: 56-58.
- Petit, J. R.; Basile, I.; Leru Yet, A. (1997). Four climate cycles in Vostok ice cores. *Nature*, 387: 359-360. cores. *Nature*, 387: 359-360.
- Plint, A.G.(1991). High-frequency relative sea-level oscillations in Upper Cretaceous shelf clastics of the Alberta foreland basin: Possible evidence for a glacio-eustatic control? *Special Publications of the International Association of Sedimentologists* 12: 409-428.
- Price, G.D. (1999). The evidence and implications of polar ice during the Mesozoic. *Earth-Science Reviews*, 48: 183-210.

- Prohom, M. J. (2003). Incidència de les grans erupcions volcàniques en el clima de la Península Ibèrica. Tesis doctoral Universitat de Barcelona, 226 pp.
- Retallack, G. J. (1983). A paleopedological approach to the interpretation of terrestrial sedimentary rocks: The Mid Tertiary fossil soils of Badlands National Park, South Dakota. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 823-840.
- Robert C., Chamley H. (1992) Late Eocene-early Oligocene evolution of climate and marine circulation: deep sea clay mineral evidence, in: *The Antarctic Paleoenvironment: a perspective on global change*, part one, ed. AGU, 97-117.
- Royer, D.L., Berner, R.A., Montanez, I.P., Tabor, N.J., Beerling, B.J. (2004). CO₂ as a primary driver of Phanerozoic climate. *GSA Today*, 14: 4-10.
- Saltzman, B. (2001). *Dynamical paleoclimatology: generalized theory of global climate change*.
- Scotese, C.R. (2002) PALEOMAP Project: Earth History (paleogeographic maps) <http://www.scotese.com/climate.htm> Dept. Geol., Univ. Texas, Arlington.
- Sher H., Martin, E. (2006). Timing and climatic consequences of the opening of Drake Passage, *Science*, 312, 428-430.
- Siegenthaler, U., Stocker, T. F., Monnin, E., Lüthi, D., Schwander, J. Stauffer, B., Raynaud, D., Barnola, J-M., Fischer, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J. (2005). Stable Carbon Cycle-Climate Relationship during the Late Pleistocene. *Science*, 310: 1313-1317.
- Skelton, P. W., ed. (2006) *The Cretaceous World*. Cambridge University Press, 360 pp.
- Solé de Porta, N., Salas, R. (1994). Conjuntos microflorísticos del Cretácico inferior de la Cuenca del Maestrazgo. Cordi-

llera Ibérica Oriental (NE de España). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 18: 355-368.

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt (2007). *Technical Summary*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Svensmark, H. (2007). Cosmoclimatology: a new theory emerges. *Astronomy & Geophysics*, 48: 1.18-1.24

Svensmark, H., Enghoff, M. B., Pepke Pedersen, J.O. (2013). Response of cloud condensation nuclei (> 50 nm) to changes in ion-nucleation. *Physics Letters A*, 377: 2343–2347

Uriarte, A. (2009). *Historia del clima de la Tierra*. Gobierno Vasco, Departamento del Interior, 403 pp.

Zachos, J.C., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. (2001). Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292: 686-693.



Discurs de contestació

Excm. Sr. Dr. Enrique Tierno Pérez-Relaño

❧ SALUDOS

*Excmo. Sr. Presidente de esta Reial Acadèmia
Excmas. Sras. y Sres. Académicos
Sras. y Sres.*

En este foro interdisciplinar que es la Real Academia de Doctors, sean mis primeras palabras unas de agradecimiento al Presidente de esta Reial Acadèmia, el Excmo. Sr. Dr. D. Alfredo Rocafort Nicolau, por el privilegio que supone poder leer este discurso de respuesta al nuevo Académico, el Dr. Ramón Salas Roig.

El profesor Salas nos trae a esta docta Casa 35 años de vida académica y -permítame observar- que 35 años de intensa dedicación a la investigación y a la docencia, si ya son difíciles de resumir en un currículum que se hace interminable, aún resulta más complicado intentar tratar de estos años en unas pocas palabras.

Pero voy a intentarlo y decirles que, tras su premiada tesis doctoral en 1987, el Prof. Salas lleva a sus espaldas la dirección de un buen número de tesis doctorales, 130 publicaciones académicas, 195 comunicaciones a Congresos y ha sido citado más de 1700 veces en innumerables revistas españolas, catalanas y extranjeras.

En paralelo a esta vertiente académica, han transcurrido buen número de Congresos y reuniones científicas de todo tipo en las que ha tomado parte, tanto nacionales como internacionales, bien presidiéndolas, bien organizándolas o bien formando parte de sus respectivos Comités Científicos.

Por cierto, el último que aparece en la larga lista ha tenido lugar este mismo mes, en Lisboa

Como investigador, ha tomado parte en muy diversos trabajos de campo dentro y fuera de la Península. De entre ellos me ha llamado la atención uno en particular, aquel que tuvo lugar en el año 1999 bajo los auspicios de la Universidad Nacional de la Plata (Argentina); el trabajo comparaba la evolución mesozoica de una Cuenca de Rift (Neuquén) en Argentina con el Sistema de Rift en la Cadena Ibérica española.

No ha olvidado nuestro invitado la colaboración con el mundo empresarial mediante cursos de formación, seminarios de campo y proyectos de investigación y desarrollo para diversas compañías como Exxon Mobile (2008-2011), Repsol Exploración (2008-2015), Maersk Oil (2011) o Total (2014).

Después de este breve esbozo de su trayectoria académica, no puede extrañarnos el magnífico discurso que hemos escuchado y que este ponente debe intentar glosar ante ustedes, tarea que no le va ser nada fácil dada su categoría académica y el elevado grado de especialización que presenta el trabajo.

❧ DISCURSO DE CONTESTACIÓN

Parece razonable afirmar que si un lego en la materia que nos ocupa, un trabajo de Paleo-climatología, escucha hablar de esta disciplina, lo primero que se le viene la cabeza son la multitud de referencias mediáticas que todos los días nos hablan acerca del calentamiento global, de la destrucción de la capa de ozono, del deshielo polar y, en general, también se preguntará acerca de cómo está afectando la actividad humana a la climatología de nuestro planeta y sobre las consecuencias, más o menos inmediatas, que traerá consigo..

Tomemos como ejemplo el calentamiento global. Tres preguntas parecen obvias: En la historia de nuestro planeta ¿han ocurrido antes cambios de este tipo? ¿Cuáles han sido las causas de estos cambios en el pasado y cuáles son ahora? Y en estas últimas *¿qué importancia tienen, tanto en términos absolutos como relativos, las actividades humanas?*

Si podemos responder aunque sólo sea de manera aproximada a estas preguntas, podremos comenzar a bosquejar un escenario que nos permita indagar *si las variables que en el pasado causaron cambios climáticos, hasta qué punto siguen actuando y dando lugar al clima actual*. Además, alcanzado un cierto umbral de precisión, esto es, un margen de error aceptable, esta información debería permitirnos extrapolar qué es lo que va a ocurrir en el corto plazo geológico.

De esta manera y una vez más, el estudio del pasado nos permitiría modelar los escenarios climáticos más probables a corto y medio plazo, si bien la complejidad y no linealidad de los sistemas en estudio, por no hablar de una escala temporal en miles de millones de años, dificultan extraordinariamente el problema.

El excelente trabajo del Dr. Salas nos ha llevado por muy diversos escenarios a lo largo de la extensa escala temporal geológica terrestre, deteniéndose en aquellas Eras y Períodos mejor estudiados y conjugando en ellos las diversas interacciones que han ido transformando el clima del planeta Tierra, interacciones tanto *endógenas* (entre los subsistemas terráqueos: atmósfera, litosfera, etc.), como *exógenas* (gravitatorias, energéticas) procedentes del exterior interplanetario.

Estas interacciones han ido acompañadas de sus correspondientes cambios climáticos y éstos han ido quedando registrados en múltiples categorías de indicadores naturales (los así llamados “proxies”). Una enumeración y clasificación temporales de estos indicadores, su importancia relativa y su medición experimental, aportan los datos que deben permitirnos modelar el pasado. A partir de aquí, juega un papel muy importante la continuidad de los datos recolectados durante los últimos siglos sobre los subsistemas climáticos terrestres.

El Dr. Salas deja claro que *el objetivo final de toda esta masa acumulativa de datos debe servir para la construcción de modelos que, describiendo la evolución sufrida, intenten predecir el futuro climático del planeta*. Y estas predicciones deben incorporar no sólo los fenómenos naturales (las interacciones de las que antes hablábamos), *sino también el peso relativo que tienen las actividades humanas y su interacción con el medio ambiente*. Teniendo en cuenta el ritmo de desarrollo tecnológico y el consumo energético-ambiental de todo tipo que caracteriza a la especie humana, es este un factor fundamental a tener en cuenta.

El trabajo mantiene esta línea argumental subyacente a todos los detalles técnicos y el Dr. Salas *termina dándonos su opinión acerca de la importancia relativa que puede tener el calentamiento global como un fenómeno más en la evolución climática del planeta*.

En lo que sigue, *voy a intentar exponer ante ustedes las enormes dificultades con que se enfrentan a medio plazo la Paleo-climatología y su compañera inseparable, la Paleo-geografía*, ambas caracterizadas por reunir un enorme número de variables y parámetros, cuyas interacciones dan lugar a sistemas dinámicos a menudo no lineales y con comportamientos caóticos.

Para ello voy a comenzar comentando la construcción de modelos climáticos y, acto seguido, enumerar algunas de las principales variables y parámetros que entran en juego.

La acumulación de datos cuando no se tienen modelos verificables

A la hora de construir modelos, entra en juego un viejo aserto científico, un mantra que pusieron en circulación los físicos teóricos allá por la segunda mitad del siglo pasado:

Los datos científicos describen, los modelos científicos explican.

Esta afirmación puede parecer una perogrullada, pero en la Historia de la Ciencia se ha comprobado multitud de veces que *un grupo puntual de datos ha sido erróneamente interpretado como resultado de un proceso, infiriendo una relación causal inexistente*. En otras palabras, la acumulación de datos, por muy selectiva que sea, sin disponer de un modelo teórico ‘a priori’, exige una cuidadosa manipulación tanto conceptual como numérica *y no intentar pasar de la descripción a la explicación sin un modelo verificable*.

A menudo esto es debido a no tomar en cuenta, o no poder integrar, todos los niveles de interacción temporal que ocurren en el sistema. Tanto la Paleo-climatología como la Paleo-geografía

han corrido y corren este peligro, *debido al gran número de parámetros y variables que han de manejar y encajar en períodos muy dilatados de tiempo.*

Como ejemplo de lo anterior, algo diré más adelante acerca de las inferencias que relacionan el calentamiento global con la concentración de ciertos gases, pero mi interés radica ahora en conceptualizar el trabajo están llevando a cabo los especialistas en las ramas de paleo-climatología y paleo-geografía y poner de relieve algunas de las dificultades con las que se encuentran.

El problema conceptual que plantean la Paleo-climatología y la Paleo-geología

¿Qué entiendo por conceptualizar? Simplemente *definir desde sus raíces el problema científico que plantean estas disciplinas y analizar el cómo se está estudiando, la metodología de la investigación paleo-climática.*

No son nuevos los modelos que han intentado explicar las variaciones climáticas; al comienzo fueron modelos conceptuales, deductivos, y se ocuparon de las variaciones sufridas por el clima terrestre en el Cuaternario. Hace más de un siglo, en 1897, T. S. Chamberlain construyó un *modelo conceptual* para explicar cambios climáticos a largo plazo que todavía hoy tiene algunos puntos sorprendentemente modernos.

Pero al día de hoy un “*modelo climático*” suele consistir en una complicada computación numérica que representa los procesos físicos involucrados en el subsistema climático bajo estudio (p. ej., la atmósfera en una Era geológica determinada) e intenta

explicarlos formulando “a posteriori” una hipótesis de trabajo, en este caso con su verificabilidad limitada al sistema estudiado. *En general, tienden a ser modelos estadístico-inductivos.*

Los modelos conceptuales, deductivos, siguen siendo fundamentales en la investigación climática, pero parece demasiado pronto, en función de los datos hasta ahora recogidos y procesados por esta disciplina, para poder establecer un conjunto satisfactorio de premisas.

En todo caso, siempre que haya que interpretar datos climáticos, bien incorporándolos a sus respectivas variables, bien parametrizándolos, *necesitaremos referirnos a algún tipo de modelo, ya sea cuantitativo-inductivo o conceptual-deductivo.*

Los datos, el conjunto de datos con consecuencias climatológicas que hayamos recogido, nos describirán cómo ha sido el clima y de qué forma ha cambiado, *pero los datos por sí solos no nos pueden dar una explicación unívoca de por qué ha surgido un estado climático en particular, ni de por qué ha cambiado.*

Esto se debe a que la mayor parte de las variaciones climáticas (en particular las de origen endogénico terrestre), se originan en una multiplicidad de causas posibles, ordenadas temporal y jerárquicamente (p. ej., suele haber más de una causa para crear sequía en una región determinada). A esto se añade que:

- a) *Las interacciones de los subsistemas medioambientales* normalmente tienen respuestas no-lineales y no cumplen el principio de superposición, esto es, las magnitudes de los efectos climáticos no son proporcionales a las magnitudes de las causas.

- b) *La extensión de la escala temporal en la que actúan* estos fenómenos dinámicos, ~ 4.600 Ma y la dificultad en encajar los Períodos/Épocas/ Edades en los que actúa.
- c) Además, hay *múltiples caminos de causa-efecto* que pueden dar lugar a la misma respuesta en un indicador climático (p. ej., la sequía); esta indeterminación en la “*señal climática*” es posible refinarla, priorizando estadísticamente las causas, pero no eliminarla.

El escenario físico global: un sistema abierto

Vamos a ocuparnos ahora del escenario teórico que debe de servir como punto de partida a *cualquier tipo de modelo climático terrestre, ya sea conceptual o numérico*.

Imaginemos una superficie en el espacio con centro en el Sol, compuesta por todos aquéllos puntos en los que la presión del plasma gaseoso de protones y electrones que emite el Sol a unos 400 km/seg, el viento solar, es igual a la presión del viento interestelar, de los gases emitidos por las estrellas. Esta superficie, denominada *heliopausa*, se puede aproximar mediante una esfera que tiene como diámetro $\sim 100 - 120$ UA, equivalentes a 15.000 millones de kilómetros (13,6 horas-luz). Esta es la aproximación más correcta para definir el *diámetro de nuestro sistema planetario y por tanto, la frontera con el espacio interestelar*, fijada en el 2013, mediante los datos del *Voyager 1*, en 121 UA.

Concéntrica a ella, imaginemos otra esfera que tenga como diámetro aproximado el del sistema planetario Tierra-Luna-Sol, unos 300 millones de kilómetros, equivalentes a 2 UA (8 m 19 s-luz).

Asumiremos que estas dos esferas concéntricas conforman un sistema abierto (OSM), es decir, a través de estas imaginarias fronteras, de estas dos “cáscaras” concéntricas, podrán pasar todo tipo de materia (p. ej., meteoritos) y campos que interaccionen con nuestro planeta, ya sean electromagnéticos o gravitatorios.

Y, como bien sabemos los físicos, en cuanto un sistema bajo estudio tiene sus fronteras *abiertas a los intercambios energéticos*, se suele complicar el instrumental matemático de cualquier modelo que se intente desarrollar para explicar comportamientos dentro del sistema.

Los rayos cósmicos externos al subsistema Tierra-Luna-Sol

El volumen de espacio comprendido entre ambas esferas estará ocupado por: los restantes planetas, otros muchos cuerpos celestes, campos de energía de diversas características, partículas cósmicas, etcétera.

Pero lo que más nos interesa para nuestro estudio, por ser de importancia para la climatología, son los rayos cósmicos que también comparten este volumen. Éstos rayos cósmicos, llamados *primarios*, están compuestos en un 99% de ciertos átomos como el hidrógeno o el helio, cuyos núcleos atómicos han perdido sus capas electrónicas, quedando los protones y partículas α . El 1% restante se compone de ciertos núcleos pesados y antimateria en forma de positrones y antiprotones.

Como vemos, el nombre de rayos cósmicos induce a confusión, pues se trata de partículas. Pueden ser de origen galáctico (GCR, de baja densidad energética) o de origen extra galáctico, fuera de la Vía Láctea (EGCR, de muy baja densidad energética).

En ambos casos tienen que poder atravesar esas fronteras imaginarias que hemos trazado con geometría esférica y llegar a nuestro planeta, *luego no nos es posible comenzar a trabajar con un sistema abierto*.

Una vez que entramos en nuestro sistema encontramos, además de éstos rayos cósmicos procedentes del espacio exterior, otras fuentes de radiación. Repasémoslas.

Las radiaciones propias del subsistema Tierra-Luna-Sol

En la esfera interior, que tiene como radio la distancia entre la Tierra y el Sol encontramos, aparte de otros cuerpos y materiales celestes, los rayos cósmicos primarios procedentes del espacio que se encuentra entre las esferas y de los que antes hemos hablado, pero además:

- *Rayos cósmicos secundarios*, generados por las interacciones de los rayos cósmicos primarios (en un 87% protones energéticos) con las moléculas que componen la atmósfera terrestre, fundamentalmente O_2 y N_2 a unos 20 km de altura (en la estratosfera).

En estas colisiones se generan cascadas energéticas que incluyen rayos X, muones, protones, partículas alfa, priones, electrones y neutrones. Un factor adicional es la ionización que sufren estos átomos y que puede dar lugar a una variedad de reacciones físico-químicas atmosféricas, algunas de las cuales podrían dar lugar a efectos climáticos. Como ejemplos de los desarrollos teóricos más conocidos intentando justificar estos efectos climáticos, tenemos los centrados en:

- Estudiar los mecanismos que dan lugar a la disminución del ozono (O_3) en la atmósfera. Los modelos de referencia también incluyen entre sus variables el comportamiento de los cloro-fluoro-carbonos (CFC).
- Otros modelos consideran que con el mayor número de iones producido por los rayos cósmicos, aumenta la probabilidad de generar aerosoles, partículas en suspensión de $\sim 1 \text{ nm}$ (10^{-9} m) de tamaño. Estas micro partículas tienden a condensar ácido sulfúrico y vapores orgánicos hasta alcanzar el tamaño adecuado ($> 50 \text{ nm}$), para convertirse en núcleos de condensación nubosa, que darían lugar a gotitas de nube ($10 \text{ }\mu\text{m}$, 10^{-6} m) cuando la humedad relativa alcance el 100%.

Sobre la base de este último tipo de reacciones, desde 1970 se han postulado diversas teorías acerca de la influencia que ejercen los *rayos cósmicos galácticos (GCR)* sobre la *generación de nubes terrestres y, por tanto, sobre el calentamiento global*.

Concretamente, se especula con que nuestro Sistema Solar, al atravesar los brazos en espiral de nuestra galaxia, *estaría expuesto a un incremento de los rayos cósmicos primarios procedentes de una mayor densidad de supernovas regionales* y también a un incremento de las turbulencias magnéticas interestelares.

Los protones de estos rayos interaccionarían con la atmósfera terrestre, creando un mayor número de partículas secundarias, en este caso iones, que a su vez darían lugar a un incremento en el número de nubes a baja altitud, *según la reacción antes descrita*. Las nubes bloquearían la luz del sol y enfriarían la temperatura del planeta.

Ahora bien, los experimentos más recientes (CLOUD, en el CERN) *no dan pie a establecer una correlación válida entre los rayos cósmicos y la creación de nubes, por lo que cualquier relación causa efecto en este sentido, no está por ahora validada.*

Otras fuentes de rayos cósmicos que interaccionan con la atmósfera terrestre son:

- *El viento solar*, de baja energía y alta densidad ($10^{-7}/\text{cm}^2\text{-segundo}$)
- *Erupciones cromosféricas* solares de altas energías y altas densidades. Son las que tienen lugar en *la cromosfera solar*, una capa delgada (2.000 -5.000 km de espesor) de la atmósfera solar.
- *Radiación procedente de los cinturones Van Halen*, una capa de partículas con carga eléctrica que se encuentran atrapadas en la *magnetosfera* por el campo magnético terrestre.

El papel que juega la suma total ("*cosmic-ray flux*") de estos flujos de rayos cósmicos está sometido a debate por la comunidad científica, *sin resultados convincentes para escalas de tiempo globales.*

Un factor importante, endógeno a la superficie terrestre y directamente relacionado con las radiaciones que llegan a ella, es el *albedo o porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.*

Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la Tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol. Es decir, un albedo bajo calienta el planeta; uno alto lo enfría.

Sus variaciones vienen dadas por factores muy diversos de origen endogénico, geológico (p. ej., la tectónica de placas, la deriva continental o la actividad volcánica); también por el factor antropogénico (gases invernadero).

Las más de las veces el albedo es un parámetro sensible y complicado de fijar en los modelos numéricos más complejos, pero importante, p. ej., a la hora de reproducir los períodos de glaciación, en conjunción con las variaciones orbitales que veremos seguidamente.

Hemos pasado revista a los principales factores externos que han interaccionado con nuestro planeta a lo largo de toda su escala geológica de tiempos, desde el eón *Hadeico* (en el origen de la Tierra, ~ 4.600 millones de años) hasta el *Holoceno* en el que nos encontramos, dentro del *Cuaternario*. Pero nos faltan todavía por enumerar los factores planetarios internos al sistema Tierra-Luna-Sol los cuales, en una primera aproximación, *vamos a limitar a las variaciones orbitales de nuestro planeta.*

La órbita terrestre. Algunas de sus características

Las variaciones que experimenta la órbita terrestre parecen ser una de las principales causas de los períodos glaciales e interglaciales. Repasémoslas.

En el plano de la órbita básica de nuestro planeta (su *eclíptica*) encontramos una serie de fenómenos que se repiten periódicamente en el tiempo, causantes de que la cantidad media de radiación que recibe cada hemisferio fluctúe a lo largo del tiempo, esto es, *dando lugar a que varíe la insolación media.*

Son cuatro los cambios básicos que ocurren en la órbita terrestre, cambios que -como hemos dicho- se repiten cíclicamente en períodos de distinta duración.

La suma de las influencias climáticas de tres de ellos sobre la Tierra (*los debidos a la excentricidad, la oblicuidad axial y la precesión*), un capítulo clásico de la Paleo-climatología, fue estudiada por *Milankovitch* y publicada en 1920. Examinemos estos cambios.

- a) Variaciones en la *excentricidad*: la órbita elíptica en la que se mueve la Tierra con respecto al Sol cambia su excentricidad cambiando su distancia al Sol y con ella la energía solar que llega la Tierra y el clima. La periodicidad es de 413.000 años, pero aparecen sub-ciclos de 95.000 a 136.000 años. El de 100.000 años es el más citado y creo que estudiado.
- b) Variaciones en la *oblicuidad*: son cambios en el ángulo del eje de la Tierra con el plano de su órbita, aproximadamente de 2° cada 41.000 años. Este fenómeno produce grandes alteraciones en las estaciones del año.
- c) Variaciones en la *precesión*: con ellas cambia la orientación del polo Norte en el espacio, describiendo un cono completo cada 26.000 años. Da lugar a cambios climáticos importantes, al variar la posición de los solsticios de verano e invierno, haciendo que ocurran en estaciones diferentes a las actuales.

Asociado a la precesión terrestre aparece otro fenómeno: el de la *Nutación*. La Tierra al no ser esférica, experimenta un vaivén en forma de pequeños bucles con períodos de 18,6 años, debido a la atracción que ejerce la Luna sobre el abultamiento terráqueo.

- d) Oscilaciones del plano de la eclíptica: con un ciclo de 70.000 años con respecto al plano fijo, parecido al período de 100.000 años correspondiente a las variaciones en la excentricidad.

Cada cierto tiempo estos 4 factores se suman (~ 100.000 años) y, aunque por sí solas estas variaciones orbitales no alcanzan a desencadenar un período climático específico, p. ej. el glacial, sí parecen formar parte importante, si no imprescindible, de su inicio.

El siguiente grupo de factores paleo-climáticos a integrar en un modelo serían endógenos, lo encontraríamos en el ecosistema Tierra y está formado por la atmósfera y demás subsistemas climáticos (hidro-, crio-, lito- y bio- esferas). Pero creo que no necesito extenderme más.

Conclusión y felicitación

Les decía al comienzo de mi exposición que iba intentar poner de manifiesto, insistir en la enorme complejidad de los sistemas estudiados por la Paleo -climatología en el magnífico trabajo que nos ha presentado el Dr. Salas Roig.

He bosquejado algunas de las grandes dificultades que, debidas a esta complejidad, han encontrado y seguirán encontrando los modelos que intentan, en base a la reconstrucción de nuestro dilatadísimo pasado climático, predecir comportamientos climáticos futuros.

Con los aspectos teórico-prácticos que les he ido narrando, aunque sólo haya sido de manera superficial, espero haberlo conseguido.

Reitero mi felicitación al Dr. Salas por el brillante trabajo que nos ha presentado y me congratulo como miembro de esta Real Acadèmia por la fecunda aportación que va a suponer su incorporación como Académico de número, pues se que pondrá a disposición de esta docta Casa sus conocimientos e incansable hacer científico.

Señoras y señores, muchas gracias por su atención.



PUBLICACIONES DE LA REIAL ACADÈMIA DE DOCTORS

Directori 1991

Los tejidos tradicionales en las poblaciones pirenaicas (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Eduardo de Aysa Satué, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep A. Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història) 1992.

La tradición jurídica catalana (Conferència magistral de l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Joan Pintó i Ruiz, Doctor en Dret, en la Solemne Sessió d'Apertura de Curs 1992-1993, que fou presidida per SS.MM. el Rei Joan Carles I i la Reina Sofia) 1992.

La identidad étnica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Ángel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Pou d'Avilés, Doctor en Dret) 1993.

Els laboratoris d'assaig i el mercat interior; Importància i nova concepció (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Simón i Tor, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1993.

Contribución al estudio de las Bacteriemias (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent II.Im. Sr. Miquel Marí i Tur, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Sr. Manuel Subirana i Cantarell, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1993.

Realitat i futur del tractament de la hipertròfia benigna de pròstata (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia i contestació per l'Excm. Sr. Albert Casellas i Condom, Doctor en Medicina i Cirurgia i President del Col·legi de Metges de Girona) 1994.

La seguridad jurídica en nuestro tiempo. ¿Mito o realidad? (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Ángel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1994.

La transició demogràfica a Catalunya i a Balears (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Tomàs Vidal i Bendito, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ferrer i Bernard, Doctor en Psicologia) 1994.

L'art d'ensenyar i d'aprendre (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Agustín Luna Serrano, Doctor en Dret) 1995.

Sessió necrològica en record de l'Excm. Sr. Lluís Dolcet i Boxeres, Doctor en Medicina i Cirurgia i Degà-emèrit de la Reial Acadèmia de Doctors, que morí el 21 de gener de 1994. Enaltiren la seva personalitat els acadèmics de número Excms. Srs. Drs. Ricard Garcia i Vallès, Josep Ma. Simón i Tor i Albert Casellas i Condom. 1995.

La Unió Europea com a creació del geni polític d'Europa (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jordi Garcia-Petit i Pàmies, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Llort i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques) 1995.

La explosión innovadora de los mercados financieros (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Emilio Soldevilla García, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació per l'Excm. Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret) 1995.

La cultura com a part integrant de l'Olimpisme (Discurs d'ingrés com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Joan Antoni Samaranch i Torelló, Marquès de Samaranch, i contestació per l'Excm. Sr. Jaume Gil Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques) 1995.

Medicina i Tecnologia en el context històric (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Ángel Aguirre Baztán) 1995.

Els sòlids platònics (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excma. Sra. Pilar Bayer i Isant, Doctora en Matemàtiques, i contestació per l'Excm. Sr. Ricard Garcia i Vallès, Doctor en Dret) 1996.

La normalització en Bioquímica Clínica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Xavier Fuentes i Arderiu, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Sr. Tomàs Vidal i Bendito, Doctor en Geografia) 1996.

L'entropia en dos finals de segle (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques, i contestació per l'Excm. Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques) 1996.

Vida i música (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Carles Ballús i Pascual, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Espadaler i Medina, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1996.

La diferencia entre los pueblos (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Sebastià Trías Mercant, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Ángel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

L'aventura del pensament teològic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teologia, i contestació per l'Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1996.

El derecho del siglo XXI (Discurs d'ingrés com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Dr. Rafael Caldera, President de Venezuela, i contestació per l'Excm. Sr. Ángel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

L'ordre dels sistemes desordenats (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm. Sr. Joan Bassegoda i Novell, Doctor en Arquitectura) 1997.

Un clam per a l'ocupació (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Isidre Fainé i Casas, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Joan Bassegoda i Nonell, Doctor en Arquitectura) 1997.

Rosalía de Castro y Jacinto Verdaguer, visión comparada (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jaime M. de Castro Fernández, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

La nueva estrategia internacional para el desarrollo (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Santiago Ripol i Carulla, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

El aura de los números (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins,

Canals i Ports, i contestació per l'Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1998.

Nova recerca en Ciències de la Salut a Catalunya (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excma. Sra. Anna Maria Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 1999.

Dilemes dinàmics en l'àmbit social (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Albert Biayna i Mulet, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 1999.

Mercats i competència: efectes de liberalització i la desregulació sobre l'eficàcia econòmica i el benestar (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Amadeu Petitbó i Juan, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Jaime M. de Castro Fernández, Doctor en Dret) 1999.

Epidemias de asma en Barcelona por inhalación de polvo de soja (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excma. Sra. Ma. José Rodrigo Anoro, Doctora en Medicina, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Llorc i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques) 1999.

Hacia una evaluación de la actividad cotidiana y su contexto: ¿Presente o futuro para la metodología? (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excma. Sra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres (Psicologia) i contestació per l'Excm. Sr. Josep A. Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història) 1999.

Directorio 2000

Génesis de una teoría de la incertidumbre. Acte d'imposició de la Gran Creu de l'Orde d'Alfons X el Savi a l'Excm. Sr. Dr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Financeres) 2000.

Antonio de Capmany: el primer historiador moderno del Derecho Mercantil (discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Xabier Añoberos Trías de Bes, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Santiago Dexeus i Trías de Bes, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2000.

La medicina de la calidad de vida (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Luís Rojas Marcos, Doctor en Psicologia, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Ángel Aguirre Baztán, Doctor en psicologia) 2000.

Pour une science touristique: la tourismologie (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Dr. Jean-Michel Hoerner, Doctor en Lletres i President de la Universitat de Perpinyà, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques) 2000.

Virus, virus entèrics, virus de l'hepatitis A (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Albert Bosch i Navarro, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2000.

Mobilitat urbana, medi ambient i automòbil. Un desafiament tecnològic permanent (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Pere de Esteban Altirriba, Doctor en Enginyeria Industrial, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Carlos Dante Heredia García, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

El rei, el burgès i el cronista: una història barcelonina del segle XIII (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. José Enrique Ruiz-Domènec, Doctor en Història, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

La informació, un concepte clau per a la ciència contemporània (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Salvador Alsius i Clavera, Doctor en Ciències de la Informació, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2001.

La drogaaddicció com a procés psicobiològic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Miquel Sánchez-Turet, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm. Sr. Pedro de Esteban Altirriba, Doctor en Enginyeria Industrial) 2001.

Un univers turbulent (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Jordi Isern i Vilaboy, Doctor en Física, i contestació per l'Excm. Sra. Dra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Psicologia) 2002.

L'envelliment del cervell humà (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Dr. Jordi Cervós i Navarro, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Josep Ma. Pou d'Avilés, Doctor en Dret) 2002.

Les telecomunicacions en la societat de la informació (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Ángel Cardama Aznar, Doctor en Enginyeria de Telecomunicacions, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2002.

La veritat matemàtica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Josep Pla i Carrera, doctor en Matemàtiques, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 2003.

L'humanisme essencial de l'arquitectura moderna (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Helio Piñón i Pallarés, Doctor en Arquitectura, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Xabier Añoveros Trías de Bes, Doctor en Dret) 2003.

De l'economia política a l'economia constitucional (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Joan Francesc Corona i Ramon, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Xavier Iglesias i Guiu, Doctor en Medicina) 2003.

Temperància i empatia, factors de pau (Conferència dictada en el curs del cicle de la Cultura de la Pau per el Molt Honorable Senyor Jordi Pujol, President de la Generalitat de Catalunya, 2001) 2003.

Reflexions sobre resistència bacteriana als antibiòtics (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excma. Sra. Dra. Ma. de los Angeles Calvo i Torras, Doctora en Farmàcia i Veterinària, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2003.

La transformación del negocio jurídico como consecuencia de las nuevas tecnologías de la información (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Rafael Mateu de Ros, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Jaime Manuel de Castro Fernández, Doctor en Dret) 2004.

La gestión estratégica del inmovilizado (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excma. Sra. Dra. Anna Maria Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Josep J. Pintó i Ruiz, Doctor en Dret) 2004.

Los costes biológicos, sociales y económicos del envejecimiento cerebral (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Félix F. Cruz-Sánchez, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Dr. Josep Pla i Carrera, Doctor en Matemàtiques) 2004.

El conocimiento glaciar de Sierra Nevada. De la descripción ilustrada del siglo XVIII a la explicación científica actual. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Antonio Gómez Ortiz, Doctor en Geografia, i contestació per l'acadèmica de número Excma. Sra. Dra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres (Psicologia))2004.

Los beneficios de la consolidación fiscal: una comparativa internacional (Discurs de recepció com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Dr. Rodrigo de Rato y Figaredo, Director-Gerent del Fons Monetari Internacional. El seu padrí d'investidura és l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Jaime Manuel de Castro Fernández, Doctor en Dret) 2004.

Evolución histórica del trabajo de la mujer hasta nuestros días (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Eduardo Alemany Zaragoza, Doctor en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Rafel Orozco i Delclós, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2004.

Geotecnia: una ciencia para el comportamiento del terreno (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Antonio Gens Solé, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2005.

Sessió acadèmica a Perpinyà, on actuen com a ponents; Excma. Sra. Dra. Anna Maria Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresarials i Excm. Sr. Dr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials: “Nouvelles perspectives de la recherche scientifique en économie et gestion”; Excm. Sr. Dr. Rafel Orozco i Delcós, Doctor en Medicina i Cirurgia: “L'impacte mèdic i social de les cèl·lules mare”; Excma. Sra. Dra. Anna Maria Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia: “Nouvelles stratégies oncologiques”; Excm. Sr. Dr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària: “Les résistances bactériennes a les antibiotiques”. 2005.

Los procesos de concentración empresarial en un mercado globalizado y la consideración del individuo (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Fernando Casado Juan, Doctor en Ciències Econòmiques

i Empresarials, i contestació de l'Excm. Sr. Dr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 2005.

"Son nou de flors els rams li renc" (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Jaume Vallcorba Plana, Doctor en Filosofia i Lletres (Secció Filologia Hispànica), i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. José Enrique Ruíz-Domènec, Doctor en Filosofia i Lletres) 2005.

Historia de la anestesia quirúrgica y aportación española más relevante (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Vicente A. Gancedo Rodríguez, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Josep Llort i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2006.

El amor y el desamor en las parejas de hoy (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Paulino Castells Cuixart, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Joan Trayter i Garcia, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2006.

El fenomen mundial de la deslocalització com a instrument de reestructuració empresarial (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Alfredo Rocafort i Nicolau, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Isidre Fainé i Casas, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2006.

Biomaterials per a dispositius implantables en l'organisme. Punt de trobada en la Historia de la Medicina i Cirurgia i de la Tecnologia dels Materials (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Josep Anton Planell i Estany, Doctor en Ciències Físiques, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2006.

La ciència a l'Enginyeria: El llegat de l'école polytechnique. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Xavier Oliver i Olivella, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Josep Pla i Carrera, Doctor en Matemàtiques) 2006.

El voluntariat: Un model de mecenatge pel segle XXI. (Discurs d'ingrés de l'acadèmica de número Excma. Sra. Dra. Rosamarie Cammany Dorr, Doctora en Sociologia de la Salut, i contestació per l'Excma. Sra. Dra. Anna Maria Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia) 2007.

El factor religioso en el proceso de adhesión de Turquía a la Unión Europea. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Josep Maria Ferré i Martí, Doctor en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Carlos Dante Heredia García, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2007.

Coneixement i ètica: reflexions sobre filosofia i progrés de la propedèutica mèdica. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Màrius Petit i Guinovart, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teologia) 2007.

Problemática de la familia ante el mundo actual. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic honorari Excm. Sr. Dr. Gustavo José Noboa Bejarano, Doctor en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Paulino Castells Cuixart, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2007.

Alzheimer: Una aproximació als diferents aspectes de la malaltia. (Discurs d'ingrés de l'acadèmica honoraria Excma. Sra. Dra. Nuria Durany Pich, Doctora en Biologia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Eugenio Oñate, Doctor-Enginyer de Camins, Canals i Ports) 2008.

Guillem de Guimerà, Frare de l'hospital, President de la Generalitat i gran Prior de Catalunya. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic honorari Excm. Sr. Dr. Josep Maria Sans Travé, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. D. José E. Ruiz Domènec, Doctor en Filosofia Medieval) 2008.

La empresa y el empresario en la historia del pensamiento económico. Hacia un nuevo paradigma en los mercados globalizados del siglo XXI. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm. Sr. Dr. Guillermo Sánchez Vilariño, Doctor Ciències Econòmiques i Financeres, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Jaume Gil Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Financeres) 2008.

Incertesa i bioenginyeria (Sessió Acadèmica dels acadèmics corresponents Excm. Sr. Dr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia amb els ponents Excm. Sr. Dr. Joan Anton Planell Estany, Doctor en Ciències Físiques, Excma. Sra. Dra. Anna M. Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Financeres i Il·lm. Sr. Dr. Humberto Villavicencio Mavrich, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2008.

Els Ponts: Història i repte a l'enginyeria estructural (Sessió Acadèmica dels acadèmics numeraris Excm. Sr. Dr. Xavier Oliver Olivella, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, i Excm. Sr. Dr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, amb els Ponents Il·lm. Sr. Dr. Angel C. Aparicio Bengoechea, Professor i Catedràtic de Ponts de l'escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Il·lm. Sr. Dr. Ekkehard Ramm, Professor, institute Baustatik) 2008.

Marketing político y sus resultados (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm. Sr. Dr. Francisco Javier Maqueda Lafuente, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials i contestació per l'acadèmica de número Excm. Sra. Dra. Anna M. Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Financeres) 2008.

Modelo de predicción de "Enfermedades" de las Empresas a través de relaciones Fuzzy (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm. Sr. Dr. Antoni Terceño Gómez, Doctor en Ciències Econòmiques i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Paulino Castells Cuixart, Doctor en Medicina) 2009.

Células Madre y Medicina Regenerativa (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm. Sr. Dr. Juan Carlos Izpisúa Belmonte, Doctor en Farmàcia i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina) 2009.

Financiación del déficit externo y ajustes macroeconómicos durante la crisis financiera El caso de Rumania (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm. Sr. Dr. Mugur Isarescu, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Alfredo Rocafort Nicolau, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2009.

El legado de Jean Monnet (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Dra. Teresa Freixas Sanjuán, Doctora en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Fernando Casado Juan, Doctor en Ciències Econòmiques) 2010.

La economía china: Un reto para Europa (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Jose Daniel Barquero Cabrero, Doctor en Ciències Humanes, Socials i Jurídiques, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Alfredo Rocafort Nicolau, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2010.

Les radiacions ionitzants i la vida (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Albert Biete i Solà, Doctor en Medicina, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 2010.

Gestió del control intern de riscos en l'empresa postmoderna: àmbits econòmic i jurídic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Ramon Poch i Torres, Doctor en Dret i Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'acadèmica de número Excma. Sra. Dra. Anna Maria Gil i Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresariales) 2010.

Tópicos típicos y expectativas mundanas de la enfermedad del Alzheimer (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Rafael Blesa, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Josep Llorit i Brull, Doctor en Ciències econòmiques i Dret) 2010.

Los Estados Unidos y la hegemonía mundial: ¿Declive o reinvencción? (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm. Sr. Dr. Mario Barquero i Cabrero, Doctor en Economia i Empresa, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Alfredo Rocafort i Nicolau, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales) 2010.

El derecho del Trabajo encrucijada entre los derechos de los trabajadores y el derecho a la libre empresa y la responsabilidad social corporativa (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. José Luis Salido Banús, Doctor en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Manuel Subirana Canterell) 2011.

Una esperanza para la recuperación económica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Jaume Gil i Lafuente, Doctor en Econòmiques, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teologia) 2011.

Certes i incertes en el diagnòstic del càncer cutani: de la biologia molecular al diagnòstic no invasiu (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Josep Malveyh, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Josep Llorit, Doctor en Econòmiques i Dret) 2011.

Una mejor universidad para una economía más responsable (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Senén Barro Ameneiro, Doctor en

Ciències de la Computació i Intel·ligència, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Jaume Gil i Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2012.

La transformació del món després de la crisi. Una anàlisi polièdrica i transversal (Sessió inaugural del Curs Acadèmic 2012-2013 on participen com a ponents: l'Excm. Sr. Dr. José Juan Pintó Ruiz, Doctor en Dret: “*El Derecho como amortiguador de la inequidad en los cambios y en la Economía como impulso rehumanizador*”, Excma. Sra. Dra. Rosmarie Cammany Dorr, Doctora en Sociologia de la Salut: “*Salut: mitjà o finalitat?*”, Excm. Sr. Dr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres: “*Globalización Económico-Cultural y Repliegue Identitario*”, Excm. Sr. Dr. Jaime Gil Aluja, Doctor en Econòmiques: “*La ciencia ante el desafío de un futuro progreso social sostenible*” i Excm. Sr. Dr. Eugenio Oñate Ibañez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports: “*El reto de la transferencia de los resultados de la investigación a la industria*”), publicació en format digital www.reialacademiadoctors.cat, 2012.

La quantificació del risc: avantatges i limitacions de les assegurances (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numeraria Excma. Sra. Dra. Montserrat Guillén i Estany, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació per l'acadèmica de número Excma. Sra. Dra. M. Teresa Anguera i Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres-Psicologia) 2013.

El procés de la visió: de la llum a la consciència (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Rafael Ignasi Barraquer i Compte, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. José Daniel Barquero Cabrero, Doctor en Ciències Humanes, Socials i Jurídiques) 2013.

Formación e investigación: creación de empleo estable (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Mario Barquero Cabrero, Doctor en Economia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. José Luis Salido Banús, Doctor en Dret) 2013.

El sagrament de l'Eucaristia: de l'Últim Sopar a la litúrgia cristiana antiga (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Armand Puig i Tàrrach, Doctor en Sagrada Escripura, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Jaume Vallcorba Plana, Doctor en Filosofia i Lletres) 2013.

Al hilo de la razón. Un ensayo sobre los foros de debate (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Enrique Tierno Pérez-Relaño, Doctor en Física Nuclear, y contestación por la académica de número Excm. Sra. Dra. Ana María Gil Lafuente, Doctora en Ciencias Económicas y Empresariales) 2014.

Col·lecció Reial Acadèmia Doctors – Fundación Universitaria Eserp

1. *La participació del Sistema Nerviós en la producció de la sang i en el procés cancerós* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Pere Gascón i Vilaplana, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmica de número Excm. Sra. Dra. Montserrat Guillén i Estany, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2014.
ISBN: 978-84-616-8659-9, Dipòsit Legal: B-5605-2014
2. *Información financiera: luces y sombras* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Emili Gironella Masgrau, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. José Luis Salido Banús, Doctor en Derecho) 2014.
ISBN: 978-84-616-8830-2, Depósito Legal: B-6286-2014
3. *Crisis, déficit y endeudamiento* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. José Maria Gay de Liébana Saludas, Doctor en Ciencias Económicas y Doctor en Derecho y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Juan Francisco Corona Ramón, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales) 2014.
ISBN: 978-84-616-8848-7, Depósito Legal: B-6413-2014
4. *Les empreses d'alt creixement: factors que expliquen el seu èxit i la seva sostenibilitat a llarg termini* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Oriol Amat i Salas, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Santiago Dexeus i Trias de Bes, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2014.
ISBN: 978-84-616-9042-8, Dipòsit Legal: B-6415-2014

5. *Estructuras metálicas* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Joan Olivé Zaforteza, Doctor en Ingeniería Industrial y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Xabier Añoberos Trias de Bes, Doctor en Derecho) 2014.
ISBN: 978-84-616-9671-0, Depósito Legal: B-7421-2014
6. *La acción exterior de las comunidades autónomas* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Josep Maria Bové Montero, Doctor en Administración y Dirección de Empresas y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. José María Gay de Liébana Saludas, Doctor en Ciencias Económicas y Doctor en Derecho) 2014.
ISBN: 978-84-616-9672-7, Depósito Legal: B-10952-201
7. *El eco de la música de las esferas. Las matemáticas de las consonancias* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Vicente Liern Carrión, Doctor en Ciencias Matemáticas (Física Teórica) y contestación por la académica de número Excma. Sra. Dra. Pilar Bayer Isant, Doctora en Matemáticas) 2014.
ISBN: 978-84-616-9929-2, Depósito Legal: B-11468-2014
8. *La media ponderada ordenada probabilística: Teoría y aplicaciones* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. José María Merigó Lindahl, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Josep Pla i Carrera, Doctor en Ciencias Matemáticas) 2014.
ISBN: 978-84-617-0137-7, Depósito Legal: B-12322-2014
9. *La abogacía de la empresa y de los negocios en el siglo de la calidad* (Discurso de ingreso de la académica numeraria Excma. Sra. Dra. María José Esteban Ferrer, Doctora en Economía y Empresa y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Carlos Dante Heredia García, Doctor en Medicina y Cirugía) 2014.
ISBN: 978-84-617-0174-2, Depósito Legal: B-12850-2014
10. *La ciutat, els ciutadans i els tributs* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Joan-Francesc Pont Clemente, Doctor en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Enrique Tierno Pérez-Relaño, Doctor en Física Nuclear) 2014.
ISBN: 978-84-617-0354-8, Dipòsit Legal: B-13403-2014

11. *Organización de la producción: una perspectiva histórica* (Discurso de ingreso de los académicos numerarios Excmo. Sr. Dr. Joaquín Bautista Valhondo, Doctor en Ingeniería Industrial y del Excmo. Sr. Dr. Francisco Javier Llovera Sáez, Doctor en Derecho y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. José Luis Salido Banús, Doctor en Derecho) 2014.
ISBN: 978-84-617-0359-3, Depósito Legal: B 13610-2014

12. *Correlación entre las estrategias de expansión de las cadenas hoteleras Internacionales y sus rentabilidades* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Onofre Martorell Cunill, Doctor en Economía y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teología) 2014.
ISBN: 978-84-617-0546-7, Depósito Legal: B 15010-2014

13. *La tecnología, detonante de un nuevo panorama en la educación superior* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Lluís Vicent Safont, Doctor en Ciencias de la Información y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. José Daniel Barquero Cabrero, Doctor en Ciencias Humanas, Sociales y Jurídicas y Doctor en Administración y Alta Dirección de Empresas) 2014.
ISBN: 978-84-617-0886-4, Depósito Legal: B 16474-2014

14. *Globalización y crisis de valores* (Discurso de ingreso del académico de Honor Excmo. Sr. Dr. Lorenzo Gascón, Doctor en Ciencias Económicas y contestación por la académica de número Excmo. Sra. Dra. Ana María Gil Lafuente, Doctora en Ciencias Económicas y Empresariales) 2014.
ISBN: 978-84-617-0654-9, Depósito Legal: B 20074-2014

15. *Paradojas médicas* (Discurso de ingreso del Académico Correspondiente para Venezuela Excmo. Sr. Dr. Francisco Kerdel-Vegas, Doctor en Medicina y Cirugía y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. José Lloret Brull, Doctor en Ciencias Económicas y Doctor en Derecho) 2014.
ISBN: 978-84-617-1759-0, Depósito Legal: B 20401-2014

16. *La formación del directivo. Evolución del entorno económico y la comunicación empresarial* (Discurso de ingreso de los académicos numerarios Excmo. Sr. Dr. Juan Alfonso Cebrián Díaz, Doctor

en Ciencias Económicas y Empresariales y del Excmo Sr. Dr. Juan María Soriano Llobera, Doctor en Administración y Dirección de Empresas y Doctor en Ciencias Jurídicas y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Fernando Casado Juan, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales) 2014.

ISBN:978-84-617-2813-8, Depósito Legal: B 24424-2014

17. *La filosofia com a cura de l'ànima i cura del món* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Francesc Torralba Roselló, Doctor en Filosofia i Doctor en Teologia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. David Jou i Mirabent, Doctor en Física) 2014.
ISBN: 978-84-617-2459-8, Dipòsit Legal: B 24425-2014

18. *Hacia una Teoría General de la Seguridad Marítima* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Jaime Rodrigo de Larrucea, Doctor en Derecho y Doctor en Ingeniería Náutica y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Juan Francisco Corona Ramón, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales) 2015.
ISBN: 978-84-617-3623-2, Depósito Legal: B 27975-2014

Col·lecció Reial Acadèmia Doctors

19. *Pensamiento Hipocrático, Biominimalismo y Nuevas Tecnologías. La Innovación en Nuevas Formas de Tratamiento Ortodóncico y Optimización del Icono Facial* (Discurso de ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Luis Carrière Lluch, Doctor en Odontología y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Antoni Terceño Gómez, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales) 2015.
ISBN: 978-84-606-5615-9, Depósito Legal: B 3966-2015

20. *Determinantes de las Escuelas de Pensamiento Estratégico de Oriente y Occidente y su contribución para el Management en las Organizaciones del Siglo XXI.* (Discurso de ingreso del académico Correspondiente para Chile Excmo. Sr. Dr. Francisco Javier Garrido Morales, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. José Daniel Barquero Cabrero, Doctor en Ciencias Humanas, Sociales y Jurídicas y Doctor en Administración y Alta Dirección de Empresas) 2015.
ISBN:978-84-606-6176-4, Depósito Legal: B 5867-2015

21. *Nuevos tiempos, nuevos vientos: La identidad mexicana, cultura y ética en los tiempos de la globalización.* (Discurso de ingreso del académico Correspondiente para México Excmo. Sr. Dr. Manuel Medina Elizondo, Doctor en Ciencias de la Administración, y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. José Daniel Barquero Cabrero, Doctor en Ciencias Humanas, Sociales y Jurídicas y Doctor en Administración y Alta Dirección de Empresas) 2015.
ISBN: 78-84-606-6183-2, Depósito Legal: B 5868-2015
22. *Implante coclear. El oído biónico.* (Discurso del ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Pedro Clarós Blanch, Doctor en Medicina y Cirugía y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. Joaquín Barraquer Moner, Doctor en Medicina y Cirugía) 2015.
ISBN: 978-84-606-6620-2, Depósito Legal: B 7832-2015
23. *La innovación y el tamaño de la empresa.* (Discurso del ingreso del académico numerario Excmo. Sr. Dr. Carlos Mallo Rodríguez, Doctor en Ciencias Económicas y contestación por el académico de número Excmo. Sr. Dr. José María Gay de Liébana Saludas, Doctor en Ciencias Económicas y Doctor en Derecho) 2015.
ISBN: 978-84-606-6621-9, Depósito Legal: B 7833- 2015
24. *Geologia i clima: una aproximació a la reconstrucció dels climes antics des del registre geològic* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Dr. Ramon Salas Roig, Doctor en Geologia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Dr. Enrique Tierno Pérez-Relaño, Doctor en Física Nuclear) 2015.
ISBN: 978-84-606-6912-8, Dipòsit Legal: B 9017-2015



RAD Tribuna Plural. La revista científica

Número 1/2014

Globalización y repliegue identitario, *Ángel Aguirre Baztán*. El pensament cristià, *Josep Gil Ribas*. El teorema de Gödel: recursivitat i indecidibilitat, *Josep Pla i Carrera*. De Königsberg a Göttingen: Hilbert i l'axiomatització de les matemàtiques, *Joan Roselló Moya*. Computerized monitoring and control system for ecopyrogenesis technological complex, *Yuriy P. Kondratenko, Oleksiy V.Kozlov*. Quelques réflexions sur les problèmes de l'Europe de l'avenir, *Michael Metzeltin*. Europa: la realidad de sus raíces, *Xabier Añoveros Trias de Bes*. Discurs Centenari 1914-2014, *Alfredo Rocafort Nicolau*. Economía-Sociedad-Derecho, *José Juan Pintó Ruiz*. Entrevista, *Jaime Gil Aluja*.

ISSN: 2339-997X, Depósito Legal: B 12510-2014, Págs. 404.

Número 2/2014 *Monográfico Núm.1*

I Acto Internacional: Global Decision Making.

2014: à la recherche d'un Humanisme renouvelé de El Greco à Nikos Kazantzakis, *Stavroula-Ina Piperaki*. The descent of the audit profession, *Stephen Zeff*. Making global lawyers: Legal Practice, Legal Education and the Paradox of Professional Distinctiveness, *David B. Wilkins*. La tecnología, detonante de un nuevo panorama universitario, *Lluís Vicent Safont*. La salida de la crisis: sinergias y aspectos positivos. Moderador: *Alfredo Rocafort Nicolau*. Ponentes: Burbujas, cracs y el comportamiento irracional de los inversores, *Oriol Amat Salas*. La economía española ante el hundimiento del sector generador de empleo, *Manuel Flores Caballero*. Tomando el pulso a la economía española: 2014, año de encrucijada, *José Maria Gay de Liébana Saludas*. Crisis económicas e indicadores: diagnosticar, prevenir y curar, *Montserrat Guillén i Estany*. Salidas a la crisis, *Jordi Martí Pidelaserra*. Superación de la crisis económica y mercado de trabajo: elementos dinamizadores, *José Luis Salido Banús*.

Indicadores de financiación para la gestión del transporte urbano: El fondo de comercio, El cuadro de mando integral: Una aplicación práctica para los servicios de atención domiciliaria, Competencias de los titulados en ADE: la opinión de los empleadores respecto a la contabilidad financiera y la contabilidad de costes. Teoría de conjuntos clásica versus teoría de subconjuntos borrosos. Un ejemplo elemental

comparativo. Un modelo unificado entre la media ponderada ordenada y la media ponderada. Predicting Credit Ratings Using a Robust Multi-criteria Approach.

ISSN: 2339-997X, Depósito Legal: B 12510-2014, Págs. 588.

Número 3/2014

Taula rodona: Microorganismes i patrimoni. Preàmbulo, *Joaquim Gironella Coll*. L'arxiu Nacional de Catalunya i la conservació i restauració del patrimoni documental, *Josep Maria Sans Travé, Gemma Goikoechea i Foz*. El Centre de Restauració Béns Mobles de Catalunya (CRBMC) i les especialitats en conservació i restauració, *Àngels Solé i Gili*. La conservació del patrimoni històric davant l'agressió per causes biològiques, *Pere Rovira i Pons*. Problemàtica general de los microorganismos en el patrimonio y posibles efectos sobre la salud, *Maria dels Àngels Calvo Torras*. Beyond fiscal harmonisation, a common budgetary and taxation area in order to construct a European republic, *Joan-Francesc Pont Clemente*. El microcrédito. La financiación modesta, *Xabier Añoveros Trias de Bes*. Extracto de Stevia Rebaudiana. *Pere Costa Batllori*. Síndrome traumático del segmento posterior ocular, *Carlos Dante Heredia García*. Calculadora clínica del tiempo de doblaje del PSA de próstata, *Joaquim Gironella Coll, Montserrat Guillén i Estany*. Miguel Servet (1511-1553). Una indignació coherent, *Màrius Petit i Guinovart*. Liquidez y cotización respecto el Valor Actual Neto de los REITs Españoles (Las SOCIMI), *Juan María Soriano Llobera, Jaume Roig Hernando*. I Acte Internacional: Global decision making. Resum. Entrevista, *Professor Joaquim Barraquer Moner*.

ISSN: 2339-997X, Depósito Legal: B 12510-2014, Págs. 376

Número 4/2014

Sessió Acadèmica: La simetria en la ciència i en l'univers. Introducció, evocació del Dr. Jaume Vallcorba Plana, *David Jou Mirabent i Pilar Bayer i Isant*. La matemàtica de les simetries, *Pilar Bayer i Isant*, l'Univers i les simetries trencades de la física, *David Jou Mirabent*. Sessió Acadèmica: La financiación de las grandes empresas: el crédito sindicado y el crédito documentario. Los créditos sindicados, *Francisco Tusquets Trias de Bes*. El crédito documentario. Una operación financiera que sustituye a la confianza en la compraventa internacional, *Xabier Añoveros Trias de Bes*. Sessió Acadèmica: Vida i obra d'Arnau de Vilanova.

Introducció, *Josep Gil i Ribas*. Arnau de Vilanova i la medicina medieval, *Sebastià Giral*. El *Gladius Iugulans Thomatistas* d'Arnau de Vilanova: context i tesis escatològiques, *Jaume Mensa i Valls*. La calidad como estrategia para posicionamiento empresarial, *F. González Santoyo, B. Flores Romero y A.M. Gil Lafuente*. Etnografía de la cultura de una empresa, *Ángel Aguirre Baztán*. L'inconscient, femení i la ciència, *Miquel Bassols Puig*. Organización de la producción: una perspectiva histórica, *Joaquim Bautista Valhondo y Francisco Javier Llovera Sáez*. La quinoa (*Chenopodium quinoa*) i la importancia del seu valor nutricional, *Pere Costa Batllori*.

El Séptimo Arte, *Enrique Lecumberri Martí*. "Consolatio" pel Dr. Josep Casajuana i Gibert, *Rosmarie Cammany Dorr, Jaume Gil Aluja i Josep Joan Pintó Ruiz*. The development of double entry: An example of the International transfer of accounting technology, *Christopher Nobes*. Entrevista, *Dr. Josep Gil Ribas*.

ISSN: 2339-997X, Depósito Legal: B 12510-2014, Págs. 460





D. Enrique Tierno Pérez-Relaño (1946 -).

Estudia el Bachillerato en el *Colegio Alemán de Madrid*. Cursa estudios de Matemáticas y Física teórica en las *Universidades de Princeton (EEUU), Madrid y Essex (GB)*, con grados de Licenciatura y Master of Science (M. Sc.).

En 1976 se doctora 'summa cum laude' (Dr. rer. nat.) en Física nuclear por la *Justus-Liebig-Universität (RFA)* con el premio extraordinario de la Universidad. Compagina una actividad docente en la misma con la investigación para la *Deutsche Forschungsgesellschaft*. Completa en la RFA su formación humanista con estudios de Macroeconomía Internacional y Sociología.

A su regreso a España (1977) se incorpora a *PETRONOR* (Petróleos del Norte) y desempeña el puesto de Adjunto a la Presidencia.

En 1983 accede, como Director de Instituciones Internacionales, al *Banco Exterior de España*, lo que compagina con su actividad como Profesor en la *UNED*.

En 1988 se incorpora a la naciente *Corporación Financiera Caja Madrid*, ocupando el puesto de Director General para el desarrollo internacional del *Grupo Caja Madrid*. En diciembre de 1992 fue elegido miembro de la *Academia de Ciencias de Nueva York* (fundada en 1817).

En 1995 es Concejal de Hacienda en el *Ayuntamiento de Madrid*, reincorporándose a *Caja Madrid* en 1998 como Director de Instituciones Financieras Internacionales. En el 2009 deja *Caja Madrid* como Subdirector General del Grupo.

Desde entonces preside la *Asociación para la Reflexión y el Debate Enrique Tierno Galván* y la Sección de Ciencias Económicas del *Ateneo de Madrid*.

“Els resultats dels estudis paleoclimàtics dels darrers 541 Ma de la història de la Terra (Fanerozoic) ens ensenyen que els dos grans motors de l’evolució del clima a gran escala han estat l’astronomia i la geologia, a través dels processos vinculats a la radiació còsmica espacial, les variacions solars, les variacions orbitals de la Terra, la tectònica de plaques i l’activitat volcànica”.

Ramon Salas Roig

1914 - 2014

Col·lecció Reial Acadèmia de Doctors



**Generalitat
de Catalunya**



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EDUCACIÓN, CULTURA
Y DEPORTE