

A4. El forçament antropogènic i els canvis en el clima

Xavier Rodó

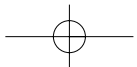
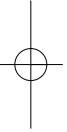
Miquel Àngel Rodríguez-Arias

Laboratori de Recerca del Clima
Parc Científic de Barcelona

Xavier Rodó (Terrassa, 1965) és professor d'Investigació de la Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA) i dirigeix el Laboratori de Recerca del Clima del Parc Científic de Barcelona, de la Universitat de Barcelona (UB). Inicià estudis d'enginyeria i l'any 1997 es doctorà en Ciències Biològiques per la UB. Ha estat docent en Ecologia a la UB, en Estadística Aplicada a la UPC, i investigador al Departament de Meteorologia i Astronomia de la UB. Ha realitzat nombroses estades postdoctorals en alguns dels principals centres de recerca climàtica del món, com ara a les universitats de Princeton, Michigan, San Diego State, Minnesota, Cathòlique de Louvaine, SCRIPPS, GATECH i al Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/NOAA. També va ser investigador del COLA (Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, Maryland) al que continua adscrit com a investigador visitant.

La seva recerca s'ha centrat en els components interanuals de la variabilitat climàtica i, més concretament, en les teleconnexions de l'ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*) amb les regions extra-tropicals, en les que intervenen fluxos d'energia entre regions oceàniques no comunicades. Té més de 10 anys d'experiència en l'anàlisi de les interaccions clima-ecosistemes i clima-malalties. Ha col·laborat en nombrosos projectes de recerca amb equips d'Europa, Àsia i els Estats Units d'Amèrica. D'entre aquestes col·laboracions, les més remarcables són les establertes amb George Philander (Universitat de Princeton) per estudiar la relació de les connexions extra-tropicals de l'ENSO i els components d'alta freqüència dels cicles de Milankovitch, i amb Mercedes Pascual (Universitat de Michigan) per investigar la influència del clima i el canvi global sobre la dinàmica de les epidèmies de còlera a Bangla Desh. A partir de la seva recerca ha publicat contribucions significatives en prestigioses revistes internacionals (*Science*, *PNAS*, *Climate Dynamics* i *Journal of Climate*, entre d'altres).

Miquel Àngel Rodríguez-Arias, (Barcelona, 1969) és investigador del Laboratori de Recerca del Clima del Parc Científic de Barcelona (LRC-PCB), de la Universitat de Barcelona. Es va formar com a biòleg a la UB i actualment combina la seva recerca al LRC amb el seu treball de doctorat al Departament d'Ecologia d'aquesta universitat. Ha estat membre del Grup de Geociències Marines de la UB (GGM), on va treballar en temes tan diversos com la geomorfologia, la sedimentologia o la robòtica submarina. Al GGM va participar en un total de 15 campanyes oceanogràfiques i es va formar com a gestor de projectes de recerca. En l'actualitat, la seva feina al LRC-PCB combina l'activitat científica amb la gestió administrativa i de suport a la recerca en totes les línies del grup. Com a investigador, la seva activitat més notable ha estat el desenvolupament del *Size Dependent Correlation Analysis* o SDC, una eina estadística que permet la localització i la identificació d'interaccions locals i transitòries entre dues sèries de dades, i que té una gran utilitat de cara a estudiar els impactes del clima sobre qualsevol tipus de sistema humà o natural.



Síntesi	117
A4.1. El canvi climàtic: el reflex d'un balanç d'energia alterat	119
A4.1.1. El canvi climàtic	120
A4.1.2. L'increment de l'efecte d'hivernacle: de la desestabilització del cicle del carboni a l'alteració del balanç radiatiu planetari	122
A4.1.3. L'home com a agent de canvi global	126
A4.2. El paper d'Europa en el canvi climàtic	127
A4.2.1. La difícil tasca d'atribuir responsabilitats	128
A4.2.2. La mesura de la contribució a l'increment de l'efecte d'hivernacle. Balanços versus inventaris	130
A4.2.3. El balanç de carboni de la Unió Europea i dels seus estats membres	133
A4.3. La detecció del canvi climàtic a la regió mediterrània	136
A4.3.1. L'evolució temporal dels descriptors climàtics	136
A4.3.2. Respostes geofísiques i biològiques al canvi climàtic	138
A4.3.3. Els esdeveniments extrems: què ens diu el passat i què ens espera en el futur	139
A4.3.4. La variabilitat interanual del clima a Catalunya. La influència de la variabilitat de latituds mitjanes i la dels fenòmens tropicals en la regulació del clima a l'àrea mediterrània	142
A4.3.4.1. La variabilitat climàtica a latituds mitjanes i el nostre clima	143

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

A4.3.4.2. El paper dels fenòmens tropicals en la regulació del clima a l'àrea mediterrània	145
Referències bibliogràfiques	151

Síntesi

Actualment hi ha la certesa absoluta que l'home ha canviat i està canviant el clima del planeta. Per tant, és el moment d'intentar entendre millor com les activitats humanes alteren el funcionament del sistema climàtic per tal de predir la magnitud dels possibles impactes i avaluar si els sistemes naturals i les societats humanes s'adaptaran o magnificaran els canvis previstos. Tot això serà necessari per tal d'atribuir responsabilitats, dissenyar polítiques d'adaptació i, sobre tot, per millorar les prediccions del canvi climàtic que pot produir-se a mitjà i a llarg termini i, si és possible, fer-ho per a regions tan petites com ara Catalunya.

El canvi climàtic és, bàsicament, la resposta de la Terra a l'alteració del balanç energètic planetari que ha provocat l'home en desestabilitzar el cicle global del carboni. Aquest canvi ja s'està manifestant i encara ho farà d'una manera molt més intensa en el futur. S'ha de començar, doncs, a prevenir i a adoptar mesures d'adaptació, però la proporció entre un i altre tipus de resposta dependrà de la sensació d'alarma que es percebi i per tant del temps que es trigui en començar a actuar decididament.

Si la resposta és ràpida, la majoria de les despeses seran en mesures preventives que potenciaran l'establiment de models energètics alternatius que permetin reduir de manera clara i decidida el volum de les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle. Si, per contra, es continua considerant el canvi climàtic com un problema secundari i no s'actua decididament, a mitjà termini caldrà fer front a una situació molt complicada i que requerirà de grans esforços per tal de trobar-hi solucions. Una situació que podria comprometre seriosament la qualitat de vida de les societats occidentals i accentuar fins a límits insospitables i probablement insuportables les desigualtats a escala mundial. Tant en un cas

com en l'altre es produiran una sèrie de costos que, de ben segur, caldrà assumir conjuntament.

La qüestió però, és com es distribueixen aquests costos. No hi ha cap garantia que el repartiment sigui just, ja que l'impacte no es distribuirà pas de manera equitativa. Segons les actuals prediccions, les regions tropicals, on es troben un gran nombre d'estats en vies de desenvolupament, patiran la major part dels impactes negatius, mentre que les zones boreals, on se situen estats amb elevats estàndards de qualitat de vida podrien arribar a gaudir d'efectes beneficiosos. Resulta necessari, per tant, estudiar el balanç de carboni d'una regió determinada del planeta per poder arribar a quantificar quina és la seva responsabilitat en l'increment de l'efecte d'hivernacle.

Amb la tecnologia i els coneixements disponibles actualment, això només es pot fer per a regions de mida continental, com ara Europa (on ja es treballa en aquesta direcció i de les quals ja es disposa de les primeres estimacions, obtingudes a través d'un procediment fiable). En el cas de regions més petites, com ara Catalunya, encara no és possible mesurar aïlladament la seva contribució a l'escalfament global, tot i que hi ha la possibilitat que es pugui fer en un futur no gaire llunyà.

El que si és possible en regions tan petites com ara Catalunya —encara que no és gens fàcil— és detectar-hi estadísticament el canvi climàtic. La detecció local del canvi climàtic és un problema amb el que fa temps que s'enfronta el Grup Intergovernamental d'Experts sobre Canvi Climàtic (IPCC). La seva solució, que sembla prou acurada, consisteix en fer servir tota la informació disponible per valorar qualitativament la certesa del canvi. La informació que s'utilitza no són només els canvis en la mitjana i la dispersió

en les sèries temporals de dades climàtiques (que fins fa no gaire era l'única aproximació que es considerava fiable), sinó també tota la resta de proves, de vegades circumstancials, que s'han anat adquirint en els estudis climàtics realitzats en el decurs del temps. D'entre aquestes proves destaca especialment la consistència entre les dades reals, físiques i biològiques, i els resultats dels experiments climàtics amb models on es simulen els forçaments antropogènics.

Per predir com serà el canvi climàtic a Catalunya i els seus efectes cal entendre, en primer lloc, les característiques del clima que experimenta actualment el Principat. L'adequada caracterització del clima del Principat no es pot separar de la caracterització del clima a la Península Ibèrica i, per extensió, a tota la regió mediterrània. Si es busquen les connexions regionals i interhemisfèriques que han de permetre explicar el clima de Catalunya, cal estendre l'anàlisi més enllà d'aquesta regió, d'una dimensió espacial tan reduïda.

No obstant això, en l'àmbit geogràfic de la Mediterrània els estudis climàtics no estan encara al nivell de desenvolupament que hi ha en altres zones geogràfiques, com ara el Pacífic tropical, el sud-est asiàtic, i determinades zones de l'Àfrica, Austràlia, Amèrica del Nord o del Nord d'Europa. A la conca mediterrània, les aproximacions que s'han fet han estat molt fragmentades o en alguns casos són molt recents i encara no s'han pres en consideració –o bé han estat obviades–. En conjunt, en la major part dels casos aquestes aproximacions no van gaire més enllà de la caracterització dels valors de referència a

diferents nivells, sobretot al nivell estacional, o bé de l'evolució del comportament mitjà a llarg termini. Així, encara manca una visió conjunta i moderna del clima mediterrani, aspecte que, tret d'algunes excepcions, ni tan sols s'ha abordat pel que fa al conjunt dels països costaners de la conca occidental mediterrània.

A l'hora d'estudiar el clima cal diferenciar entre els seus diversos components, els quals, en principi, han de ser estudiats separatament. Així la climatologia d'una localitat, comarca o àrea geogràfica determinada es pot separar en variabilitat estacional, corresponent al cicle anual, i en altres components interanuals com ara les tendències lligades a la variació en el temps del propi cicle anual i una porció de la variabilitat total que potser és simplement aleatòria o que, més aviat, està modulada per fenòmens climàtics de gran escala i de llarg abast com ara la NAO (*North Atlantic Oscillation*) o l'ENSO (*El Niño/Southern Oscillation*).

Es creu amb una fiabilitat elevada que la NAO esdevindrà més profunda i variable en el futur, tot i que no queda clar com afectarà el clima de Catalunya a l'hivern. D'altra banda, l'evolució futura de l'ENSO i el monsoó africà, que influeixen –encara que de manera discontinua–, sobre el clima mediterrani, també és objecte d'un ampli debat científic. En el cas de l'ENSO, sembla ser que aquesta veurà incrementada la seva variabilitat interanual a causa de l'escalfament global –i del Pacífic tropical en particular– i que això tindrà efectes significatius sobre el clima de les nostres contrades.

Actualment, els investigadors que estudien el clima i els seus efectes sobre la societat i la natura tenen la certesa absoluta que l'home ha canviat i està canviant el clima del planeta. De fet, aquesta certesa, que és el resultat de l'observació de la natura i de la construcció i experimentació amb models climàtics planetaris, fa temps que es té. En aquests moments, tot i que pugui semblar exagerat, el canvi climàtic és un fet tan acceptat i incontestable com ara l'estructura atòmica dels físics o l'evolució de les espècies pels biòlegs.

La recerca que s'està realitzant actualment en l'àmbit de la climatologia ja no pretén demostrar l'existència del canvi climàtic, sinó entendre'l millor. Es vol aprofundir en el coneixement sobre com les activitats humanes contribueixen a l'alteració del funcionament del sistema climàtic, amb l'objectiu de copsar tota la magnitud de l'impacte antròpic. Igualment, també es vol conèixer millor la resposta dels sistemes naturals i les societats humanes a aquest entorn canviant i esbrinar si la seva adaptació tamponarà o magnificarà els canvis previstos. Aquest coneixement més profund permetrà avançar en l'atribució de responsabilitats concretes en la generació d'aquest fenomen, dissenyar polítiques de mitigació i d'adaptació i, sobre tot, millorar les prediccions del canvi climàtic que es pot produir a mitjà i llarg termini i, si és possible, fer-ho per a regions tan petites com ara Catalunya.

En aquest capítol s'estudia com el canvi climàtic és, en gran mesura, la resposta planetària a l'alteració del balanç energètic provocada per l'home en desestabilitzar el cicle global del carboni (apartat A4.1). D'aquí es deriva que si s'estudia el balanç de carboni d'una regió determinada del planeta es pot arribar a quantificar quina és la contribució d'aquesta regió al canvi climàtic global (apartats A4.2.1 i A4.2.2). Amb la tecnologia i els coneixements disponibles actualment, això només es pot fer per a regions de mida continental (apartat A4.2.3) i, per tant, encara no es pot arribar a mesurar aïlladament la contribució de Catalunya al canvi climàtic global. La detecció del canvi climàtic, en canvi, sí que es pot fer per regions més petites. Al Principat aquest fenomen es pot detectar tant als descriptors climàtics com als registres físics i biològics (A4.3.1 i A4.3.2), però també en la incidència cada cop més gran dels esdeveniments meteorològics extrems i, en general, en la influència creixent de fenòmens climàtics d'origen tropical sobre les nostres contrades (A4.3.3 i A4.3.4).

A4.1. El canvi climàtic: el reflex d'un balanç d'energia alterat

En aquest apartat s'intenta aclarir què s'entén per canvi climàtic i quines són les causes que el provoquen. En primer lloc es defineix què és el clima i de què es parla quan es diu que està canviant. A continuació s'estudia l'efecte d'hivernacle, el balanç energètic planetari i com el canvi climàtic és el resultat de l'increment del primer i de la altera-

ció del segon. Més endavant s'enuncien els processos naturals i les activitats humanes que poden modificar el balanç energètic del planeta i, per tant, convertir-se en agents generadors de canvi climàtic. En aquest punt s'estudia el cicle del carboni i el seu paper com a modulador del clima. Finalment, es mostra com d'entre tots els processos que poden alterar el clima, els principals responsables són els relacionats amb l'activitat humana.

A4.1.1. El canvi climàtic

El clima del planeta depèn de molts factors que actuen a escales temporals i espacials molt diferents. Primer, el clima és un fenomen planetari. El sol escalfa la Terra, tot i que no ho fa de forma homogènia: les zones equatorials reben més escalfor que no pas les polars, i de manera canviant al llarg de l'any. Si el planeta fos una bola metàl·lica rígida, no ens caldria res més per entendre les diferències de temperatura entre diversos llocs. A la superfície terrestre, però, hi ha dos compartiments fluids (l'atmosfera i els oce-

ans), que redistribueixen l'escalfor per tot el planeta, transportant calor netament des de l'equador cap als pols mitjançant els seus propis desplaçaments, corrents marins i masses d'aire en moviment, la trajectòria dels quals està regulada no només pels gradients tèrmics sinó també per la rotació terrestre i la topografia terrestre submarina i de la superfície terrestre.

Tenint en compte aquests factors, es pot definir de manera relativament fidel el clima mitjà de qualsevol regió del planeta. Per entendre què és el clima mitjà, es poden observar els diagrames ombrotèrmics representats a la figura A.4.1, fets a partir de les dades de l'estació meteorològica que hi ha al pantà de Foix. En aquests diagrames es mostra la temperatura mitjana i la pluja acumulada els diferents mesos de l'any en un punt determinat del planeta. Aquestes variables no són el mateix que la temperatura i la pluja que experimentem quotidianament –és a dir, aquelles que intenta predir la meteorologia. En climatologia les variables són diferents: la tempera-

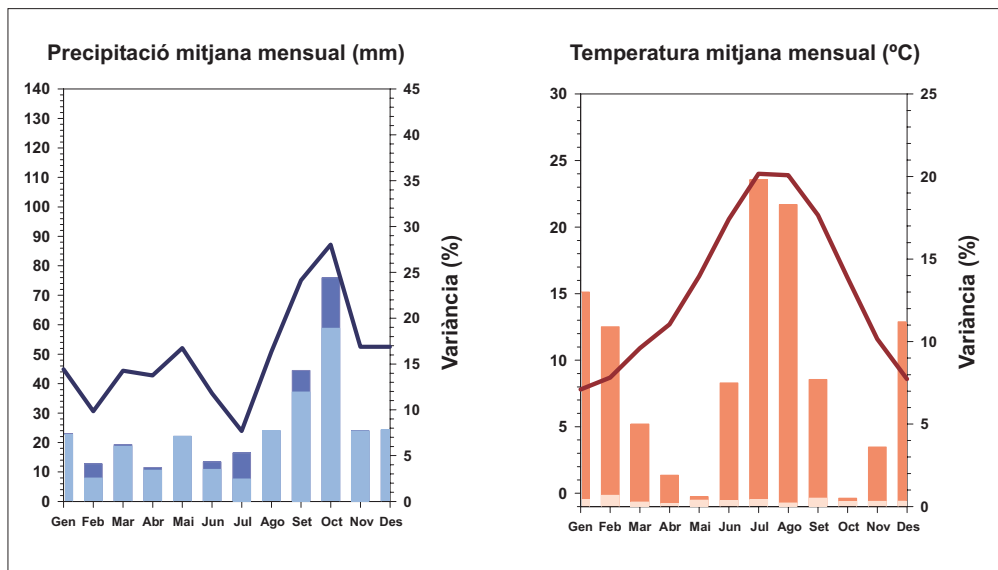


Figura A4.1. Cicles anuals de la precipitació (mm mes⁻¹, en blau) i de la temperatura (°C, en vermell) al Pantà de Foix, i contribucions mensuals (en %) a la variabilitat total (barres). La part més fosca de les barres és la contribució intraanual, mentre que la part més clara és la interanual.

Font: elaboració pròpia.

tura és la mitjana mensual de la temperatura mitjana diària, mentre que la pluja es la suma de tot el que ha caigut al llarg del mes (figura A4.1). Es pot veure, per tant, com en aquest camp d'estudi l'escala temporal bàsica és la mensual, i que les variables de treball no són pas les que perceben els nostres sentits, encara que estiguin estadísticament molt relacionades: d'aquí neix la confusió en el públic, i de vegades en medis acadèmics entre meteorologia i climatologia.

Els diagrames ombrotèrmics són importants perquè sovint permeten caracteritzar molt bé com és el clima d'un lloc determinat, però no contenen tota la informació climàtica. A la mateixa figura A4.1 també es representa la variància mensual de la temperatura i de la precipitació, separades en les seves components intraanual i interanual. La variància és una mesura de la dispersió de les dades respecte al seu valor mitjà. La intraanual ens informa de la dispersió que es produeix en el cicle anual, mentre que la interanual ens mostra les diferències entre anys. Les variàncies de la temperatura i la precipitació són molt diferents: mentre que a la temperatura quasi tota la dispersió es pot explicar per les diferències existents entre les estacions de l'any (quasi tota la variància és intraanual), pel que fa a la precipitació la major part de la dispersió és interanual (entre anys). Aquest fet té conseqüències importants. Actualment es coneix molt més sobre l'estacionalitat (el cicle anual), que sobre les diferències entre anys (oscil·lacions climàtiques interanuals) i, per tant, es disposa de models –i, en conseqüència, de prediccions– millors per a la temperatura que per a la precipitació.

Quan es parla de canvi climàtic s'està fent referència a canvis en els valors de les variables climàtiques d'un lloc, d'una regió o de tot el planeta. Però, quins són aquests canvis? Els més intuïtius són els que afecten el valor mitjà, però també es poden produir canvis en la variància. La figura A4.2 (IPCC, 2001) il·lustra el canvi en la freqüència de dies amb valors determinats de

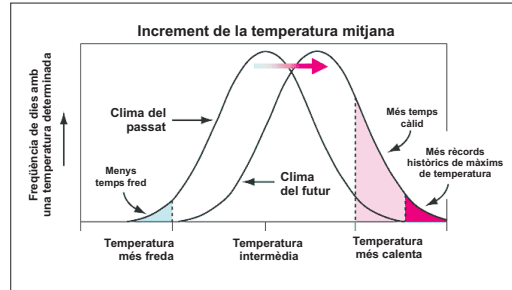


Figura A4.2. Esquema conceptual dels canvis en la freqüència de dies amb temperatures extremes que es podria produir davant d'un increment de la mitjana de les temperatures.

Font: elaboració pròpia a partir de la figura 2.32 de l'informe IPCC (2001).

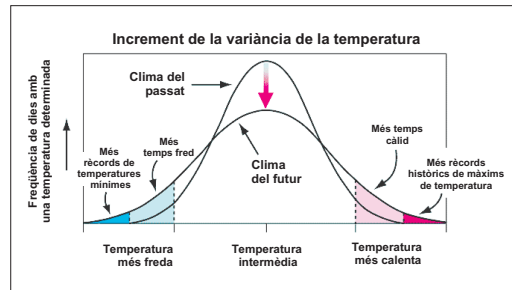


Figura A4.3. Esquema conceptual dels canvis en la freqüència de dies amb temperatures extremes si s'incrementava la variància de les temperatures.

Font: elaboració pròpia a partir de la figura 2.32 de l'informe IPCC (2001).

temperatura que s'esperaria trobar atès un increment en la mitjana (anual o mensual). En canvi, la figura A4.3 mostra el que passaria si augmentava la dispersió.

En el primer cas només s'experimentaria més calor, mentre que en el segon el clima esdevindria més extrem (més episodis de fred i de calor intenses). L'increment de la variància es pot produir perquè els canvis estacionals siguin més marcats o perquè augmentin les diferències entre els anys. També podria passar que canviés la proporció entre la dispersió estacional i la variància interanual, amb variacions o no de la variabilitat total. Actualment s'estaria produint un canvi tant de la mitjana com de la variància (figura A4.4) de la precipitació i la temperatura.

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

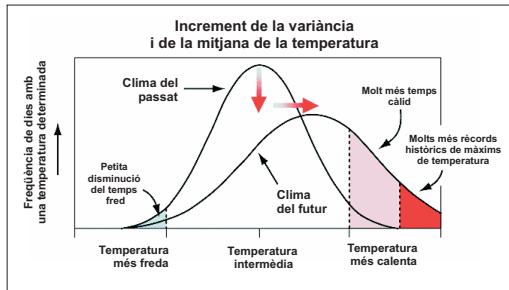


Figura A4.4. Esquema conceptual dels canvis en la freqüència de dies amb temperatures extremes en cas que augmentessin la variància i el promig de la temperatura.

Font: elaboració pròpia a partir de la figura 2.32 de l'informe IPCC (2001).

Des del punt de vista estadístic, no sempre és fàcil demostrar aquestes diferències, sobretot quan els canvis es produeixen simultàniament en la mitjana i en la variància. Cal tenir present que el clima té una dispersió natural elevada i, quan això passa, els canvis han de ser molt forts per tal que puguin ser estadísticament significatius. Això no vol dir, però, que els canvis no siguin detectables. Actualment es treballa amb models planetaris que reproduïxen el clima global i, introduint-hi els diversos factors que poden alterar el clima, permeten detectar i demostrar canvis que, d'altra forma, passarien desapercebuts. En tot cas, no es pot oblidar que fins i tot canvis poc significatius estadísticament poden arribar a tenir un efecte climàtic de gran magnitud i provocar alteracions en els meteors que afectin dràsticament la nostra vida quotidiana. Finalment, cal recordar que la temperatura és una mitjana (anual o mensual) d'una mitjana (diària), i per tant és extraordinàriament resiliència als canvis. Per tant, quan la temperatura canvia, les causes han de ser molt fortes i, de resultes, també ho són els efectes.

A4.1.2. L'increment de l'efecte d'hivernacle: de la desestabilització del cicle del carboni a l'alteració del balanç radiatiu planetari

Per entendre les causes del canvi climàtic cal tenir presents quatre nocions bàsiques de física. El canvi climàtic és una resposta directa a l'altera-

ció del balanç energètic planetari (Philander, 1998). En un cos en equilibri tèrmic, amb un balanç energètic nul, l'energia que entra és la mateixa que en surt. L'energia surt dels cossos en forma de radiació electromagnètica amb una longitud d'ona (λ) que és inversament proporcional a la temperatura del cos.

La superfície del sol té una temperatura d'aproximadament 6.000 °C i emet bàsicament radiació de longitud d'ona curta (llum visible). Aquesta energia arriba a la Terra, on esdevé la font d'alimentació de l'activitat biològica i dels moviments de l'atmosfera i dels oceans. En fer aquest treball l'energia es degrada a formes de longitud d'ona més llarga i llavors retorna cap a l'espai. En el cas de la Terra la temperatura d'equilibri és de 15 °C, que correspon a una emissió d'energia centrada a la part infrarroja de l'espectre. Aquesta diferència entre la longitud d'ona de la radiació incident i la de la radiació emesa (figura A4.5) és també en part deguda a l'anomenat efecte d'hivernacle. Si la Terra no tingués atmosfera, la seva temperatura d'equilibri seria de 18 °C sota zero. A la figura A4.6 es compara la temperatura real d'alguns planetes del sistema solar (cercles negres) amb la que haurien de tenir si fossin un cos negre que recullís tota la radiació solar (corba, sense reflexió, i cercles blancs considerant l'albedo, la part de la radiació incident que es reflectida). La diferència entre els cercles blancs i els negres és deguda a la presència d'atmosferes, i és l'anomenat efecte d'hivernacle.

L'efecte d'hivernacle és, per tant, una característica natural pròpia de tots els planetes amb atmosferes que contenen gasos que interactuen amb la radiació que les travessa. Els gasos atmosfèrics responen de maneres diverses davant la radiació segons la seva λ i la forma molecular del propi gas (fotoionització, excitació dels electrons externs, fotodissociació, rotació i vibració). A l'atmosfera terrestre, el CO₂ i l'aigua, que són molt abundants, i d'altres gasos menys freqüents, són pràcticament transparents a la llum visible (ra-

diació incident) però absorbeixen intensament la radiació infrarroja emesa pel planeta (figura A4.7). La conseqüència d'això es que bona part de la radiació infrarroja és retinguda i l'equilibri tèrmic planetari s'assoleix a una temperatura superior a la d'un planeta sense atmosfera: els 15 °C que fan possible la vida sobre la Terra.

No només el gasos amb efecte d'hivernacle (a partir d'ara GEH) determinen el balanç tèrmic planetari (figura A4.8). També pot canviar la quantitat de radiació solar incident com a conseqüència de petites oscil·lacions orbitals que donen lloc a l'alternància cíclica entre períodes freds (glaciacions) i càlids (interglaciacions) que la Terra ha experimentat els darrers milions d'anys. L'albedo, la quantitat de llum reflectida pel planeta, també és important en el balanç tèrmic, i depèn de la reflectància de la superfície terrestre. En general els núvols, el gel i els terrenys sense vegetació reflecteixen més la radiació incident mentre els ecosistemes forestals tendeixen a captar-les. Finalment, els aerosols i les partícules en suspensió a l'atmosfera dispersen la llum i absorbeixen a l'infraroig.

Si, per alguna raó, la dinàmica habitual d'algun d'aquests factors canvia, el balanç energètic s'altera i la Terra s'escalfa o es refreda fins que assoleix un nou equilibri. Normalment aquests factors no són independents i estan lligats mitjançant processos de retroalimentació positiva o negativa. Per exemple, petites alteracions de l'òrbita terrestre provoquen una lleugera disminució en la radiació incident, la qual cosa té com a resultat un augment de la formació de gel en les zones polars. Això, al seu torn, genera un increment en l'albedo, fet que provoca, de retruc, una entrada neta de radiació solar encara més petita. Aquesta retroalimentació positiva donarà lloc a un període glacial.

De tots aquests factors però, els únics que són suficientment dinàmics i directes com per poder explicar el canvi climàtic observat en els darrers anys són els GEH i els aerosols, la concentració

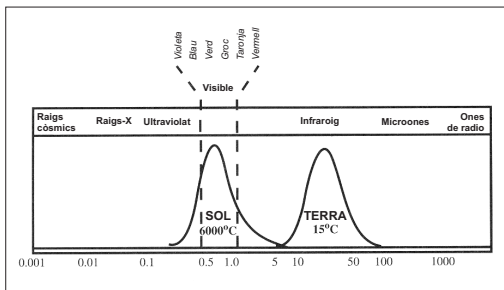


Figura A4.5. Espectres de radiació electromagnètica de dos cossos negres amb temperatures de 6.000 °C (com la del Sol) i de 15 °C (com la de la Terra). La longitud d'ona, a l'eix horitzontal, es mesura en micròmetres (μm, 1000 μm = 1 mm). La llum visible, corresponent als color de l'arc de Sant Martí, ocupa només la part de l'espectre indicada amb les línies de punts. L'eix vertical mesura la intensitat relativa de la radiació. Font: elaboració pròpia a partir de Philander (1998).

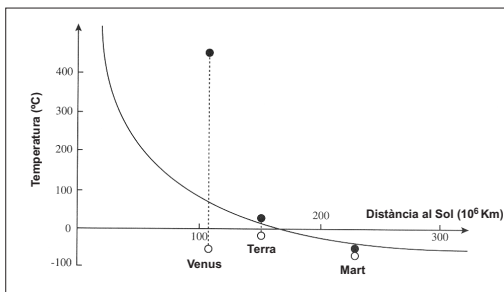


Figura A4.6. La corba mostra la disminució de la temperatura quan augmenta la distància al sol en planetes que no tenen ni atmosfera ni fons interns d'energia. Els cercles blancs tenen en compte que cada planeta reflecteix una part de la llum solar incident (albedo). El cercles negres corresponen a les temperatures reals. La longitud de les línies de punts és una mesura de l'efecte d'hivernacle a cada planeta. Font: elaboració pròpia a partir de Philander (1998).

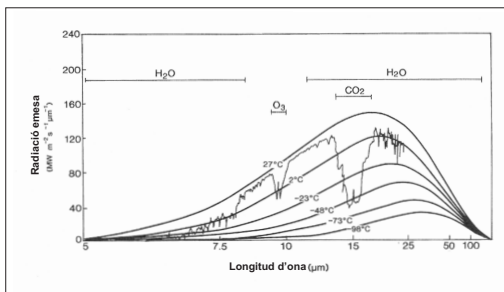


Figura A4.7. La corba amb pics de serra correspon a la radiació terrestre mesurada per un satèl·lit a sobre de l'Illa de Guam, al Pacific Tropical, on la temperatura era d'aproximadament 27 °C. Les corbes suavitzades són la radiació teòrica que emetrien cossos amb la temperatura superficial que s'indica. Font: elaboració pròpia a partir de Philander (1998).

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

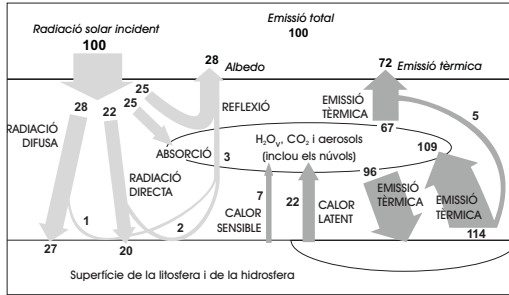


Figura A4.8. Balanç radiatiu terrestre. Els valors, percentatges respecte a la radiació total incident a les capes altes de l'atmosfera, s'han estimat fent mitjanes durant un període llarg de temps. Font: elaboració pròpia a partir de FEC (1993) i de Philander (1998).

dels quals, precisament, ha estat fortament modificada per l'home, que els ha emès a l'atmosfera —en grans quantitats— des del començament de la revolució industrial i, especialment, durant els darrers 50 anys (figura A4.9). De tots aquests compostos, el que més ha contribuït a l'alteració del balanç energètic del planeta és el CO₂, la

concentració atmosfèrica del qual no depèn només de l'activitat humana sinó que està fortament lligada al cicle del carboni i la seva dinàmica, que es relaciona pràcticament amb tots els processos geològics i biològics del planeta.

La figura A4.10 mostra un esquema de com seria el cicle global del carboni si a la Terra no hi hagués presència humana. Hi ha quatre compartiments, l'atmosfera, els ecosistemes terrestres, els oceans i la litosfera. El principals fluxos es donen entre l'atmosfera i els ecosistemes terrestres. Cada any els productors primaris capten una quantitat de CO₂ de 120,4 PgC, que és pràcticament compensada per la respiració (120 PgC any⁻¹) i l'emissió de metà (CH₄) que fan el conjunt dels ecosistemes terrestres. La diferència (0,4 PgC any⁻¹) s'acumula al sòl i és equivalent al carboni orgànic dissolt (DOC) que va a parar primer als rius i, posteriorment, al mar quan la pluja renta els sòls. Els rius transporten al mar 0,4

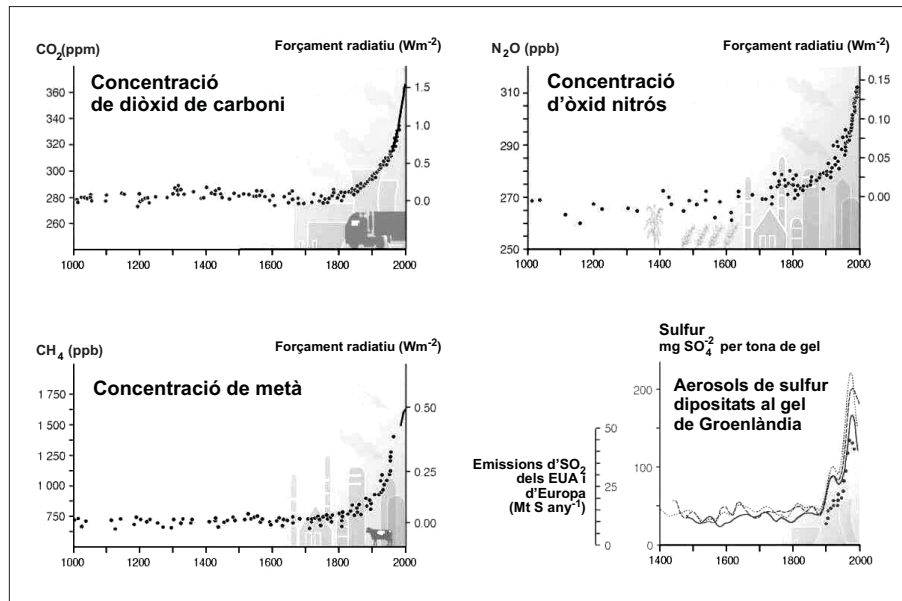


Figura A4.9. Indicadors de la influència humana sobre l'atmosfera des del començament de la Revolució Industrial (1750-1800). La concentracions de diòxid de carboni (a dalt a l'esquerra), d'òxid nitrós (a dalt a la dreta) i de metà (a baix a l'esquerra) s'han incrementat exponencialment a l'atmosfera des del moment que es va començar a emetre aquests gasos amb efecte d'hivernacle de manera sistemàtica. També es detecta un increment exponencial de la quantitat d'aerosols de sulfur (a baix a la dreta) dipositats al gel de Groenlàndia. Font: elaboració pròpia a partir d'IPCC (2001).

PgC any⁻¹ addicionals corresponents al carboni inorgànic dissolt (DIC) que resulta de la meteorització de les roques de la superfície terrestre. En la reacció de meteorització, la meitat del carboni (0,2 PgC any⁻¹ de CO₂) prové de l'atmosfera (CO₂) mentre que l'altra meitat correspon als carbonats alliberats de les roques. El cycle es tanca als oceans, mitjançant intercanvis atmosfera-oceà que generen una emissió neta de 0,6 PgC any⁻¹, que compensen la major part del carboni aportada pels rius. La resta (0,2 PgC any⁻¹) va a parar als sediments profunds on, eventualment, donarà lloc novament a roques calcàries.

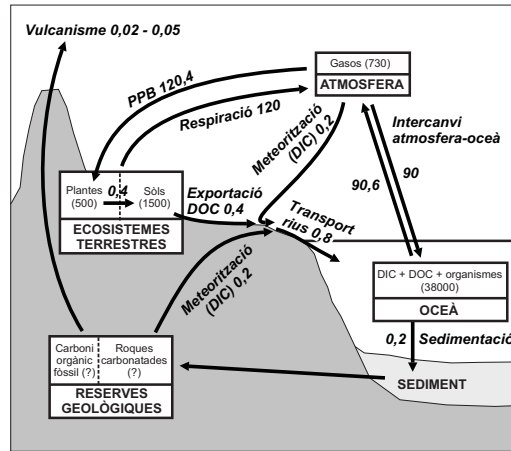


Figura A4.10. Cicle global del carboni (sense incloure-hi l'activitat humana). S'indiquen els volums de carboni en els compartiments (en PgC, on 1 Pg = 10¹⁵ g) i els fluxos entre ells (PgC any⁻¹) tal i com es van estimar per als anys 80 (IPCC, 2001). Atès que encara hi ha jaciments de combustibles fòssils per descobrir, el volum total de les reserves geològiques encara és desconegut.

Font: elaboració pròpia.

L'activitat humana ha alterat el cicle del carboni de manera significativa (figura A4.11). En primer lloc, mobilitza les reserves geològiques de carboni quan crema combustibles fòssils, (5,3 PgC any⁻¹) i quan produeix i utilitza ciment (0,1 PgC any⁻¹). També ho fa quan pertorba fortament els ecosistemes terrestres canviant els usos del sòl i provocant desforestació i incendis (1,7 PgC any⁻¹). El resultat de l'activitat humana és, doncs, una emissió neta anual de 7,1 PgC, encara que només 3 PgC any⁻¹ s'acumulen a l'atmosfera i són els responsables de l'increment de 3 ppm anuals que s'observa en la concentració atmosfèrica de CO₂. Encara hi ha molta controvèrsia sobre quin és el destí dels altres 4,1 PgC any⁻¹ restants. Els últims càlculs indiquen que uns 2 PgC serien captats anualment pels sistemes agrícoles i els ecosistemes forestals, mentre que l'oceà hauria de ser el destí dels 2 PgC any⁻¹ restants.

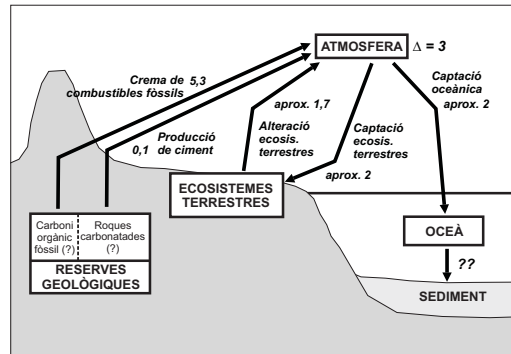


Figura A4.11. La pertorbació humana anual del cicle global del carboni. Els fluxos es donen en PgC any⁻¹.

Font: elaboració pròpia.

La captació forestal i agrícola, però, no implica pas la immobilització d'aquest carboni. Pensem que tota la biomassa tard o d'hora es respira i que quan els sistemes agrícoles s'abandonen o els boscos envelleixen, la captació disminueix. El cas dels oceans és molt diferent. Avui es pensa que l'oceà funciona com una bomba biològica que envia carboni cap als sediments, on sí que queda immobilitzat. L'increment de CO₂ atmosfèric afavoriria un augment de la producció primària i, per tant, una exportació més elevada de

carboni orgànic en forma de partícules (POC) cap a les aigües fondes i, de resultes d'això, una sedimentació més important. No obstant això, altres investigadors pensen que l'augment de producció es veu compensat per una respiració més elevada a la columna d'aigua, de tal manera que la taxa de sedimentació no canviaria gaire.

El que és ben cert és que, passi el que passi amb el carboni que falta per tancar exactament el ci-

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

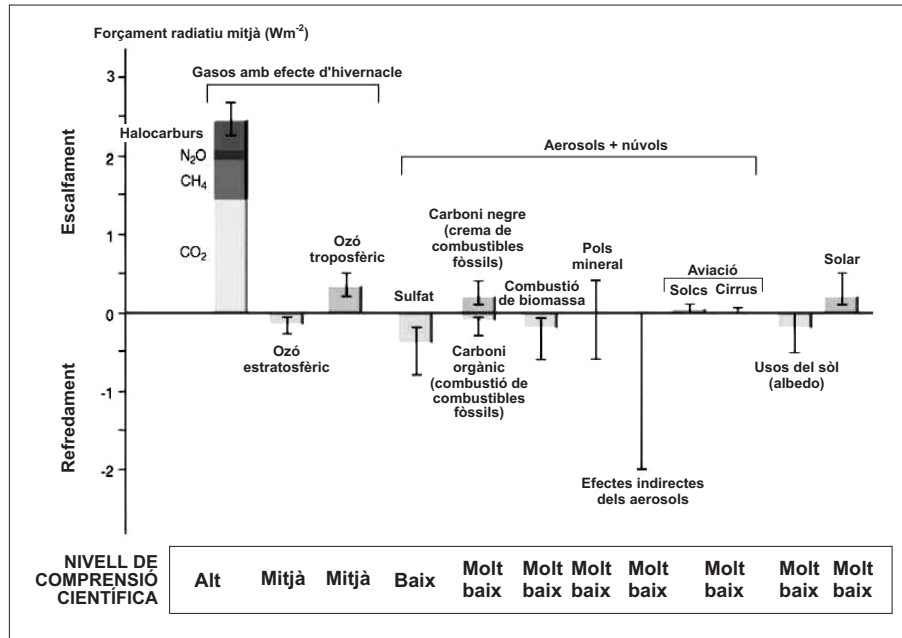


Figura A4.12. Forçaments naturals i antropogènics del clima l'any 2000 en relació al forçament de l'any 1750. L'altura de les barres indica la millor estima del forçament i les línies associades corresponen al rang de valors més probables atesos els coneixements disponibles actualment. L'absència de barres indica que encara no es disposa d'estimacions prou fiables d'un determinat forçament.

Font: elaboració pròpia a partir de IPCC (2001).

cle global, la concentració del CO₂ i d'altres gasos atmosfèrics amb efecte d'hivernacle va incrementant-se any rera any com a conseqüència de les activitats antròpiques. Això ha fet que en els darrers 50 anys l'efecte d'hivernacle terrestre s'hagi incrementat, provocant una alteració significativa del balanç radiatiu que ha escalfat el planeta i que ha canviat altres aspectes del clima. En l'equilibri, el balanç energètic planetari hauria de ser zero, però en la situació actual hi ha un balanç positiu, anomenat forçament radiatiu, que es mesura en watts m⁻² (energia per unitat de temps i de superfície). La figura A4.12 mostra el forçament radiatiu de l'any 2000, desglossat en els diferents factors que afecten el balanç i que han estat alterats d'alguna manera per l'activitat humana. La figura mostra clarament que, tot i que encara falta entendre molts detalls d'alguns dels processos, l'increment dels GEH és el principal responsable del forçament radiatiu i, per tant, de l'escalfament global.

A4.1.3. L'home com a agent de canvi global

Actualment pot semblar relativament trivial dir que l'activitat humana és la principal causa del canvi climàtic però, en realitat, la recerca científica que ha acabat demostrant la seva evident contribució a aquest fenomen ha estat llarga i laboriosa. De fet, no ha estat fins la publicació del Tercer Informe d'Avaluació del Grup Intergovernamental d'Experts sobre Canvi Climàtic (IPCC), l'any 2001, que això no s'ha pogut afirmar amb la seguretat extrema que demanava la societat –molt superior, per cert, a la que habitualment demanen els investigadors als propis resultats científics.

Els models climàtics han tingut un paper protagonista en tot aquest procés. Els primers models eren molt senzills, però amb el temps, la seva complexitat s'ha incrementat per integrar-hi tots els factors que determinen el balanç radiatiu (figura A4.13).

El canvi climàtic a Catalunya El forçament antropogènic i els canvis en el clima

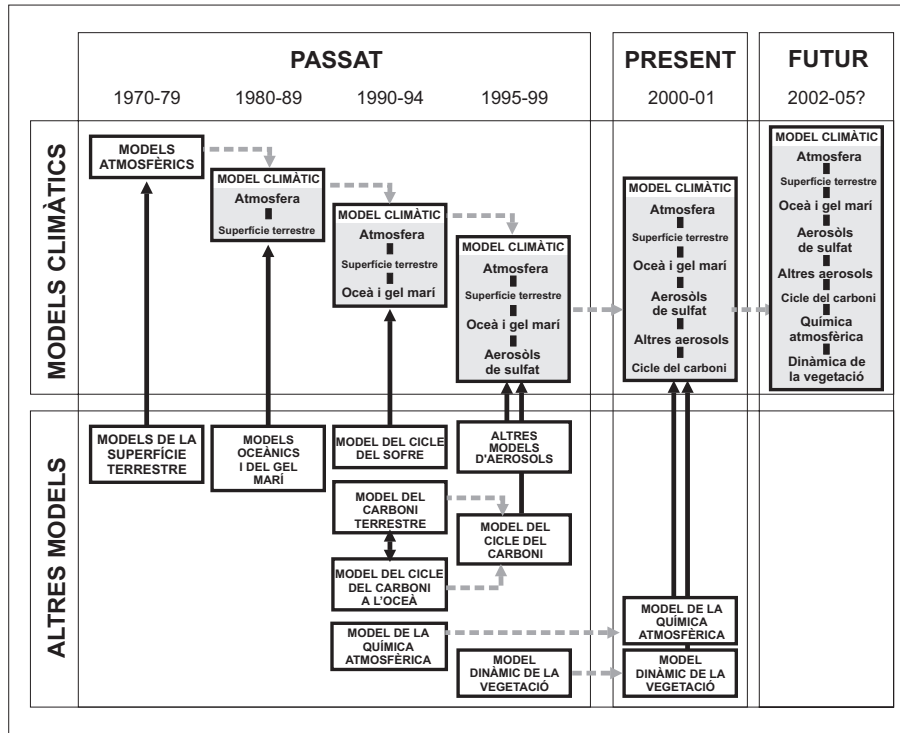


Figura A4.13. El desenvolupament dels models climàtics en els darrers 25 anys mostra com, en un primer moment, els diferents components es desenvolupen separadament i després s'acoblen a models climàtics cada cop més complicats. Les fletxes negres impliquen la integració dels models de compartiments en els models climàtics, mentre que les fletxes grises indiquen fases importants en el desenvolupament dels models.

Font: elaboració pròpia a partir d'IPCC (2001).

Encara que s'han de millorar moltes coses, sobretot la formulació dels processos biològics, encara massa simplista, ja es pot experimentar amb els models i estudiar si són capaços de reproduir les dades reals introduint-hi alguns processos i deixant-ne altres de banda. Concretament, es pot separar la part del forçament radiatiu provocada per l'activitat humana de la que és deguda a canvis en els processos naturals i, després fer córrer els models només amb una o l'altra per esbrinar si es pot reproduir el clima observat només amb una d'elles. La figura A4.14 mostra els resultats de les simulacions on només es considera la variació natural del forçament radiatiu, mentre que la figura A4.15 mostra els resultats dels models considerant només el forçament antropogènic.

Fent servir només el forçament radiatiu natural (figura A4.14) no es pot reproduir les observacions mentre que, quan es considera només el forçament antropogènic, l'ajust és molt millor (figura A4.15). Malgrat tot, només quan es consideren a la vegada tots dos tipus de processos la reproducció del clima observat esdevé molt acurada (figura A4.16). Això porta a la conclusió que el forçament antropogènic ha estat el principal responsable del canvis climàtics observats fins ara, encara que també s'ha produït una certa variació atribuïble a causes naturals.

A4.2. El paper d'Europa en el canvi climàtic

L'activitat humana és la principal responsable del canvi climàtic que s'està experimentant a escala global i que es manifestarà d'una manera en-

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

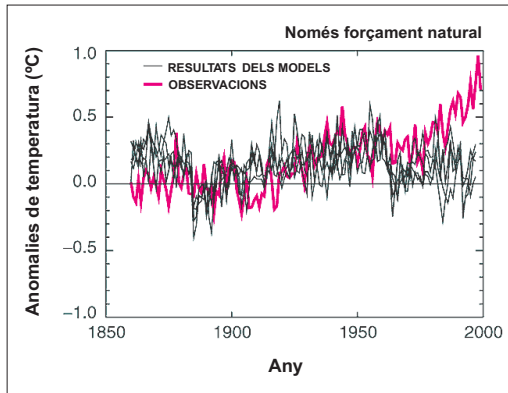


Figura A4.14. Sèrie temporal (en vermell) on es mostra l'anomalia de la temperatura mitjana anual respecte al valor mitjà entre els anys 1880 i 1920, obtinguda amb dades experimentals. Les línies negres són el resultat de les simulacions de diversos conjunts de models acoblats atmosfera-oceà, on només s'han introduït els **factores naturals** que afecten el forçament radiatiu.

Font: elaboració pròpia a partir d'IPCC (2001).

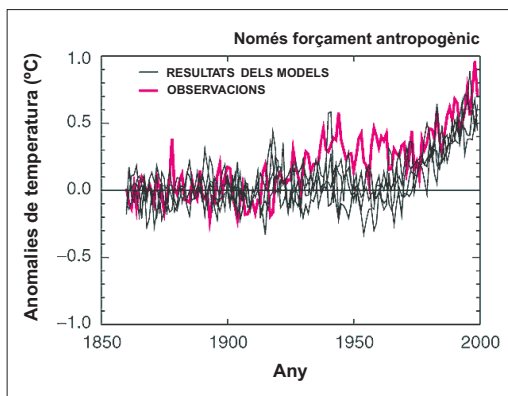


Figura A4.15. Sèrie temporal (en vermell) on es mostra l'anomalia de la temperatura mitjana anual respecte al valor mitjà entre els anys 1880 i 1920, obtinguda amb dades experimentals. Les línies negres són el resultat de les simulacions de diversos conjunts de models acoblats atmosfera-oceà, on només s'han introduït els **factores antropogènics** que afecten el forçament radiatiu.

Font: elaboració pròpia a partir d'IPCC (2001).

cara molt més intensa en el futur. És per aquest motiu, doncs, que caldrà desenvolupar mesures de mitigació i d'adaptació en el futur. La proporció entre un tipus de mesura i un altre dependrà de quina sigui la nostra sensació d'alarma i, per tant, del temps que es tardi en donar-hi una resposta contundent. Si es respon aviat, la majoria de les mesures seran preventives i aniran enca-

minades a l'establiment de models energètics alternatius que permetin abandonar l'ús dels combustibles fòssils i reduir de manera clara i decidida el volum de les emissions antròpiques de GEH. Encara que la resposta fos prou ràpida, s'hauria d'invertir en algunes mesures d'adaptació perquè, fins i tot aturant immediatament totes les emissions avui, es produiria un canvi considerable en el clima durant les properes dècades. Si, per contra, la societat no és capaç de fer front a aquest problema perquè, com sembla, continua considerant-lo secundari, a mitjà termini es presenta una situació terriblement complicada i de solució enormement costosa. Podríem dir, sent moderats, que comprometrà seriosament la nostra qualitat de vida i accentuarà les desigualtats a escala mundial fins a límits insospitats i probablement insostenibles.

Tant en un cas com en l'altre es produiran una sèrie de despeses i s'hauran de compensar les pèrdues i les alteracions que provocarà el canvi climàtic. Ben segur que tothom haurà de contribuir-hi. No obstant això, cal començar a plantejar com se'n distribuirà la factura. No hi ha cap garantia que el seu repartiment sigui just. Es preveu que la distribució d'aquests costos sigui, necessàriament, injusta, ja que els impactes no es repartiran pas de manera homogènia per tot el planeta. Així, segons les actuals prediccions, les regions tropicals, on es troben bàsicament estats en vies de desenvolupament, patiran la major part dels impactes negatius, mentre que les zones boreals, on se situen estats amb elevats estàndards de qualitat de vida, patiran menys i, fins i tot, podrien arribar a tenir condicions climàtiques més favorables que les actuals.

A4.2.1. La difícil tasca d'atribuir responsabilitats

Per tal de garantir un repartiment just de les despeses, s'hauria de mesurar amb suficient fiabilitat la contribució actual i la històrica de cada estat del món a l'increment de l'efecte d'hivernacle—en termes d'emissions de GEH— així com la seva contribució futura tenint en compte les seves po-

lítiques energètiques. L'únic repartiment just possible és aquell en què les despeses siguin proporcionals a les responsabilitats (passades i futures).

L'atribució de responsabilitats té dos components. Per un costat hi ha l'aspecte tècnic de mesurar amb prou fiabilitat quina ha estat i quina serà la contribució de cada estat en particular a l'increment de l'efecte d'hivernacle. Per l'altre, hi ha la resposta sociopolítica d'aquest mateix estat davant d'aquesta informació. En l'aspecte tècnic (com s'estudiarà en detall en el proper apartat) s'ha avançat moltíssim en pocs anys, i en algunes regions del planeta aviat s'utilitzaran sistemes de mesura i de seguiment capaços de proporcionar estimacions molt fiables de les contribucions nacionals a l'increment de l'efecte d'hivernacle. A la resta del món, es continuaran utilitzant els inventaris, un protocol universal per calcular les contribucions nacionals que, encara que imprecís, proporciona una bona aproximació de quina és la contribució relativa de cada estat.

Els aspectes socials i polítics són molt més subtils. El primer pas és acceptar que s'ha d'actuar. En els estudis climàtics, tant en les prediccions de la magnitud del canvi futur com en la atribució de responsabilitats presents i passades, hi ha una certa incertesa que és inherent al funcionament del sistema climàtic i que pràcticament no es reduirà encara que es millorin molt les tècniques o el coneixement científic. Una altra incertesa neix del fet que el forçament radiatiu futur dependrà en gran mesura de la nostra resposta present davant del problema. Es tracta, per tant, d'una incertesa externa als models que els estudiosos del clima no podem reduir, però potser sí que ho poden fer el sociòlegs, els economistes, els polítics, o per què no, la societat en general. Els climatòlegs ja han acceptat aquestes incerteses, cosa que encara ha de fer la societat, i prendre la decisió d'actuar malgrat que les afirmacions sobre aquest fenomen no semblin aparentment tan «exactes» com les procedents d'altres camps científics. En qualsevol cas, la in-

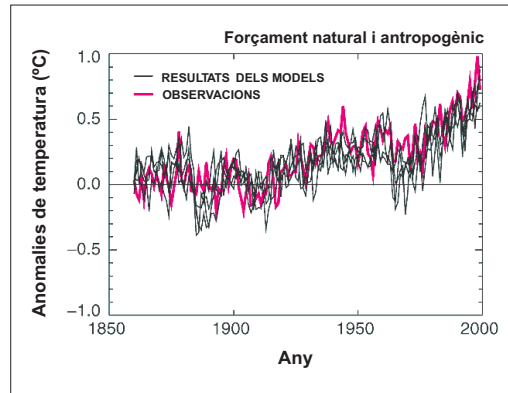


Figura A4.16. Sèrie temporal (en vermell), que mostra l'anomalia de la temperatura mitjana anual respecte al valor mitjà entre els anys 1880 i 1920, obtinguda amb dades experimentals. Les línies negres són els resultats de les simulacions de diversos conjunts de models amblogs atmosfera-oceà, on s'han introduït **tots els factors (naturals i antropogènics)** que afecten el forçament radiatiu.
Font: elaboració pròpia a partir d'IPCC (2001).

acció davant de la incertesa no és una bona resposta política, atès que com més es trigui a donar una resposta més alt serà el cost social provocat pel canvi climàtic (May, 2001).

La certesa de la mort, dels accidents i de les catàstrofes ha generat el lucratiu negoci de les assegurances que, a més, té una innegable utilitat social, ja que permet mitigar els efectes dels cops de l'infortuni. La certesa del canvi climàtic hauria de generar una resposta similar. De fet, la històrica resistència social i política a acceptar el canvi climàtic és una versió a gran escala del procés de decisió que fem per contractar una assegurança. No es pren la mateixa decisió davant d'una assegurança d'accident que davant d'una assegurança de vida ja que, mentre la mort és una certesa, l'accident potser no es produirà mai. Fins ara, la societat s'ha enfrontat al canvi climàtic amb dubtes equivalents als que té un individu davant d'una assegurança d'accidents. La societat ha fet servir la incertesa natural associada al canvi climàtic per agafar-se a la inútil esperança que potser no succeirà. Fins ara, el canvi climàtic s'ha percebut com un possible accident, no pas com una realitat. No obstant

això, és un fenomen ben real. Tant que, si es triga gaire a respondre, seria com si una persona que pateix un càncer avançat anés a fer-se una assegurança de vida. Us imagineu, si la hi fan, el preu de la pòlissa que hauria de pagar?

La signatura a Rio de Janeiro el juny de 1992 del Conveni Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (UNFCCC), en el marc de la Conferència de les Nacions Unides sobre Medi Ambient i Desenvolupament (la Cimera de la Terra), va representar un petit raig d'esperança ja que es va reconèixer que les emissions de GEH havien provocat un considerable increment de l'efecte d'hivernacle i, per tant, alterat el sistema climàtic. Els signants del Conveni Marc van acordar, com a principal objectiu, l'estabilització de les concentracions atmosfèriques de GEH en un valor que: «... no sigui tan alt com per fer que la interferència humana resulti perillosa per al sistema climàtic» (PNUMA, 2002).

Atès el coneixement tècnic de l'època i la tebiesa demostrada fins llavors, aquest acord tenia un gran potencial per esdevenir un document clau en la lluita contra el canvi climàtic. Des d'aleshores s'ha investigat quin hauria de ser aquest nivell de seguretat a partir del qual la intervenció humana no fos perillosa per al sistema climàtic (molts científics consideren que ja s'ha ultrapassat). Finalment, es va acordar una reducció preventiva d'un 5% de les emissions en els països industrialitzats entre els anys 1990 i 2012, la qual hauria de permetre desaccelerar una mica el creixement exponencial de les concentracions atmosfèriques de GEH.

En aquest acord, el famós Protocol de Kyoto de 1997, els estats afectats van acordar reduccions voluntàries més o menys proporcionals a les seves emissions històriques i al seu nivell de desenvolupament, i es van comprometre a investigar mètodes més fiables per determinar les contribucions nacionals respectives. La manca d'una voluntat decidida de molts estats (com l'Estat espanyol) a l'hora d'implantar i aplicar de

manera contundent les polítiques necessàries per complir el Protocol fa que l'assoliment d'una reducció global del 5% el 2012 sigui, en aquest moment, una utopia. Això ens fa pensar que la «inacció» ha prèns noves formes. En la política internacional actual s'accepta oficialment la realitat del canvi climàtic però, a manca d'un mecanisme supraestatal que obligui al compliment dels acords, tota acció queda supeditada als interessos dels estats i a polítiques cegues plantejades a massa curt termini. La nova excusa són les incerteses en la definició de les contribucions estatals i el fet d'apuntar-se a unes polítiques neoliberals que només prioritzen el creixement econòmic, com si aquest fos possible «ad infinitum» en un món amb recursos limitats.

Des del punt de vista tècnic cada cop es disposa de millors prediccions del futur canvi i és possible atribuir amb una fiabilitat més elevada les responsabilitats de cada estat. En canvi, en el camp de la resposta social i política la situació és molt pitjor que fa deu anys, i el nou «ordre» mundial no ajudarà gens a millorar la situació. La possibilitat de donar una resposta clara al canvi climàtic passa no només pel desenvolupament de noves eines tecnològiques sinó, sobre tot, pel desenvolupament de noves eines legals i de governança de caràcter internacional, que permetin actuacions concertades i d'obligatori compliment a escala planetària. No obstant això, és clar, tal i com es presenta el món actualment, que això encara és molt més utòpic.

A4.2.2. La mesura de la contribució a l'increment de l'efecte d'hivernacle. Balanços versus inventaris

El sistema operacional acordat en el Protocol de Kyoto per calcular la contribució neta de cada estat a l'increment de l'efecte d'hivernacle són els inventaris d'emissions. Encara que molt imprecisos, són un protocol homogeni i estandaritzat desenvolupat per l'IPCC que es pot aplicar a qualsevol país del món, independentment de la seva capacitat tecnològica. És important remarcar aquest punt, ja que els inventaris no són

SUMARI DE L'INFORME D'EMISSIONS EN EQUIVALENTS DE CO₂ DE L'ESTAT ESPANYOL L'ANY 2000

Fonts i embornals de GEH		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFCs	PFCs	SF ₆	Total
Categories		Equivalents de CO ₂ (Gg)						
Emisió total neta		277379	38363	30497	9878	409	209	356735
1. Energia		285260	2842	6253				294355
A. Consum de combustibles fòssils	1. Producció energètica	103542	44	1313				104899
	2. Manufactures i construcció	58203	106	1905				60214
	3. Transport	85118	211	2080				87409
	4. Altres sectors	34436	695	955				36086
B. Emissions fugitives de combustibles	1. Combustibles sòlids	2005	1209					3214
	2. Petrol i gas natural	1957	577	NE				2533
2. Processos industrials		19903	69	2307	9878	409	209	32773
A. Mineria		17488						17488
B. Indústria química		602	52	2307	NE	NE		2961
C. Metalls		1812	16		NE	367	NE	2196
D. Altres tipus de producció		0						0
E. Elaboració d'halocarbons i de SF ₆					6395			6395
F. Consum d'halocarbons i de SF ₆					3483	41	209	3733
G. Altres		NE	NE	NE	NE	NE	NE	0
3. Us de dissolvents i altres productes		1269		440				1709
4. Agricultura		0	22263	20306				42569
A. Fermentació entèrica			14070					14070
B. Gestió de fems			7843	1450				9293
C. Conreu de l'arròs			290					290
D. Sòls agrícoles		NE	NE	18570				18570
F. Crema de matolls i de residus agrícoles			60	286				346
G. Altres			NE	NE				0
5. Canvis en els usos del sòl		-29252	0	0				-29252
A. Canvis en els boscos i en la quantitat de fusta		-29252						-29252
B. Conversió entre boscos i praderies		NE	NE	NE				0
C. Terrenys abandonats		NE						0
D. Emissions i captació de CQ pels sòls		NE						0
E. Altres		NE	NE	NE				0
6. Residus		200	13189	1192				14581
A. Abocadors		32	10099					10131
B. Gestió d'agües residuals			2241	1079				3320
C. Incineració de residus		168	270	113				550
D. Altres		NE	580	NE				580
7. Altres		NE	NE	NE	NE	NE	NE	0

Font o embornal inexistent	NE
No s'estima (font o embornal que existeix però de magnitud desconeguda)	NE
Estimació de qualitat baixa	
Estimació de qualitat mitjana	
Estimació de qualitat alta	
Estimació completa (on s'han considerat tots els elements)	1234
Estimació incompleta (on no s'han considerat tots els elements)	1234
Valor resultant de la suma de moltes estimacions, independentment de la seva qualitat	

Figura A4.17. Sumari de l'inventari d'emissions de l'Estat espanyol corresponent a l'any 2000. A l'inventari es quantifica la magnitud de cadascuna de les categories i subcategories de les fonts (valors positius) i embornals (valors negatius) identificats per l'IPCC. Les estimacions poden ser de qualitat baixa, mitjana o elevada segons el grau de certesa. També poden ser completes, quan es tenen en compte tots els elements que intervernen a la font o a l'embornal, o parcials en cas contrari. Finalment, hi ha algunes fonts i embornals dels quals no hi ha dades. Per definir la qualitat i la integritat de les dades es segueix el protocol definit per l'IPCC i per l'Agència Europea del Medi Ambient (AEMA). Les fonts i embornals dels quals no hi ha dades disponibles varien segons el grau de desenvolupament del sistema de comptabilitat ambiental de cada estat.

Font: elaboració pròpia a partir de les taules 2 i 7 de l'informe Greenhouse gas emissions inventories report from Spain 1990-2000 (MMA, 2002, EEA, 2002).

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

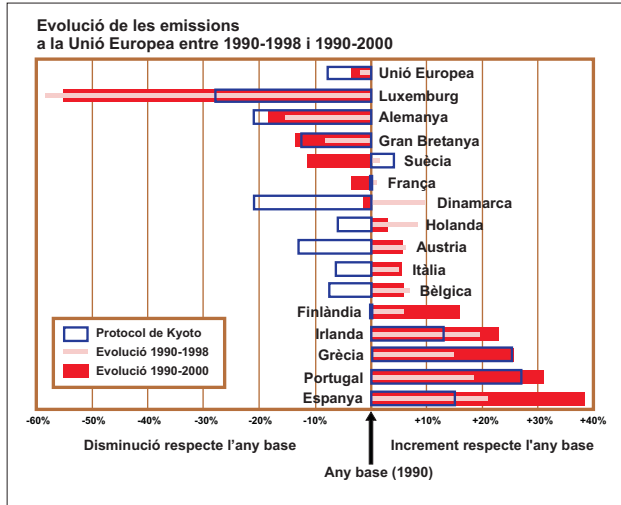


Figura A4.18. Comparació entre els compromisos voluntaris d'evolució de les emissions de GEH acordats entre els estats membres de la Unió Europea, en el marc del Protocol de Kyoto, i la seva evolució real des de l'any 1990 al 1998 i al 2000. Les barres indiquen el percentatge d'augment o de reducció respecte a 1990. En blau s'indica el percentatge acordat.

Font: elaboració pròpia a partir de EEA (2002) i MMA (2002).

La Unió Europea es va comprometre, en el Protocol de Kyoto, a una reducció conjunta del 8% de les seves emissions de GEH i després va negociar internament els compromisos de cada estat membre. A l'Estat espanyol, a causa del seu inferior desenvolupament industrial, se li va concedir poder incrementar fins a un 15% les seves emissions entre 1990 i el 2008-2012. No obstant això, l'any 2000 l'increment ja havia estat del 38% (vegeu capítol A5 d'aquest informe), i les projeccions més realistes indiquen que el creixement en l'horitzó del 2010 podria arribar a ser del 50% (figura A4.19)*. En un context europeu en el qual hi ha estats que amb tota seguretat, compliran els seus compro-

pas documents científics sinó administratius. A partir de dades estadístiques més o menys elaborades de l'economia productiva, i aplicant una sèrie de factors de conversió, és possible obtenir una aproximació de quin és el volum d'emissions de GEH en l'estat considerat.

A tall d'exemple, la figura A4.17 mostra l'inventari d'emissions de l'Estat espanyol corresponent a l'any 2000, amb una valoració qualitativa del grau de fiabilitat que tenen les dades que hi ha a cada casella. A la figura queda clar que només és possible confiar-se de l'estimació de les emissions energètiques i industrials de CO₂. Tots els altres valors (aproximadament un 20% del total) són molt incerts i poden estar, en alguns casos, molt sobreestimats o subestimats.

Aquests inventaris es calculen anualment per tal de resseguir l'evolució de les emissions nacionals i poder avaluar el grau de compliment dels compromisos adquirits. La figura A4.18 es mostra l'evolució dels inventaris d'emissions a la Unió Europea entre 1990 i 2000.

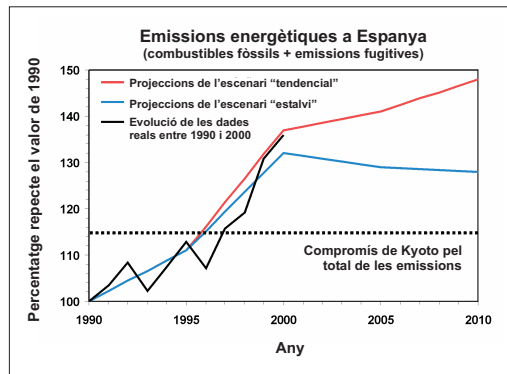


Figura A4.19. Comparació entre l'evolució real de les emissions energètiques a l'Estat espanyol entre 1990 i 2000 i les projeccions dels dos escenaris estudiats pel Grup de Prospectiva Energètica de l'Institut para la Diversificació y Ahorro de la Energía (IDEA), amb la col·laboració de la Subdirecció General de Planificació Energètica del Ministeri d'Economia i de la Subdirecció General d'Anàlisi i Avaluació de Polítiques de Despesa del Ministeri d'Hisenda. L'escenari «tendencial» correspon a la continuïtat en les actuals pautes de consum, i l'escenari «estalvi» correspon a una intensificació substancial de les mesures d'eficiència energètica, amb millores en tots els sectors respecte a les aplicades a la dècada dels anys 90. Tots dos escenaris assumeixen la consecució de tots els objectius del Plan de Fomento de Energías Renovables, aprovat a finals de 1999.

Font: elaboració pròpia a partir de IDEA (2000).

* En el moment de la publicació d'aquest informe (començaments del 2005), el Ministeri de Medi Ambient ha declarat, provisionalment, que l'increment era ja d'un 45% el 2004, més elevat que el calculat en el pitjor dels escenaris de la figura A4.19.

misos o fins i tot tindran excedents (França, Gran Bretanya i Alemanya, figura A4.18) i en el qual, a partir de l'1 de gener de 2005 s'ha establert un mercat d'emissions de GEH, no és difícil predir a curt termini que l'Estat espanyol haurà de comprar emissions als seus socis comunitaris, fet que sens dubte afectarà la competitivitat de l'economia espanyola en general, i la catalana en particular.

L'inventari però, no és pas la millor manera de mesurar la contribució de cada estat. A part de ser poc fiables, els inventaris és molt probable que s'estigui subestimant la captació biològica d'una bona part del CO₂ emès per l'home. La figura A4.20 mostra la diferència entre la captació de CO₂ pels ecosistemes terrestres estimada amb els inventaris i amb altres mètodes. Segons alguns dels altres mètodes, la captació pot arribar a ser fins a 15 vegades superior a l'estimada pels inventaris. De tots els mètodes alternatius, el més prometedori és la monitorització dels balanços regionals de carboni. En una primera aproximació, un balanç regional de carboni es pot obtenir fent un seguiment en el temps de les concentracions de CO₂ en les masses d'aire que entren i surten d'una regió determinada, tal i com es mostra a la figura A4.21. A la pràctica, el càlcul del balanç de carboni no és tan senzill, i implica el disseny d'un sistema de monitorització i modelat de les concentracions atmosfèriques de GEH d'enorme complexitat.

A4.2.3. El balanç de carboni de la Unió Europea i dels seus estats membres

La Unió Europea ha apostat fermament pel mètode del balanç de carboni per mesurar la contribució dels seus estats membres a l'increment de l'efecte d'hivernacle. La seva estratègia ha consistit en el finançament, tant en el 5è com en el 6è Programa Marc (FWP, el programa que es fa servir a Europa per gestionar la recerca), d'una sèrie de projectes d'investigació agrupats sota la denominació CARBOEUROPE (Freibauer et al., 2001). La finalitat de CARBOEUROPE és el desenvolupament d'una eina fiable i verificable

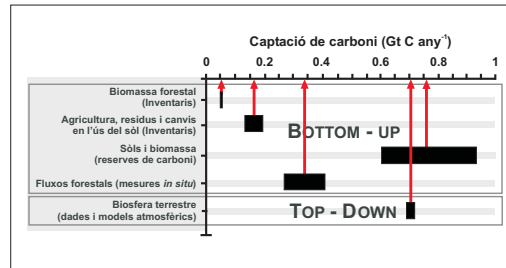


Figura A4.20. Estimes, fetes amb diferents mètodes, de la captació de carboni pels ecosistemes terrestres a Europa (en GtC any⁻¹). Les fletxes indiquen el valor mitjà, i l'amplada del requadre negre correspon a la incertesa de cada estimació. S'han separat els valors proporcionats pels mètodes que fan servir mesures directes en els ecosistemes (bottom-up) d'aquelles elaborades a partir de dades atmosfèriques (top-down).

Font: elaboració pròpia.

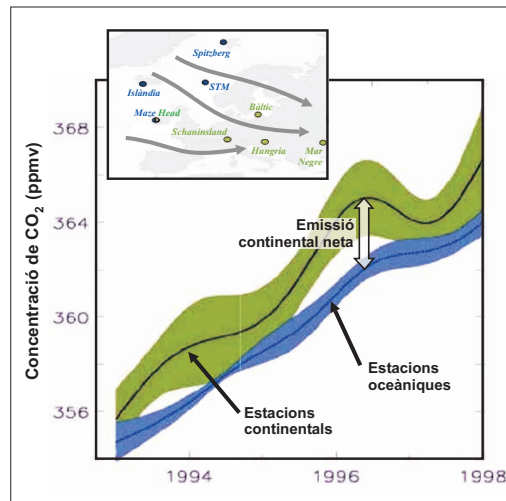


Figura A4.21. Evolució de la concentració mitjana de CO₂ atmosfèric, mesurada a diverses estacions del continent europeu entre els anys 1993 i 1998. En el requadre es mostra un mapa amb la localització dels punts de mostreig i les trajectòries habituals de les masses d'aire. Les estacions oceàniques mesuren l'aire que entra al continent, mentre que les continentals mesuren la concentració de CO₂ a l'aire que en surt. Les diferències entre les mesures dels dos grups d'estacions permeten estimar l'emissió neta del continent europeu.

Font: elaboració pròpia a partir de Valentini et al. (2000).

per calcular les contribucions nacionals a l'increment de l'efecte d'hivernacle mitjançant el càlcul de balanços de carboni regionals.

Aquesta eina, que un cop desenvolupada constarà d'un sistema de monitorització de les con-

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

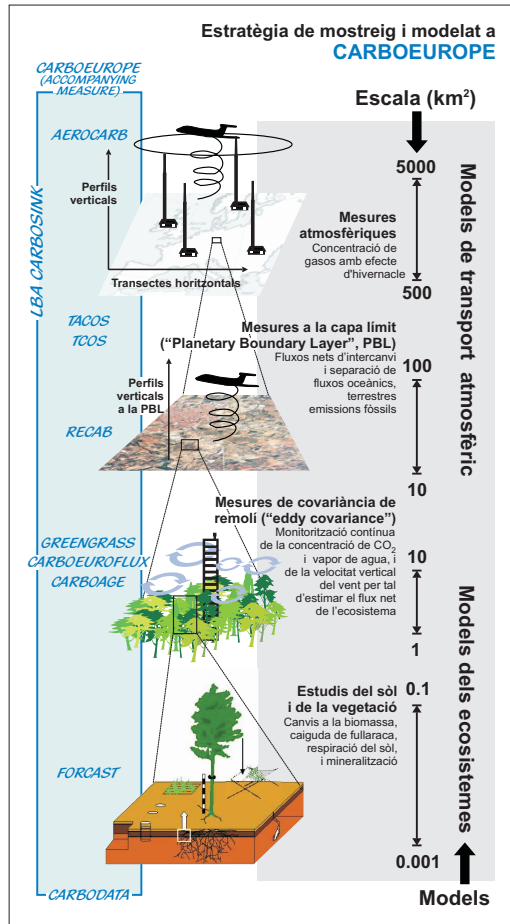


Figura A.4.22. L'aproximació integrada del grup de projectes europeus CARBOEUROPE al 5è Programa Marc. El que es pretén és quantificar el balanç de carboni europeu a escales que varien des de l'ecosistema, la més petita, a tot el continent, la més gran. En blau, els noms dels projectes de recerca involucrats. Al 6è Programa Marc, l'estratègia és semblant.

Font: elaboració pròpia.

centracions atmosfèriques i dels fluxos naturals i antropogènics de carboni i d'un sistema de modelització per generar el balanç a partir de les dades de camp, podrà exportar-se i utilitzar-se per calcular les contribucions nacionals en altres regions del planeta. De fet, a Austràlia, als Estats Units d'Amèrica i al Japó s'estan desenvolupant eines semblant sobre la base comuna de l'estudi dels balanços de carboni. La figura A4.22 mostra l'aproximació multi-escalar als fluxos de carboni realitzada pels diferents pro-

jectes coordinats en el 5è Programa Marc. En el 6è, l'estratègia és bàsicament la mateixa, però amb una millora significativa en la resolució espacial i temporal.

La part atmosfèrica de CARBOEUROPE consisteix en la monitorització de les concentracions atmosfèriques de CO₂ a sobre del continent europeu mitjançant una sèrie molt nombrosa de punts de mostreig de tipologia diversa que caracteritzen, cadascun, una regió determinada. Hi ha estacions on es mostra el CO₂ a nivell de terra (figura A4.23) i altres situades en torres molt elevades o que fan servir avionetes on es mesura la concentració de GEH en alçada (figura A4.24).

Les concentracions obtingudes d'aquesta manera es fan servir per alimentar models de transport atmosfèric que s'executen cap al passat (modelització inversa) per tal d'inferir les trajectòries que han seguit les masses d'aire mostrejades i saber quina era la seva concentració de CO₂ en cada moment (figura A4.25). Fent servir totes les dades que són simultànies, i tenint en compte les fonts i embornals locals, es pot generar un mapa de concentracions per a cada moment (figura A4.26).

Finalment, a partir de les variacions en el temps d'aquests camps de concentracions es poden inferir el fluxos nets de carboni (en quins llocs i en quin moment té lloc una emissió o una captació neta de carboni). El flux net anual resultant és un balanç de carboni i correspon a la contribució d'aquella regió a l'EGE en el cas que sigui positiu. Les estimacions actuals apunten una emissió per crema de combustibles fòssils a la Unió Europea d'1,7 PgC any⁻¹, dels quals 0,47 PgC any⁻¹ (és a dir, un 30% del total) serien absorbits pels ecosistemes terrestres donant lloc a una emissió neta de 1,23 PgC any⁻¹. Actualment encara no es disposa d'estimacions prou fiables de les contribucions dels diversos estats. En aquesta línia, però, cal plantejar la importància que tindria per l'Estat espanyol que els seus ecosistemes terrestres tinguessin una capacitat de captació semblant a

El canvi climàtic a Catalunya El forçament antropogènic i els canvis en el clima

la de la resta de boscos europeus. Segons l'inventari d'emissions de l'Estat espanyol (MMA, 2002), el boscos capten una quantitat de carboni equivalent al 7,6% de les emissions estatals (figura A4.17). Encara que tant la desertització com els incendis fan pensar que a Espanya no s'arribarà a percentatges de captació tan alts com els de la resta d'Europa, és probable que en els inventaris s'estigui subestimant el paper dels ecosistemes terrestres i que les emissions netes declarades siguin superiors a les reals.

La possibilitat d'obtenir estimacions fiables del balanç de carboni a una escala espacial més petita, similar a la mida dels estats membres de la Unió Europea, és directament proporcional a la qualitat de la xarxa de mostreig atmosfèric. I aquesta és més gran com més elevada és la freqüència de mostreig a les seves estacions i com millor sigui el seu recobriment espacial. És especialment important que no quedin àrees sense cap estació i de les quals es desconeix completament el comportament de les concentracions de CO_2 atmosfèric.

De moment, el mostreig només ha assolit prou qualitat al centre d'Europa, on hi ha una xarxa molt densa d'estacions de tipologia molt diversa. En aquesta zona, les administracions alemanya, francesa i holandesa, sobretot, han donat un suport decidit a l'estratègia europea, han aportat finançament i han involucrat les seves agències meteorològiques i ambientals en el mostreig. Aquests estats comencen a disposar de les primeres estimacions fiables de la seva contribució a l'efecte d'hivernacle, fet que encara no és possible al sud d'Europa, on fins ara la resposta de les administracions públiques ha estat més aviat tènua, per no dir nul·la.

Fins l'any 2004, a l'Estat espanyol han estat funcionat només dues estacions de mostreig de CO_2 atmosfèric. Izaña, la més antiga, està situada a les Illes Canàries, i la gestiona l'*Instituto Nacional de Meteorología* (INM), amb fons d'institucions nord-americanes que fan servir les seves dades per es-

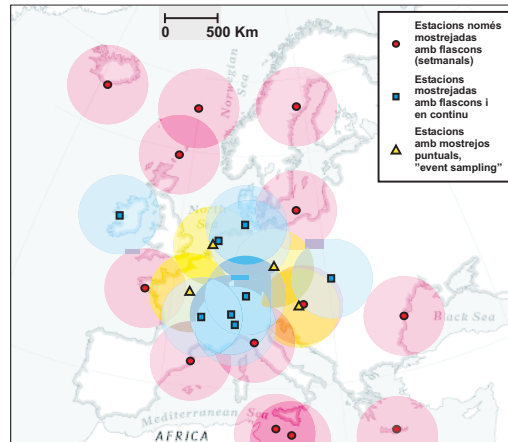


Figura A4.23. Estacions de mostreig de la concentració de GEH a nivell de terra en CARBOEUROPE (projecte AEROCARB del 5è FWP). Els diferents símbols permeten diferenciar les estacions segons la seva tipologia. Els cercles que envolten cada símbol són una aproximació grollera a la regió ben representada per les dades l'estació (àrea d'uns 300 km de radi, però que pot variar entre els 50 i els 500 km).

Font: Elaboració pròpia.

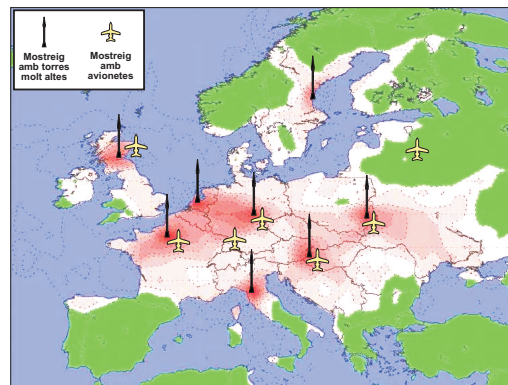


Figura A4.24. Estacions de mostreig de la capa límit planetària (PBL, de l'anglès *Planetary Boundary Layer*) que estaven en funcionament a Europea l'any 2003 (projectes europeus AEROCARB i CHIOTTO del 5è FWP i projectes estatals de França, Alemanya, Holanda i Regne Unit). Aquests mostres es poden fer recollint l'aire a la part més alta de torres molt elevades o bé fent servir equips aerotransportats. Aquestes estacions són representatives de regions molt amples però d'extensió variable en funció de les condicions atmosfèriques. Amb la intensitat variable de vermell es representen les regions mostrejades per les torres, mentre que en verd es mostren les àrees que queden fora del seu abast. A destacar que pràcticament tota la Península Ibèrica no està representada per cap torre ni per cap mostreig aerotransportat. Això ha canviat a partir del 2004.

Font: Elaboració pròpia.

tudiar el fluxos de carboni a l'Atlàntic central. En el càlcul del balanç de carboni europeu, la informació que proveeix Izaña només serveix per definir les condicions de contorn en el costat occidental del continent (combinada amb la que procedeix de moltes altres estacions atlàntiques). Les seves dades no tenen cap utilitat de cara a estimar el balanç de carboni de l'Espanya peninsular. L'altra estació de mostreig està situada a Begur (Girona) i és l'única localitzada a la Península Ibèrica (Portugal no en té cap). Gestionada pel Laboratori de Recerca del Clima del Parc Científic de Barcelona (LRC-PCB), aquesta estació es va implantar amb finançament de la Unió Europea (durant el 5è FWP) per cobrir, en part, la manca de dades que hi havia en el sudoest d'Europa. Les administracions de l'Estat espanyol es van mostrar durant algun temps molt poc interessades en finançar projectes de recerca que recolzessin l'estratègia europea del carboni. L'única excepció va ser la petita contribució del Servei Meteorològic de Catalunya, de la Generalitat de Catalunya, al finançament del mostreig a Begur.

Després de les desastroses dades d'emissions de l'any 2000 i després de l'alarma social que ha provocat la successió de dos estius atípics (2002 i 2003), s'ha produït una certa reacció. Des de mitjans de 2004 es realitza un mostreig troposfèric amb avioneta finançat pel Programa Nacional de Recerca i Desenvolupament del MEC a sobre de l'estació de mostreig en continu, també de nova implantació, situada a la torre de telecomunicacions de La Muela, prop de Zaragoza, i finançada pel 6è FWP de la Unió Europea. Totes dues estacions de mostreig també seran gestionades per l'LRC-PCB. Cal esmentar que el desinterès de l'administració catalana (en el període 2002-2003) per participar en aquests projectes ha fet impossible la implantació de noves estacions de mostreig al territori català, tal i com era la intenció inicial de l'LRC-PCB.

L'existència d'aquestes dues noves estacions i la continuïtat de Begur farà possible que en finalitzar el 6è FWP, moment que coincidirà amb el

primer any de verificació del compliment del Protocol de Kyoto, sigui possible proporcionar bones estimes de la contribució real de l'Estat espanyol a l'increment de l'efecte d'hivernacle. No gens menys important seria el manteniment dels mostrejos més enllà del 2006, moment fins el qual està garantit el finançament, i la implantació d'almenys dues estacions més de superfície a l'oest i al sud de la Península Ibèrica per proporcionar una més gran fiabilitat a les estimes.

A4.3. La detecció del canvi climàtic a la regió mediterrània

Com ja s'ha explicat al principi d'aquest capítol, la detecció estadística del canvi climàtic no és fàcil, i menys per a regions tan petites com ara Catalunya. Aquest és un problema amb el que ja s'ha enfrontat l'IPCC i la seva solució, que sembla prou acurada, consisteix en utilitzar tota la informació disponible per fer una valoració qualitativa del grau de certesa associada a una determinada afirmació. La informació que s'utilitza no són només les sèries temporals i la seva variació, que fins no fa gaire era l'única aproximació per estudiar els canvis, sinó també tota la resta de proves (de vegades circumstancials), que s'han anat adquirint en els estudis climàtics que s'han anat fent fins ara. D'entre aquestes proves destaca sobretot la consistència entre les dades reals i els resultats dels experiments amb models on es simulen els forçaments antropogènics. L'escala de valoració que utilitza l'IPCC (IPCC, 2001) varia des de la virtual certesa que una afirmació sigui certa (amb més d'un 99% de probabilitat) a la seva improbabilitat pràcticament absoluta (amb menys d'un 1% de probabilitat). Evidentment, les valoracions més útils són les més extremes (seguretat absoluta que quelcom passarà o no), mentre que les probabilitats intermèdies corresponen a afirmacions incertes que encara s'han d'investigar més a fons.

A4.3.1. L'evolució temporal dels descriptors climàtics

A petita escala, el clima europeu és molt complex, a causa de la presència de muntanyes altes

que de vegades funcionen com a barreres físiques a la circulació atmosfèrica i poden provocar grans diferències en les temperatures i en les precipitacions entre zones molt properes. Malgrat tot, es poden diferenciar zones més o menys consistents des d'un punt de vista climàtic, com ara la regió mediterrània. A Europa hi ha registres instrumentals molt antics (per exemple, la temperatura es va començar a registrar l'any 1659 al centre d'Anglaterra) i s'han fet nombroses reconstruccions de les variables climàtiques fent servir els anells dels arbres, dades hidrològiques o testimonis extrets del gel. Desgraciadament quasi tots aquests estudis s'han fet al centre i nord d'Europa i no pas a la regió mediterrània. A les nostres contrades ens hem de conformar només amb els registres instrumentals que hi ha des del segle XIX.

L'increment de la temperatura mitjana a tota Europa durant el segle XX ha estat d'uns 0,8 °C, encara que a la Península Ibèrica l'escalfament ha estat una mica més fort (Onate i Pou, 1996) i, sobretot, més a l'hivern que a l'estiu (Brunetti et al., 2000). D'entre totes, la darrera dècada (1990-99) va ser la més calorosa del segle XX a Europa. Al nord d'Europa, l'escalfament mitjà s'ha produït més per l'increment de les temperatures nocturnes que de les diürnes (Tuomenvirta et al., 1998), fet que ha provocat una reducció molt clara del rang de temperatures diàries (DTR, del anglès *diurnal temperature range*). En canvi, a la regió Mediterrània –i concretament a Itàlia– s'ha observat una evolució totalment oposada i el DTR ha augmentat (Brunetti et al., 2000).

A Europa, la precipitació ha disminuït durant el segle XX a la regió mediterrània però ha augmentat al centre i nord del continent. Aquest contrast latitudinal s'ha observat a tot l'hemisferi nord (Hulme et al., 1998). En algunes àrees de la Mediterrània, la precipitació s'ha reduït fins a un 20% (figura A4.27). Durant el període 1964-1993, al Pirineu el nombre de dies de pluja va disminuir en un 30%, mentre que a la costa sud

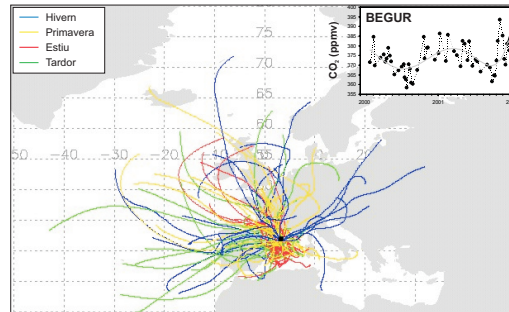


Figura A4.25. Retro-trajectòries de les masses d'aire mostrejades a l'estació de superfície situada a Begur (Girona). En el requadre de la cantonada superior dreta es mostren les concentracions de CO₂ mesurades durant dos anys a l'estació. Les trajectòries s'obtenen per modelat invers, fent servir un model de circulació atmosfèric que es fa funcionar cap enrera. Les trajectòries s'han separat en funció de l'època de l'any.

Font: elaboració pròpia.

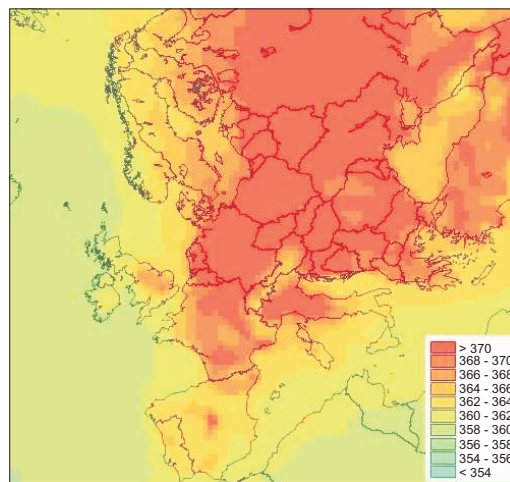


Figura A4.26. Estima de la concentració mitjana de CO₂ superficial durant el mes de setembre de 1999 a sobre d'Europa. L'escala de les concentracions s'expressa en ppmv.

Font: elaboració pròpia.

de l'Estat espanyol aquesta disminució va ser d'aproximadament el 50% (Romero et al., 1999), implicant, per tant, també un increment de la variabilitat.

Si, en lloc de parlar de tendències, s'analitzen fets més puntuals, s'observa que Europa va experimentar estius extremament càlids els anys 1992, 1994 i 2003. Durant aquests estius, els

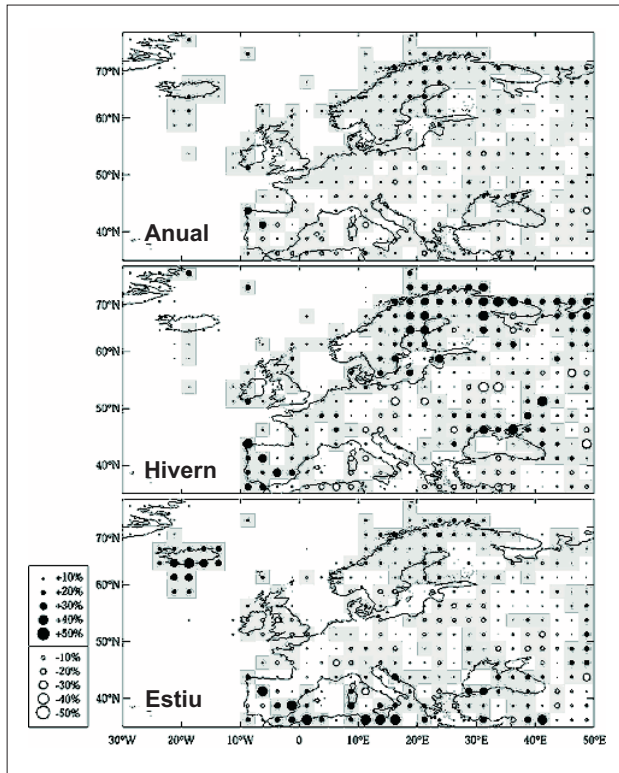


Figura A4.27. Tendències en la precipitació anual (a dalt), en la d'hivern (al mig) i en l'estival (a baix), en forma de variació percentual per segle. El càlcul de les tendències s'ha fet en una xarxa de 2,5° de costat. Els cercles negres indiquen que plou més, mentre que els blancs que s'hi precipita menys aigua. La magnitud de les tendències és proporcional a la mida dels cercles. A les zones ombrejades, les tendències són significatives amb un 90% de probabilitat.

Font: elaboració pròpia a partir de New et al., 1999.

impactes sobre els sistemes naturals van ser devastadors per la reducció de la disponibilitat d'aigua i l'increment dels incendis (l'Estat espanyol va perdre 485.622 hectàrees l'estiu de 1994). A causa de la persistència de les condicions anticiclòniques, també va disminuir la qualitat de l'aire. Aquest fet, combinat amb un increment en la freqüència de les onades de calor, va afectar la salut pública en forma d'augments considerables en el nombre d'hospitalitzacions i en la mortalitat en els sectors de la població més sensibles, encara que aquest fet quedava, fins ara, dissimulat per la forma en què es mostraven les estadístiques oficials.

A4.3.2. Respostes geofísiques i biològiques al canvi climàtic

Des del punt de vista geofísic, el canvi més important observat amb relació al canvi climàtic ha estat la pèrdua, des de l'any 1980, de la meitat del volum de gel que hi havia a les glaceres pirenaïques. Pel que fa a les respostes biològiques, aquestes han estat molt nombroses (vegeu capítol B9 d'aquest informe). Per exemple, entre 1959 i 1993 la floració primaveral de les plantes es va avançar, de mitjana, uns 6 dies, mentre que el canvi de color de les fulles a la tardor es produeix, en termes mitjans, uns cinc dies més tard. Un fet similar s'observa en l'aparició i l'obertura dels borrons de les plantes: amb relació a l'any 1969, l'any 1998 aquests processos començaven amb 8 dies d'antel·lació (14 dies en el cas de Portugal). Per tant, actualment l'estació de creixement és molt més llarga que fa 30 anys (al voltant d'unes tres setmanes). Altres indicadors biològics que s'han observat són un desplaçament de més de 200 km cap al nord en la distribució geogràfica de la majoria de les espècies de papallona estudiades (Parmesan et al., 1999) i l'avançament de l'estació

de cria en moltes espècies d'amfibis i d'ocells migratoris (Forchhammer et al., 1997).

L'avançament de la primavera sovint provoca efectes molt negatius. A Anglaterra, per exemple, es va observar que després de dos hiverns molt temperats, molts insectes i altres animals van començar força abans la seva activitat, fet que va provocar una disminució significativa de la producció vegetal d'aquells anys (Cannell i Pitcairn, 1993). També s'ha observat que quan els hiverns no són prou freds, espècies com ara la píceia (*Picea abies*) poden arribar a fallar en la formació de borrons durant la regeneració primaveral (Sykes i Prentice, 1996). En el cas dels arbres, els estius

secs i càlids de la dècada dels 90 van provocar una clara disminució del seu creixement i van fer que la producció i la qualitat de la fusta fossin més baixes. Aquest fet va afavorir la proliferació de plagues als boscos de tota Europa. Finalment, als ecosistemes aquàtics s'ha constatat una major freqüència de mareas roges i d'altres proliferacions d'algues com a resposta a l'increment de la temperatura i de l'arribada de nutrients a les masses d'aigua costaneres.

A4.3.3. Els esdeveniments extrems: què ens diu el passat i què ens espera en el futur

La previsió d'esdeveniments extrems constitueix un tema de cabdal importància a la nostra regió geogràfica, ja que comporta uns riscos que semblen haver-se accentuat en les darreres dècades. El clima del planeta ha canviat durant el darrer segle i continua canviant. I d'entre aquests canvis, els previstos sobre fenòmens extrems (Meehl et al., 2000) –com ara onades de calor, sequeres o riuades– tenen o poden tenir un impacte sobre la societat potencialment més gran que no pas aquells canvis sobre valors climatològics mitjans com la temperatura d'estiu mitjana calculada per unes quantes dècades (McCarthy et al., 2001). Per tot això, doncs, la millora de la predicció dels riscos futurs associats a aquests esdeveniments extrems té una importància cabdal per a la nostra societat.

En general, els darrers estudis científics sobre aquests temes indiquen que la freqüència de riuades extremes en grans conques hidrogràfiques s'ha incrementat notablement durant el segle xx (Milly et al., 2002), amb només una probabilitat extremadament petita que aquests canvis es deguin a la variabilitat natural del clima. D'altra banda, pel que fa a les previsions per al proper segle, un estudi recent ha analitzat un total de 19 simulacions de models climàtics i estima que hi haurà una probabilitat fins a cinc cops més elevada de patir hiverns molt més plujosos que ara a l'Europa central i septentrional (Palmer i Räisänen, 2002). També prediu, amb un grau de fiabilitat molt elevat, que el monzó

d'estiu portarà moltes més pluges al sud-est asiàtic, i incrementarà notablement el risc de riuades torrencials en aquella àrea tan castigada i tan sensible a aquests fenòmens climàtics. No obstant això, no sembla atribuir cap increment significatiu (o, en tot cas, un lleu augment) a la probabilitat d'observar increments torrencials en la precipitació d'hivern a l'àrea mediterrània.

Estudis similars a aquest posen de manifest resultats contradictoris amb els esmentats anteriorment per la nostra àrea geogràfica, fet que constata la deficient capacitat dels models actuals per simular l'evolució futura del clima a Catalunya. Un finançament escàs de la recerca en l'àmbit del clima –extensiu a la major part de països de la regió (amb la possible excepció d'Itàlia)–, dona com a resultat un pobre coneixement dels factors que modulen la nostra variabilitat climàtica a una escala superior a l'estacional i fa que la majoria d'aquests models s'hagin desenvolupat en i per a altres regions geogràfiques. Aquest fet, unit a la nostra complicada orografia i a la nostra posició com a frontera o transició entre diferents zones climàtiques, ha dificultat seriosament que s'avancés significativament en aquesta direcció en les darreres dècades.

D'altra banda, recentment s'ha posat de manifest una deficiència addicional en els estudis que intenten subministrar als gestors eines adequades per a la predicció d'aquests fenòmens extrems i que mostra que hi ha aproximacions més efectives que altres, les quals s'haurien d'anar utilitzant cada vegada més. I aquestes deficiències poden igualment fer-se extensives a altres tipus d'estudis que intenten explicar les causes de la tan denostada variabilitat climàtica interanual (el fet per exemple, que el clima a Catalunya sigui tan diferent uns anys dels altres). Molts d'aquests estudis es basen en aproximacions metodològiques que utilitzen la integració o reducció en variables sintètiques més «explicatives». Es tracta, doncs, que per fer la predicció d'episodis extrems sembla ser més adequat considerar com canvia la freqüència d'aparició d'aquests esdeve-

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

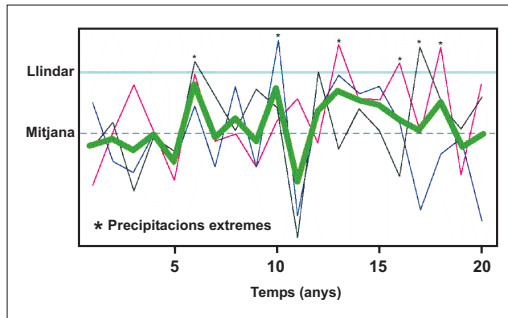


Figura A4.28. Errors associats a la predicció de fenòmens extrems. A la figura es pot apreciar com la probabilitat que les pluges d'estiu en una determinada localitat excedeixi un lílendar concret (indicat per la línia blava horitzontal), seria erròniament baixa en la mitjana d'un conjunt de simulacions (línia verda), mentre que s'obtenen millors resultats amb cadascuna d'elles per separat (línies de diferents colors). En aquest exemple, la probabilitat seria zero amb la simulació mitjana, i positiva, en canvi, amb les simulacions individuals.
Font: elaboració pròpia a partir de Schnur (2002).

niments que confiar en una única projecció o en el comportament mitjà d'un conjunt d'aquestes (Schnur, 2002). Això es deu al fet que, en general, per fer projeccions dels canvis en el clima derivats de l'increment de l'efecte d'hivernacle, els investigadors utilitzen models numèrics que simulen els efectes d'aquests canvis atmosfèrics sobre el clima.

No obstant això, aquests models climàtics –tot i que extremadament valuosos, ja que són l'única eina disponible actualment–, són imperfectes, atès que els processos físics que hi operen sovint no són totalment coneguts o no hi han estat adequadament representats per la limitada capacitat de càlcul de què es disposa. Per tal de solucionar –encara que sigui parcialment– aquest problema, sovint s'opta per prendre una aproximació consensual basada en assumir que la influència –negativa– que pot tenir aquesta incertesa associada al modelat es pot limitar notablement si es fa la mitjana dels resultats d'un conjunt de models climàtics que difereixen lleument en la representació que fan del clima.

Aquesta és l'aproximació que es pren per exemple en el cas de la majoria d'estudis de canvi cli-

màtic, que estan dirigits bàsicament a conèixer les transformacions a llarg termini que es produiran en els valors mitjans d'una variable en una àrea geogràfica extensa, àmbit on es mostra altament eficaç. Per exemple, el treball de l'IPCC se sustenta àmpliament en aproximacions d'aquest tipus, que cerquen aquells trets que són comuns a un «conjunt» de simulacions provinents d'un o més models climàtics. Per contra, aquesta mateixa aproximació pot portar a seriosos biaixos quan s'aplica a àrees geogràfiques més reduïdes, infravalorant o sobreestimant localment aquests efectes. Per això és absolutament necessari en aquests tipus de prediccions per a àrees més reduïdes que es duguin a terme altres aproximacions. Tal és el cas de Catalunya, on es requereixen projeccions que es basin en simulacions fetes a l'escala de xarxes de punts de desenes de quilòmetres i no com les actuals, que són de l'ordre d'uns 200 quilòmetres.

Això només es pot aconseguir incrementant notablement la capacitat de càlcul disponible o ajuntant les projeccions mitjanes d'un conjunt de models climàtics globals i utilitzant-les per fer funcionar d'altres models d'alta resolució per a àrees més reduïdes. És l'anomenada estratègia en models aniuats o en pila. En el cas de Catalunya, fins ara no s'està aplicant cap d'aquestes dues aproximacions. El problema que sorgeix quan s'aplica aquesta aproximació integrada a la predicció de fenòmens extrems i que també pot fer-se extensiva al camp de la detecció dels impactes de fenòmens tropicals sobre el nostre clima, és el següent: si s'utilitzen els resultats «consensuats» obtinguts a partir de projeccions d'un conjunt de models diferents per predir aquestes incidències ocasionals i/o extremes, el resultat mitjà sempre subestimarà l'aparició d'aquests esdeveniments. Això s'il·lustra a la figura A4.28, on s'aprecien els efectes negatius que l'ús dels valors mitjans té en aquestes inferències.

A tall d'exemple, la figura mostra com la probabilitat que a l'estiu, i en una determinada regió, les pluges excedeixin un determinat valor (lín-

dar), seria erròniament baixa en la projecció consensuada –la línia verda–, en contrast amb les simulacions individuals –líniees primes de diferents colors–, com a conseqüència d'un efecte d'allisat espuri. Es pot apreciar clarament, doncs, com en aquest cas la utilització de qualsevol de les simulacions individuals dóna millors resultats que l'ús de la simulació mitjana, ja que aquesta no aconsegueix predir cap episodi extrem –valors per sobre del llinzar, identificats per asteriscs.

El mateix passa quan s'intenta identificar, mitjançant aproximacions d'aquest tipus, fenòmens que tenen una aparició puntual, és a dir, que tenen una incidència discontinua en el temps, però que alhora pot ser que siguin importants en el conjunt total dels valors observats. Aquest seria el cas de totes aquelles tècniques estadístiques que utilitzen la reducció de variables, per tal d'obtenir-ne d'altres de sintètiques i més “explicatives”. Aquest problema esdevé especialment important en la recerca sobre climatologia que s'ha desenvolupat tradicionalment a casa nostra i, més concretament, en l'àmbit de la detecció de l'impacte de fenòmens tropicals o –en menor mesura– extratropicals, sobre el nostre clima, aspecte que s'aborda a l'apartat següent.

S'ha constatat, també, que les pluges torrencials acostumen a produir-se preferentment en zones costaneres que, a més, tenen una orografia complexa, tot i que hi ha pocs estudis específicament dedicats a estudiar aquests aspectes i el lligam que aquests poden tenir amb altres fenòmens extratropicals, d'un abast més gran. De tota manera, alguns estudis han constatat que en les darreres dècades hi ha una tendència a la concentració dels episodis plujosos en àrees costaneres més reduïdes (a les costes italianes i de la Península Ibèrica, per exemple), tot i la reducció dels valors totals de pluviositat acumulats (Alpert et al., 2002).

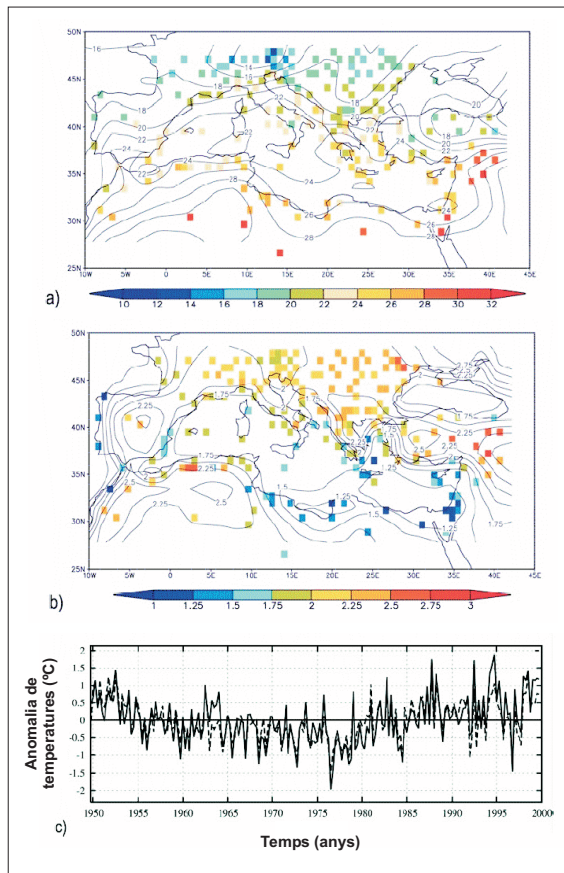


Figura A4.29. Característiques espacials i temporals de les temperatures d'estiu (de juny a agost) a l'àrea mediterrània entre els anys 1950 i 1999: a) temperatures mitjanes d'estiu en un total de 213 estacions –els contorns provenen de dades de les reanàlisi–; b) desviacions estàndard de les temperatures d'estiu en les mateixes 213 estacions; c) evolució de les anomalies en les temperatures mitjanes mensuals en estacions de terra.

Font: figura extreta de Xoplaki et al. (2003).

Pel que fa a un altre dels fenòmens extrems importants, les onades de calor a l'estiu, que tant ens van afectar l'any 2003, també han estat objecte d'alguns (pocs) estudis coherents, encara que abastaven el conjunt de la Mediterrània. Per exemple, es constata que aproximadament la meitat de la variabilitat en les temperatures estivals es pot descomposar en dos modes –o patrons– principals de variació, un de primer que apareix amb temperatures uniformes distribuïdes més o menys a tota la Mediterrània, i un de segon que mostra un dipol entre la Mediterrània

Occidental –amb el centre d'acció sobre el sud de França i Catalunya– i la cubeta oriental –en especial sobre Grècia i Turquia–. Aquest comportament bipolar sovint dona lloc a patrons diferenciats també a escala meteorològica (figura A4.29).

Segons tots els indicis, l'onada de calor que vam patir durant l'estiu del 2003 va ser anòmala. Tot i que no es pot assegurar que un fenomen puntual d'aquest tipus pugui tenir els seus orígens en el canvi climàtic, sí que es posa de manifest la peremptòria necessitat que hi ha –no només a la Península Ibèrica, sinó també a les regions veïnes– de millorar significativament els models climàtics regionals de què es disposa. Aquesta millora s'aconseguiria, per una banda, amb més recursos per millorar els models regionals i, per una altra, amb un coneixement millor dels processos que regulen aquests extrems climàtics a la nostra àrea geogràfica. Per exemple, els models climàtics globals operen normalment amb una malla de punts distribuïts a l'entorn dels 2,5° de latitud i a escala regional es requeria, com a mínim, incrementar aquesta resolució fins a un nivell de 0,5°. Com ja s'ha vist, aquesta resolució encara és impossible d'aconseguir amb els models i la capacitat de càlcul actuals.

Per intentar apropar-s'hi, sovint s'ajunten els resultats aconseguits amb aquests models globals de resolució més grollera i s'utilitzen junt amb el coneixement de l'orografia i climes locals, per fer un *downscaling* o reescalat estadístic a més gran resolució. L'altra aproximació complementària es basa en acoblar els resultats sorgits d'una simulació amb un model global, per tal que serveixin com a dades d'entrada de models regionals de més resolució. Aquestes aproximacions, que es mostren altament subòptimes en àrees amb una orografia complexa, ni tan sols no s'han desenvolupat encara adequadament en el cas de Catalunya, la qual com a molt apareix representada amb un sol punt en la majoria dels estudis regionals que s'han fet.

En el cas de les onades de calor, tot i que és habitual que a l'estiu es donin situacions sinòptiques caracteritzades per la presència d'un potent anticicló i que, a més, a la Mediterrània occidental els anys que segueixen el desenvolupament d'un episodi càlid de l'ENSO (els anomenats *El Niño*) siguin, en general, particularment secs i –encara que en menor mesura– també càlids, no es coneixen els processos concrets que regeixen la intensitat d'aquest anticicló ni tampoc el temps que hi romandrà. En aquest context, és difícil especular sobre si aquestes onades de calor –els canvis en la freqüència i intensitat amb la que es donen– estan afavorides o no pel canvi climàtic i/o altres fenòmens, o per relacions complexes que es puguin donar entre un o més d'aquests. Malgrat aquest desconeixement en detall s'ha consensuat, d'una manera robusta, que les elevades temperatures enregistrades a l'hemisferi nord durant la segona meitat del segle xx no tenen precedents en el darrer mil·lenni.

A4.3.4. La variabilitat interanual del clima a Catalunya. La influència de la variabilitat de latituds mitjanes i la dels fenòmens tropicals en la regulació del clima a l'àrea mediterrània

L'adequada caracterització del clima del Principat no es pot separar del de la Península Ibèrica i per extensió del de la regió mediterrània a l'hora de cercar-ne les connexions regionals i interhemisfèriques, a causa de la seva reduïda dimensió espacial. En aquest àmbit geogràfic, els estudis climàtics no estan encara al nivell de desenvolupament que hi ha per a d'altres zones geogràfiques, com el Pacífic tropical, el sud-est asiàtic, determinades zones de l'Àfrica, Austràlia, l'Amèrica del Nord o el Nord d'Europa, entre d'altres. Aquí en canvi, les aproximacions que s'han fet han estat molt fragmentades o en alguns casos són molt recents i encara no s'han pres en consideració o bé han estat obviades. En conjunt, aquestes en la major part dels casos no van gaire més enllà de la caracterització dels valors de referència a diferents nivells, sobretot al nivell estacional o bé de l'evolució del comportament mitjà a llarg termini. Així encara manca una vi-

sió conjunta i moderna del clima mediterrani, aspecte aquest que tret d'algunes excepcions, ni tan sols s'ha abordat pel que fa al conjunt dels països costaners de la cubeta occidental.

Així, quan estudiem el clima a casa nostra hem d'entendre que en podem diferenciar diferents components, que en principi han de ser estudiats separatament. Així la climatologia d'una localitat, comarca o àrea geogràfica determinada es pot separar en variabilitat estacional –lligada al cicle anual–, i en altres components interanuals, de tendència, lligats a la variabilitat del propi cicle anual i finalment, una porció de la variabilitat total aleatòria o també modulada per d'altres fenòmens que encara no coneixem (figura A4.30).

A4.3.4.1 La variabilitat climàtica a latituds mitjanes i el nostre clima

Fa més de quinze anys, Lamb i Pepler (1987) van constatar que el fenomen conegut com *Oscil·lació de l'Atlàntic Nord* (més coneguda com NAO, per les seves inicials en anglès; Hurrell, 1995), tenia una influència notable en el règim de precipitacions hivernals del Marroc, sobretot en les localitats de la vessant atlàntica. El mateix es va descriure uns anys després per a la part occidental de la Península Ibèrica (Zorita et al., 1992). Abans que tots ells, però, Meehl i van Loon (1979) ja havien associat les anomalies de precipitació observades durant el mes de gener en tota una àmplia regió de l'Atlàntic Nord i l'Europa occidental amb la NAO.

Aquesta oscil·lació climàtica té un índex –l'índex NAO– que bàsicament descriu el gradient de pressió meridional que hi ha a l'Atlàntic Nord. En base a com estan distribuïts allà els centres de pressió, s'entén fàcilment que els camins seguits per les depressions atmosfèriques extratropicals variaran, com també ho faran la intensitat i la direcció dels vents que bufen de l'oest. Els canvis que es produiran en aquesta regió poden originar variacions importants en les quantitats de precipitació caigudes, bàsicament a l'hivern, època en la qual també es podran ob-

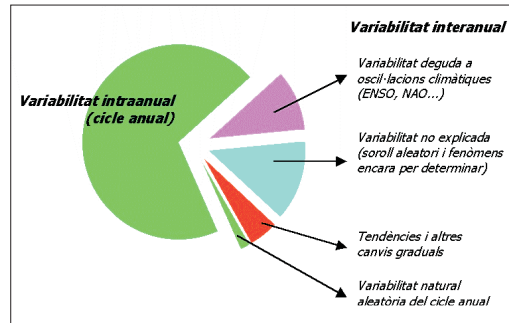


Figura A4.30. Esquema conceptual dels components en que es pot descomposar una sèrie climàtica determinada. Es pot separar la variabilitat estacional de la interanual, la qual al seu torn pot dividir-se en diferents components, com ara les contribucions que hi fan fenòmens com la NAO i l'ENSO.

Font: elaboració pròpia.

servar variacions en les temperatures, tot i que en menor mesura (Rodwell et al., 1999).

Aquest fet s'ha constatat també pel que fa a la precipitació hivernal al Principat i altres regions de la mediterrània occidental. Concretament, la relació entre la NAO i les precipitacions és inversa, és a dir que valors extrems positius d'aquest índex van associats a disminucions en la precipitació. Això es deu al fet que les depressions que porten la pluja i tenen el seu origen a l'Atlàntic Nord segueixen una ruta més septentrional, allunyada de les nostres latituds. D'altra banda, alguns estudis recents semblen fins i tot estendre aquesta relació amb la precipitació a escales temporals superiors a l'estacional (Rimbu et al., 2001), tot i que aquest extrem encara és controvertit. A causa de la seva naturalesa atmosfèrica i la seva proximitat geogràfica, l'impacte de la NAO sobre Catalunya es dona bàsicament a l'hivern i sense retard temporal, la qual cosa limita molt el seu potencial predictiu.

No obstant això, estudis recents semblen associar la NAO a un fenomen hemisfèric acoblat de més gran escala, conegut com *Oscil·lació Àrtica* (l'AO, com típicament se la coneix, per les seves inicials en anglès), de la qual la NAO seria part de la seva manifestació atmosfèrica (Thompson i

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

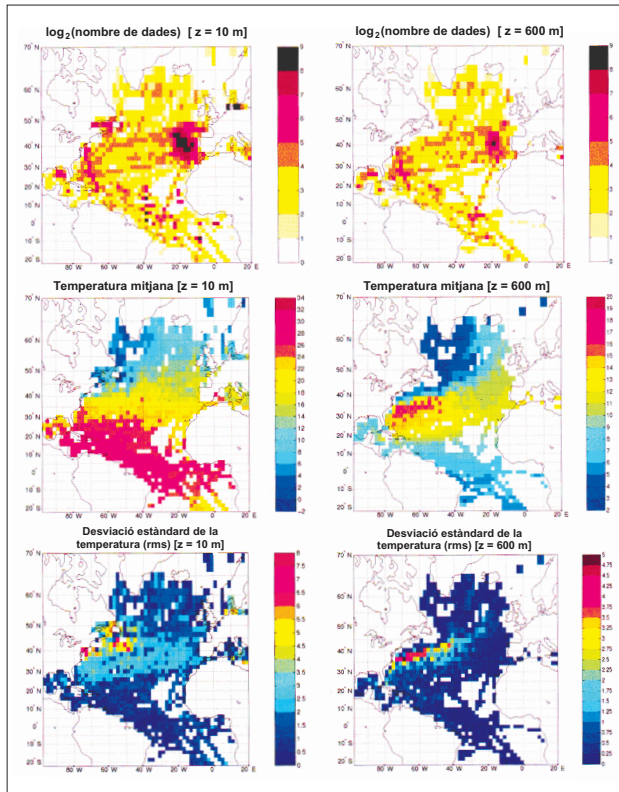


Figura A4.31. Perfils de temperatura continguts en la base de dades CORIOLIS durant els seus dos primers anys de funcionament. En les figures es mostren el nombre de perfils que hi ha per fondària, temperatura mitjana i desviació estàndard a 10 metres (columna esquerra) i 600 metres (columna dreta).

Font: Gabaldón et al. (2002).

Wallace, 1998). Estudis com els de Czaja et al. (2002) han constatat la rellevància de l'acoblament atmosfera-oceà a l'hora de determinar la variabilitat total de la NAO. Pel seu lligam amb l'AO, la NAO apareixeria també en una posició central en el debat actual sobre el canvi climàtic, a causa sobretot de les modulacions multidecadals que ha mostrat des de mitjans del segle xx (Gillett et al., 2000). En un moment on s'ha constatat que les temperatures superficials a l'hemisferi nord probablement són les més elevades del darrer mil·lenni, una fracció substancial d'aquest escalfament s'associa al comportament de la NAO i, més concretament, a la tendència del seu índex hivernal a passar de grans anomalies d'un signe en la dècada dels seixanta a grans

anomalies de signe oposat d'ençà de la dècada dels vuitanta (Hurrell et al., 2002).

Previsiblement, aquests canvis també tindrien un efecte constatable i directe sobre les precipitacions i temperatures catalanes en les properes dècades. No obstant això, per tal de poder aventurar amb una mínima fiabilitat quines poden ser les tendències que mostrarà la precipitació a Catalunya en relació a aquest mode de variabilitat climàtica, cal conèixer millor el paper que la complexa orografia del país juga en aquest procés i com aquesta interacciona amb les masses d'aire procedents de l'Atlàntic. Per exemple, a la Mediterrània el contrast tèrmic entre les masses d'aire procedents de l'Atlàntic i les temperatures de finals d'estiu sovint originen tempestes molt violentes, amb conseqüències catastròfiques, que tots, desgraciadament, recordem. En aquest sentit, i per poder afinar encara més la predicció d'aquests successos extrems de finals d'estiu, és necessari conèixer millor el funcionament tèrmic de la cubeta ocidental de la Mediterrània, en tant

que reservori de calor que després alimentarà tots aquests fenòmens. Per fer-ho, cal incrementar considerablement l'esforç que es fa des de Catalunya per conèixer amb una gran resolució espacial com la calor es distribueix en fondària en el mar, una informació de la qual actualment només en disposem d'una manera fragmentada.

La figura A4.31 mostra la cobertura existent en els perfils de temperatura de l'aigua que s'estan obtenint a través de la base de dades CORIOLIS, una iniciativa molt important a escala internacional, i que una vegada més posa de manifest les deficiències en el coneixement de zones extremadament importants de cara a millorar les prediccions climàtiques per al Principat.

Tot i el paper que juga la NAO en les precipitacions hivernals a Catalunya, la resposta que hi ha en relació a aquest fenomen tampoc no és homogènia en les sèries climàtiques de les diverses comarques catalanes. En aquest sentit, cal destacar que la NAO tampoc no és l'únic fenomen de latituds mitjanes que té influència sobre la climatologia del Principat, tot i que desgraciadament en aquest punt també hem de dir que no se n'han fet estudis específics. Per exemple, per la costa nord peninsular, Sáenz et al. (2001) constaten que la NAO juga un paper secundari en la precipitació d'hivern, i que la importància d'altres modes extratropicals, com ara l'anomenat EA (de l'anglès

Eastern Atlantic), sembla tenir-hi un paper molt important. És coneguda, d'altra banda, la gran importància que té el patró EA en l'advecció de masses d'aire més humides o més càlides cap a determinades zones.

A4.3.4.2. El paper dels fenòmens tropicals en la regulació del clima a l'àrea mediterrània

Els primers estudis que es van publicar amb relació a la influència del fenomen ENSO sobre el continent europeu van concloure que es podia distingir una resposta (lleu) a aquests fenòmens durant l'hivern (entès des del punt de vista climatològic com el període que va de desembre a fe-

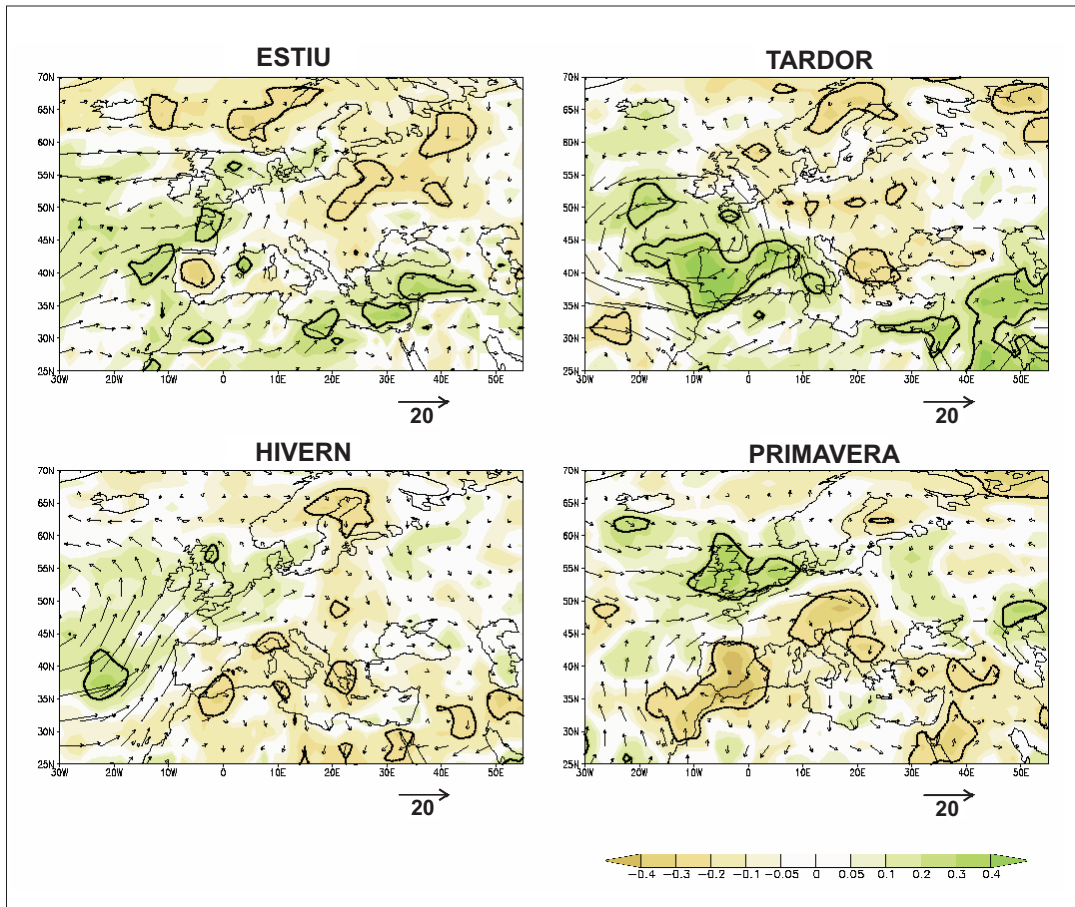


Figura A4.32. Regressió estacional dels fluxos d'humitat integrats verticalment i el fenomen d'El Niño. També es mostren envoltades per contorns les àrees amb correlacions significatives a un nivell del 95%, entre El Niño i les pluges.

Font: Mariotti et al. (2002).

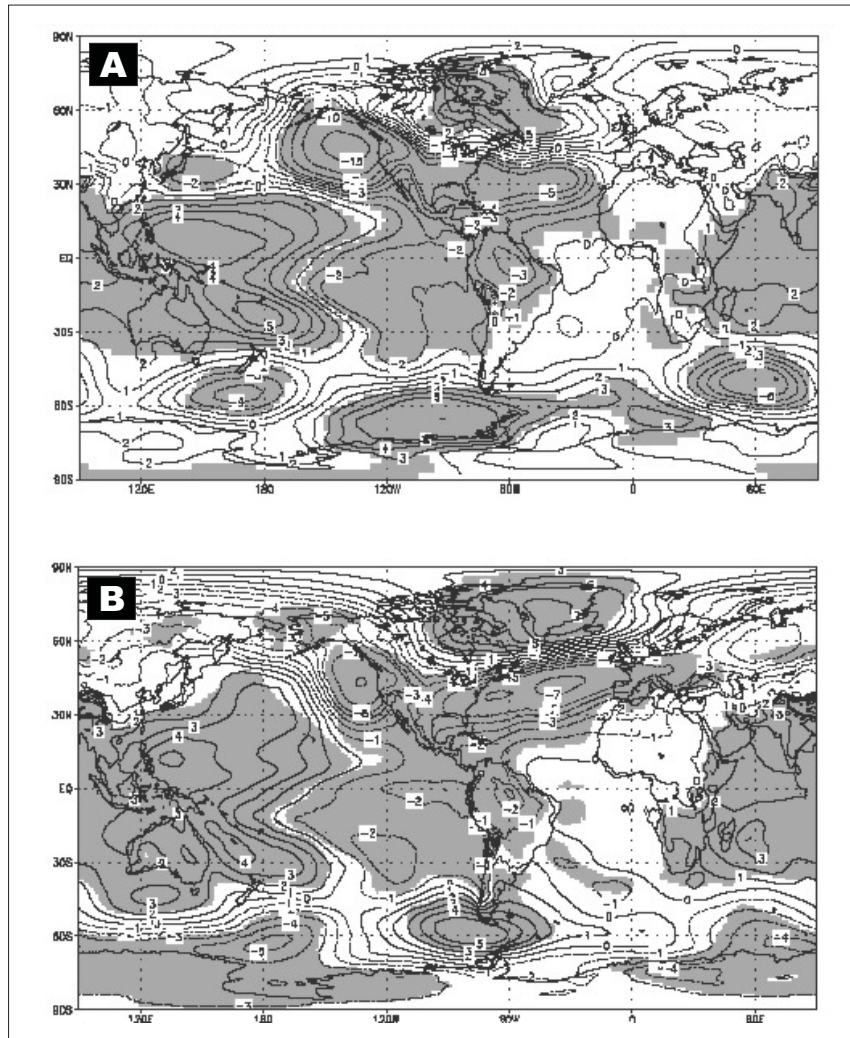


Figura A4.33. Resposta hivernal mitjana (de desembre a febrer) de la SLP (en hPa). Les regions ombrejades denoten una significació a un nivell del 95% en un t-test: a) experiment amb T42; i b) experiment amb T106.

Font: Merkel i Latif (2003).

brer) en els anys amb episodis d'*El Niño* o *La Niña* (Fraedrich i Müller, 1992; Fraedrich, 1994). Per exemple, Ropelewski i Halpert (1987) identifiquen dues zones de l'àrea mediterrània com *regions ENSO-sensibles*: una primera sobre el Marroc i l'Estat espanyol, anomenada regió NAS (*Northern Africa-Southern Europe*) i una segona a la Mediterrània Oriental i Israel (la MME, de *Mediterranean-Middle East*). Uns anys més tard, Kila-

dis i Díaz (1989) afinaven una mica més en precisar que el tipus de resposta que es produïa a la regió NAS era dual i, més concretament, que existia una tendència cap a increments de la precipitació coincidint amb l'inici i l'establiment d'una fase càlida o *El Niño* al Pacífic (de juny a febrer) i, posteriorment, una clara disminució de les precipitacions en aquesta mateixa regió a la primavera següent (de març a maig).

El canvi climàtic a Catalunya El forçament antropogènic i els canvis en el clima

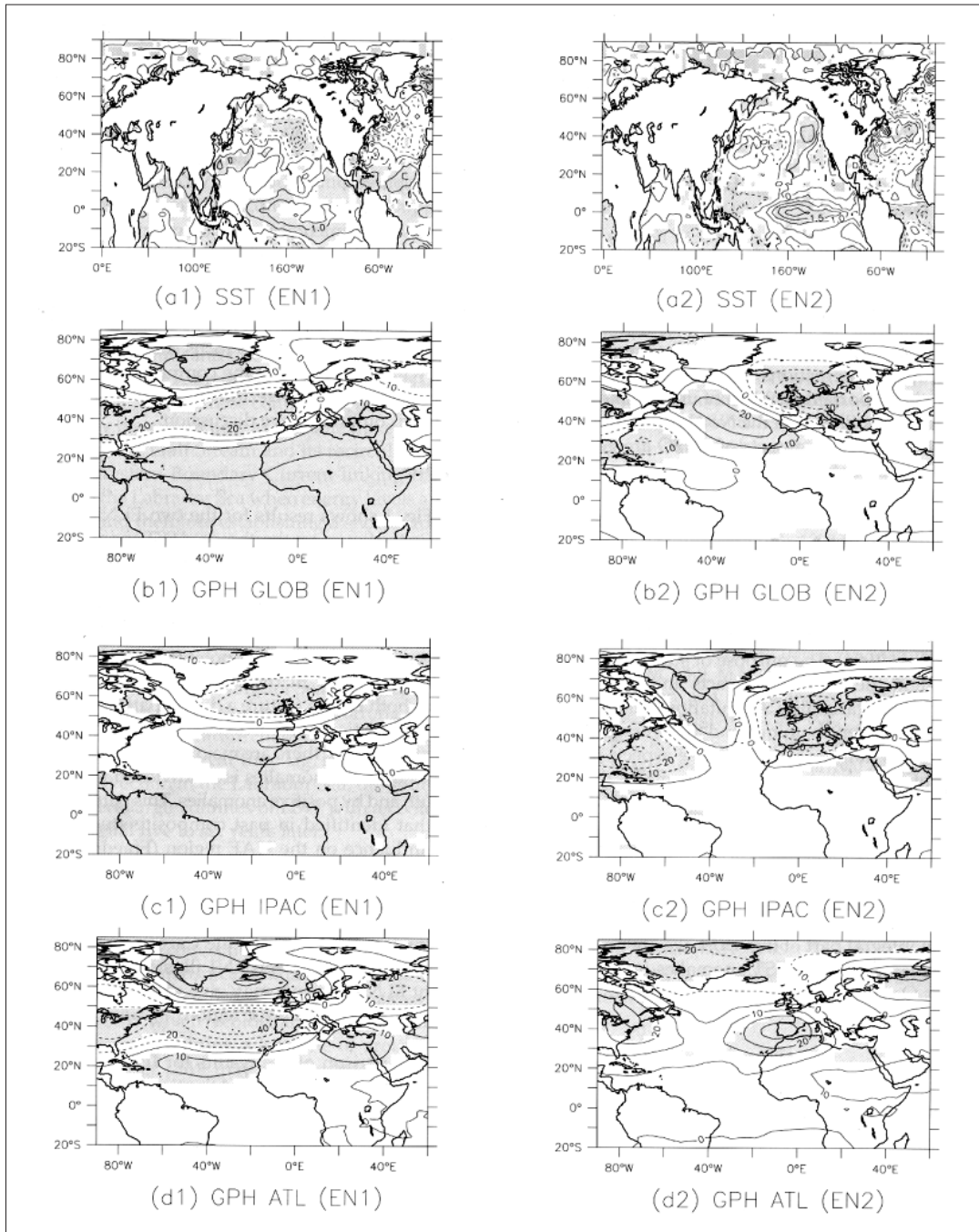


Figura A4.34. Forçament oceànic i resposta atmosfèrica durant els episodis de *El Niño* dels períodes 1987/88 (EN1) i 1991/92 (EN2): (a) anomalies de SST a l'hivern (DJF); (b) simulació de l'alçada del geopotencial a 500 mb (GPH) en l'experiment GLOB; (c) en l'experiment IPAC, i (d) en l'ATL. En (a), (b) i (c) les anomalies de SST i de GPH s'han calculat respecte al període climatològic 1986-2001. El model de climatologia del GPH s'ha obtingut de l'experiment GLOB. A (d) les anomalies de GPH es calculen com la diferència entre els conjunt de mitjanes dels experiments GLOB i IPAC. Els ombrats en els mapes de GPH indiquen una significació del 95% en un test t. L'ombrat en el mapa de SST (a) es refereix a les regions on les anomalies superen la desviació estàndard de la variabilitat interanual.
 Font: Mathieu et al. (2002).

Altres estudis analítics següen tractant d'esbrinar quin paper juga l'ENSO en el clima europeu i, en particular, també a la Mediterrània, la qual es mostra com una àrea altament sensible d'entre totes aquelles investigades al vell continent. Per exemple, Santoleri et al. (1995), analitzant canvis en la temperatura superficial de l'aigua de mar (SST, de l'anglès *Sea Surface Temperature*), van observar fortes anomalies en les SST d'hivern a la Mediterrània occidental posterior als episodis d'*El Niño* dels anys 1982-1983 i 1986-1987. Més tard, i pel que fa a la pluviositat, Rodó et al. (1997) van investigar si hi havia traces del fenomen ENSO a les precipitacions peninsulars, constatant també l'existència d'una disminució significativa en la pluviositat a la primavera següent (entesa climatològicament de març a maig) a l'establiment d'un episodi d'*El Niño* de, com a mínim, una intensitat moderada. Aquesta coherència s'ha incrementat clarament durant la segona meitat del segle passat, si es compara amb les anàlisi efectuades sobre la primera meitat, aspecte que deixa oberta la possibilitat –posada ja de manifest també en altres estudis similars de l'ENSO–, que el canvi climàtic pugui tenir alguna responsabilitat en l'alteració dels patrons altrament considerats «normals», o en l'amplificació de les seves teleconnexions amb altres regions del planeta.

Estudis semblants fets en altres zones de la Mediterrània, com Israel (Yakir et al., 1996; Price et al., 1998) i la cubeta oriental, també van establir associacions més o menys clares amb l'ENSO. En cap cas aquestes relacions apareixen –com succeeix amb la NAO– amb les pluges d'hivern (Quadrelli et al., 2001), sinó que estan centrades principalment a la primavera i la tardor, exactament aquelles èpoques on en conjunt les precipitacions són més abundants i importants de cara a la vegetació i els conreus. De forma similar, altres estudis recents (van Oldenborgh et al., 2000 i Mariotti et al., 2002) també constaten aquestes respostes a l'ENSO en la precipitació i les temperatures, tant a la tardor com a la primavera, en la mateixa línia descrita anteriorment. A més, l'es-

tudi de Mariotti et al. (2002) permet entendre una mica més quines són les estructures atmosfèriques que es formen durant aquests episodis sobre la península i la Mediterrània, així com a l'Atlàntic adjacent (figura A4.32). Pel que fa al seguiment d'esdeveniments concrets altres estudis, com els de Grötzner et al. (2000) i sobretot, Dong et al. (2000), han establert clarament com alguns dels severos fenòmens climatològics que van tenir lloc a Europa entre 1997 i 1999, estaven associats al cicle de l'ENSO del 1997-1999.

No obstant això, l'estudi del paper de l'ENSO a Catalunya no ha tingut únicament una aproximació de caràcter empíric, sinó que també s'ha cercat a bastament una explicació dinàmica dels mecanismes. S'ha avançat molt en aquest camp, des dels treballs pioners de Lanzante (1996) i Enfield i Mayer (1997), els quals exploraren com es produeix el forçament de l'Atlàntic tropical durant les fases madures de l'ENSO, una regió oceànica que podria jugar un paper de mitjancera en la teleconnexió cap la Mediterrània (Klein et al., 1999; Rodó, 2001). Aquesta línia d'investigació ha portat a establir que la hipòtesi més plausible és l'existència de ponts atmosfèrics que uniria ambdues cubetes a través de les ja conegudes circulacions de Walker i la seva connexió amb les cel·les de Hadley a l'Atlàntic. S'ha constatat que un forçament i/o alteració del ritme ascendent o descendent de l'aire en aquestes circulacions altera notablement les estructures atmosfèriques i el balanç de calor en aquelles regions. En el cas específic de les latituds mitjanes, es coneix també com operaria aquest forçament tropical, i s'ha aconseguit simular amb força èxit tant la dinàmica com els patrons que es generen (Lau and Nath, 2001; i d'altres).

En el cas particular de la Mediterrània, la pregunta més immediata que es deriva d'aquests estudis és per què ha estat tan difícil identificar històricament l'empremta d'aquest tipus de fenòmens en el clima. La resposta a aquesta pregunta no és simple. Ans el contrari, hi hauria diverses raons que justificarien aquesta dificultat, així com no-

ves proves que l'explicació podria raure en el que es comenta breument a continuació. D'una banda, cal destacar que estudis molt recents amb models atmosfèrics forçats per anomalies de la SST proven que l'increment de la resolució espacial horitzontal permet augmentar molt notablement la detecció i, per tant, la significació del senyal ENSO en el que es coneix com a regió NAE (*North Atlantic-European*). Així, en contraposició a l'experiment amb menor resolució (el del T42), quan s'augmenta notablement el detall (passant a T106), Merkel i Latif (2003) demostren que és possible identificar l'existència de canvis significatius tant en els valors mitjans de determinades variables atmosfèriques a Europa (com ara, pressió a nivell del mar o SLP [*Sea Level Pressure*], temperatura i precipitació), com en l'activitat d'ones geofísiques transitòries i estacionàries. Com a exemple de la millora en la detecció d'aquest tipus de processos, a la figura A4.33 es poden observar els canvis mitjans obtinguts en les respostes estacionals (a l'hivern) d'un conjunt de simulacions amb l'experiment de menys resolució (figura A4.33a, corresponent a T42) i amb el de més resolució (figura A4.33b, del T106). En el cas del conjunt d'Europa i de la Mediterrània occidental, i també per a Catalunya, el canvi en la capacitat de detecció és molt notable, ja que es passa de no poder detectar res a obtenir senyals molt forts, per exemple en les SLP.

Una segona raó que pot permetre explicar aquesta recent identificació de l'ENSO en el nostre clima està relacionada amb la pròpia estructura que tenen aquest tipus de forçaments tropicals en el clima de les latituds extratropicals. Per una banda, es tractaria d'uns patrons de teleconnexió que impliquen diferents compartiments del sistema climàtic, com a mínim l'atmosfera i diferents regions oceàniques, i no de processos purament atmosfèrics, com en principi succeeix en el cas de la NAO. Aquest fet s'integra sovint en forma de relacions no lineals entre variables, característica que complica la seva identificació amb les tècniques estadístiques habituals. De l'altra, el fet que moltes d'aquestes respostes, de-

gut bàsicament al fet que hi intervé l'oceà, es poden i se solen donar amb un cert decalatge temporal. Així, les teleconnexions detectades entre el Pacífic tropical i l'Atlàntic tropical poden anar d'entre 2 i 7 mesos –segons els diferents estudis– i arribar en ocasions a ser més llargues en el cas d'Europa i la Mediterrània.

En tercer lloc, el forçament tropical no és continu, sinó que únicament hi ha una activació de la circulació atmosfèrica (i, en conseqüència, de les teleconnexions) a partir del moment que se supera un determinant lliniar de temperatura en les SST del Pacífic tropical. Aquesta darrera característica dificulta notablement la seva identificació amb els mètodes de detecció clàssics, que utilitzen el registre instrumental sencer per fer les seves anàlisis o bé «redueixen» la informació en components que «sintetitzen» la informació. Com s'ha vist abans, aquesta darrera aproximació s'ha mostrat inadequada per tractar aquest tipus de senyals transitoris (Rodríguez-Arias i Rodó, 2004).

Com s'ha constatat en diverses ocasions (per exemple, a Hamilton, 1988), s'ha de tenir en compte que la resposta a l'ENSO en regions remotes com Europa o la Mediterrània pot variar d'episodi a episodi, degut en gran mesura a les diferències que ja hi ha en origen entre els diferents esdeveniments (de *El Niño*, per exemple). Aquesta característica pot dificultar el seu ús com a variable predictora del clima peninsular, tot i que la seva gran anticipació pot contrarestar aquests efectes negatius. D'altra banda, també s'ha de tenir en compte que aquesta resposta pot veure's emmascarada per l'elevada variabilitat interna de l'atmosfera a les nostres latituds. Així, a la figura A4.34 es mostra quina és la resposta atmosfèrica al forçament oceànic, durant dos episodis d'*El Niño* (a l'esquerra EN1 indica l'episodi del 1987-88 i a la dreta, EN2, el de 1991-92). Les sigles GPH es refereixen a les alçades geopotencials a 500 mb (*Geopotencial Height*) en diferents experiments on es força l'atmosfera bàsicament des de diferents regions oceàniques i

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

Esdeveniment	Precipitació				Temperatura				Senyal	Descripció climàtica
	LL	D	R	E	LL	D	R	E		
* LNSO 50-51	Tot Catalunya	14	10	↓	Costa	12	10	↑	Sincrònic	Disminució de pluges i increment de temperatura entre agost de 1951 i octubre de 1952.
LNSO 55-56	Interior (costa?)	8	14	↓	-	-	-	-	Només precipitació	Lleugera disminució de les pluges entre agost de 1956 i març de 1957.
w-ENSO 57-58	Interior	7/8	4	↓	Tot Catalunya	8/9	10	↑	Asincrònic (senyal doble)	Disminució de pluges a l'interior de Catalunya entre agost de 1957 i febrer de 1958. Increment de la temperatura i de la sequera entre el desembre de 1957 i la tardor/hivern de 1958.
w-ENSO 65-66	-	-	-	-	Tot Catalunya	14	2	↑	Només temperatura (senyal dinàmic)	Increment de les temperatures i de la sequera entre l'estiu de 1965 i el de 1966. A continuació disminució de les temperatures i del DI durant la tardor i l'hivern següents només a l'interior.
					Interior	4	12	↓		
w-ENSO 72-73	Tot Catalunya	12	6/8	↓	Tot Catalunya	14/15	8	↑	Quasi sincròniques (senyal doble?)	Disminució de la pluja entre el juliol de 1972 i l'estiu de 1973. Increment de la temperatura des de setembre de 1972 a l'hivern de 1973.
LNSO 73-74	Costa i Pirineus	10	12	↓	-	-	-	-	Només precipitació	Disminució de la precipitació a la costa i al Pirineu entre setembre de 1974 i juny de 1975.
w-ENSO 82-83	-	-	-	-	Tot Catalunya	8/9	2	↓	Només temperatura (senyal dinàmic)	Primer té lloc una lleugera disminució de les temperatures entre agost de 1982 i abril de 1983. Posteriorment, a partir de juny i fins a setembre de 1984, hi ha un increment important de les temperatures que provoca, només a la costa, un increment de la sequera.
					Tot Catalunya	14/16	10	↑		
w-ENSO 86-87	-	-	-	-	-	-	-	-	Cap senyal	-
LNSO 88-89	-	-	-	-	Tot Catalunya	12/14	14	↓	Només temperatura	Disminució de les temperatures entre gener de 1990 i la primavera de 1991.
w-ENSO 91-92	Interior i sud	10/12	6	↑	-	-	-	-	Només precipitació (doble?)	Increment de la precipitació a l'interior i al sud entre setembre de 1991 i juliol de 1992. Petita disminució de la precipitació a la costa nord i central entre desembre de 1992 i abril de 1993.
	Costa	5	4	↓						
w-ENSO 94-95	Tot Catalunya	12	22/14	↑	Tot Catalunya	5	12	↑	Quasi sincròniques (doble senyal?)	Increment de la precipitació entre abril de 1995 i febrer de 1996. Increment de la temperatura entre gener i abril de 1996.
w-ENSO 97-98	-	-	-	-	Tot Catalunya	10/12	12	↓	Només temperatura	Disminució de la temperatura entre la primavera i l'hivern de 1998.

Llegenda: LL: lloc
D: durada (en mesos)
R: retard (en mesos)
E: efecte
DI: índex de sequera (de l'anglès *drought index*)
↑ : increment
↓ : disminució.

Taula A4.1
Font: Rodríguez-Arias i Rodó, 2005

on es poden apreciar les diferències espacials generades entre els dos episodis (com es pot veure, la resposta a Europa i l'àrea mediterrània és clarament significativa en tots els casos, encara que diferent entre episodis i simulacions).

Així es constata, en aquest i altres estudis, que hi ha uns impactes significatius i, per tant, potencialment predictibles dels episodis d'*El Niño* a la nostra àrea geogràfica (Mathieu et al., 2002). Però d'altra banda, aquests estudis també indiquen que aquests impactes poden variar notablement entre episodis i que per afinar en les prediccions dels impactes segons la seva tipologia, hauríem de tenir presents altres regions, a més del Pacífic tropical.

Pel que fa estrictament a Catalunya, i segons el coneixement que tenen els autors d'aquest capítol, no existeix encara cap estudi que abordi l'aparició d'aquest tipus de senyals transitoris en les sèries climàtiques catalanes amb metodologies com les descrites prèviament. Únicament es té constància de la recerca preliminar que l'LRC-PCB va elaborar en aquest sentit, sota finançament del Departament de Medi Ambient, un informe lliurat l'any 2001, on es posaven de manifest els resultats expressats a la Taula A1.4.1 en referència a l'analítica dels senyals transitoris i es feia esment de les conclusions que se'n deriven (Rodríguez-Arias i Rodó, 2005).

En un context de canvi climàtic es creu, amb un grau de fiabilitat elevat, que la NAO esdevindrà més profunda i variable en el futur, tot i que no queda clar en quina mesura la seva influència afectarà el clima de Catalunya, en termes globals, a l'hivern. Tampoc no es coneix com poden evolucionar altres moduladors climàtics regionals, com ara l'EA i altres fenòmens originats a les nostres mateixes latituds mitjanes. D'altra banda l'evolució futura de fenòmens tropicals com ara l'ENSO i el monzó africà, que poden tenir una influència discernible sobre la cubeta mediterrània (encara que sigui d'una manera discontinua), també és objecte d'ampli debat

científic. En el cas de l'ENSO, es creu que pot veure incrementada la seva variabilitat a escala interanual a causa de l'escalfament global i del Pacífic tropical en particular (Timmermann, 1999). Es fa palesa, doncs, la necessitat d'incrementar els esforços de recerca en aquest àmbit, tant a nivell analític (per exemple millorant els registres de dades físiques de l'aigua al mar Balear, al d'Alboran, a la zona del corrent d'Algèria i a la cubeta central del Mediterrani Occidental) o bé utilitzant el reescalat estadístic per tal d'apropar les prediccions de canvi global a una escala sinòptica, o fins i tot mitjançant el desenvolupament a mitjà i llarg termini de models climàtics regionals millors, els quals ens haurien de permetre simular més acuradament el clima d'aquesta àrea geogràfica tan complexa que és la Mediterrània. Resulten òbvies, doncs, a tots nivells, les millores socials i econòmiques que derivarien d'aquest increment en el coneixement dels factors que regulen el clima mediterrani.

Referències bibliogràfiques

- ALPERT, P.; BEN-GAI, T.; BAHARAD, A.; BENJAMINI, Y.; YEKUTIELI, D.; COLACINO, M.; DIODATO, L.; RAMIS, C.; HOMAR, V.; ROMERO, R.; MICHAELIDES, S.; MANES, A. (2002). «The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values». *Geophys. Res. Lett.*, núm. 29, p. 1536.
- BRUNETTI, M.; MAUGERI, M.; NANNI, T. (2000). «Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1995». *Theoretical and Applied Climatology*, núm. 65, p. 165-174.
- CANNELL, M.G.R.; PITCAIRN, C.E.R. (1993). *Impacts of the Mild Winters and Hot Summers in the United Kingdom in 1988-1990*. London: Department of the Environment (HMSO), (154).
- CZAJA, A.; ROBERTSON, A.W.; HUCK, T. (2002) «The role of Atlantic ocean-atmosphere coupling in affecting North Atlantic Oscillation». A: HURRELL, J.W.; KUSHNIR, Y.; OTTERSEN, G.; VISBECK, M. (eds.) *The North Atlantic Oscillation*. En premsa.
- DONG, B.-W.; SUTTON, R.T.; JEWSON, S.P.; O'NEILL, A.; SLINGO, J.M. (2000). «Predictable winter climate in the North Atlantic sector during the 1997-1999 ENSO cycle». *Geophys. Res. Lett.*, núm. 27, p. 985-988.

- EEA (2002). *Annual European Community Greenhouse Gas Inventory 1990-2000 and Inventory Report 2002*. Editors: B. GUGELE; M. RITTER; A. JOL, de l'ETC on Air and Climate Change, European Environmental Agency, Brusel·les.
- ENFIELD, D.B.; D.A. MAYER (1997). «Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to ENSO». *J. Geophys. Res.*, núm. 102, p. 929-945.
- FEC (1993). *Biosfera. Els humans en els àmbits ecològics del mon. Planeta viu*. Vol. I. Barcelona: Fundació Enciclopèdia Catalana.
- FORCHHAMMER, M.C.; E. POST; N.C. STENSETH (1997). «Breeding phenology and climate». *Nature*, núm. 391, p. 29-30.
- FRAEDRICH, K.; K. MÜLLER (1992). «Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes». *Int. J. Climatol.*, núm. 12, p. 25-31.
- FRAEDRICH, K. (1994). «An ENSO impact on Europe?» *Tellus*, núm. 46A, p. 541-552.
- FREIBAUER, A. (ed) (2001). *Carboeurope: a cluster of projects to understand and quantify the carbon balance of Europe*. Jena: CarboEurope European Office, Max-Planck-Institute for Biogeochemistry.
- GABALDON, J.E.; F. GAILLARD; T. CARVAL (2002). «Temperature profiles contained in the CORIOLIS database during its first two years (2000-2001)». *CLIVAR Exchanges*, núm. 25, p. 68-71.
- GILLET, N.P.; G.C. HEGERL; M.R. ALLEN; P.A. STOTT (2000). «Implications of changes in the Northern hemisphere circulation for the detection of anthropogenic climate change». *Geophys. Res. Lett.*, núm. 27, p. 993-996.
- GRÖTZNER, A.; M. LATIF; D. DOMMENGET (2000). «Atmospheric response to sea surface temperature anomalies during El Niño 1997/98 as simulated by ECHAM4». *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, núm. 126, p. 2175-2198.
- HAMILTON, K. (1988). «A detailed examination of the extratropical response to tropical El Niño/Southern Oscillation events». *J. Climatol.*, núm. 8, p. 67-86.
- HOUGHTON, J.T. et al. (eds.) (2001). *Climate Change 2001: The scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HULME, M.; T.J. OSBORN; T.C. JOHNS (1998). «Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations». *Geophysical Research Letters*, núm. 25, p. 3.379-3.382.
- HURRELL, J.W. (1995). «Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation». *Science*, núm. 269, p. 676-679.
- HURRELL, J.W.; Y. KUSHNIR; M. VISBECK; G. OTTERSEN (2002). «The North Atlantic Oscillation: A forthcoming American Geophysical Union Monograph». *CLIVAR Exchanges*, núm. 25, p. 73-75.
- IDEA (2000). *Prospectiva energètica y CO₂: escenarios 2010*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- IPCC (2001). *The science of climate change. Contribution on working group I to the third assessment report of the inter-governmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KILADIS, G.N.; H.F. DÍAZ (1989). «Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation». *J. Climate*, núm. 2, p. 1069-1090.
- KLEIN, S.A.; B.J. SODEN; N.-C. LAU (1999). «Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge». *J. Climate*, núm. 12, p. 917-932.
- LAMB, P.J.; R.A. PEPLER (1987). «North Atlantic Oscillation: concept and an application». *Bull. Am. Met. Soc.*, núm. 68, p. 1218-1225.
- LANZANTE, J.R. (1996). «Lag relationships involving tropical sea surface temperatures». *J. Climate*, núm. 9, p. 2568-2578.
- LAU, N.C.; M.J. NATH (2001). «Impact of ENSO on SST variability in the North Pacific and North Atlantic: seasonal dependence and role of extratropical sea-air coupling». *J. Climate*, núm. 14, p. 2846-2866.
- MARIOTTI, A.; N. ZENG; K.M. LAU (2002). «Euro-Mediterranean rainfall and ENSO -a seasonally varying relationship». *Geophys. Res. Lett.*, núm. 29, art. 1.621.
- MATHIEU, P.P.; R. T. SUTTON; B. DONG (2002). «Impact of individual El Niño events on the North Atlantic-European region». *CLIVAR Exchanges*, núm. 25, p. 49-51.
- MAY, R. (2001). «Risk and uncertainty». *Nature*, vol. 411, p. 891
- MCCARTHY, J.J. et al. (eds.) (2001). *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MEEHL, G.A.; G.J. BOER; C. COVEY; M. LATIF; R.J. STOUFFER (2000) «The coupled model intercomparison project». *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, núm. 81, p. 313-318.
- MEEHL, G.A.; H. VAN LOON (1979). «The seesaw in winter temperatures between Greenland and northern

- Europe. Part III: teleconnections with lower latitudes». *Mon. Wea. Rev.*, núm. 107, p. 1.095-1.106.
- MERKEL, U.; M. LATIF (2002). «A high resolution AGCM study of the El Niño impact on the North Atlantic/European sector». *Geophys. Res. Lett.*, núm. 29, p. 13.726-13.729.
- MILLY, P.C.; R.T. WETHERALD, K.A. DUNNE; T.L. DELWORTH (2002). «Increasing risk of great floods in a changing climate». *Nature*, núm. 415, p. 514-517.
- MMA (2002). *Greenhouse gas emissions inventories report from Spain, 1990-2000*. madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- NEW, M.; M. HULME; P.D. JONES (1999). «Representing twentieth century space-time climate variability, part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology». *Journal of Climate*, núm. 12, p. 829-856.
- ONATE, J.J.; A. POU (1996). «Temperature variations in Spain since 1901: a preliminary analysis». *International Journal of Climatology*, núm. 16, p. 805-815.
- PALMER, T.N.; J. RÄISANEN (2002). «Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate». *Nature*, núm. 415, p. 512-514.
- PARMESAN, C.; N. RYRHOLM; C. STEPHANESCU; J.K. HILL; C.D. THOMAS; H. DESCIMON; B. HUNTLEY; L. LAILLI; K. KULLBERG; T. TAMMARU; W.J. TENNENT; J.A. THOMAS; M. WARREN (1999). «Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming». *Nature*, núm. 399, p. 579-583.
- PHILANDER, S.G. (1998). *Is the temperature rising? The uncertain science of global warming*. Princeton: Princeton University Press.
- PNUMA (2002). *Para comprender el Cambio Climático: Guía Elemental de la Convención Marco de las Naciones Unidas y el Protocolo de Kyoto*. Ginebra: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- PRICE, C.; L. STONE; A. HUPPERT; B. RAJAGOPALAN; P. ALPERT (1998). «A possible link between El Niño and precipitation in Israel». *Geophys. Res. Lett.*, núm. 25, p. 3963-3966.
- QUADRELLI, R.; V. PAVAN; F. MOLTENI (2001). «Wintertime variability of mediterranean precipitation and its links with large-scale circulation anomalies». *Clim. Dyn.*, núm. 17, p. 457-466.
- RIMBU, N.; H. LE TREUT; S. JANICOT; C. BORONE-ANT; C. LAURENT (2001). «Decadal precipitation variability over Europe and its relation with surface atmospheric circulation and sea surface temperatures». *Q. J. Roy. Met. Soc.*, núm. 127, p. 315-329.
- RODÓ, X. (2001). «Reversal of three global atmospheric fields linking changes in SST anomalies in the Pacific, Atlantic and Indian oceans at tropical latitudes and mid-latitudes». *Clim. Dyn.*, núm. 18, p. 203-217.
- RODÓ, X. E.; BAERT; F.A. COMÍN (1997). «Variations in seasonal rainfall in southern Europe during the present century: relationships with the NAO and the ENSO». *Clim. Dyn.*, núm. 13, p. 275-284.
- RODRÍGUEZ-ARIAS, M.A.; X. RODÓ (2004). «A primer on the study of transitory dynamics in ecological series using the scale-dependent correlation analysis». *Oecologia*, núm. 138, p. 485-504.
- RODRÍGUEZ-ARIAS, M.A.; X. RODÓ (2005) «Identification of transitory ENSO forcings on climatological series from Catalunya». *Theor. Appl. Clim. (en revisió)*.
- RODWELL, M.J.; D.P. ROWELL; C.K. FOLLAND (1999). «Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate». *Nature*, núm. 398, p. 320-323.
- ROPELEWSKI, C.F.; M.S. HALPERT (1987). «Global and regional precipitation patterns associated with El Niño-Southern Oscillation». *Mon. Wea. Rev.*, núm. 115, p. 1.606-1.626.
- ROMERO, R., C.; RAMIS; J.A. GUIJARRO (1999). «Daily rainfall patterns in the Spanish Mediterranean area: an objective classification». *International Journal of Climatology*, núm. 19, p. 95-112.
- SÁENZ, J.; J. ZUBILLAGA; C. RODRÍGUEZ-PUEBLA (2001). «Interannual variability of winter precipitation in northern Iberian Peninsula». *Int. J. Climatol.*, núm. 21, p. 1.503-1.513.
- SANTOLERI, R.; E. BÖHM; M.E. SCHIANO (1995). «The sea surface temperature of the western Mediterranean sea: historical satellite thermal data». *Am. Geophys. Union*. p. 155-176.
- SCHNUR, R. (2002). «The investment forecast». *Nature*, núm. 415, p. 483-484.
- SYKES, M.T.; I.C. PRENTICE (1996). «Climate change, tree species distributions and forest dynamics: a case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of Northern Europe». *Climatic Change*, núm. 34, p. 161-177.
- THOMPSON, D.W.J.; J. M. WALLACE (1998). «The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopoten-

El forçament antropogènic i els canvis en el clima Xavier Rodó i Miquel Àngel Rodríguez-Arias

tial height and temperature fields». *Geophys. Res. Lett.*, núm. 25, p. 1.297-1.300.

TIMMERMANN, A.; J. OBERHUBER; A. BACHER; M. ESCH; M. LATIF; E. ROECKNER (1999). «Increase El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming». *Nature*, núm. 398, p. 694-697.

TUOMENVIRTA, H.; H. ALEXANDERSSON; A. DREBS; P. FRICH; P.O. NORDLI (1998). «Trends in Nordic and Arctic Extreme Temperatures». *DNMI Report No. 13/98*. Oslo: Norwegian Meteorological Institute.

VAN OLDENBORGH, G.J.; G. BURGERS; A. KLEINTANK (2000). «On the El Niño teleconnection to spring precipitation in Europe». *Int. J. Climatol.*, núm. 20, p. 565-574.

VALENTINI, R.; H. DOLMAN; P. CIAIS; E.D. SCHULZE; A. FREIBAUER; D. SCHIMEL; M. HEIMANN (2000). «Accounting for carbon sinks in the Biosphere,

European perspective». *Scientific note to articles 3.3, 3.4 and 12 of the Kyoto Protocol*. Jena: Carboeurope European Office, M.P.I. for Biogeochemistry.

XOPLAKI, E.; J.F. GONZÁLEZ-ROUCO; J. LUTERBACHER; H. WANNER (2003). «Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs». *Clim. Dyn.*, núm. 20, p. 723-739.

YAKIR, D.; S. LEV-YADUN; A. ZANGVIL (1996). «El Niño and tree ring growth near Jerusalem over the last 20 years». *Glob. Change Biol.*, núm. 2, p. 97-101.

ZORITA, E.; V. KHARIN; H. VON STORCH (1992). «The atmospheric circulation and sea surface temperature in the North Atlantic area in winter: their interaction and relevance for Iberian precipitation». *J. Clim.*, núm. 5, p.1.097-1.108.