Aigua i canvi climàtic

Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya

Escenaris Climàtics

Generalitat de Catalunya
Departament de Medi Ambient i Habitatge

Agència Catalana de l'Aigua

Escenaris climàtics

Resum

Jordi Cunillera
Servei Meteorològic de Catalunya

Durant els darrers anys, sovint s'atribueix a l'existència del canvi climàtic l'observació de determinats fenòmens en la natura, i es comenta fàcilment que aquest canvi climàtic és la causa d'una disminució de la precipitació, d'un augment de pluges intenses, d'un augment dels períodes de sequera, d'un avançament en la floració dels arbres, d'una alteració en el cicle vital dels animals, o d'altres fets. Ara bé, les preguntes que hom creu important que s'han de contestar són: quina ha estat l'alteració del clima durant les darreres dècades (segles XIX i XX); quins fenòmens naturals es poden atribuir sense cap mena de dubte a aquesta alteració del clima, independentment de les causes que la provoquen; com evolucionarà el clima durant el segle XXI, i quines conseqüències se'n poden derivar.

L'objectiu general 'del primer bloc d'aquest informe és donar a conèixer, d'una banda, els resultats obtinguts amb l'estudi de l'evolució del clima a Catalunya durant, bàsicament, el segle XX, i, d'altra banda, els resultats d'estudis realitzats per esbrinar l'evolució del clima a Catalunya al llarg del segle XXI, que seria l'estudi pròpiament dit dels possibles escenaris climàtics.

És important comentar que la informació que es presenta en els set capítols que tracten els escenaris climàtics no s'ha generat a partir de treballs de recerca encarregats expressament per elaborar aquest informe, sinó que des 'del primer moment es van voler compilar els resultats dels estudis que s'han anat fent en diferents universitats catalanes i altres centres de recerca durant els darrers anys i concretar, així, el coneixement actual de l'evolució del clima a Catalunya tant en el passat com en el futur.

Aquest bloc s'ha estructurat en tres parts. La primera part es refereix a l'anàlisi de la informació disponible per saber si s'ha detectat algun canvi en el clima de Catalunya durant les darreres dècades. Per a la detecció d'aquest possible canvi, s'han estudiat sèries llargues i representatives de dades meteorològiques, bàsicament de temperatura de l'aire i precipitació (capítols 1 i 3), però també s'esmenten els canvis observats als ecosistemes i a la biosfera (capítol 2).

La segona part és més teòrica, atès que s'ha considerat oportú explicar les eines que s'utilitzen per a predir l'evolució futura del clima, és a dir, els models climàtics (capítol 4), abans de presentar directament els resultats que ofereixen aquestes eines, i aprofitar aquest capítol per a esmentar la rigorositat dels models, però també les incerteses que són inherents a la modelització climàtica.

Finalment, la tercera part consta de tres capítols en els quals es fa una anàlisi de les projeccions climàtiques a escala global (capítol 5), a escala regional (capítol 6) i a escala local (capítol 7), tenint en compte que a mesura que es disminueix l'escala per a la qual es fa la projecció, n'augmenta la incertesa, atès que entren en joc fenòmens meteorològics de petita escala difícils de considerar en els models climàtics.

Tot seguit es fa una breu descripció d'algunes de les principals conclusions que apareixen al llarg dels capítols d'aquest bloc dedicat als escenaris climàtics. Tenint present que tot intent de resum implica una simplificació de les explicacions, es recomana la lectura de tots els capítols per extreure'n un coneixement millor.

a) Observacions i indicadors de canvi climàtic

- L'estudi de dades meteorològiques del passat s'ha centrat en la variable precipitació, atès que aquesta variable és la més interessant per als impulsors d'aquest informe (malgrat que no és l'única, evidentment) i és, probablement, la que presenta més incertesa i més dependència espacial.

- L'anàlisi de sèries de dades de precipitació durant els segles XIX i XX no presenta cap tendència estadísticament significativa, de manera que amb dades dels darrers 150 o 200 anys no es pot deduir una variació global en la quantitat de precipitació recollida al nostre territori.
- Les sèries analitzades presenten una gran variabilitat temporal, amb períodes anuals de precipitació escassa seguits per períodes anuals amb precipitació abundant. Una de les conseqüències més importants d'aquesta variabilitat és que el signe de la tendència depèn força de l'origen i l'abast de la sèrie estudiada; per exemple, l'estudi de la sèrie de precipitació durant el període 1897-1998 a diferents estacions de la conca de l'Ebre i de les conques internes de Catalunya presenta dos períodes amb una tendència diferent: el període 1897-1940 proporciona una forta tendència significativa positiva (augment de la precipitació), mentre que el període 1940-1998 proporciona una lleugera tendència negativa (disminució de la precipitació) però no significativa. Per tant, si només s'estudien els darrers 50 o 60 anys, es poden deduir conclusions errònies des del punt de vista de l'evolució del clima a llarg termini.
- Com a indicadors de canvi climàtic, s'han estudiat 27 índexs climàtics relacionats amb la temperatura de l'aire i la precipitació, i s'ha calculat la seva evolució amb dades de gairebé els darrers 100 anys a l'Observatori de l'Ebre (Baix Ebre) i a l'Observatori Fabra (Barcelonès). S'ha obtingut una mateixa tendència als dos observatoris per a 11 índexs relacionats amb la temperatura (augmenten els dies d'estiu, les nits tropicals, la màxima de les temperatures màximes, la mínima de les temperatures màximes, les nits càlides, els dies càlids, l'indicador de durada de ratxa càlida i l'amplitud tèrmica anual, mentre que disminueixen les nits fredes, els dies freds i l'indicador de durada de ratxa freda) i per a un únic 1 índex relacionat amb la precipitació (augment de l'índex simple d'intensitat diària, que pot indicar que la pluja total anual cau repartida en menys dies).
- A causa dels canvis en la temperatura de les darreres dècades, i malgrat haver-hi diferències entres espècies, actualment a Catalunya les fulles dels arbres surten de mitjana uns 20 dies abans que no pas fa una cinquantena d'anys, i els cicles vitals d'alguns animals (invertebrats, amfibis, ocells...) també s'han alterat en els darrers 30-50 anys. Els estudis actuals posen un èmfasi especial en el poder d'adaptació de les plantes i dels animals als canvis en les variables que defineixen el clima, i s'analitza si aquesta capacitat d'adaptació és prou ràpida davant la velocitat del canvi observat i projectat en el clima.

b) Modelització climàtica

- No és el mateix predir l'evolució del temps meteorològic que pronosticar l'evolució del clima, atès que els fenòmens que cal considerar, les escales temporals i espacials, i la informació disponible no és la mateixa. Per exemple, els models meteorològics sovint són alimentats amb la informació obtinguda a xarxes d'observació terrestre (estacions meteorològiques, radiosondatges, satèl·lits, radars...), però òbviament aquesta operació no es pot fer amb els models climàtics.
- Una de les principals fonts d'incertesa de les simulacions d'escenaris regionals de canvi climàtic és la definició dels anomenats escenaris d'emissions, que reflecteixen diferents concentracions a l'atmosfera de gasos amb efecte d'hivernacle segons l'evolució socioeconòmica arreu del nostre planeta durant les properes dècades.
- Altres fonts d'incertesa estan relacionades amb els processos fisicoquímics que intervenen en el sistema climàtic (manca de coneixement complet del cicle del carboni i/o de la dinàmica de les escorces de gel, gran sensibilitat dels models climàtics a petits canvis en el forçament extern del sistema, etc.).
- Hi ha diferents tècniques de regionalització dels escenaris de canvi climàtic per a l'anàlisi regional o local dels seus efectes, especialment en territoris amb un clima poc homogeni com pot ser Catalunya. La impossibilitat de demostrar que els models emprats en aquestes tècniques proporcionen bons resultats per al clima futur (segle

XXI), amb forçaments diferents dels del període utilitzat per definir-los (una part del segle XX, generalment), afegeixen incertesa a les projeccions climàtiques locals.

c) Projeccions climàtiques

- Malgrat les incerteses esmentades abans en parlar de la modelització climàtica, les projeccions globals que proporciona el 4t informe de l'IPCC (AR4) no ofereixen cap dubte amb relació al fet que durant el segle XXI s'espera un augment de la temperatura mitjana del planeta, i el motiu és, principalment, l'augment continuat de les concentracions dels gasos amb efecte d'hivernacle (deduït dels diferents escenaris d'emissions considerats). Així, la temperatura mitjana global a finals del segle XXI seria entre 1,1 i 6,4 °C superior a la mitjana global del període 1980-1999, i aquest rang d'augment depèn de l'escenari d'emissions.
- L'augment de temperatura no serà uniforme a tota la Terra, i s'espera un augment molt més alt que el de la mitjana en zones de les latituds altes de l'hemisferi nord, i un augment més baix sobre els oceans, en particular sobre l'oceà Atlàntic. A la zona que l'AR4 anomena «Sud d'Europa i Mediterrània» i per a l'escenari d'emissions A1B, cal esperar un augment de la temperatura mitjana a finals del segle XXI de prop de 3,5 °C, amb un augment més marcat a l'estiu que no pas a l'hivern.
- La majoria de models analitzats a l'AR4 indiquen un augment global de la precipitació, però no es donen valors mitjans d'aquest augment a causa de la dispersió entre models i de la heterogeneïtat espacial i temporal dels canvis en la precipitació. Ara bé, com a resum es pot dir que hi ha augment de precipitació a la zona intertropical i en latituds altes d'ambdós hemisferis, i disminueix la precipitació a zones subtropicals. Com en el punt anterior, l'AR4 proporciona resultats per a la zona «Sud d'Europa i Mediterrània» considerant l'escenari d'emissions A1B, i per al període 2080-2099 s'estima una disminució de la precipitació de prop del 12% amb relació a la precipitació mitjana del període 1980-1999, amb una disminució més marcada a l'estiu que no pas a l'hivern.
- L'anàlisi dels resultats d'estudis a escala de la península Ibèrica ofereix uns rangs de canvis previstos que no s'allunyen gaire dels esmentats als punts anteriors. Per exemple, un estudi en aquesta zona realitzat amb diferents models climàtics regionals, forçats amb un únic model global i per a l'escenari d'emissions A2, mostra un augment de la temperatura màxima mitjana anual d'entre 3 i 4,5 °C, un augment de la temperatura mínima mitjana anual d'entre 2,5 i 3,5 °C, i una disminució de la precipitació d'entre el 10% i el 35% (els tres resultats són variacions per al període 2071-2100 amb relació al període 1961-1990).
- Tot i les incerteses tant dels models climàtics globals com de les projeccions climàtiques locals, i tenint en compte que actualment 'es desenvolupen diferents projectes que intenten millorar aquestes projeccions locals i reduir-ne la incertesa, en aquest informe s'han volgut donar alguns resultats vàlids per a Catalunya. Així, a partir de l'estudi de diferents treballs realitzats a zones que inclouen el nostre país, es pot resumir que la temperatura mitjana a Catalunya podria augmentar entre 4 i 5,5 °C a finals del segle XXI, i aquest augment seria més important a l'estiu als Pirineus i comarques interiors i més moderat a l'hivern a zones costaneres, mentre que la precipitació mitjana anual pot disminuir entre el 5% i el 15%, i l'estiu seria l'estació de l'any que patiria disminucions més importants de precipitació.

1. Constatacions de caràcter meteorològic a Catalunya

Maria del Carme Llasat
Javier Martín
Joan Albert López
Universitat de Barcelona

Toni Barrera
Servei Meteorològic de Catalunya

Introducció, objectiu i metodologia

La forma més usual de cercar la presència de constatacions de caràcter meteorològic sobre el canvi climàtic és l'anàlisi de sèries de variables meteorològiques de la regió que es vol estudiar, en aquest cas, Catalunya. El més freqüent és treballar amb sèries de temperatura i precipitació. Aquest capítol se centra concretament en la precipitació, en primer lloc perquè és la variable meteorològica més interessant per a l'Agència Catalana de l'Aigua (malgrat que no és l'única, òbviament), i en segon lloc, perquè mentre que per a la temperatura les proves del seu augment són molt clares, la precipitació està sotmesa a nombroses incerteses i a més dependència regional. D'altra banda, s'ha d'aclarir que aquesta contribució es basa en treballs de recerca fets pels mateixos autors, i no en la presentació d'un estat de l'art de tots els treballs que sobre aquesta temàtica existeixen a Catalunya i que ja es troben en altres informes.

Els resultats de les anàlisis de les tendències de les variables meteorològiques depenen completament de la tècnica que s'hagi fet servir i del període seleccionat. Si es parteix d'un moment de fort dèficit, el més probable és obtenir un augment, i viceversa. En l'actualitat no hi ha consens sobre la longitud ni l'inici de les sèries que s'han d'analitzar, si bé es parteix d'un llindar superior a 30 anys, que és el que es considera com un període climàtic. Tampoc hi ha consens sobre una forma de tractament única i la bibliografia presenta nombrosos tests paramètrics i no paramètrics, alguns amb més sentit físic i d'altres purament empírics. Atenent aquestes consideracions, l'objectiu d'aquest primer capítol és treballar amb les sèries més llargues de Catalunya, per a un període de més de 200 anys, un altre d'uns 100 anys i un darrer d'uns 50 anys. Per al primer període es treballa amb una estació (Barcelona), per al segon es treballa amb la pluja regionalitzada per a la conca de l'Ebre i les conques internes a partir de vint-i-tres estacions, i per al tercer, amb la pluja de cinquanta estacions de la xarxa més moderna.

La metodologia aplicada és diferent per a cada un d'aquests períodes. L'estudi parteix dels resultats que es van publicar per a la sèrie mensual de Barcelona per al període 1850-1991 (Rodríguez *et al.,* 1999). A continuació s'analitza l'evolució de les anomalies de precipitació a Barcelona per al període 1786-2005. A fi de suavitzar la sèrie i veure les anomalies importants més clarament, s'han aplicat uns filtres passabaix gaussians d'11 i 31 anys (Štìpánek, 2003). Prèviament la sèrie de precipitació mensual ha estat completada (a escala diària, des de 1854) tenint present totes les estacions oficials dels serveis meteorològics que hi ha hagut, les estacions particulars antigues i les dades més recents de Clavegueram de Barcelona (CLABSA), i se n'ha analitzat l'homogeneïtat. Després s'analitza la sèrie de precipitació màxima en 24 hores mensual a la ciutat de Barcelona per al període 1854-2000. Per a determinar si una tendència és significativa o no, s'hi aplica la tècnica de Montecarlo. Seguint aquesta tècnica, primer es calcula la tendència de la sèrie original per regressió lineal; després es generen 10.000 permutacions aleatòries de la sèrie original i se'n calculen les tendències; es calculen els percentils 97,5 i 2,5 d'aquestes tendències, i si la tendència de la sèrie original és més alta que el percentil de 97,5 (si és positiva) o més baixa que el 2,5% (si és negativa), es pot considerar que és significativa al 95%.

En segon lloc s'aborda la qüestió des d'un altre punt de vista, que consisteix a analitzar les tendències de la sèrie de precipitació areal o regionalitzada per a la conca de l'Ebre i les conques internes de Catalunya, per als períodes 1898-1998 i 1940-1998 (anys hidrològics, d'octubre a setembre). Aquest darrer període s'ha considerat pel fet de ser un dels més utilitzats tant al *Llibre Blanc de l'Aigua a Espanya* (MMA, 1998) com a nombrosos plans de conca. Les sèries han estat prèviament completades (Barrera, 2004) amb el mètode CORMUL (correlació múltiple) desenvolupat pel CEDEX i implementat en el programari propi CHAC (càlcul hidrometeorològic d'aportacions i crescudes; http://hercules.cedex.es/chac/). Per a calcular la precipitació areal, s'han dividit les dues regions en cel·les d'1 x 1 km i s'ha calculat la precipitació a cada cel·la utilitzant-ne l'invers de la distància al quadrat, tenint en compte els 4 pluviòmetres més propers a la cel·la en qüestió; finalment s'ha calculat la mitjana areal. La precipitació areal té l'avantatge de ser més representativa de la regió en el seu conjunt.

L'estudi de tendències per a les sèries de 50 anys s'ha fet mitjançant el t-test.

Dades i resultats

La sèrie de Barcelona

L'anàlisi de la sèrie mensual de Barcelona per al període 1850-1991 mostra un desplaçament de la precipitació de la tardor del setembre cap a l'octubre/novembre, quatre intervals amb una forta anomalia positiva (1870-1880, 1910-1930, 1950-1970, 1980-1990) i tres períodes amb anomalies negatives (1860-1870, 1935-1950, 1970-1990), si bé no dona una tendència significativa. Aquest resultat obtingut a escala mensual per al període 1850-1991 es pot comparar amb el que s'obtindria a escala anual o estacional. La taula 1, en la qual s'han fet servir dos mètodes a fi de corroborar els resultats per al període 1786-2005, indica que no hi ha cap tendència estadísticament significativa de la precipitació anual, però en el context de tota la sèrie hi ha un augment de la precipitació a l'estiu. En el cas de la primavera la tendència negativa encara no és significativa.

Taula 1. Resultats de l'aplicació dels mètodes de Montecarlo i Mann-Kendall a l'estudi de les tendències en la precipitació estacional i anual a la ciutat de Barcelona (1786–2005).

Mètode Montecarlo

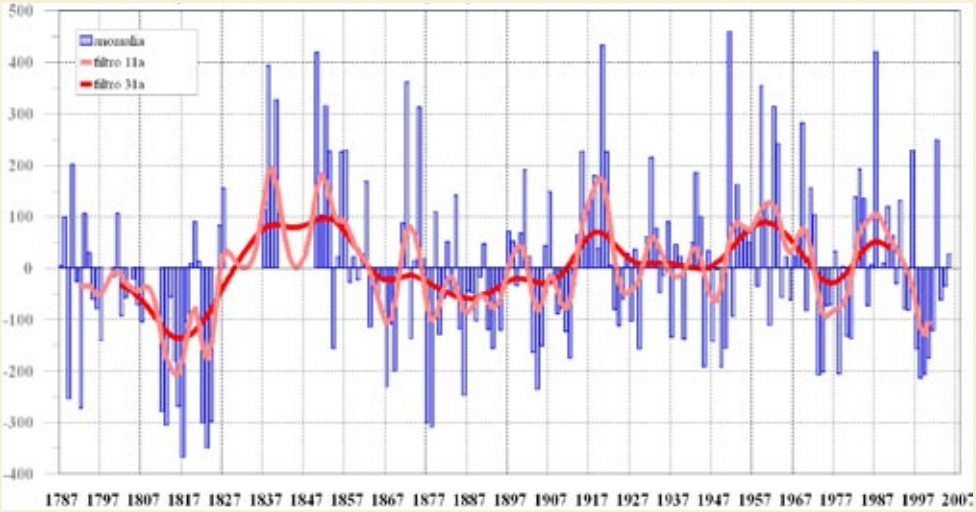
Període	r (mm/a)	T_97,5 (mm/a)	T_2,5 (mm/a)	Sig al 95%? ➡ r > |T|?
DGF	+0,027	+0,152	–0,155	No
MAM	–0,016	+0,141	–0,142	No
JJA	**+0,134**	**+0,129**	–0,134	Sí
SON	+0,081	+0,222	–0,226	No
ANUAL	+0,305	+0,361	–0,369	No

Mètode de Mann-Kendall

Període	t	t_c	Sig al 95? ➡ |t| > t_c?
DGF	+0,028	+0,093	No
MAM	–0,028		No
JJA	**+0,099**		Sí
SON	+0,024		No
ANUAL	+0,053	+0,095	No

La figura 1 mostra les anomalies anuals a Barcelona per al període 1787-2005. Si bé les anomalies que hem esmentat abans encara es detecten, l'efecte de tractar amb una mitjana obtinguda per a un període més llarg i, òbviament, disposar de més anys d'informació, fa que es trobin altres períodes anòmals. Com a anomalia negativa cal destacar-ne l'interval de temps comprès entre 1810 i 1825, en el qual, recordem-ho, hi ha «l'any de la fam» (Barriendos, 1994), i el llarg període de sequera que va afectar tot Catalunya entre 1812 i 1817. Entre 1870 i 1910 hi hauria un seguit important d'anys amb dèficit de precipitació, amb un extrem per als anys 1877 i 1878. Malgrat que no torna a aparèixer en tota la sèrie un dèficit similar, la sèrie amb filtre d'11 anys presenta dos mínims importants cap al final de la sèrie, a l'entorn dels anys setanta del segle XX i, sobretot, entre 1997 i 2004. En conclusió, hi ha una forta variabilitat, però, tal com visualment s'hi aprecia, no 'es pot parlar d'una tendència en la precipitació anual, coincidint amb els resultats de la taula 1.

Figura 1. Evolució de les anomalies anuals de precipitació (valor-mitjana) a la ciutat de Barcelona des del 1787 fins al 2005. Les línies continues representen l'evolució suavitzada amb filtres passabaix gaussians d'11 i 31 anys (Barrera *et al.,* en prep.).



La figura 2 es refereix a la precipitació màxima diària mensual. Malgrat que presenta una tendència positiva molt lleugera, l'aplicació del test de Montecarlo demostra que tampoc és significativa. Si ens referim al nombre de dies de pluja es pot veure que hi ha una clara tendència positiva per al llindar de precipitació acumulada inferior (entre 0,1 i 10 mm), que probablement esta vinculada a la millora dels mètodes de detecció i acumulació de pluja i, fins i tot, a possibles canvis de criteri. En efecte, la taula 2 deixa palès que aquest augment no es detecta per als altres llindars.

Figura 2. Evolució temporal de la precipitació mensual màxima diària per a la ciutat de Barcelona (1854-2000) (Barrera *et al.,* 2006).

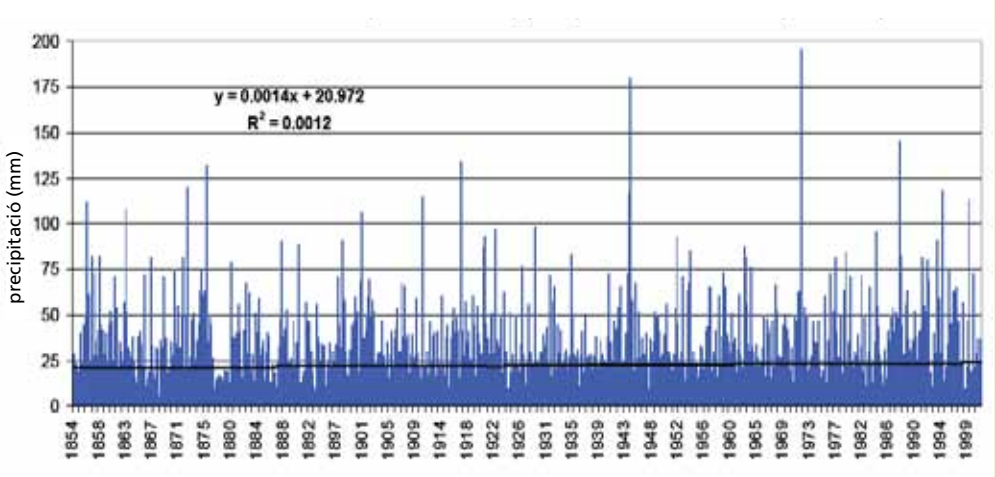
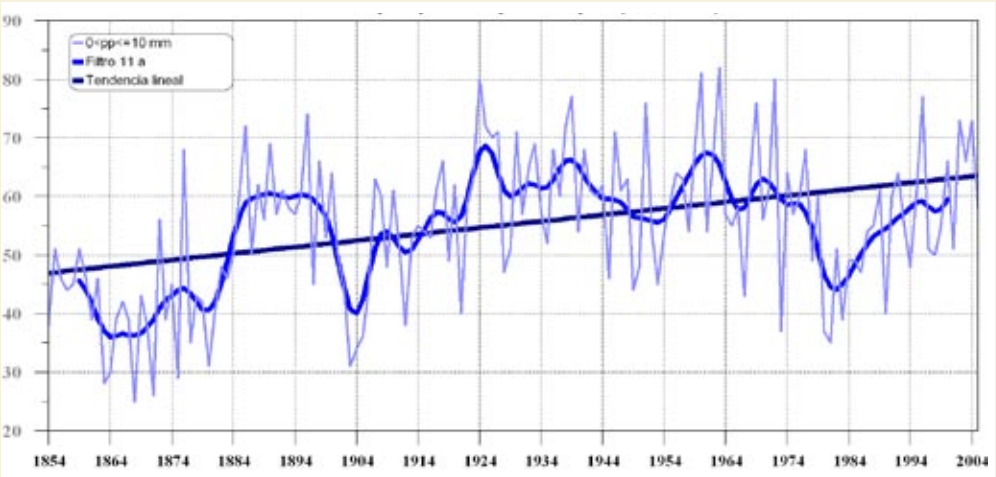


Figura 3. Evolució temporal dels dies anuals amb precipitació apreciable per a l'interval [0,1;10 mm] a la ciutat de Barcelona de 1854 a 2005. Es mostra la tendència lineal i l'evolució suavitzada amb un filtre passabaix gaussià d'11 anys.



Taula 2. Resultats de l'aplicació del mètode de Montecarlo a l'estudi de les tendències en la precipitació màxima diària anual del mes de setembre, i al nombre de dies anuals amb precipitació apreciable, també de setembre i per a intervals amb diferents llindars de precipitació (10, 20, 30, 45 i 60 mm).

Sèrie	r	T_97,5	T_2,5	Sign. al 95%? → r > |T|?
Màx. diària anual	+0,06 mm/a	+0,10 mm/a	–0,10 mm/a	No
Nre. anuals precip.	**+0,11 esdev./a**	**+0,05 esdev./a**	**–0,05 esdev./a**	**Sí**
Màx. diària anual SET	–0,01 mm/a	+0,09 mm/a	–0,09 mm/a	No
Nre. dies anuals precip. SET	+0,01 esdev./a	+0,01 esdev./a	–0,01 esdev./a	No*
0 mm < Nre. dies ≤ 10 mm	**+0,11 esdev./a**	**+0,05 esdev./a**	**–0,05 esdev./a**	**Sí**
10 mm < Nre. dies ≤ 20 mm	$-5 \cdot 10^{-3}$ esdev./a	+0,011 esdev./a	–0,011 esdev./a	No
20 mm < Nre. dies ≤ 30 mm	$+7 \cdot 10^{-3}$ esdev./a	+0,007 esdev./a	–0,007 esdev./a	No*
30 mm < Nre. dies ≤ 45 mm	$+4 \cdot 10^{-4}$ esdev./a	+0,006 esdev./a	–0,006 esdev./a	No
45 mm < Nre. dies ≤ 60 mm	$-1 \cdot 10^{-4}$ esdev./a	+0,003 esdev./a	–0,003 esdev./a	No
Nre. dies anuals > 60 mm	$+2 \cdot 10^{-3}$ esdev./a	+0,003 esdev./a	–0,003 esdev./a	No

(*):tendència estadísticament significativa amb un nivell de confiança del 90%.
esdev.: abreviatura per a esdeveniments o nombre d'esdeveniments.

La sèrie de pluja areal per al període 1897-1998

La taula 3 indica les estacions que s'han fet servir per a l'anàlisi de la tendència de la precipitació areal per al període 1897-1998.

Taula 3. Paràmetres bàsics estadístics de les sèries més llargues de Catalunya i la conca de l'Ebre (1897-1998), on $\bar{X}$ és la mitjana anual, σ és la desviació estàndard, CV és el coeficient de variació i N és el nombre d'anys amb dades (Barrera *et al.,* en prep.).

Estació	$\bar{X}$ (mm)	σ (mm)	CV	Període temporal	N
BELORADO (BEL)	550,5	104,2	0,19	1912/13-1997/98	86
HARO (HAR)	485,9	136,6	0,28	1912/13-1997/98	86
LOGROÑO (LO)	426,4	103,0	0,24	1880/81-1982/83	103
SARTAGUDA (SAR)	479,7	128,5	0,27	1919/20-1997/98	79
PAMPLONA (PAM)	844,7	324,3	0,38	1880/81-1997/98	118
ALSASUA (ALS)	1.305,1	298,7	0,23	1913/14-1997/98	85
TERRER (TER)	411,6	100,4	0,24	1921/22-1997/98	77
ZARAGOZA (Z)	323,7	90,2	0,28	1858/59-1984/85	127
ALCALÁ DE GURREA (ALC)	554,6	451,3	0,81	1917/18-1997/98	81
CASTELLOTE (CAS)	411,2	110,0	0,27	1922/23-1995/96	74
LA TORRE DE CABDELLA (TCA)	1.234,0	257,5	0,21	1914/15-1993/94	80
LLEIDA (LL)	356,4	115,9	0,33	1880/81-1982/83	103
HUESCA (HU)	534,0	139,4	0,26	1864/65-1959/60	96
TIVISA (TIV)	587,0	208,0	0,35	1912/13-1997/98	86
BENISSANET (BEN)	438,0	150,5	0,34	1912/13-1995/96	84

Estació	$\bar{x}$ (mm)	σ (mm)	CV	Període temporal	N
TORTOSA (TOR)	530,0	162,3	0,31	1879/80-1978/79	100
AMPOSTA (AMP)	559,5	193,6	0,35	1912/13-1997/98	86
SALLENT (SNT)	570,0	111,6	0,20	1915/16-1989/90	75
SANT QUINTÍ DE MEDIONA (SQM)	586,6	138,0	0,24	1901/02-1997/98	97
BARCELONA (B)	569,0	156,3	0,27	1858/59-1994/95	137
SABADELL (SAB)	633,4	154,5	0,24	1896/97-1989/90	94
ALELLA (ALE)	568,3	142,5	0,25	1914/15-1994/95	81
PALAFRUGELL (PAF)	672,9	197,1	0,29	1912/13-1997/98	86

Pel que fa a l'evolució de la distribució de la precipitació areal s'observa una variació intraanual molt elevada (figura 4), amb dos períodes marcats per anomalies molt negatives tant al principi com al final de la sèrie. Si s'analitza estacionalment, els resultats discrepen (figura 5). Mentre que la precipitació a la tardor va arribar a un mínim a finals dels anys vuitanta del segle XX, s'observa una certa recuperació en la mitjana mòbil cap al final de la sèrie (recordem que acaba el 1998), si bé la figura 6 deixa ben paleses les anomalies negatives de finals dels noranta. Contràriament, la precipitació a l'estiu i la primavera presenta una tendència negativa, molt més marcada en el cas de la primavera (figura 7), estació per a la qual arriba a superar la tendència negativa del principi de la sèrie. La taula 4 mostra les tendències de les sèries estacionals i la seva significança. Crida l'atenció la tendència positiva per a totes les estacions de l'any, que tanmateix no és significativa i és conseqüència del punt de partida de la sèrie. D'aquí ve el valor de les figures que permeten disposar d'una anàlisi visual i detectar millor els canvis. De totes maneres, atenent aquesta darrera anàlisi es podria concloure que no apareix una tendència significativa per a la sèrie en el seu conjunt, sinó que les anomalies del final del període es podrien trobar dins de la variabilitat natural de la precipitació a les conques del NE de la Península. Aquest resultat és coherent amb el que s'ha trobat per a les sèries individuals representatives de les conques internes de Catalunya i de l'Ebre (Llasat i Quintas, 2004).

Figura 4. Evolució de les anomalies absolutes (valor de precipitació menys la mitjana) de precipitació anual a les conques de l'Ebre i a les conques internes per al període 1897-1998 (Barrera *et al.,* en prep.).

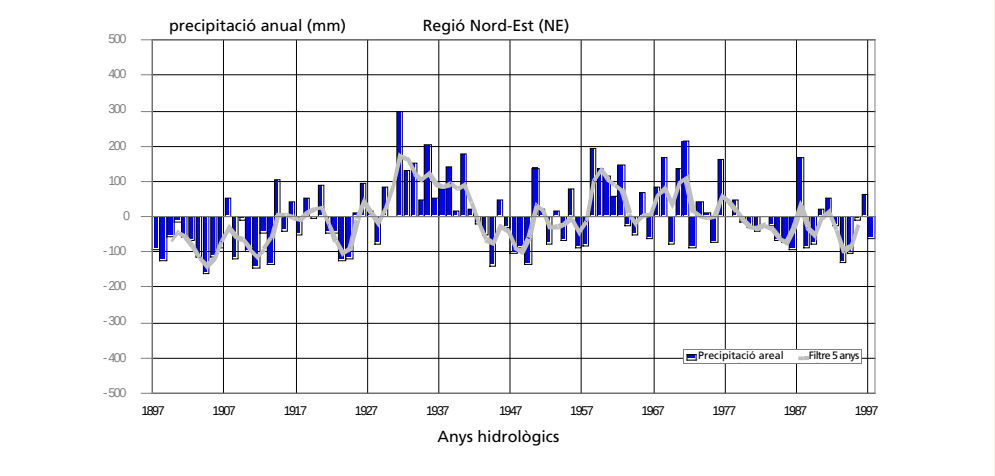


Figura 5. Evolució de la mitjana mòbil estacional amb una longitud de finestra de 30 anys (Barrera *et al.*, en prep.).

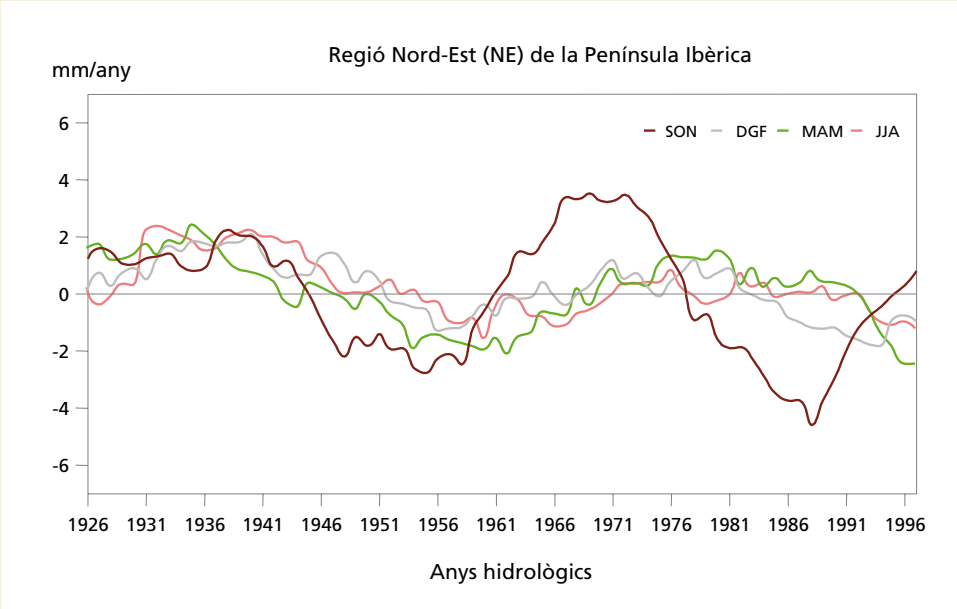


Figura 6. Evolució de les anomalies absolutes de precipitació (valor de precipitació menys la mitjana) de tardor (SON) a les conques de l'Ebre i a les conques internes per al període 1897-1998 (Barrera *et al.*, en prep.).

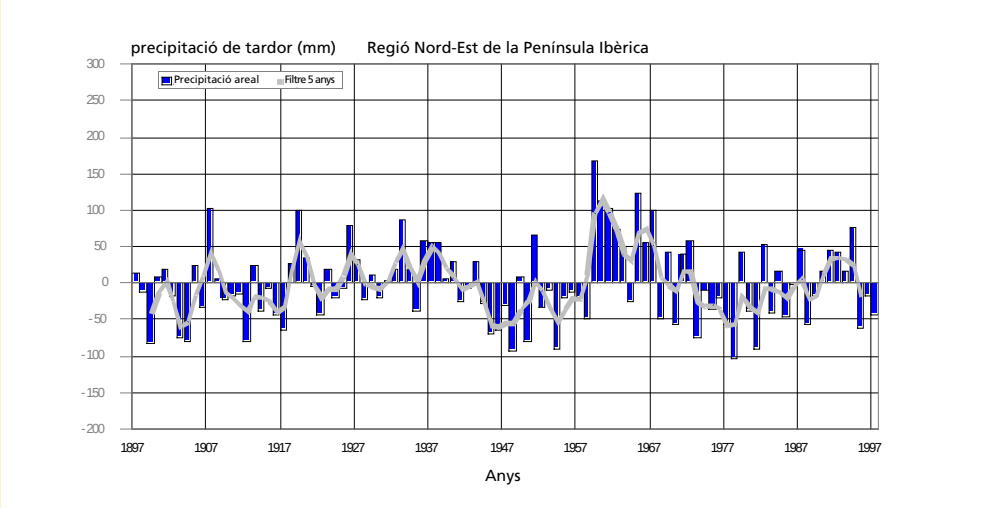
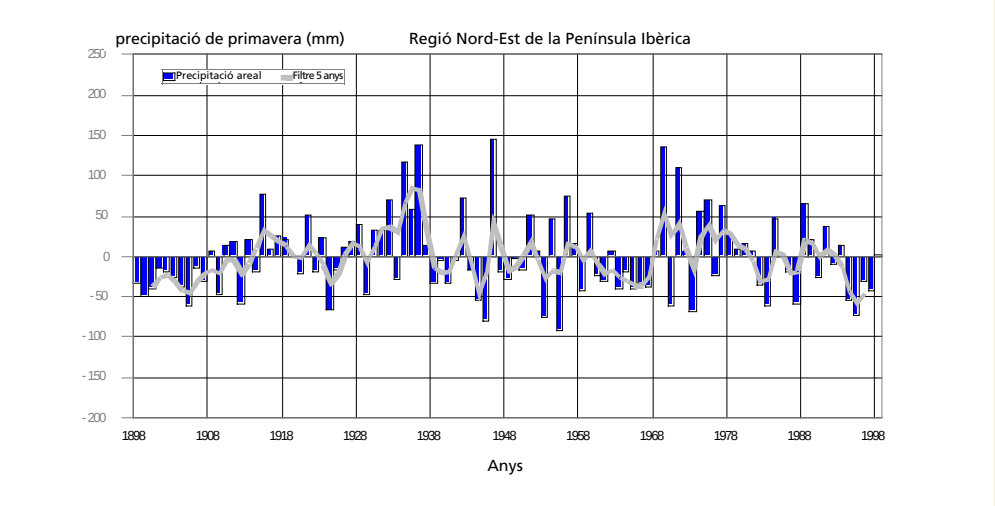


Figura 7. Evolució de les anomalies absolutes de precipitació (valor de precipitació menys la mitjana) de primavera (MAM) a les conques de l'Ebre i a les conques internes per al període 1897-1998 (Barrera *et al.,* en prep.).



Taula 4. Tendències de la precipitació a la regió NE per al període 1897/98-1997/1998. La significança ha estat provada amb el test de Montecarlo.

Regió	Període	T(mm/any)	T(97,5%)	T(2,5%)	Sign. 95%?
	SON	+0,08	+0,37	–0,37	NS
	DGF	+0,19	+0,29	–0,29	NS
NE	MAM	+0,05	+0,33	–0,33	NS
	JJA	+0,16	+0,28	–0,28	NS
	Anual	+0,49	+0,64	–0,67	NS

Com ja s'ha dit a l'inici del capítol, les tendències depenen fortament de l'origen i la longitud de la sèrie. La taula 5 mostra com, quan es treballa amb el període partit entre 1897-1940 i 1940-1998, la tendència anual varia. Mentre que en el primer període es té una forta tendència significativa positiva, el segon apuntaria cap a una tendència negativa però no significativa. A l'apartat següent es comentarà més detingudament l'evolució en els darrers 50 anys.

Taula 5. Tendències de la precipitació a la regió NE per als períodes 1897/98-1939/40 i 1940/41-1997/98. La significança ha estat provada amb el test de Montecarlo.

Regió	Període	T(mm/any)	T(97,5%)	T(2,5%)	Sign. 95%?
	1897/98 1939/40	**+5,49**	**+2,42**	**-2,43**	**Sign.**
NE					
	1940/41 1997/97	+0,55	+1,56	–1,57	NS

Tendències de la precipitació anual i de la seva variabilitat durant la segona meitat del segle XX

El possible senyal del canvi climàtic –clarament visible des de la segona meitat de la dècada dels anys setanta del segle XX a les sèries tèrmiques– s'ha intentat cercar a partir de l'anàlisi de 50 sèries pluviomètriques anuals d'estacions meteorològiques catalanes. La taula 6 mostra el valor del coeficient de variació (CV) per a cada sèrie, i l'índex d'irregularitat temporal, S1, proposat per Martín Vide *et al*. (2001), que s'expressa com la mitjana dels valors absoluts dels logaritmes naturals dels quocients de la precipitació d'un any i la de l'any anterior. Els resultats són els següents:

1) Hi ha un predomini de sèries (78%) amb una tendència negativa; però tan sols en dues sèries (Torelló i Vilaller) la tendència negativa és estadísticament significativa (α = 0,05).

2) El Pirineu lleidatà és l'àrea que concentra les tendències negatives més marcades, que ultrapassen els 150 mm de reducció anual en alguns indrets.

3) No hi ha sèries amb una tendència positiva estadísticament significativa.

La comparació dels valors anuals del coeficient de variació (CV) i de l'índex d'irregularitat temporal S1 (Martín Vide *et al*., 2001) dels períodes 1951-1975 i 1976-2000 resulta adient per a esbrinar la possible variació de la variabilitat i la irregularitat any rere any degudes al canvi climàtic. Respecte al coeficient de variació, tan sols una quarta part (24%) de les estacions meteorològiques mostren un augment de la variabilitat del primer al segon període. En referència a l'índex S1, només un terç (32%) de les estacions meteorològiques presenten un augment de la irregularitat temporal entre el primer i el segon període. La major part es localitza a la meitat occidental del territori.

Tendències de la precipitació estacional i patrons de variabilitat de baixa freqüència durant la segona meitat del segle XX

El règim pluviomètric de Catalunya durant la meitat freda de l'any té un comportament diferenciat de la resta de la península Ibèrica. Les situacions sinòptiques que porten pluges a l'Oest de la Península i a Catalunya són ben diferents. Les fases positiva i negativa dels patrons de variabilitat de baixa freqüència de l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (*North Atlantic Oscillation*, NAO), l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental (*Western Mediterranean Oscillation*, WeMO; Martín Vide i López Bustins, 2006) i l'Oscil·lació de l'Àrtic (*Artic Oscillation*, AO) també ajuden a explicar aquestes diferències en la distribució espacial de la precipitació i, sobretot, a comprendre'n l'evolució recent i futura a la península Ibèrica i a Catalunya.

L'hivern és l'estació més complexa. Està sota un domini de la NAO i l'AO, sobretot a la meitat occidental de Catalunya. Aquests índexs tenen una tendència positiva, que està donant lloc a un cert descens de la precipitació en algunes àrees de les Terres de Ponent. A les àrees litorals i prelitorals, i especialment al Pirineu Oriental, que estan més ben correlacionades amb la WeMO, hi succeeix un fenomen invers: un lleuger increment. Aquest fenomen es pot relacionar amb un augment de la precipitació de tipus intensa per una freqüència més alta de fluxos del nord-est. Aquesta circulació de vents està vinculada a la presència d'altes pressions a l'Europa central, que afavoreixen la formació de fronts de retrocés sobre la façana est de la península Ibèrica. L'evident reforçament de l'anticicló centreeuropeu afavoreix una tendència positiva de l'AO i de la NAO, però simultàniament una de negativa de la WeMO.

L'estiu és l'estació de l'any en què aquests patrons de teleconnexió no poden explicar la variabilitat pluviomètrica. La precipitació estival és predominantment convectiva i no depèn de situacions sinòptiques advectives relacionades amb certs valors dels índexs de teleconnexió. A l'estiu es detecten les reduccions de precipitació més clares a Catalunya, sobretot a la meitat occidental del país, coincident amb la reducció força generalitzada a la conca de la Mediterrània.

Els índexs no presenten tendències destacades a la tardor. En coherència amb això, les precipitacions en aquesta estació no estan variant. Com és sabut, és el període de l'any amb una freqüència més elevada d'episodis torrencials, sobretot a la primera quinzena d'octubre, tal com assenyala el calendari anual de la WeMO. El notable escalfament que s'està detectant en les aigües marines al mes de novembre podria allargar el període de pluges torrencials fins a la tardor tardana.

La primavera està sota un domini total de la NAO. Aquest patró no mostra tendències destacades i, en conseqüència, la precipitació primaveral no ha variat en conjunt apreciablement. No obstant això, en una anàlisi per mesos, es detecta que el mes de març està patint una marcada reducció de les precipitacions a les capçaleres dels rius. Es tracta d'un risc climàtic evident per a la població amb vista a les reserves d'aigua per a l'estació seca. La davallada més forta es detecta al Pirineu Occidental. La NAO té un marcat ascens en aquest mes, que es podria relacionar amb certs canvis que estan tenint lloc en la dinàmica atmosfèrica de l'estratosfera polar per un enfortiment progressiu del vòrtex polar primaveral.

Quant a la variabilitat i la irregularitat temporal per estacions, sembla que a l'hivern o la tardor la irregularitat pluviomètrica pot estar augmentant per una mediterraneïtzació de la precipitació en algunes àrees litorals i prelitorals de les Terres de l'Ebre i del Pirineu Oriental, per un progressiu predomini de la WeMO sobre els altres índexs (López Bustins, 2007; González-Hidalgo *et al*., en premsa).

Taula 6. Tendències de la precipitació (López Bustins, 2007).

Punt d'observació	Comarca	Tendència precipitació 1951-2000 (mm/dècada)	Coeficient de variació 1951-1975	Coeficient de variació 1976-2000	Índex d'irregularitat temporal 1951-1975	Índex d'irregularitat temporal 1976-2000
Llívia	la Cerdanya	7,0	baix	moderat	molt baix	moderat
Campdevànol	el Ripollès	-27,0	moderat	moderat	moderat	moderat
Cadaqués	l'Alt Empordà	-11,6	molt alt	alt	molt alt	moderat
Figueres	l'Alt Empordà	27,2	molt alt	moderat alt	molt alt	moderat alt
Palafrugell	el Baix Empordà	-19,6	molt alt	moderat	molt alt	baix
Girona	el Gironès	-9,8	moderat alt	moderat alt	alt	moderat
Breda	la Selva	-19,3	moderat alt	moderat alt	moderat alt	moderat alt
Tossa de Mar	la Selva	-4,6	alt	moderat alt	alt	moderat alt
Argentona	el Maresme	-23,6	alt	moderat alt	alt	moderat alt
Caldes de Montbui	el Vallès Oriental	-10,8	moderat alt	moderat	moderat	moderat
Llinars del Vallès	el Vallès Oriental	-18,7	moderat alt	moderat alt	alt	moderat alt
Torrellebreta	Osona	-19,3	moderat	moderat alt	moderat alt	moderat
Torelló	Osona	-42,7 (sig.)	moderat	moderat	moderat alt	baix
Puig-reig	el Berguedà	29,1	moderat alt	molt alt	moderat	alt
la Pobla de Lillet	el Berguedà	23,4	moderat alt	moderat	moderat alt	moderat alt
Callús	el Bages	2,4	moderat alt	moderat alt	moderat alt	moderat alt
Moià	el Bages	-17,3	moderat alt	alt	alt	moderat
Sabadell	el Vallès Occidental	-20,8	moderat alt	moderat	moderat alt	moderat
Barcelona (obs. Fabra)	el Barcelonès	1,8	moderat alt	moderat	moderat	moderat
el Prat de Ll. (aeroport)	el Baix Llobregat	-35,3	molt alt	moderat alt	molt alt	moderat
el Bruc	l'Anoia	1,3	moderat	moderat	moderat alt	moderat
Vilafranca del Penedès	l'Alt Penedès	-1,0	moderat	moderat	moderat	baix
Cubelles	el Garraf	-14,0	moderat	moderat	alt	moderat
els Omellons	les Garrigues	-4,1	moderat	moderat	moderat	moderat alt
la Granadella	les Garrigues	-10,2	moderat alt	moderat	moderat	moderat
Raïmat	el Segrià	-21,1	moderat alt	moderat	moderat alt	moderat
Lleida	el Segrià	-10,1	moderat	moderat alt	moderat	alt
Agramunt	l'Urgell	-8,7	moderat	moderat alt	moderat alt	moderat alt
Torà	la Segarra	-3,9	moderat alt	moderat alt	moderat	moderat alt
Ponts	la Noguera	-17,2	molt alt	moderat alt	alt	moderat alt
Tentellatge	el Solsonès	-34,1	moderat	moderat alt	moderat	alt
Solsona	el Solsonès	-30,1	moderat	moderat alt	baix	moderat alt
Organyà	l'Alt Urgell	-7,0	moderat	moderat alt	baix	moderat alt
la Seu d'Urgell	l'Alt Urgell	-37,6	alt	moderat alt	moderat	alt
Sort	el Pallars Sobirà	-32,8	moderat	moderat	baix	moderat
Molinos	el Pallars Jussà	-39,5	baix	baix	baix	moderat
Talarn	el Pallars Jussà	-32,8	moderat	baix	moderat	baix
Vilaller	l'Alta Ribagorça	-51,4 (sig.)	baix	moderat	molt baix	baix
Vielha	la Val d'Aran	0,3	molt baix	moderat alt	molt baix	molt baix
el Vendrell	el Baix Penedès	3,9	moderat	moderat alt	moderat	moderat alt
Vila-seca	el Tarragonès	-25,7	moderat alt	moderat	alt	moderat
Riudecanyes	el Baix Camp	-2,9	alt	moderat alt	molt alt	alt
Valls	l'Alt Camp	-1,9	moderat alt	moderat	moderat alt	baix
Rocafort de Queralt	la Conca de Barberà	1,3	moderat	moderat	moderat	moderat
Cabacès	el Priorat	1,1	moderat alt	moderat alt	baix	moderat alt
Flix	la Ribera d'Ebre	-8,4	alt	moderat alt	moderat alt	alt
Miravet	la Ribera d'Ebre	-3,5	molt alt	alt	alt	molt alt
Vilalba dels Arcs	la Terra Alta	-13,6	moderat alt	moderat alt	moderat alt	moderat alt
Roquetes (obs. Ebre)	el Baix Ebre	-28,3	alt	moderat alt	molt alt	moderat
Amposta	el Montsià	-2,4	molt alt	moderat	molt alt	moderat alt

	molt baix	baix	moderat	moderat alt	alt	molt alt
Coeficient de variació (%)	<15	15-19	20-24	25-29	30-34	>35
índex d'irregularitat temporal	<0,20	0,20-0,24	0,25-0,29	0,30-0,34	0,35-0,39	>0,40

Conclusions

L'anàlisi de la sèrie de precipitació anual de Barcelona des del 1786 no presenta cap tendència significativa, ni tampoc l'anàlisi de la precipitació màxima diària anual des del 1854. Si es treballa a escala estacional s'hi detecta una tendència positiva significativa a l'estiu, fet que també ocorre, per exemple, a València (Altava-Ortiz *et al.*, en rev.). La sèrie de nombre de dies de precipitació entre 0,1 mm i 10 mm presenta una tendència positiva, però que es podria vincular a canvis en la detecció de valors molt petits, ja que no té impacte en les sèries de pluja acumulada mensual.

Si ens referim a l'evolució de la pluja mensual areal de les conques internes de Catalunya i de la conca de l'Ebre, es conclou que no hi ha cap tendència significativa per al període 1897-1998, resultat que canvia si es considera partit el període entre abans i després del 1940. En tal cas la precipitació té una tendència positiva significativa per a la primera part (1897-1940), però malgrat que es troba una tendència negativa per a la segona part, no és significativa. És important afegir que aquesta tendència negativa seria conseqüència, sobretot, del dèficit enregistrat a la primavera.

Quan ens centrem en el període 1951-2000 per a 50 estacions repartides per tot Catalunya, s'observa un predomini de les tendències negatives, però que tan sols és significatiu en el cas de Torelló i Vilaller. Aquesta tendència seria més marcada per a les comarques pirinenques i prepirinenques. Aquest predomini es pot justificar amb variacions detectades en diferents índexs climàtics.

En síntesi, encara no es detecta cap senyal que mostri una tendència significativa a una disminució de la precipitació generalitzada en el conjunt de Catalunya. Tanmateix, s'apunta un possible augment de la precipitació a l'estiu a la costa i una disminució de la precipitació a la primavera. Aquest descens podria ser més marcat a les capçaleres dels rius.

Referències bibliogràfiques

Altava-Ortiz, V.; Llasat, M. C.; Ferrari, E; Atencia, E. (en rev.). «Monthly rainfall behaviour in Central and Western Mediterranean Basin, from 1850 to 2004». *International Journal of Climatology*.

Barrera Escoda, A. (2004). *Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España.* Treball per a l'obtenció del Diploma d'Estudis Avançats (DEA). Programa de doctorat d'Astronomia i Meteorologia (bienni 2002–2004). DAM/250999-15/0406. Publicació interna. 96 pàg. (http://am.ub.es/~tbarrera/Publicaciones/barrera-dea.pdf)

Barrera, A.; Llasat, M. C.; Barriendos, M. (2006). «Estimation of the extreme flash flood evolution in Barcelona country from 1351 to 2005». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, núm. 6, pàg. 505-518. Ed. Copernicus GmbH , European Geosciences Union. Katlenburg-Lindau (Alemanya). ISSN: 1561-8633. (http://www.copernicus.org/EGU/nhess/6/nhess-6-505.pdf)

Barrera, A.; Llasat, M. C.; Bladé, I.; Álvarez, J. (en prep.). *Regional precipitation in Spain and NAO influence during the period 1897-1998.*

Barriendos, M. (1994). *El clima histórico de Catalunya. Aproximación a sus características generales (ss. XV–XIX).* Tesi doctoral. Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, Universitat de Barcelona. No publicada.

González-Hidalgo, J. C.; López Bustins, J. A.; Štìpánek, P.; Martín Vide, J.; De Luis, M. (en premsa). «Monthly precipitation trends on the Mediterranean façade of the Iberian Peninsula during the second half of the 20th century (1951-2000)». *International Journal of Climatology*.

Llasat, M. C.; Quintas, XXX. (2004). *Stationarity of Monthly Rainfall Series since the Middle of the XIXth Century. Application to the Case of Penin sular Spain.* Natural Hazards. Nº 31. pp. 613-622.

López Bustins, J. A.(2007). L'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental i la Precipitació als Països Catalans / The Western Mediterranean Oscillation and Rainfall in the Catalan Countries. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona.

Martín Vide, J.; López Bustins, J. A. (2006). «The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian peninsula». *International Journal of Climatology*, núm. 26, pàg. 1455–1475.

Martín Vide, J.; Prohom, M.; Bohigas, M.; Peña, J. C.; Esteban, P.; Montserrat, D. (2001). «Índices de irregularidad temporal y dimensión fractal de la precipitación anual en España». A: Pérez-Cueva, López Baeza, Tamayo (eds.). *El Tiempo del Clima*. Buñol, AEC i Garmas Impresores. Pàg. 157-166.

MMA (Ministerio de Medio Ambiente) (1998). *Libro Blanco del Agua en España.* Madrid. 855 pàg.

Rodríguez, R.; Llasat, M. C.; Wheeler, D. (1999). «Analysis of the Barcelona precipitation series». *International Journal of Climatology*, núm. 19, pàg. 787-801. Ed. Wiley & Sons. Chichester (Sussex, Regne Unit). ISSN: 0899-8418.

Štìpánek, P. (2003). *AnClim. Software for time series analysis.* Departament de Geografia, Facultat de Ciències Naturals, Universitat de Masaryk. Brno (República Txeca). 1.47 MB.
(http://www.sci.muni.cz/~pest/)

2. Constatacions biològiques del canvi climàtic a Catalunya

Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Marc Estiarte, Romà Ogaya, Joan Llusià, Jordi Sardans, Alistair Jump, Martín Garbulsky, Marta Coll, Maria Díaz de Quijano, Roger Seco, Josep Salvador Blanch, Sue Owen, Jorge Curiel, Jofre Carnicer, Martí Boada, Constantí Stefanescu, Francisco Lloret, Jaume Terradas.
Universitat Autònoma de Barcelona

Canvis en els cicles vitals i conseqüències en les comunitats i els ecosistemes catalans

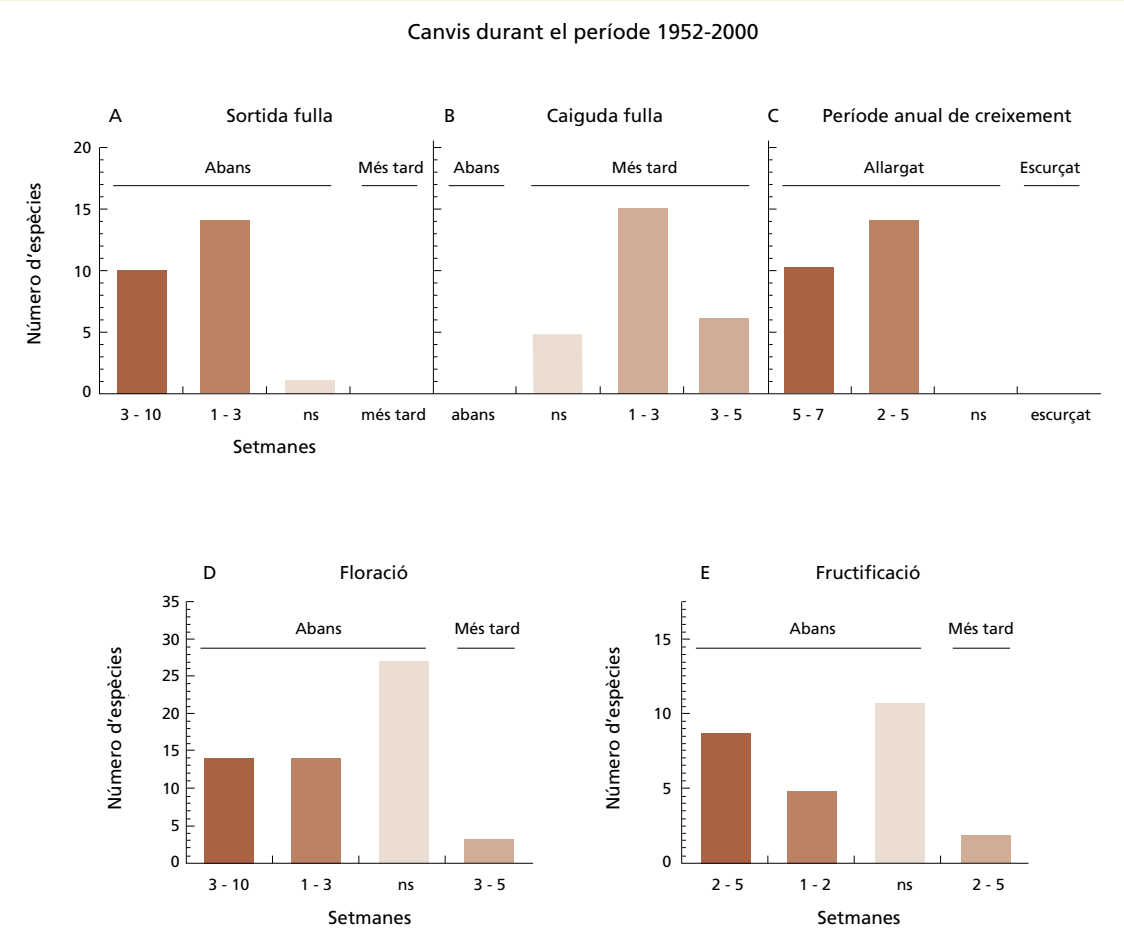
La nostra activitat i l'activitat de tots els organismes vius està fortament influïda per la temperatura. No podem esperar altra cosa que alteracions d'aquesta activitat en escalfar-se el país per sobre d'1 ºC. No ens ha d'estranyar, així doncs, que l'escalfament s'hagi traduït ja en canvis significatius en els cicles vitals de plantes i animals. Recordem que el pas per les diferents fases d'aquests cicles depèn, entre d'altres factors, de la temperatura acumulada, del que els biòlegs anomenem graus dia, és a dir, del total d'energia requerida per un organisme per a desenvolupar-se i passar d'un estadi a l'altre del seu cicle vital. Les evidències d'aquestes alteracions en els cicles vitals són fàcilment observables per tots els que segueixin la natura i tinguin uns quants anys, i de fet ja s'han descrit a diverses regions de tot el món, des dels ecosistemes freds i humits fins als càlids i secs, tot observant els registres fenològics disponibles. Aquests canvis fenològics (fenologia és la ciència que estudia la temporalitat de les diferents fases dels cicles vitals dels organismes) s'han convertit en el símptoma més clar que el canvi climàtic ja afecta la vida.

El nostre país és un dels llocs on els canvis fenològics observats són més importants. Però d'observacions com les que s'han trobat aquí també n'hi ha, amb resultats comparables, arreu del món, tot i que predominin als països rics, amb un nombre més gran d'investigadors i més tradició científica. Aquí, a Catalunya, les fulles dels arbres surten ara de mitjana uns 20 dies abans que no pas fa una cinquantena d'anys. Per exemple, la pomera, l'om o la figuera sembla que treuen les fulles amb un mes d'antelació, i l'ametller i el pollancre, uns 15 dies abans, encara que n'hi ha d'altres, com el castanyer, que semblen immutables al canvi de temperatura (segurament són més dependents d'altres factors com ara el fotoperíode o la disponibilitat hídrica). D'altra banda, les plantes també floreixen i fructifiquen de mitjana 10 dies abans que fa 30 anys (figura 1). I els cicles vitals dels animals també són alterats. Per exemple, l'aparició d'insectes com les papallones, que passen pels diferents estadis larvaris més ràpidament en resposta a l'escalfament, s'ha avançat per terme mitjà 11 dies. Els amants de les papallones ho hauran notat. Apareixen abans, són més actives i allarguen el seu període de vol. Tota aquesta activitat prematura de plantes i animals pot posar-los en perill per les gelades tardanes. Però la freqüència d'aquestes gelades també ha canviat; ha disminuït en aquest ambient cada cop més calent. A molts indrets el nombre de gelades anuals ha disminuït a un terç des de fa 50 anys fins ara, i per tant també ha disminuït el risc de malmetre fulles i flors joves. Respostes similars en l'avançament de les fenofases de plantes i animals (invertebrats, amfibis, ocells...), d'uns 3-4 dies per dècada a la primavera, han estat descrites darrerament a molts altres indrets del planeta, de manera que aquest sembla que és un fenomen general, amb la variabilitat regional, local i específica pròpia de tot fenomen biològic.

Tots aquests canvis fenològics no són simples indicadors del canvi climàtic. Tenen una importància ecològica crítica, ja que afecten l'habilitat competitiva de les diferents espècies, la seva conservació i, per tant, l'estructura i el funcionament dels ecosistemes. Com que la natura no és homogènia, les respostes a l'escalfament són diferents depenent de l'espècie (i àdhuc dels individus). Aquestes respostes diferents al canvi climàtic poden

produir importants dessincronitzacions en les interaccions entre les espècies, per exemple entre les plantes i els seus pol·linitzadors, o entre les plantes i els seus herbívors, i alterar així l'estructura de les comunitats. Un exemple paradigmàtic de les dessincronitzacions entre nivells tròfics el tenim en el que passa en els ocells migratoris. El canvi climàtic sembla que també ha alterat els seus hàbits. Atès l'avançament en la floració i la fructificació de les plantes i en l'aparició dels insectes, i, per tant, l'avançament en la disponibilitat de menjar per als ocells, es podria esperar una arribada més primerenca dels ocells migratoris. I, malgrat tot, l'arribada d'alguns ocells tan comuns i populars com el rossinyol, l'oreneta, el cucut o la guatlla sembla que s'està retardant, almenys en algunes localitats de Catalunya, de mitjana dues setmanes respecte a fa trenta anys. El retard segurament és determinat pel canvi climàtic al lloc des d'on parteixen, les regions subsaharianes, o a les regions que travessen en la seva ruta migratòria. Així, la sequera i la desforestació del Sahel, i la conseqüent manca d'aliment, poden dificultar la preparació del seu viatge i afavorir aquesta arribada més tardana. Tots aquests canvis poden representar una amenaça per a alguns ocells migratoris que arriben en un moment inapropiat per explotar l'hàbitat, ja que han de competir amb les espècies que s'han quedat durant l'hivern i es troben en un estat competitiu millor. De fet, el declivi en el nombre d'aquests ocells migratoris que arriben a Europa en els darrers anys en pot ser una conseqüència. D'altra banda, hi ha espècies abans migratòries que aprofiten que el nostre hivern és cada vegada més suau i ja no se'n van de la península. Aquest és el cas de la puput o de les cigonyes.

Figura 1. Freqüència d'espècies vegetals amb fenologia alterada durant les darreres cinc dècades (des del 1952 fins al 2000) a Cardedeu (Vallès Oriental). (ns: no significant estadísticament) (Peñuelas *et al.*, 2002).



Quan ens mirem els canvis fenològics a escala global ens trobem amb alteracions tan importants com ara l'augment del 20% de l'activitat biològica del nostre planeta en els últims 30 anys per causa en gran part d'aquest allargament fenològic del període productiu. Ho apreciem tant en les imatges dels satèl·lits d'observació de la Terra, com en les dades de concentració atmosfèrica de CO_2. Per al seguiment de les masses vegetals des de l'espai s'empra un índex de vegetació normalitzat, l'NDVI. Aquest índex es basa en el quocient entre la radiació infraroja i la roja que la superfície terrestre reflecteix cap a l'espai. Com més gran és aquest quocient, més gran és la biomassa verda. Doncs bé, aquest NDVI corrobora les dades fenològiques dels observadors terrestres i mostra com en els darrers 20 anys l'estació de creixement dels vegetals s'ha allargat 18 dies a Euràsia i això s'ha traduït en un augment de la biomassa verda, com a mínim a latituds superiors a 40º. L'increment de la productivitat vegetal de les darreres dècades, que havíem atribuït a l'efecte fertilitzador del CO_2 i de les deposicions de nitrogen, pot ser degut també en part a aquest augment de temperatura i a aquest allargament de l'estació de creixement (activitat vegetativa).

Tot això també és corroborat per les dades de concentració atmosfèrica de CO_2, que ens mostren un augment de l'amplitud i un avançament de l'oscil·lació estacional de CO_2 en les últimes dècades a causa de la disminució primaveral més forta de la concentració de CO_2. Aquest allargament de l'estació de creixement té un paper molt important en la fixació global del carboni, la quantitat de CO_2 de l'atmosfera, i en els cicles de l'aigua i del nutrients i, per tant, té conseqüències molt importants en el funcionament dels ecosistemes i en el balanç de carboni, ara tan important a la llum dels protocols de Kyoto.

Altres canvis en els nostres ecosistemes en resposta al canvi climàtic

Els ecosistemes terrestres catalans presenten una gran variabilitat climàtica, una complexitat topogràfica important, uns gradients molt marcats en els usos del sòl i en la disponibilitat d'aigua, i una gran biodiversitat. Segurament per tot això són especialment sensibles als canvis atmosfèrics i climàtics, i als canvis en usos del sòl, demogràfics i econòmics.

El canvi climàtic augmenta l'estrès hídric de la nostra vegetació, la qual sovint ja viu al límit de les seves possibilitats, com en el cas d'alguns alzinars i pinedes que tenen taxes d'evapotranspiració quasi iguals que les de precipitació (90% al bosc de Poblet per exemple). A més a més d'accentuar la poca disponibilitat d'aigua, l'escalfament accentua altres trets característics dels nostres ecosistemes, com ara els incendis forestals o l'emissió de compostos orgànics volàtils.

Més sequeres severes

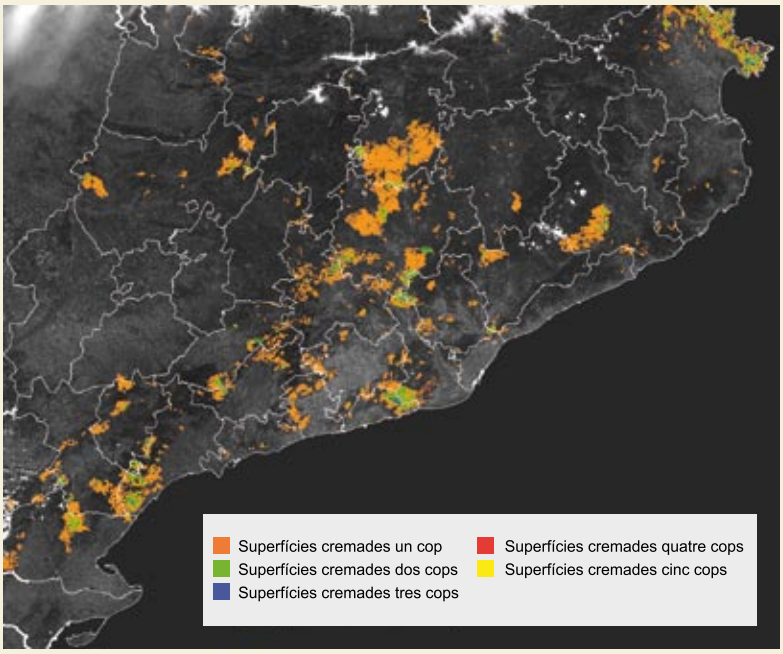
Els models GCM preveuen per al nostre país un augment de la freqüència i la intensitat dels períodes de sequera. Dels efectes de períodes càlids i/o secs en tenim exemples recents en els episodis calorosos i secs de 1986, 1994, 2003 i 2005. Cada un d'aquests episodis va afectar profundament la vegetació mediterrània. Per exemple, el que hem estudiat més a bastament, el del 1994, va danyar severament molts boscos i matollars de la península Ibèrica (en el 80% de les 190 localitats peninsulars estudiades hi havia espècies danyades). Les alzines, per exemple, es van assecar en moltes localitats de Catalunya. Estudis isotòpics amb C^{13} i N^{15} van mostrar que durant els anys posteriors aquests alzinars van romandre afectats, de manera que van fer un ús més restringit de l'aigua que tenien disponible, i es va afavorir la pèrdua dels nutrients del sòl, una conseqüència secundària greu, tenint en compte que aquests ecosistemes solen ser limitats pels nutrients (principalment fòsfor als sòls calcaris i nitrogen als silícics). La diferent severitat dels efectes sobre els diferents boscos del país va venir donada entre d'altres factors per: 1) l'orientació dels vessants (més afectació als solells); 2) la litologia del sòl (menys afectació als sòls profunds i penetrables per les arrels, com per exemple els esquists): 3) l'espècie dominant (més afectació d'alzines que de falsos aladerns, que creixen menys però són més resistents a l'embolisme, són més eficients en l'ús de l'aigua i dissipen millor l'excés d'energia), i 4) la gestió forestal (boscos aclarits menys afectats que els densos).

El grau d'afectació fou diferent també depenent del tipus funcional i de la història evolutiva de les distintes espècies. Els gèneres mediterranis, *Lavandula*, *Erica*, *Genista*, *Cistus* i *Rosmarinus,* en la seva majoria arbustius i evolucionats sota les condicions climàtiques mediterrànies, és a dir, posteriorment als 3,2 milions d'anys del Pliocè, foren aparentment més afectats per la sequera que els gèneres evolucionats amb anterioritat, *Pistacia*, *Olea*, *Juniperus*, *Pinus* i *Quercus,* majoritàriament arbres. Tot i així, els gèneres mediterranis es recuperaren molt millor després d'uns anys de més disponibilitat hídrica. Els gèneres mediterranis post-Pliocè semblen més adaptats per a respondre a un ambient no fàcilment predictible amb una gran variabilitat estacional i interanual i subjecte a pertorbacions freqüents. Entendre aquestes respostes és important per a preveure la futura composició de les comunitats i seguir el canvi climàtic.

Més incendis

Aquestes condicions més càlides i més àrides, juntament amb altres fenòmens relacionats amb el canvi global com per exemple l'increment de biomassa i d'inflamabilitat associat a l'augment de CO_2, els canvis en els usos del sòl, com ara l'abandonament de terres de cultiu seguit d'un procés de forestació i acumulació de combustible, i/o les pràctiques i activitats del creixent nombre d'«urbanites» no avesats al bosc, augmenten la freqüència i la intensitat dels incendis forestals. Els boscos i matollars mediterranis, caracteritzats per un fort eixut estival, són ecosistemes propensos als incendis. Ara bé, per tal que es produeixin els incendis, hi ha d'haver un punt d'ignició. Actualment a Catalunya només el 7% dels incendis tenen un origen natural i la immensa majoria de les ignicions són provocades per les activitats humanes, sigui per negligència, accident o intencionadament. Els incendis, que han augmentat al llarg del segle XX, ara ja constitueixen una de les pertorbacions més importants en els ecosistemes mediterranis.

Figura 2. Recurrència dels incendis forestals (>30 ha) a Catalunya entre el 1975 i el 1995 (Díaz-Delgado *et al.,* 2002).



Més emissió de compostos orgànics volàtils

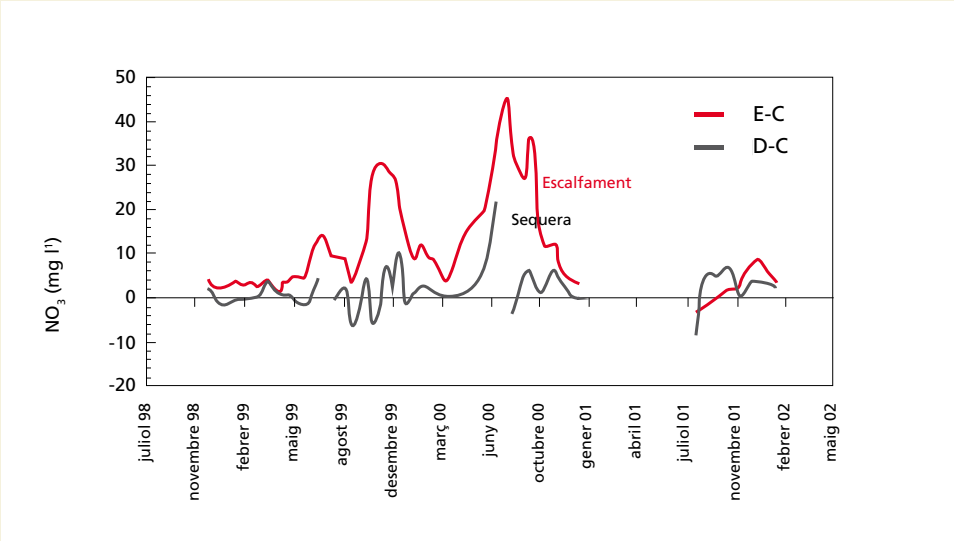
L'augment de temperatura té molts altres efectes directes sobre l'activitat dels organismes vius. Un d'important ambientalment és l'augment exponencial de l'emissió biogènica de compostos orgànics volàtils (COV). Aquestes emissions biogèniques de COV afecten la química atmosfèrica, no solament pel que fa al cicle del carboni (emissions d'unes 1.500 Tg C/any) o la formació d'aerosols, sinó pel seu paper en l'equilibri oxidatiu de l'aire (nivells de OH, NOx, O_3…). Les emissions resulten de la difusió dels COV en un gradient de pressió de vapor des de les altes concentracions als teixits on es produeixen fins a l'aire circumdant, on les concentracions són baixes com a conseqüència de l'extrema reactivitat dels COV. Per tant, les emissions són controlades pels factors que alteren la concentració tissular, la pressió de vapor o la resistència a la difusió cap a l'atmosfera. La temperatura incrementa exponencialment l'emissió d'aquests COV en activar la seva síntesi enzimàtica i la seva pressió de vapor i en disminuir la resistència a l'emissió. D'altra banda, la sequera extrema redueix les emissions com a conseqüència de la manca de carbohidrats i ATP, i de la disminució de la permeabilitat de la cutícula en l'intercanvi gasós. Per tant, caldrà veure quin és el resultat final d'aquest antagonisme entre escalfament i sequera en quelcom tan important ambientalment com és l'emissió biogènica de COV. De moment, però, tot indica que les emissions han augmentat amb l'escalfament.

Lligada amb el canvi climàtic, una de les funcions més importants que sembla que tenen alguns d'aquests COV, com ara els terpens, en la fisiologia vegetal, és la d'actuar com a elements termoprotectors. *Quercus ilex* empraria aquests compostos com a estabilitzadors de les membranes cel·lulars i, més concretament, de les membranes íntimament relacionades amb els fotosistemes, i també com a desactivadors dels radicals oxidats per a protegir-se de les altes temperatures de l'estiu. Però a més a més de «refrigerar» la planta, aquestes emissions de COV podrien retroalimentar negativament l'escalfament del mateix clima atmosfèric, en actuar com aerosols que disminueixen la irradiància. Caldrà estudiar-ho, perquè també podrien retroalimentar positivament l'escalfament a través del seu efecte d'hivernacle directe, en absorbir la radiació infraroja, i indirecte, en allargar la vida mitjana del metà i altres gasos hivernacle. Estem davant d'un exemple més de l'important paper que tenen els ecosistemes sobre el mateix clima i el possible canvi climàtic, a part del més conegut i important efecte sobre el balanç del CO_2 a l'atmosfera.

Més nitrats a l'aigua

Recordem que els processos biogeoquímics depenen de la temperatura i que entre ells podem citar-ne un altre que ara preocupa com a component important del canvi global arreu del món i a moltes comarques catalanes en particular: la progressiva eutrofització, és a dir, l'enriquiment en nutrients, sobretot nitrats, que té lloc en el nostre país, en especial a les aigües subterrànies. Aquí va lligada en molts casos a l'excés de purins, però l'augment de temperatura, o les sequeres, no són del tot alienes a aquest fenomen. L'escalfament augmenta la mineralització, i la sequera impedeix l'ús de nutrients per part de les plantes i facilita les pèrdues del sistema quan arriben les pluges. De fet, els resultats d'estudis experimentals en matollars mostren com l'escalfament augmenta l'alliberament de nitrats en els lixiviats dels sòls rics en nitrats (figura 3). Un altre exemple d'alteració biogeoquímica el tenim en l'estimulació de la descomposició per l'escalfament. La manca d'aigua, en canvi, l'alenteix. Convindrà de nou estudiar el balanç de la interacció d'aquests dos factors sobre el cicle de la matèria i el funcionament dels nostres ecosistemes mediterranis.

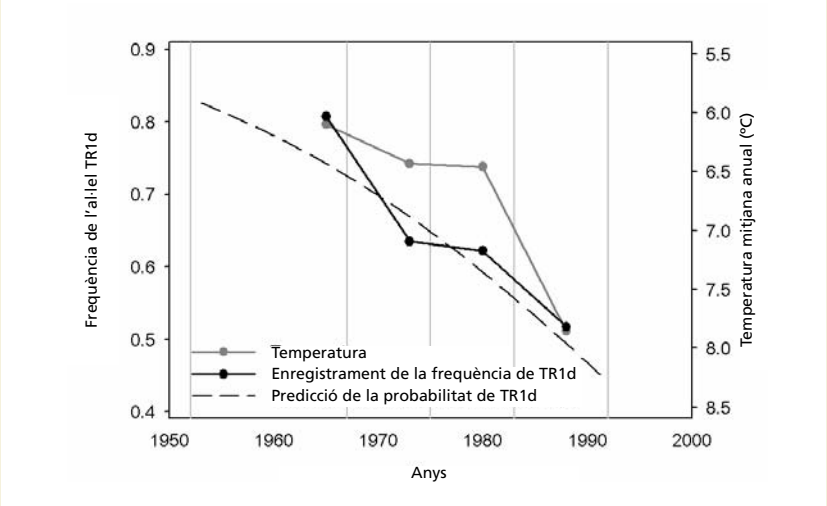
Figura 3. Exemple de canvi funcional ecosistèmic produït pel canvi climàtic en un matollar de bruguerola ric en nitrats: Alliberament de nitrats a l'aigua del sòl (mg L^{-1}) en resposta a un escalfament de prop d'1 °C i a una disminució del 33% de la humitat del sòl. Es representa la diferència respecte a parcel·les control. (E-C: diferència entre escalfament i control, en roig; D-C: diferència entre sequera i control, en negre) (basat en Emmet *et al.*, 2004).



Adaptabilitat de les espècies i les poblacions als canvis

Fins a quin punt les plantes i els animals s'han adaptat a aquests canvis climàtics tan ràpids? Doncs sembla que ho han intentat amb canvis fenotípics, com ara els suara esmentats canvis fenològics, i també amb canvis genotípics en la seva descendència, és a dir, que sembla que la pressió selectiva ha fet efecte. Fins i tot plantes de vida llarga com el faig han mostrat una certa capacitat de canviar la freqüència gènica en resposta a l'escalfament de les darreres dècades (figura 4). Així ho hem comprovat al Montseny. I ho hem comprovat, també, amb més intensitat, en plantes de vida més curta com la *Fumana thymifolia* a les brolles del Garraf.

Figura 4. La freqüència de l'al·lel TR1d als faigs del Montseny ha disminuït amb el temps en paral·lel amb l'augment de temperatura (Jump *et al.,* 2006).



Però tot i així, els canvis genètics no sembla que vagin a prou velocitat per a poder adaptar les plantes al ràpid canvi climàtic de les darreres dècades. Per això, el mateix faig de les zones baixes del Montseny creix cada vegada menys. Segurament per això, els boscos catalans mostren una progressiva defoliació i decoloració en els darrers anys. Per això, l'exclusió parcial de l'aigua de pluja i de l'escorriment superficial, que generen una disminució del 15% de la humitat del sòl en un experiment dels 10 darrers anys als boscos de Prades, ha reduït el creixement diametral dels troncs el 37%, encara que no totes les espècies han resultat afectades de la mateixa manera. Algunes resulten força sensibles, com *Arbutus unedo* i *Quercus ilex*, que mostren, respectivament, un creixement diametral més baix en una proporció del 77% i del 55% en condicions de sequera, mentre que d'altres, com *Phillyrea latifolia,* no experimenten cap disminució apreciable en el creixement diametral (figura 5). La mortalitat dels individus mostra un patró semblant, ja que *Arbutus unedo* i *Quercus ilex* mostren una mortalitat més elevada que *Phillyrea latifolia*. L'experiment mostra, doncs, que lleugeres aridificacions com les que s'han viscut fins ara i com les s'han projectat per a un futur immediat, minven significativament les seves taxes de creixement i per tant la capacitat per a segrestar carboni atmosfèric d'algunes espècies. A més a més, com que no totes les espècies vegetals en resulten igualment afectades, a llarg termini hi pot haver un canvi en la composició específica del bosc. De fet, en un altre experiment també dut a terme durant els darrers 10 anys a les brolles del Garraf, s'ha vist que la sequera i l'escalfament fan disminuir el nombre de plàntules i la seva riquesa d'espècies, no tan sols de plantes (figura 6) i d'animals, sinó segurament també de bacteris i fongs (dades preliminars).

Des d'un punt de vista evolutiu, les espècies tendeixen a ser bastant conservadores i a respondre a les pertorbacions més amb la migració que amb l'evolució. A les muntanyes, les espècies poden respondre al canvi climàtic migrant verticalment distàncies curtes (per exemple, són necessaris 500 m per a contrarestar un augment de 3°C). A Catalunya, i en general a tot el planeta, ja s'han apreciat mitjançant estudis paleoecològics nombrosos desplaçaments de les àrees de distribució d'algunes espècies i formacions vegetals en resposta a canvis climàtics pretèrits. Però encara no hi ha pas gaires evidències de la resposta a l'escalfament actual. Cal recordar que aquests

processos requereixen un temps. De totes maneres, recentment, s'ha comparat la distribució de la vegetació actual del Montseny amb la de principis i de meitat del segle XX, i s'ha pogut apreciar que els ecosistemes mediterranis guanyen terreny als temperats. Les condicions progressivament més càlides i àrides, però també els canvis d'usos del sòl, principalment l'abandonament de la gestió tradicional, com ara la desaparició gairebé total dels incendis associats a la ramaderia (ara són prohibits al parc del Montseny), són a la base d'aquests canvis, en un exemple paradigmàtic de com interactuen els diferents components del canvi global.

Figura 5. Diferent resposta a la sequera (disminució del 15% de la humitat del sòl) en les tres espècies dominants de l'alzinar de Prades (basat en l'estudi d'Ogaya i Peñuelas, 2007).

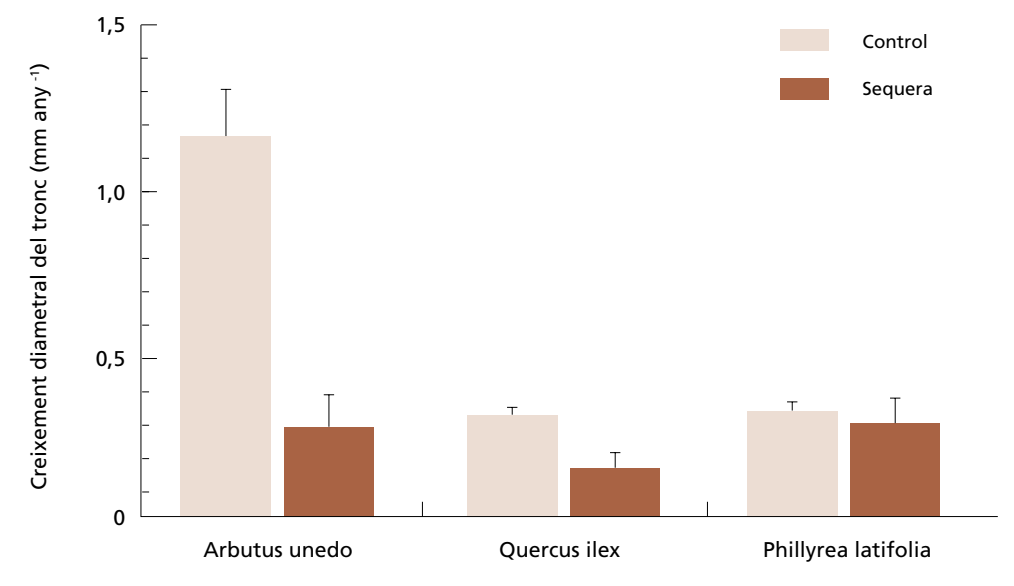
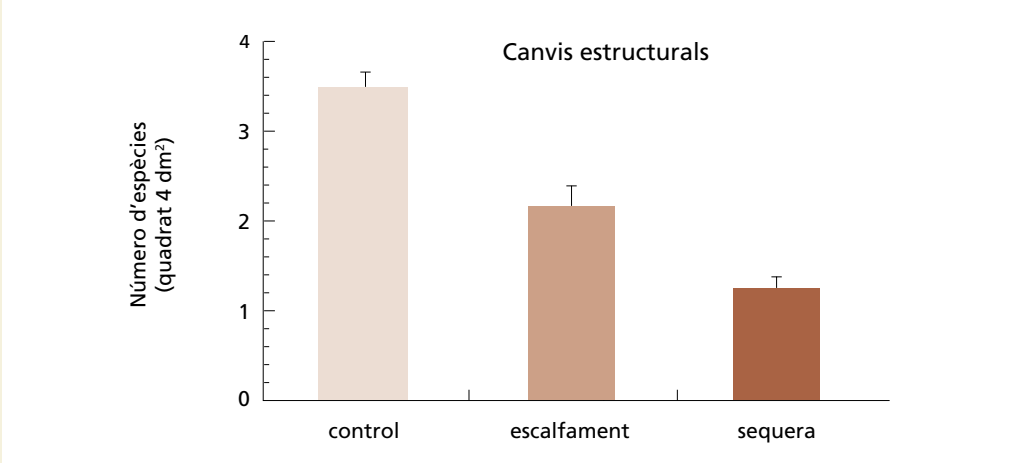
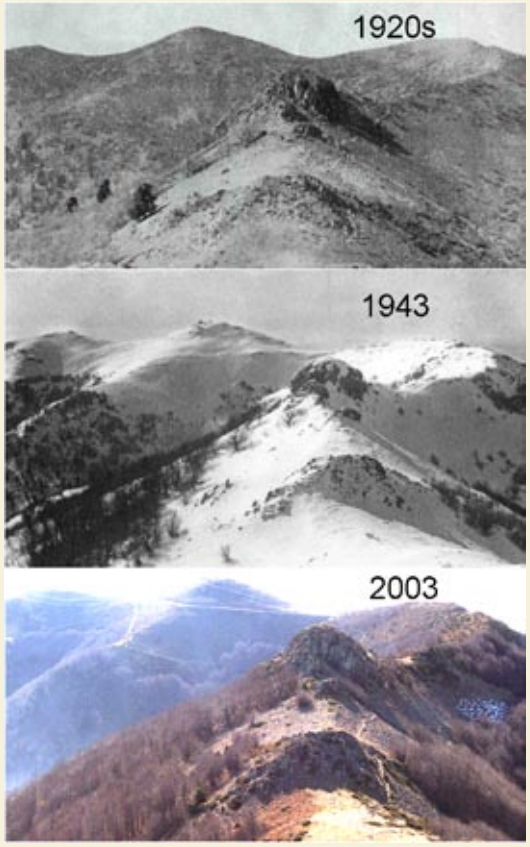


Figura 6. Exemple de canvis ecosistèmics estructurals produïts pel canvi climàtic. Disminució de la riquesa d'espècies reclutades en parcel·les de brolles mediterrànies del Garraf sotmeses a 1 °C d'escalfament o a una disminució de la humitat del sòl del 20% (basat en l'estudi de Lloret *et al.*, 2004).



Els estudis paleoecològics suggereixen que moltes espècies vegetals poden migrar amb la rapidesa suficient per a adaptar-se al canvi climàtic, però solament si existeixen ecosistemes contigus no pertorbats, la qual cosa ens recorda la importància de la fragmentació dels ecosistemes naturals com un altre factor del canvi global. I la fragmentació és elevada a moltes contrades del nostre país. Només cal observar una fotografia aèria de les comarques de Barcelona. Pel que fa a les muntanyes, la migració cap a altituds superiors comporta una reducció concomitant en l'àrea total de cada hàbitat, per la qual cosa les espècies amb un requeriment d'àrea més elevat es poden extingir.

Figura 7. Desplaçament altitudinal de la fageda del Montseny a la carena Turó de l'Home-Les Agudes durant el darrer segle. La fageda ha esdevingut més densa a les parts altes i s'ha desplaçat per sobre la línia d'arbres amb l'establiment de nous i vigorosos individus (Peñuelas i Boada, 2003; Peñuelas *et al.,* 2007).



Aquests efectes de l'escalfament no ens han d'estranyar, perquè és ben conegut que els règims climàtics determinen la distribució de les espècies i dels biomes a través dels llindars específics de cada espècie pel que fa a la temperatura i la disponibilitat d'aigua. I tot això no només fa referència a les plantes: els animals no hi són pas menys sensibles. Al contrari, responen més ràpidament, atesa la seva mobilitat. S'han documentat força desplaçaments d'espècies animals relacionats amb el clima, per exemple desplaçaments latitudinals cap al nord de papallones com l'*Heodes tityrus*.

Instal·lats en el canvi

El nostre país, com el nostre planeta, com l'univers, està instal·lat en el canvi. Un canvi que moltes vegades durant la història de la Terra ha estat espectacular, més que no pas el que ara coneixem com a «canvi global». De totes maneres, molts d'aquests grans canvis s'han produït a escala geològica, moltes vegades de milions d'anys, mentre que l'actual és dels especials perquè és un canvi accelerat que s'està produint en poques dècades. I és important recordar que tots els canvis biològics descrits en aquestes darreres dècades han tingut lloc amb un escalfament que només és un terç o menys del que s'ha projectat per al segle que ara hem encetat.

Referències bibliogràfiques

Díaz-Delgado, R.; Lloret, F.; Pons, X.; Terradas, J. (2002). «Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires». *Ecology*, núm. 83, pàg. 2293-2303.

Emmet, B.; Beier, C.; Estiarte, M.; Tietema, A.; Kristense, H. L.; Williams, D.; Peñuelas, J.; Schmidt, I.; Sowerby, I. (2004). «The responses of soil processes to climate change: results from manipulation studies across an environmental gradient». *Ecosystems,* núm. 7, pàg. 625-637.

Jump, A.; Hunt, J.M.; Martínez-Izquierdo, J.A.; Peñuelas, J. (2006). «Natural selection and climate change: temperature-linked spatial and temporal trends in gene frequency in Fagus sylvatica». *Molecular Ecology*, núm. 15, pàg. 3469-3480.

Lloret, F.; Peñuelas, J.; Estiarte, M. (2004). «Experimental evidence of seedling diversity reduction by climate change in a Mediterranean-type community». *Global Change Biology*, núm. 10, pàg. 248-258.

Ogaya, R.; Peñuelas, J. (2007). «Tree growth, mortality, and above-ground biomass accumulation in a holm oak forest under a five-year experimental field drought». *Plant Ecology*, núm. 189, pàg. 291-299.

Peñuelas, J.; Filella, I.; Comas, P. (2002). «Changed plant and animal life cycles from 1952-2000». *Global Change Biology*, núm. 8, pàg. 531-544.

Peñuelas, J.; Boada, M. (2003). «A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain)». *Global Change Biology*, núm. 9, pàg. 131-140.

Peñuelas, J.; Ogaya, R.; Boada, M.; Jump, A. (2007). «Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia». *Ecography*, núm. 30, pàg. 830-838.

3. Indicadors climàtics per al seguiment

Jordi Cunillera
Servei Meteorològic de Catalunya

Objectiu i metodologia

El Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC), en el seu Quart informe d'avaluació (4AR), afirma que s'han observat nombrosos canvis a llarg termini en el clima, tant a escala global com regional, i que han afectat tant les àrees continentals com les oceàniques (IPCC, 2007). Alguns d'aquests canvis són, per exemple, les variacions en la quantitat i distribució de la precipitació, en el grau de salinitat dels oceans, en les característiques dels patrons de vent i en la freqüència i intensitat d'episodis de temps extrem o sever, com ara sequeres, precipitacions torrencials i onades de calor.

Un cop analitzades en els capítols anteriors les possibles constatacions de canvi climàtic a Catalunya, tant meteorològiques com biològiques, en aquest capítol s'explica com el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) avalua les tendències climàtiques a Catalunya a través del seguiment d'un conjunt d'indicadors climàtics definits a escala internacional, de manera que els resultats obtinguts al nostre país es poden comparar amb els obtinguts en altres zones del planeta.

Un indicador és una mesura, generalment quantitativa, que s'usa per a il·lustrar i comunicar de manera simple un procés complex que inclou tendències i progressió al llarg del temps. Perquè un indicador sigui vàlid ha de complir dues condicions: ha de tenir una bona fonamentació conceptual (s'ha de fer una descripció de la metodologia i de les fórmules emprades) i ha de ser comprensible i simple.

Hi ha indicadors basats en paràmetres ambientals com la data de la primera floració d'una determinada espècie vegetal, el nivell mitjà del mar, la quantitat de gasos d'efecte d'hivernacle que s'emeten a l'atmosfera des d'una zona determinada, o el nombre de dies que el terra està cobert de neu en un indret concret, i alguns dels quals han aparegut als dos capítols anteriors. Aquest tercer capítol d'indicadors de seguiment del canvi climàtic, però, se centrarà en els *índexs climàtics* que es basen en les variables temperatura i precipitació. Tal com fixa l'Organització Meteorològica Mundial (OMM), el càlcul d'índexs climàtics és una eina útil per a caracteritzar el clima, presentar els patrons climàtics històrics i detectar els canvis. Amb aquest objectiu l'OMM ha impulsat el desenvolupament d'eines de detecció del canvi climàtic i de programari específic per a calcular índexs que reflecteixin les millors estimacions de les tendències del clima arreu del món. De fet, experts de diferents països han compartit coneixements i esforços per establir índexs comuns aplicables a tot el món i facilitar-ne el càlcul. En concret, el Grup d'Experts en Detecció de Canvi Climàtic i Índexs (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*, ETCCDI) ha definit i ha formulat un conjunt d'índexs per a analitzar situacions climàtiques extremes seguint una metodologia idèntica perquè els resultats es puguin analitzar globalment. L'ETCCDI depèn de la Comissió de Climatologia (CCl) de l'OMM, dins del Programa de Recerca Climàtica Mundial (WCRP), i de la Joint Comission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM); es pot consultar més informació sobre l'ETCCDI a *http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/indices.shtml*, però els 27 índexs definits per aquest grup d'experts es mostren a la taula 1.

Taula 1. Índexs climàtics definits per l'ETCCDI, on TN és la temperatura mínima, TX la temperatura màxima, TG la temperatura mitjana i PPT la precipitació; el càlcul de percentils, si escau, es fa prenent com a període de referència el trentenni 1961-1990.

Núm. d'índex	Codi (català)	Codi (anglès)	Nom (català)	Nom (anglès)	Definició	Unitats
1	DGe0	FD0	Dies de glaçada	Frost days	Nombre de dies en 1 any en què TN < 0°C	dies
2	DE25	SU25	Dies d'estiu	Summer days	Nombre de dies en 1 any en què TX > 25°C	dies
3	DGa0	ID0	Dies glaçats	Ice days	Nombre de dies en 1 any en què TX < 0°C	dies
4	NT20	TR20	Nits tropicals	Tropical nights	Nombre de dies en 1 any en què TN > 20°C	dies
5	DEC	GSL	Durada de l'estació de creixement	Growing season length	Nombre de dies en 1 any entre la primera ratxa de, com a mínim, 6 dies amb TG > 5°C i la primera ratxa després de l'1 de juliol amb, com a mínim, 6 dies amb TG < 5°C	dies
6	TXx	TXx	Màxima de TX	Maximum TX	Valor màxim anual de la temp. màxima diària	°C
7	TNx	TNx	Màxima de TN	Maximum TN	Valor màxim anual de la temp. mínima diària	°C
8	TXn	TXn	Mínima de TX	Minimum TX	Valor mínim anual de la temp. màxima diària	°C
9	TNn	TNn	Mínima de TN	Minimum TN	Valor mínim anual de la temp. mínima diària	°C
10	TN10p	TN10p	Nits fredes	Cold nights	Percentatge de dies en què TN < percentil 10	%
11	TX10p	TX10p	Dies freds	Cold days	Percentatge de dies en què TX < percentil 10	%
12	TN90p	TN90p	Nits càlides	Warm nights	Percentatge de dies en què TN > percentil 90	%
13	TX90p	TX90p	Dies càlids	Warm days	Percentatge de dies en què TX > percentil 90	%
14	IDRC	WSDI	Indicador de durada de ratxa càlida	Warm spell duration indicator	Nombre de dies en 1 any en què, com a mínim, hi ha 6 dies consecutius amb TX > percentil 90	dies
15	IDRF	CSDI	Indicador de durada de ratxa freda	Cold spell duration indicator	Nombre de dies en 1 any en què, com a mínim, hi ha 6 dies consecutius amb TN < percentil 10	dies
16	ATA	DTR	Amplitud tèrmica anual	Diurnal temperature range	Mitjana anual de la diferència entre TX i TN	°C
17	PX1dia	RX1day	Màxim de PPT en 1 dia	Maximum 1-day precipitation amount	Valor màxim anual de la PPT diària	mm
18	PX5dia	RX5day	Màxim de PPT en 5 dies consecutius	Maximum 5-day precipitation amount	Màxima anual de la PPT enregistrada en 5 dies consecutius	mm
19	ISID	SDII	Índex simple d'intensitat diària	Simple daily intensity index	PPT total anual dividida pel nombre de dies amb PPT ≥ 1 mm	mm/dia
20	DP10	R10	Dies de PPT ≥ 10 mm	Annual count of days when precipitation ≥ 10 mm	Nombre anual de dies en què PPT ≥ 10 mm	dies
21	DP20	R20	Dies de PPT abundant	Annual count of days when precipitation ≥ 20 mm	Nombre anual de dies en què PPT ≥ 20 mm	dies

Núm. d'índex	Codi (català)	Codi (anglès)	Nom (català)	Nom (anglès)	Definició	Unitats
22	DP50	R50	Dies de PPT molt abundant	Annual count of days when precipitation ≥ 50 mm	Nombre anual de dies en què PPT ≥ 50 mm	dies
23	LMRS	CDD	Longitud màxima de la ratxa seca	Maximum length of dry spell	Màxim nombre en 1 any de dies consecutius amb PPT < 1 mm	dies
24	LMRH	CWD	Longitud màxima de la ratxa plujosa	Maximum length of wet spell	Màxim nombre en 1 any de dies consecutius amb PPT ≥ 1 mm	dies
25	P95pTOT	R95pTOT	PPT total anual en els dies molt plujosos	Annual total precipitation when PPT on a wet day > 95th percentile	PPT total anual (en dies on PPT ≥ 1 mm) quan la PPT diària acumulada és superior al percentil 95	mm
26	P95pTOT	R95pTOT	PPT total anual en els dies extremadament plujosos	Annual total precipitation when PPT on a wet day > 99th percentile	PPT total anual (en dies on PPT ≥ 1 mm) quan la PPT diària acumulada és superior al percentil 99	mm
27	PTOT	PRCPTOT	PPT total anual en els dies plujosos	Annual total wet-day precipitation	PPT total anual en dies on PPT ≥ 1 mm	mm

Dades i resultats

Un cop definits els índexs climàtics que s'han de calcular, cal identificar quines són les sèries de dades aptes per a poder estudiar l'evolució temporal d'aquests índexs. El Servei Meteorològic de Catalunya ha començat a analitzar i identificar sèries de dades meteorològiques de la temperatura de l'aire, de l'aigua del mar i de la precipitació que a Catalunya disposin d'una cobertura temporal i d'una qualitat suficient.

Inicialment s'ha treballat amb les dades de temperatura de l'aire i precipitació corresponents a l'Observatori de l'Ebre i a l'Observatori Fabra, dos observatoris de Catalunya que disposen de sèries històriques que es remunten a l'inici del segle XX. La sèrie de l'Observatori de l'Ebre, ubicat a Roquetes (Baix Ebre), s'inicia l'any 1905, i la de l'Observatori Fabra, ubicat a Barcelona (Barcelonès), l'any 1913 (cal esmentar que per als càlculs anuals no s'ha utilitzat el primer any d'ambdues sèries atès que no es disposa de tot el període anual complet). Les dades de la temperatura de l'aigua del mar corresponen a les observacions realitzades a l'estació meteorològica de l'Estartit (Baix Empordà), únic indret de Catalunya on s'han fet aquest tipus de mesures durant un període llarg de temps (la temperatura superficial de l'aigua des del 1969 i la temperatura a una fondària de 80 metres des del 1973); aquestes mesures es realitzen a una milla a llevant de les illes Medes.

Sobre aquestes sèries de dades, l'SMC ha fet un control de qualitat per a la detecció de grans errors, seguit de proves de tolerància, de consistència interna i de coherència temporal. Finalment s'ha estudiat l'homogeneïtat de les sèries a través de diversos tests (l'SNHT per a un únic punt de ruptura, el test Buishand, el test Pettit i el test de la proporció de Von Neumann), seguint la metodologia proposada a Wijngaard *et al.* (2003).

Un cop conegut el grau de qualitat de cadascuna de les sèries i una vegada assegurada la seva homogeneïtat, s'han analitzat els següents indicadors climàtics:

- Temperatura de l'aire mitjana anual i estacional (sèries Ebre i Fabra).
- Precipitació acumulada anual i estacional (sèries Ebre i Fabra).
- Temperatura de l'aigua del mar mitjana anual a l'Estartit.
- Els 27 índexs climàtics específics determinats per l'ETCCDI, 16 de relacionats amb la temperatura i 11 amb la precipitació (sèries Ebre i Fabra).

Atès que en el primer capítol d'aquest informe ja s'ha analitzat l'evolució històrica de la precipitació a Catalunya, i també s'esmenta que aquesta variable meteorològica presenta nombroses incerteses i una dependència regional més accentuada (l'evolució de la temperatura té una clara tendència a l'augment durant els darrers anys), en aquest capítol no es comenten els resultats de l'anàlisi dels dos primers indicadors climàtics (temperatura de l'aire mitjana anual i precipitació anual), i només es presenten els resultats obtinguts per a la temperatura de l'aigua del mar a l'Estartit i per als 27 índexs climàtics tant a l'Observatori de l'Ebre com a l'Observatori Fabra (en el càlcul d'aquests índexs ja es té en compte, evidentment, l'evolució de les sèries de temperatura i precipitació dels dos observatoris).

a) Evolució històrica de la temperatura de l'aigua del mar a l'Estartit

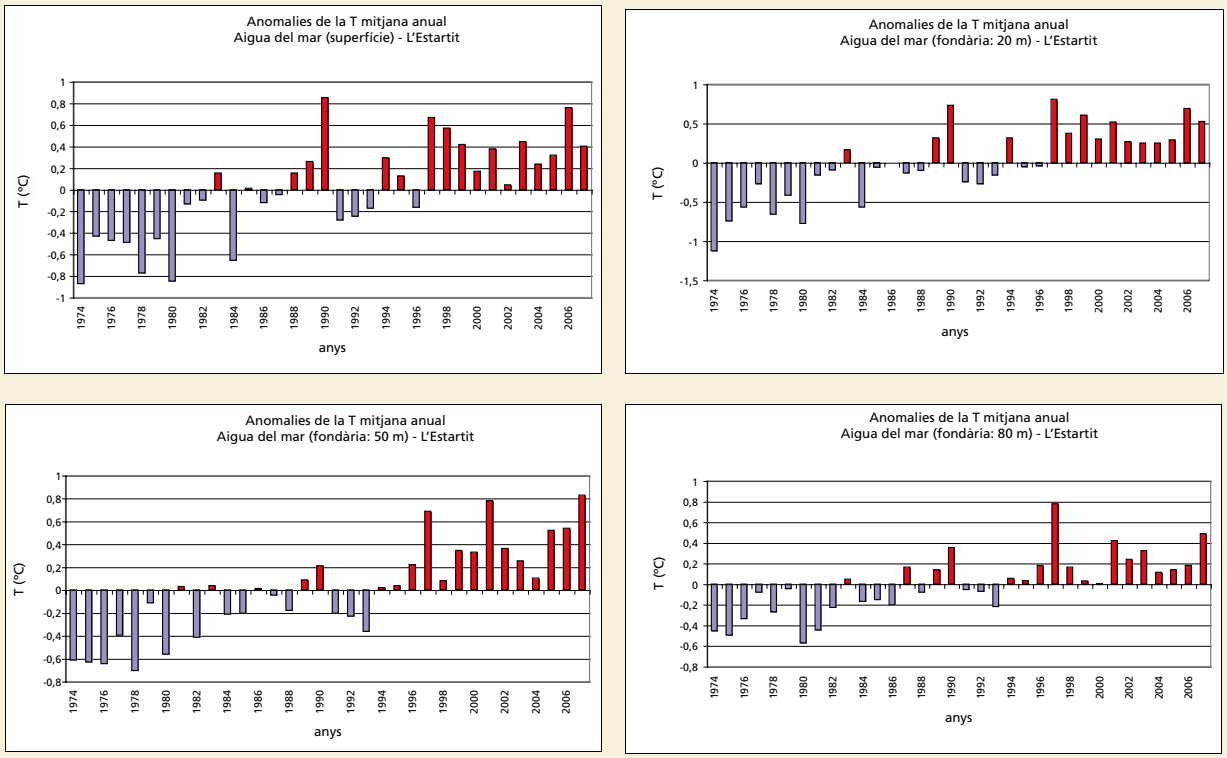
La sèrie de temperatura de l'aigua del mar a l'Estartit comença a finals dels anys seixanta del segle XX al punt amb coordenades 42° 03' N de latitud i 3° 15' E de longitud, inicialment només amb temperatura superficial de l'aigua i des del 1973, sense interrupcions, a quatre fondàries diferents: a superfície, a 20 metres, a 50 metres i a 80 metres.

L'anàlisi d'aquesta sèrie mostra una tendència paral·lela a la que ha experimentat la temperatura de l'aire en altres observatoris que s'han estudiat. Així, la temperatura de l'aigua del mar ha augmentat significativament a totes les fondàries, en especial a les tres més superficials, a un ritme proper a 0,35 °C/dècada (tenint en compte les dades des del 1974), tal com es mostra a la taula 2. En aquesta taula també es mostra el valor mitjà de la temperatura de l'aigua a diferents fondàries durant l'any 2007 (darrer període anual complet disponible) i la seva comparació amb el valor mitjà climàtic.

Taula 2. Temperatura mitjana de l'aigua del mar a l'Estartit l'any 2007 a diferents fondàries, comparativa amb el valor climàtic, i tendència decennal observada. L'asterisc (*) que apareix a les dades de la tendència indica que aquesta és estadísticament significativa, amb un 95% de confiança ($p < 0,05$).

Fondària	T any 2007 (°C)	T mitjana climàtica (°C)	Anomalia tèrmica (°C)	Tendència decennal de la temperatura
Superfície	17,1	16,7	+0,4	+0,34 °C/dècada *
a 20 m	16,6	16,1	+0,5	+0,37 °C/dècada *
a 50 m	15,3	14,5	+0,8	+0,35 °C/dècada *
a 80 m	14,1	13,6	+0,5	+0,22 °C/dècada *

Figura 1. Evolució de l'anomalia anual de la temperatura de l'aigua del mar a l'Estartit per a les quatre fondàries analitzades: (a) superfície, (b) a 20 m, (c) a 50 m, (d) a 80 m.



Font: Servei Meteorològic de Catalunya

A la figura 1 es mostra l'evolució de l'anomalia tèrmica anual (diferència entre la temperatura mitjana anual i la temperatura mitjana climàtica) durant el període 1974-2007 a les quatre fondàries estudiades. S'observa clarament el canvi de signe de l'anomalia tèrmica a totes les fondàries entre la primera meitat del període estudiat i la segona meitat del període, passant d'anomalies negatives (des de l'inici fins a la meitat dels anys vuitanta del segle XX) a anomalies positives (des de meitat dels anys noranta del segle XX fins a l'actualitat). Aquest canvi fa que la tendència decennal sigui clarament positiva.

b) Evolució temporal dels diversos índexs climàtics

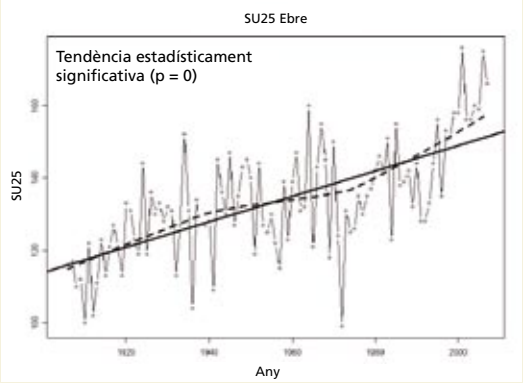
Els resultats de l'aplicació dels diferents índexs climàtics a les sèries de temperatura de l'aire i precipitació de l'Observatori de l'Ebre i de l'Observatori Fabra aporten una informació addicional a l'estudi general de la tendència dels valors mitjans de la temperatura i la precipitació.

Per a cada evolució temporal dels índexs s'ha fet un ajust lineal i un ajust polinòmic suavitzat, i també s'ha estudiat si la tendència obtinguda és estadísticament significativa (a partir del valor de l'estadístic *p*, que permet qualificar un resultat com a estadísticament significatiu quan *p* és inferior a 0,05).

En aquest informe només es presenta un resum dels resultats obtinguts, però tot l'estudi dels indicadors climàtics (amb les gràfiques d'evolució dels 27 índexs climàtics per als observatoris analitzats i l'evolució d'altres paràmetres estadístics) es pot consultar al *Butlletí Anual d'Indicadors Climàtics* (SMC, 2008), informe elaborat pel Servei Meteorològic de Catalunya i que s'actualitza anualment. Així, les figures 2-5 són exemples de les evolucions d'alguns d'aquests índexs climàtics als observatoris estudiats (Observatori de l'Ebre i Observatori. Fabra); en concret, es mostra l'evolució dels índexs DE25 (tendència clarament positiva), TN10p (tendència negativa), ISID (tendència lleugerament positiva) i DP10 (cap tendència).

Figura 2. Evolució de l'índex climàtic DE25 per a l'Observatori de l'Ebre (esquerra) i per a l'Observatori Fabra (dreta), superposant l'ajust lineal (línia contínua) i l'ajust polinòmic (corba discontínua), i mostrant el valor de l'estadístic *p* (tendència estadísticament significativa).

Núm. d'índex	Codi (català)	Codi (anglès)	Nom (català)	Nom (anglès)	Definició	Unitats
2	DE25	SU25	Dies d'estiu	Summer days	Nombre de dies en 1 any en què TX > 25 °C	dies



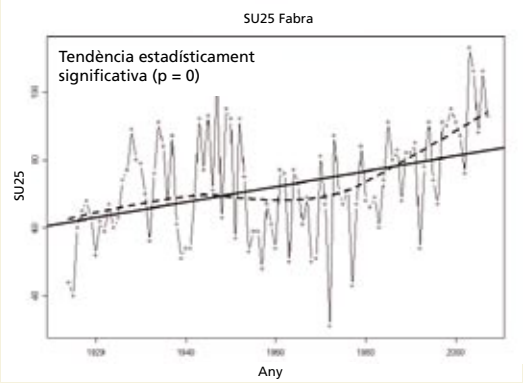
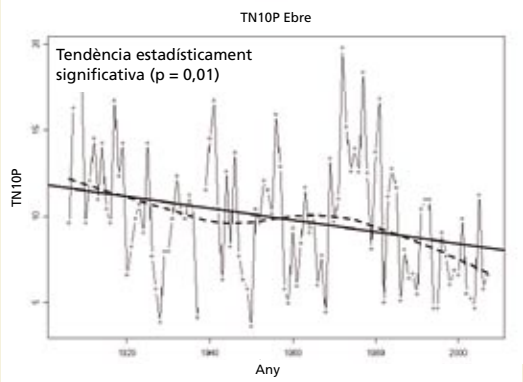


Figura 3. Evolució de l'índex climàtic TN10p per a l'Observatori de l'Ebre (esquerra) i per a l'Observatori Fabra (dreta), superposant l'ajust lineal (línia contínua) i l'ajust polinòmic (corba discontínua), i mostrant el valor de l'estadístic *p* (tendència estadísticament significativa).

Núm. d'índex	Codi (català)	Codi (anglès)	Nom (català)	Nom (anglès)	Definició	Unitats
10	TN10p	TN10p	nits fredes ≥ 10 mm	cold nights	Percentatge de dies en què TN < percentil 10	%



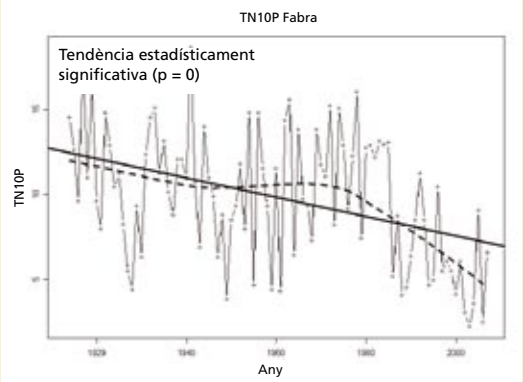
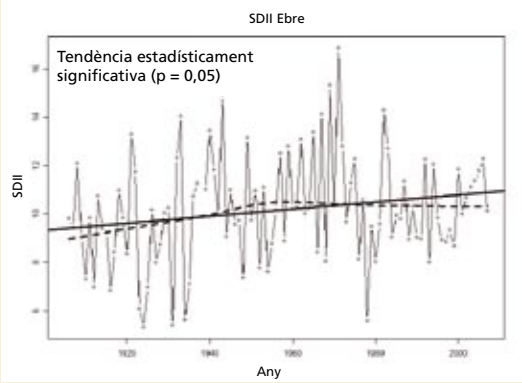


Figura 4. Evolució de l'índex climàtic ISID per a l'Observatori de l'Ebre (esquerra) i per a l'Observatori Fabra (dreta), superposant l'ajust lineal (línia contínua) i l'ajust polinòmic (corba discontínua), i mostrant el valor de l'estadístic *p* (tendència estadísticament significativa).

Núm. d'índex	Codi (català)	Codi (anglès)	Nom (català)	Nom (anglès)	Definició	Unitats
19	ISID	SDII	Índex simple d'intensitat diària	Simple daily intensity index	PPT total anual dividida pel nombre de dies amb PPT ≥ 1 mm	%



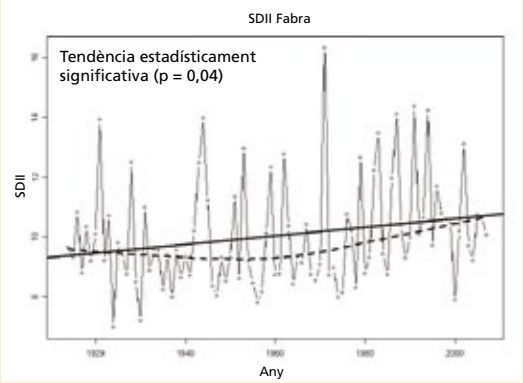
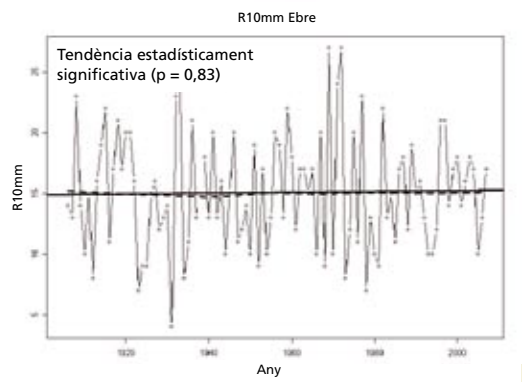
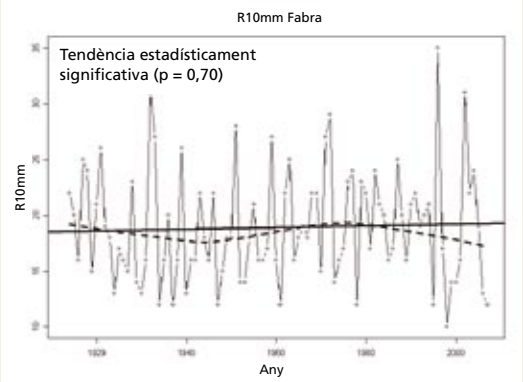


Figura 5. Evolució de l'índex climàtic DP10 per a l'Observatori de l'Ebre (esquerra) i per a l'Observatori Fabra (dreta), superposant l'ajust lineal (línia contínua) i l'ajust polinòmic (corba discontínua), i mostrant el valor de l'estadístic *p* (tendència estadísticament significativa).

Núm. d'índex	Codi (català)	Codi (anglès)	Nom (català)	Nom (anglès)	Definició	Unitats
20	DP10	R10	dies de PPT ≥ 10 mm	Annual count of days when precipitation ≥ 10 mm	Nombre anual de dies en què PPT ≥ 10 mm	dies





Taula 3. Tipus de tendència (si aquesta és estadísticament significativa) per als 27 índexs climàtics calculats a partir de les sèries de dades de l'Observatori de l'Ebre i de l'Observatori Fabra. Es destaca amb un ombrejat els índexs climàtics que proporcionen una mateixa tendència significativa per als dos observatoris.

Núm. d'índex	Codi (català)	Codi (anglès)	Nom de l'índex (català)	Tendència estadísticament significativa (nivell de confiança del 95%)?			
				Obs. de l'Ebre	Tipus tendència	Obs. Fabra	Tipus tendència
1	DGe0	FD0	Dies de glaçada	No	---	Sí	Disminució
2	DE25	SU25	Dies d'estiu	Sí	Augment	Sí	Augment
3	DGa0	ID0	Dies glaçats	---	---	No	---
4	NT20	TR20	Nits tropicals	Sí	Augment	Sí	Augment
5	DEC	GSL	Durada de l'estació de creixement	No	---	Sí	Augment
6	TXx	TXx	Màxima de TX	Sí	Augment	Sí	Augment
7	TNx	TNx	Màxima de TN	No	---	Sí	Augment
8	TXn	TXn	Mínima de TX	Sí	Augment	Sí	Augment
9	TNn	TNn	Mínima de TN	No	---	Sí	Augment
10	TN10p	TN10p	Nits fredes	Sí	Disminució	Sí	Disminució
11	TX10p	TX10p	Dies freds	Sí	Disminució	Sí	Disminució
12	TN90p	TN90p	Nits càlides	Sí	Augment	Sí	Augment
13	TX90p	TX90p	Dies càlids	Sí	Augment	Sí	Augment
14	IDRC	WSDI	Indicador de durada de ratxa càlida	Sí	Augment	Sí	Augment
15	IDRF	CSDI	Indicador de durada de ratxa freda	Sí	Disminució	Sí	Disminució
16	ATA	DTR	Amplitud tèrmica anual	Sí	Augment	Sí	Augment
17	PX1dia	RX1day	Màxim de PPT en 1 dia	No	---	No	---
18	PX5dia	RX5day	Màxim de PPT en 5 dies consecutius	No	---	No	---
19	ISID	SDII	Índex simple d'intensitat diària	Sí	Augment	Sí	Augment
20	DP10	R10	Dies de PPT ≥ 10 mm	No	---	No	---
21	DP20	R20	Dies de PPT abundant	No	---	No	---
22	DP50	R50	Dies de PPT molt abundant	No	---	No	---
23	LMRS	CDD	Longitud màxima de la ratxa seca	No	---	No	---
24	LMRH	CWD	Longitud màxima de la ratxa plujosa	No	---	No	---
25	P95pTOT	R95pTOT	PPT total anual en els dies molt plujosos	No	---	No	---
26	P99pTOT	R99pTOT	PPT total anual en els dies extremam. plujosos	No	---	No	---
27	PTOT	PRCPTOT	PPT total anual en els dies plujosos	No	---	No	---

A la taula 3 es mostra el resum dels resultats obtinguts a l'Observatori de l'Ebre i a l'Observatori Fabra per als 27 índexs climàtics definits. Evidentment, el més interessant és saber si l'índex climàtic té alguna tendència, i si aquesta tendència és estadísticament significativa, resultats que es mostren a les columnes 5 i 6 per a l'Observatori de l'Ebre, i a les columnes 7 i 8 per a l'Observatori Fabra. Tot i que només hi ha aquestes dues sèries analitzades en aquest moment, s'observen algunes diferències en el comportament dels índexs per a cada observatori, fet que ja indica la dificultat d'extreure conclusions vàlides per a tot el territori. Malgrat això, s'han enfosquit les files corresponents als índexs climàtics que proporcionen un mateix tipus de tendència i en què, a més, aquesta tendència és estadísticament significativa.

Conclusions

De comentaris sobre l'evolució de la temperatura de l'aire mitjana i la precipitació anual (que són dos indicadors de seguiment del canvi climàtic), ja se n'han fet en altres capítols d'aquest informe o en altres treball previs, de manera que aquest capítol s'ha centrat en altres indicadors de seguiment analitzats pel Servei Meteorològic de Catalunya, com són la temperatura mitjana de l'aigua del mar i els índexs climàtics definits a escala internacional.

Respecte a la temperatura de l'aigua del mar, l'anàlisi de la sèrie de dades de l'Estartit (amb mesures a quatre fondàries des del 1974 ininterrompudament) proporciona una tendència a l'augment d'aquesta variable a totes les fondàries, especialment als primers 50 metres (on el ritme mitjà d'augment observat és d'uns 0,35 °C per dècada). Durant els darrers 11 anys (1997-2007), les anomalies de temperatura de l'aigua del mar (diferència entre la temperatura mitjana anual i la temperatura mitjana del període 1974-2007) a l'Estartit han estat positives a totes les fondàries, però no es destaca un únic any amb una anomalia positiva clarament superior a totes les fondàries. Així, a superfície es destaquen els anys 1990 i 2006; a 20 m de fondària, els anys 1997 i 1990; a 50 m de fondària, els anys 2007 i 2001; i a 80 m de fondària, els anys 1997 i 2007.

D'altra banda, dels 27 índexs climàtics definits per l'ETCCDI i calculats amb les dades dels Observatoris de l'Ebre i Fabra, només s'ha obtingut una mateixa tendència estadísticament significativa en 11 índexs relacionats amb la temperatura de l'aire i en 1 índex relacionat amb la precipitació. Aquest resultat evidencia el que ja s'ha esmentat sobre la incertesa i la dependència regional de la precipitació, mentre que la temperatura presenta una tendència molt més ben definida.

Dels 11 índexs climàtics relacionats amb la temperatura, presenten una tendència a l'augment els dies d'estiu (DE25), les nits tropicals (NT20), la màxima de les temperatures màximes (TXx), la mínima de les temperatures màximes (TXn), les nits càlides (TN90p), els dies càlids (TX90p), l'indicador de durada de ratxa càlida (IDRC) i l'amplitud tèrmica anual (ATA), mentre que presenten una tendència negativa (disminució) les nits fredes (TN10p), els dies freds (TX10p) i l'indicador de durada de ratxa freda (IDRF).

Ampliant una mica més el comentari respecte als índexs climàtics relacionats amb la precipitació, només l'índex simple d'intensitat diària (ISID) mostra una tendència positiva estadísticament significativa als dos observatoris. Atès que aquest índex ISID es calcula com el quocient entre la precipitació total anual i el nombre de dies amb un precipitació igual o superior a 1 mm, un augment del seu valor indica que la pluja total anual cau repartida en menys dies. Els altres 10 índexs climàtics relacionats amb la precipitació no tenen cap tendència.

Finalment, cal remarcar que els resultats presentats es limiten a les àrees geogràfiques d'on procedeixen els registres, i és difícil fer una extrapolació d'aquests resultats a altres zones del país. Per aquest motiu, l'SMC treballa actualment per ampliar el nombre de sèries climàtiques aptes per al treball amb indicadors climàtics i ampliar, així, l'abast geogràfic de les conclusions que es puguin extreure.

Agraïments

L'autor agraeix als membres de l'Àrea de Climatologia del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) la tasca realitzada durant l'elaboració del Butlletí Anual d'Indicadors Climàtics*, i vol esmentar especialment Muntsa Busto i Marc Prohom per llur col·laboració en la redacció d'aquest capítol.*

A més, l'SMC vol agrair a l'Observatori de l'Ebre, a l'Observatori Fabra i a l'Estació Meteorològica de l'Estartit la cessió de les dades i el suport facilitat tant amb relació a l'obtenció de les sèries de dades com a l'obtenció de la informació necessària per a valorar la qualitat i la homogeneïtat de les sèries climàtiques pertinents.

Referències bibliogràfiques

IPCC (Intergovernmental Pannel for Climate Change) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen [*et al.*] (eds.). Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit) i Nova York (Estats Units).

SMC (Servei Meteorològic de Catalunya) (2008). *Butlletí Anual d'Indicadors Climàtics – Any 2007*. Document que es pot consultar a la pàgina web de l'SMC: http://www.meteo.cat, a l'apartat Climatologia – Butlletins climàtics.

Wijngaard, J. B.; Klein, A. M. G.; Können, G. P. (2003). «Homogeneity of 20th century european daily temperature and precipitation series». *International Journal of Climatology*, núm. 23, pàg. 679-692.

4. Bases de la modelització climàtica

Josep Enric Llebot
Universitat Autònoma de Barcelona

Introducció i objectius

La primera qüestió que es presenta en pensar sobre el clima i la seva evolució és distingir entre el que és el temps meteorològic i el clima. De manera ràpida i entenedora, es pot dir que la meteorologia és el temps que fa i el clima és el temps que hauria de fer. De manera habitual el clima es defineix com el temps mitjà, però el sistema climàtic ha estat objecte de definicions durant els darrers anys. L'any 1975 el programa GARP (Global Atmospheric Research Programme) de l'Organització Meteorològica Mundial va definir que el sistema climàtic estava format per l'atmosfera, la hidrosfera, la criosfera, la superfície del sòl i la biosfera. El Conveni Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic, document polític signat l'any 1992 i ratificat el mes de març de 1994, també definia el sistema climàtic d'una manera anàloga: la totalitat de l'atmosfera, la hidrosfera, la biosfera i la geosfera i les seves interaccions. El matís en esmentar les interaccions és rellevant i mostra probablement el progrés en el coneixement experimentat en els 17 anys que separa els dos documents.

L'objectiu d'aquest capítol és explicar breument les bases sobre les quals se sustenten les eines que s'utilitzen per a projectar el futur climàtic: els models. L'interès a disposar de projeccions sobre el clima del futur segons la composició atmosfèrica canviant que els diferents escenaris socioeconòmics de futur (*Special Report on Emission Scenarios(SRES)*, IPCC, 2000) proposen, ha propiciat el desenvolupament dels models numèrics. Un model és un conjunt d'equacions que pretenen representar el sistema climàtic globalment o alguna de les seves característiques, unes condicions inicials i les representacions mitjançant paràmetres d'alguns processos. Un model vol ser, doncs, una representació simplificada del comportament de la naturalesa. En tota representació hi ha aproximacions i prioritats que la caracteritzen i que en determinen els límits de confiança i d'exactitud. Els errors dels models provenen, doncs, d'una banda, de les mateixes simplificacions en la seva elaboració o en la transcripció en forma numèrica, i, de l'altra, de la definició de les condicions inicials i de contorn.

Els models climàtics

Les lleis físiques que governen la dinàmica de l'atmosfera i del clima constitueixen un conjunt complet d'equacions matemàtiques no lineals que no disposen de mètodes analítics per a ser resoltes i que han de ser tractades numèricament. Els models, però, no poden incloure de manera completa les complexitats de tots els fenòmens que intervenen en el sistema climàtic. Aleshores utilitzen parametritzacions, és a dir, algoritmes que descriuen un procés determinat a partir de variables fonamentals. Per exemple, la nuvolositat en una cel·la de 100 km^2 no està simplement relacionada amb la humitat de la cel·la. No obstant això, quan la humitat mitjana augmenta, la nuvolositat augmenta. Aquesta relació pot ser la base d'una parametrització, tot i que sovint és força més complexa del que aquí s'ha esquematitzat. Atesa la característica de les parametritzacions, un model del clima depèn del coneixement expert i, fins i tot, pot incorporar diferents parametritzacions per regions diferents. Això justifica, en part, l'existència de diversos models, cadascun dels quals té els seus detalls únics i característics. Tanmateix, el comportament a gran escala que reflecteixen la major part de models és robust, ja que no depèn de les parametritzacions específiques que s'utilitzen ni de l'escala espacial.

Els models divideixen el sistema que cal descriure, l'atmosfera, l'oceà, en una malla amb cel·les d'unes dimensions determinades. El model resol les equacions que governen el sistema per a cada cel·la tenint en compte la interacció de cada una amb les seves veïnes. Un cop fet, a partir d'unes condicions inicials, aquest càlcul per a cada cel·la, s'obté la variació del sistema climàtic segons el model en una iteració temporal i, per tant, per a cada cel·la es tenen uns valors per a les variables fonamentals del model. El següent pas consisteix a convertir els resultats anteriors en noves condicions inicials per a una nova iteració, que, al seu torn, donarà nous valors per a les variables de cada cel·la. Els models meteorològics estàndard periòdicament són alimentats amb condicions inicials mesurades a partir de la xarxa d'observatoris meteorològics i de les mesures dels satèl·lits, però, òbviament, els models climàtics no ho poden fer.

Naturalment, com més petita sigui la cel·la més precís serà el model, però més llarg i complicat serà de càlcul i més difícil de subministrar-li les condicions inicials. Les equacions diferencials que apareixen en les equacions del sistema climàtic se solen tractar mitjançant equacions equivalents amb diferències finites. La utilització de mètodes de resolució numèrics afegeix, també, problemes d'índole matemàtica, com ara la convergència de les solucions i la seva estabilitat.

L'atmosfera i els oceans estan fortament acoblats. L'esforç del vent sobre la superfície de l'oceà és el principal impulsor de la circulació superficial al mar, i l'evaporació del vapor d'aigua cap a l'atmosfera mitjançant el lliurament de la calor latent de quan es condensa és una font important d'energia que caracteritza la circulació atmosfèrica. Per tant, els models climàtics globals amb acoblament atmosfera-oceà són els que s'utilitzen actualment amb cel·les d'entre 100 i 200 km d'ample per a l'atmosfera, i més petites per a l'oceà, ja que els processos dinàmics al mar són d'escala més petita, en general la meitat de la utilitzada per a l'atmosfera. La major part de models utilitzen com a mínim unes 20 capes per a l'atmosfera i unes 20 més per al mar, tot i que darrerament, com comentarem més endavant a escala local, es pretén utilitzar models amb una escala amb més resolució.

Al final de la dècada de 1950 es pensava que les inexactituds dels models numèrics de predicció meteorològica provenien estrictament de la grandària de la cel·la elemental (Houghton, 2005) i, per tant, de la potència dels ordinadors sobre els quals es fan funcionar els models. Segons això, no hi havia cap diferència entre la predicció dels moviments orbitals dels planetes o les marees de l'oceà i la predicció del clima o del temps del futur. Tanmateix, a la darreria de la dècada de 1960, P. D. Thompson i E. N. Lorentz sospitaven que per als límits de la predictibilitat dels models meteorològics hi havia raons més fonamentals que les limitacions de càlcul. Essencialment, el que descobriren fou que els models numèrics que utilitzaven eren molt sensibles a canvis mínims en les condicions inicials. Thompson observà que la qualitat de la predicció depenia de manera significativa de la disponibilitat de la informació completa de cada estació meteorològica. Si no es disposava de la informació completa, el model l'havia d'obtenir interpolant i les prediccions no eren fiables. Lorentz, treballant sobre el mateix cas (Lorentz, 1965), observà que dues prediccions iniciades amb condicions inicials molt semblants, transcorregut un temps determinat podien portar a prediccions sobre l'estat del temps molt diferents. No es complia, doncs, allò que es dóna en els sistemes mecànics newtonians, en què dos sistemes idèntics que parteixen de condicions inicials molt properes evolucionen en el temps en trajectòries molt semblants, també.

Lorentz cercà sistemes mecànics amb característiques anàlogues i la sorpresa fou que en trobà de molt més senzills que el mateix sistema d'equacions que descrivia l'atmosfera, que havia estat estudiant fins aleshores. La conclusió que mostrà Lorentz fou que es pot predir el comportament d'alguns sistemes deterministes solament per a un temps finit que depèn de l'exactitud amb què s'han mesurat les condicions inicials.

Per tant, hi ha unes limitacions intrínseques en l'ús dels models de simulació del temps i del clima (Lorentz, 2005). Cal tenir en compte que per a l'estudi del clima no s'està interessat en un estat individual del sistema climàtic, sinó en un conjunt d'estats. D'alguna manera, l'estudi del clima és semblant a la situació que es troba en algunes

disciplines de la física, com la mecànica estadística, on el que interessa no és estudiar un estat microscòpic individual d'un sistema, sinó tots els estats que pot assolir un sistema donades unes condicions macroscòpiques determinades. Per tant, per determinar estats futurs del clima, en lloc d'estudiar el comportament estadístic d'algunes propietats atmosfèriques i la seva evolució amb el temps, estudiem els diferents valors que en una franja determinada de les condicions inicials aquestes variables poden assolir, i en fem una mitjana.

Un model fisicomatemàtic del clima representa un estat estadístic de l'atmosfera que depèn únicament de les condicions de contorn imposades per la biosfera, l'oceà, la criosfera i la litosfera, juntament amb l'espai exterior. El model climàtic es materialitza sobre la base de les equacions dinàmiques, termodinàmiques i hidrodinàmiques que representen d'una manera adequada aquests subsistemes, juntament amb les condicions de contorn i inicials, els valors de les constants físiques i dels paràmetres que permeten descriure els fluxos de matèria, energia i impuls. Les constants físiques inclouen dades planetàries, com el radi de la Terra, l'acceleració de la gravetat i la velocitat angular de rotació, i constants internes, com la massa total, la composició química de l'aire i dels oceans, calors específiques, calors latents de canvi de fase, i albedos dels núvols i de la superfície de la Terra. Les condicions inicials inclouen l'energia del Sol, els paràmetres orbitals, la topografia de la superfície, les propietats de la superfície del sòl, etc.

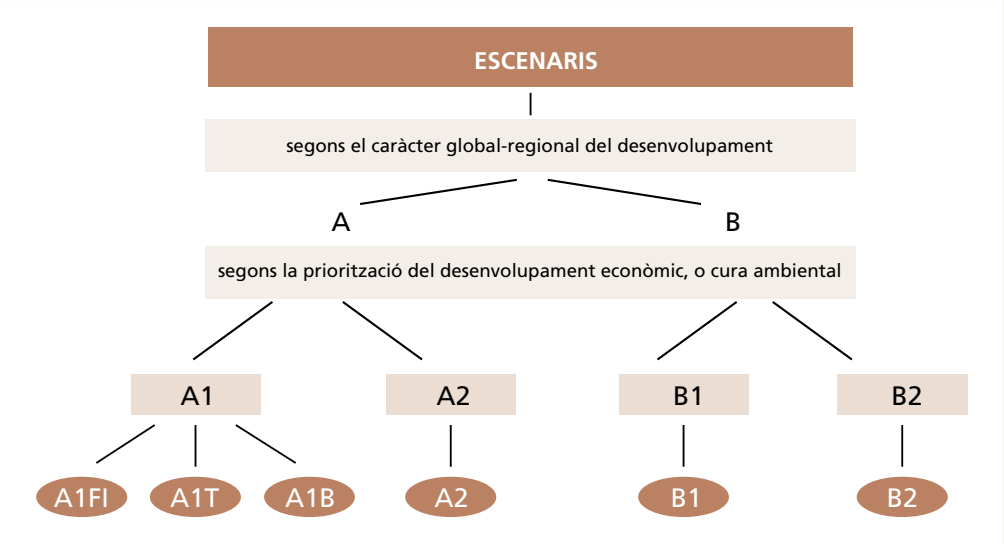
En els models es pren l'atmosfera com el sistema principal. El segon subsistema que es té en compte són els oceans. Atès el fort acoblament entre l'atmosfera i els oceans per a obtenir una bona modelització, convé incloure les interrelacions mútues entre els dos sistemes. La contribució dels altres subsistemes s'acostuma a integrar mitjançant alguns paràmetres. Els models climàtics es classifiquen tant pel que fa al tipus de model com al grau de resolució:

- **Models de balanç d'energia** (EBM, en les sigles en anglès): Els models de balanç d'energia són dels més simples, ja que no distingeixen entre les diferents components d'un sistema climàtic, però determinen la temperatura efectiva del planeta, assumint que hi ha un balanç d'energia entre la radiació solar absorbida i la radiació terrestre emesa a l'espai. Són models simples, que no vol dir senzills, que permeten calcular la distribució espacial de la temperatura d'equilibri en funció de la latitud, en funció de l'altura o en funció de les dues variables. Els paràmetres importants que utilitzen són la radiació del Sol, l'albedo amb els efectes dels núvols, els aerosols, la superfície de gel, la radiació infraroja absorbida per l'atmosfera i la distribució de la temperatura mitjana en la direcció nord-sud. En els models de balanç d'energia més sofisticats, la crosta de gel i, conseqüentment, l'albedo canvien d'acord amb la temperatura que s'obté del model, i els perfils de temperatura es determinen a partir dels valors dels paràmetres del transport de la calor meridional per a la circulació atmosfèrica i oceànica. Són models que s'utilitzen per a entendre les repercussions que es produirien sobre el sistema climàtic i la seva sensibilitat en resposta a canvis sobre elements importants del clima com, per exemple, la constant solar o l'albedo planetari. També s'utilitzen com una ajuda per a la interpretació dels resultats de models més complexos. Són models conceptualment interessants, que no impliquen la utilització de recursos de càlcul grans.
- **Models radiatius-convectius:** Són models també unidimensionals que determinen la distribució vertical de la mitjana global de la temperatura de l'atmosfera i de la superfície terrestre. Aquests models responen a una composició atmosfèrica i a un albedo superficial predeterminats. Inclouen mòduls que descriuen la transferència radiativa de radiació solar i terrestre, els intercanvis de radiació entre la superfície terrestre i l'atmosfera, i la distribució vertical de núvols amb llurs propietats radiants. Alguns d'aquests models s'han acoblat a models de l'oceà i inclouen modelitzacions de l'intercanvi energètic amb les capes més fondes de l'oceà. Les prediccions d'aquests models als canvis de la composició atmosfèrica són molt sensibles als paràmetres que s'utilitzen per a quantificar l'intercanvi amb l'oceà, especialment entre la zona de barreja i la zona d'aigües profundes.

- **Models zonals:** Els models zonals són models bidimensionals capaços de simular variacions verticals i meridionals en propietats de la superfície i de l'atmosfera sobre les quals s'ha avaluat la mitjana zonal, és a dir, sobre les quals s'ha calculat la mitjana per a totes les longituds al llarg del paral·lel corresponent a una latitud determinada. L'avantatge d'aquests models respecte els models radiatius-convectius i respecte els models de balanç d'energia, és que poden respondre a les variacions latitudinals de la crosta de gel prescrites o modelades, a les propietats del sòl i de la superfície de l'oceà, i a la distribució dels núvols. Els models zonals poden arribar a generar circulacions generals de gran escala, com la cel·la de Hadley, integrant numèricament les equacions del moviment i els transports de calor i de vapor d'aigua en una xarxa bidimensional (meridional-vertical). Els models zonals inclouen els efectes de transport dels ciclons extratropicals i tropicals, i dels núvols convectius amb paràmetres. Quan mitjançant els models zonals es redueix la insolació solar per sota d'un llindar determinat, els models passen d'un estat del clima estable, amb una part de la superfície terrestre coberta per la neu, a un altre estat del clima en què tota la Terra queda completament glaçada. Al model li cal, aleshores, un escalfament poc realista per a tornar a un planeta parcialment cobert per gel. Aquesta característica dels models zonals s'acostuma a conèixer com a *catàstrofe albedo gel*, i es deu a un problema d'aquests tipus de models en la descripció adequada del transport de calor.

- **Model climàtics globals** (GCM, en les sigles en anglès): Els models climàtics globals són models tridimensionals, és a dir, les variables del model depenen de les dues coordenades horitzontals, la latitud i la longitud, i de la altura. Simulen el clima usant tècniques numèriques de la predicció meteorològica del temps, però més complexes quan es tracta de models acoblats atmosfera-oceà (AOGCM). Per tant, explícitament intenten reproduir la circulació a l'atmosfera i a l'oceà que contribueix al transport horitzontal i vertical de calor, vapor d'aigua i d'altres propietats. Com ja s'ha dit, la resolució de la xarxa d'aquests models es basa en cel·les d'entre 3º i 1º de latitud i de longitud, que corresponen a una franja horitzontal aproximada d'entre 100 i 300 km i una resolució vertical d'entre 200 i 400 m. Els models GCM s'inicialitzen a partir d'una estructura atmosfèrica donada i simulen l'evolució de la circulació general a l'atmosfera durant dècades i fins i tot segles, superant el màxim interval de predicció de qualsevol model de predicció del temps. Els objectius d'aquests models són representar les propietat estadístiques de l'atmosfera i simular els escenaris de canvi climàtic. Els models, però, són simulacions en la mesura que s'elaboren utilitzant algunes dades que no canvien, com la radiació solar o els paràmetres orbitals. Un model complet hauria d'incloure tots els processos importants responsables, alguns dels quals encara es desconeixen amb la precisió suficient i amb la descripció de la seva dinàmica necessària, com per exemple el cicle del carboni, o d'altres que són impossibles de predir, com ara el vulcanisme o els canvis de la concentració de l'atmosfera, especialment pel que fa als gasos amb efecte d'hivernacle o als aerosols. Pel que fa a la composició de l'atmosfera, s'utilitzen els escenaris d'emissions que corresponen a les projeccions de quins podrien ser els escenaris socioeconòmics de la nostra societat que conduirien a una determinada concentració atmosfèrica de gasos amb efecte d'hivernacle. Els escenaris s'agrupen en quatre famílies, A1, A2, B1, B2 (vegeu la figura 1), que posen èmfasi en el caràcter global-regional del desenvolupament segons A o B, respectivament, i la priorització del desenvolupament econòmic o cura ambiental 1 o 2, respectivament.

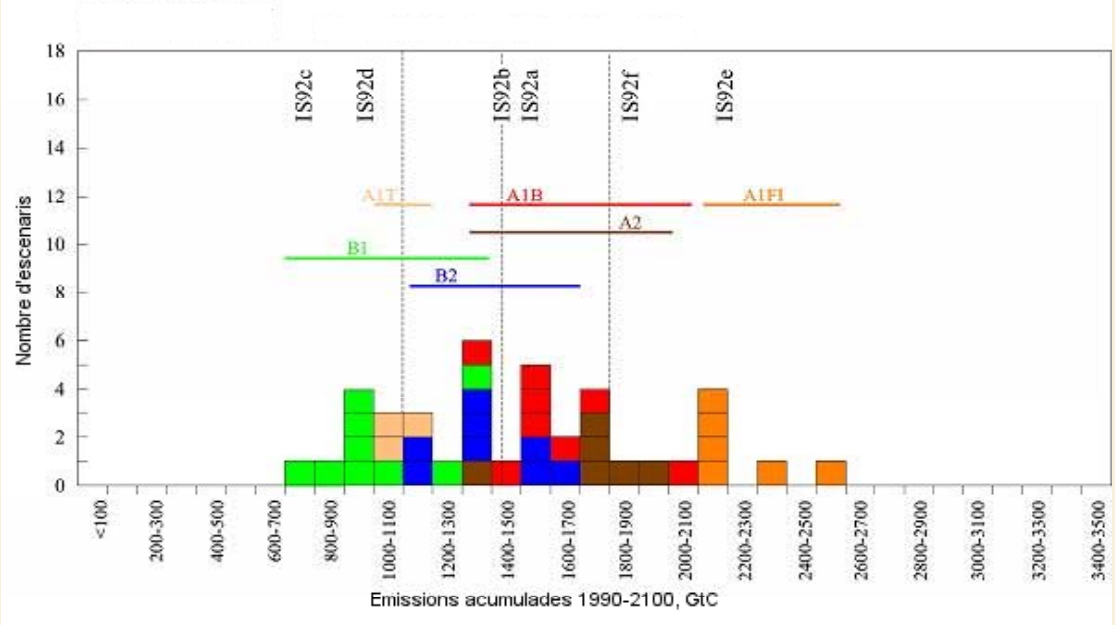
Figura 1. Escenaris plantejats per l'Intergovernmental Pannel for Climate Change (IPCC).



Els escenaris es divideixen en quatre famílies. La família A1 descriu un món futur de creixement econòmic ràpid, una demografia que assoleix un màxim a meitat de segle i una introducció ràpida de tecnologies noves i més eficients. La família A1 es desenvolupa en tres grups: A1FI (energies fòssils), A1T (totes les fonts són d'energia alternativa) i A1B (balanç entre les energies fòssils i les alternatives). La família A2 descriu un món heterogeni amb un creixement econòmic i un desenvolupament tecnològic, demogràfic i cultural dels països molt diferent a tot el món. La família B1 conté els escenaris que prenen en consideració una homogeneïtzació econòmica, tecnològica, demogràfica i social del món, amb canvis ràpids en les estructures econòmiques i amb tecnologies netes i eficients. La família B2 considera un món que posa èmfasi en les solucions locals als problemes de sostenibilitat econòmica, social i ambiental. És un escenari orientat a la protecció ambiental i a l'equitat social, que es focalitza, però, en l'àmbit local i regional.

Les hipòtesis utilitzades en aquestes famílies d'escenaris condueixen a emissions de CO_2 força diferents (vegeu la figura 2) i, naturalment, a concentracions de CO_2 molt diferents, que per als escenaris més representatius oscil·len entre el 90% i el 250% de més respecte a la concentració de l'any 1750 (280 ppm). Habitualment se solen considerar els escenaris de situacions extremes amb més o menys concentracions, és a dir els escenaris A2 i B2.

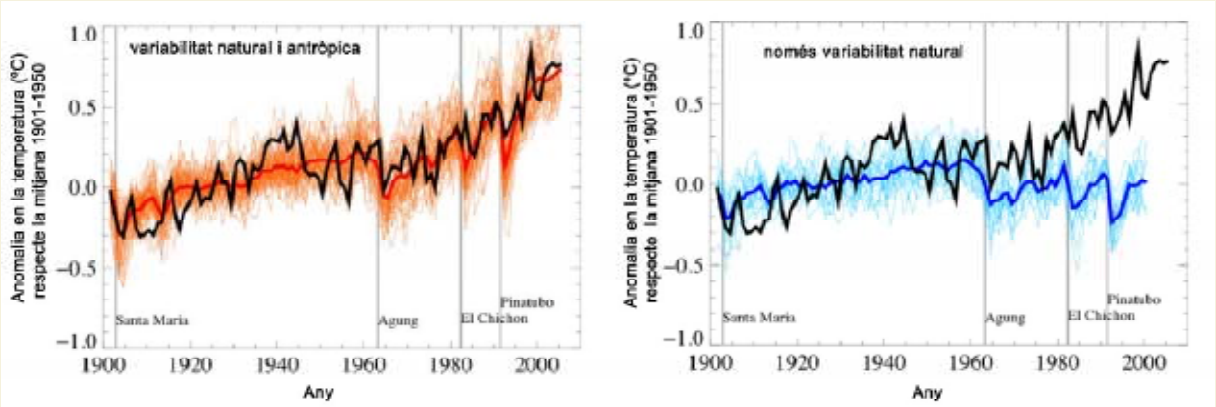
Figura 2. Emissions acumulades en Gigatones de carboni segons els diferents escenaris SRES (IPCC, 2000).



Resultats

Una prova òbvia d'un model climàtic consisteix a fer-lo córrer durant un determinat període de temps i analitzar en detall el clima que es genera i el clima que s'observa, tant pel que fa a la mitjana com a la variabilitat. Actualment, pel que fa a aquests aspectes, els models es comporten especialment bé. També se'ls posa a prova entre ells, i en simular o reproduir els canvis que es produeixen a conseqüència d'un forçament climàtic, com pot ser un episodi d'El Niño o una erupció volcànica. En aquest sentit, la simulació dels efectes de l'erupció del Pinatubo l'any 1991 ha estat particularment útil i ha estat especialment bona, tant pel que fa a les mitjanes globals, el refredament de 0,05 °C, com pel que fa als comportaments regionals. També s'han provat els models en referència al passat paleoclimàtic, en condicions d'una distribució de l'energia solar ben diferent de l'actual. La capacitat de càlcul cada vegada més gran permet fer comparacions de diferents simulacions amb condicions inicials diferents, la qual cosa permet augmentar el coneixement sobre la variabilitat dels models i la incertesa de les projeccions que realitzen. Pel que fa a aquest darrer aspecte, entre els resultats més concloents de l'AR4 (Quart informe de l'IPCC fet públic el 2007 i publicat el 2008), no es pot deixar d'esmentar la constatació que amb la variabilitat natural del clima és impossible explicar com ha canviat la temperatura mitjana superficial de la Terra durant el segle XX. De la figura 3 es desprèn que fins cap a l'any 1960 no es pot constatar en l'evolució de la temperatura el senyal antròpic, però que a partir del darrer quart del segle XX és impossible entendre com ha anat canviant sense tenir en compte la contribució de les activitats humanes.

Figura 3. Resultats de les simulacions dels models per al segle XX, tenint en compte la variabilitat natural (corbes blaves) o la variabilitat natural i l'efecte degut a les activitats humanes (corbes vermelles). La línia negra correspon a l'evolució real de la temperatura (IPCC, 2007).



Conclusions: incerteses

La modelització climàtica és fonamentalment diferent de la predicció meteorològica. La meteorologia té a veure amb un problema de condicions inicials: donada la situació d'avui, quina serà la de demà? Abans s'ha fet referència al caràcter caòtic (Schmidt, 2007), és a dir, a la sensibilitat a les condicions inicials al començament de la simulació meteorològica, que creix amb el temps i que posa el límit d'uns 14 dies. Les projeccions climàtiques són diferents: no són un problema de condicions inicials, sinó de condicions de contorn, és a dir, una descripció estadística de l'estat mitjà i de la variabilitat d'un sistema, no l'anàlisi d'una trajectòria concreta dins de l'espai de fase. Els models climàtics comporten climes estables i no caòtics. Una mostra d'aquesta estabilitat també es pot fonamentar en la correlació dels cicles de Milankovitch en els paràmetres orbitals de la Terra i els cicles dels grans canvis del clima del darrer milió d'anys. Aquesta correlació, que proporciona una forta evidència que els cicles de Milankovitch són el primer factor que indueixen els grans canvis substancials del clima que comporten la successió de períodes glacials i interglacials, suggereix que el sistema climàtic no és gaire caòtic pel que fa als canvis en les condicions ambientals que els cicles de Milankovitch suposen. Aquesta estabilitat dels climes permet plantejar l'anàlisi sobre els canvis del funcionament del sistema climàtic a causa de les accions humanes d'una manera semblant a com s'analitzen els canvis ocorreguts durant el passat, ja que la sensibilitat del clima, és a dir, els canvis del clima associats als canvis en la composició atmosfèrica de gasos amb efecte d'hivernacle, no són, pel que fa al règim radiatiu al cim de l'atmosfera, gaire diferents dels canvis deguts als forçaments associats als cicles de Milankovitch. Finalment, a mesura que s'afegeixin als models climàtics més components, com per exemple el complicat dinàmicament cicle de carboni, o la dinàmica de les escorces de gel i les corresponents retroaccions, podria passar que la caoticitat de la modelització climàtica augmentés.

La simulació d'escenaris regionals de canvi climàtic es caracteritza per la presència de distintes fonts d'incertesa que afecten tots els passos del procés, des de l'establiment dels escenaris d'emissió que acabem d'esmentar, fins als models globals i la simulació a escala regional. A continuació n'enumerem les més rellevants (Gutiérrez i Pons, 2006):

- La representativitat dels escenaris.
- La manca de coneixement complet del cicle del carboni.
- Les eines, és a dir, els models, encara mostren una dispersió massa gran i reflecteixen la sensibilitat dels models del clima a petits canvis en el forçament extern del sistema climàtic.
- Els models ja esmentats que representen la dinàmica d'altres subsistemes del sistema climàtic, com per exemple els models de l'evolució del sòl.
- Les diferents tècniques de regionalització (estadístiques i dinàmiques) afegeixen incertesa a les projeccions locals de canvi climàtic.
- Els models d'impacte, és a dir, de simulació de les conseqüències d'un determinat canvi en les condicions ambientals sobre una determinada activitat econòmica, també tenen una gran dosi d'incertesa, ja que utilitzen visions fenomenològiques moltes vegades poc provades i, fins i tot, poc desenvolupades.

En conseqüència, i a la vista de la gran quantitat d'incerteses que hi ha en el procés de generació d'escenaris de canvi climàtic, s'intenten utilitzar metodologies que permeten estimar la incertesa associada a cada pas dels esmentats, amb l'objectiu de trobar un «interval de confiança» per a un escenari resultant de canvi climàtic. A causa de la dificultat d'aquest procés, l'avaluació d'incerteses associades a les projeccions de canvi climàtic es duu a terme amb una aproximació probabilística en què s'explora un conjunt representatiu de mètodes, models, emissions, etc. Constitueix el que es coneix com a mètode de predicció per conjunts (*ensemble forecast* en anglès). Aquesta metodologia de predicció per conjunts s'ha anat imposant en l'última dècada per a la predicció probabilística a distintes escales temporals, des del termini mitjà fins a les projeccions de canvi climàtic. Per tant, les prediccions de tipus determinista es mantindran, però aniran perdent terreny enfront de les prediccions probabilístiques, basades en un conjunt o població de prediccions. El referent internacional actual d'aquest tipus d'estratègies d'aproximació probabilística al canvi climàtic el constitueix el projecte ENSEMBLES (http://www.ensembles-eu.org), que pretén limitar les incerteses en les prediccions de canvi climàtic per mitjà d'integracions d'escenaris d'emissió diferents, models globals diferents, models regionals diferents i tècniques estadístiques de regionalització diferents, i que proporciona, també, mètodes de tractament estadístic del pes estadístic de cada resultat.

Com ja s'ha comentat, la resolució dels models climàtics empleats per a simular el clima futur a partir dels distints escenaris és baixa si es vol obtenir una anàlisi regional o local, i el detall geogràfic que poden assolir actualment les previsions encara és molt limitat i no permet pronosticar diferències ni tendències regionals. Pel que fa a Catalunya, tot el territori està en dues cel·les dels models globals i, per tant, tot el país està reduït a dos punts de predicció i, en canvi, el país gaudeix d'una geografia complicada que li confereix diferents microclimes. Aquesta deficiència dels models globals fa necessari l'assoliment de projeccions que estimin els efectes locals del canvi climàtic. Aquest és un dels problemes actuals de la comunitat investigadora. Recentment s'han desenvolupat alguns projectes, com els que han involucrat nombrosos grups de modelització europeus (projectes Prudence, Stardex i Ensembles), orientats precisament a la generació d'escenaris a escala regional, amb una gran varietat de mètodes i models climàtics globals i regionals. Aquesta tasca de projecció regional es fa utilitzant tècniques dinàmiques, adaptant models numèrics locals de més resolució, o utilitzant tècniques estadístiques, amb models empírics que relacionen les variables de gran escala juntament amb variables locals (Benestad, 2001, 2004).

Les tècniques de regionalització dinàmica es basen en l'ús de models regionals o d'àrea limitada. Per a augmentar la resolució dels models climàtics globals, es nia un model regional de més resolució a l'interior del model global, únicament en la zona d'interès. El model regional sol ser un model de pronòstic meteorològic de mesoescala per a una regió determinada que usa una grandària de cel·la força petita. Aquest model pren com a condicions de contorn els valors del model global al llarg de tota la integració. Aquestes tècniques dinàmiques tenen l'avantatge

de ser físicament consistents i el desavantatge de necessitar una gran capacitat de càlcul, la qual cosa les limita actualment a simulacions amb resolucions no superiors a 20 km.

Els mètodes estadístics de regionalització es basen en l'ús de tècniques estadístiques que relacionen de manera empírica les variables climàtiques a gran escala proporcionades pels models globals de circulació, amb les variables locals observades en superfície relacionades amb el fenomen que s'estudia. Això comporta que es pugui disposar de sèries històriques llargues, tant provinents de models numèrics (reanàlisi) com d'observacions d'estacions meteorològiques. L'avantatge de les tècniques de *downscaling* estadístic és que, a més de ser aplicables a variables clàssiques, com la precipitació i la temperatura, també es poden aplicar a qualsevol altra variable, com la freqüència de tempestes de llevant o la data de la verema en una regió, que són dependents de la circulació a gran escala, però que no són proporcionades pels models globals i regionals. D'altra banda, les necessitats de càlcul d'aquestes tècniques són, en general, modestes, si bé en alguns casos les tècniques no lineals utilitzades poden consumir també grans quantitats de recursos en els processos d'optimització involucrats.

El clima del Principat no és homogeni, sinó que és afectat per fenòmens frontals i per processos convectius. Cal esperar que el *downscaling* estadístic no doni els mateixos resultats en un cas o un altre i que, per tant, unes tècniques siguin més apropiades que altres per a distintes variables i distintes zones i, per tant, sigui necessari un estudi comparatiu de diferents tècniques per a quantificar adequadament la incertesa. Una vegada identificades les millors tècniques estadístiques per a cada zona i cada variable, seria desitjable fer un conjunt de projeccions futures tan ampli com sigui possible, tant quant al nombre de models com d'escenaris de forçaments (Calbó i Rel, 2008; Calbó *et al.*, 2008).

Una de les principals crítiques a l'ús de tècniques de *downscaling* en estudis de regionalització d'escenaris de canvi climàtic és la impossibilitat de demostrar que els models són apropiats per al clima futur, amb forçaments diferents dels del període utilitzat per a inferir els models. Aquest problema és crític per als estudis de canvi climàtic en una zona com Catalunya, amb una moderada variabilitat climàtica. Es podria donar el cas que els models fossin estacionaris per a un tipus de clima, però no per a un altre. És per això que és convenient fer un estudi que estimi la significació de l'estacionarietat dels models en presència de diferents forçaments radiatius i en diferents períodes del clima actual. Per a fer-lo serà necessari dissenyar tests estadístics apropiats que permetin quantificar la variabilitat dels models respecte de la finestra temporal i els escenaris utilitzats per a lliurar-los. Lògicament també serà necessari determinar les variables de gran escala que són més robustes a aquests canvis i que, per tant, serien els predictors idonis per a aquestes tècniques, encara que no proporcionin la millor predicció del clima present.

Referències bibliogràfiques

Benestad, R. E. (2001). «Comparison between two empirical downscaling strategies». *International Journal of. Climatology*, núm. 21, pàg. 1645-1668. DOI: 10.1002/joc.703.

Benestad, R. E. (2004). «Empirical-Statistical downscaling in climate modelling». *Eos*, núm. 85, pàg. 417-422.

Calbó, J.; Rel, R. (2008). *Escenaris climàtics futurs a Catalunya.* Comunicació privada del Grup d'Experts en Canvi Climàtic de Catalunya (GECCC).

Calbó, J.; Cunillera, J.; Llasat, C.; Llebot, J. E.; Martín Vide, J. (2008). «Projeccions climàtiques per a Catalunya». A: Agència Catalana de l'Aigua (ACA) - Fundació Nova Cultura de l'Aigua (FNCA). *Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya.* Barcelona. (Aquest volum.)

Gutiérrez, J. M.; Pons, M. R. (2006). «*Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica*». *Revista de Cuaternario y Geomorfología*, núm. 20 (3-4), pàg. 15-28.

Houghton, J. (2005). «Global warming». *Reports on Progress in Physics*, núm. 68, pàg. 1343-1403. DOI: 10.1088/0034-4885/68/6/R02.

IPCC (2000). *Special report on emission scenarios (SRES).* N. Nakicenovic, R. Swart (eds.). Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit) i Nova York (Estats Units). 570 pàg.

IPCC (Intergovernmental Pannel for Climate Change) (2008). *The science of climate change 2007*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit) i Nova York (Estats Units).

Lorentz, E. N. (1965). «A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model». *Tellu*s, núm. 17, pàg. 321-333.

Lorentz, E. N. (2005). «A look at some details of the growth of initial uncertainties». *Tellus*, núm. 57A, pàg. 1-11.

Schmidt, G. A. (2007). «The physics of climate modelling», *Physics Today*, 60, núm. 1, pàg. 72.

5. Projeccions globals: el 4t informe del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el canvi climàtic

Josep Calbó
Universitat de Girona

Introducció, objectiu i metodologia

El canvi climàtic recent és un fenomen d'escala global, planetària, encara que, com s'ha vist en capítols anteriors, es reflecteix també a escala local, en aquest cas, a Catalunya. Atesa doncs la dimensió del fenomen i de les seves causes, és a dir, la introducció a l'atmosfera de gasos d'efecte d'hivernacle per part de les activitats humanes, que també tenen una extensió global, és lògic començar l'estudi de les projeccions climàtiques sobre aquesta mateixa escala. És així com presenten els resultats el Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (GIECC): primer, les projeccions climàtiques a escala global, abans de les projeccions a escala regional. Sigui com sigui, quan parlem de projeccions climàtiques hem d'entendre que es tracta d'estimacions de quin podria ser el clima d'aquí a uns decennis, i que aquestes estimacions depenen de manera important d'almenys tres factors: l'evolució futura de les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle, que al seu torn depenen de l'evolució demogràfica, socioeconòmica i tecnològica; la comprensió del sistema climàtic, que va millorant a mesura que es va desenvolupant més i més recerca, i la capacitat dels models per reproduir aquest sistema climàtic, que depèn en part de l'evolució de les tecnologies de computació.

L'objectiu d'aquest capítol és mostrar quines són les projeccions sobre el clima futur que es presenten en el darrer informe (el quart) del GIECC (sovint anomenat AR4, de l'anglès Assessment Report 4), tant a escala global com a l'escala que en el mateix informe s'anomena regional (i que es refereix a regions molt àmplies, en el nostre cas, Europa i la Mediterrània). Aquesta àrea correspon a la zona definida entre els paral·lels 30ºN i 75ºN i els meridians 10ºW i 40ºE. En algun moment es distingeix el nord d'Europa (a partir del paral·lel 48ºN) del sud i la Mediterrània (per sota d'aquest paral·lel), que és on centrarem la nostra atenció. A més de presentar les projeccions pel que fa a la temperatura, la precipitació i el nivell del mar, comentarem les incerteses associades a aquestes projeccions.

Així doncs, per elaborar aquest capítol hem procedit a una lectura detallada de dos dels capítols de l'AR4, concretament del volum corresponent al grup de treball I, sobre «Les bases físiques» [de la ciència del canvi climàtic]. Aquests dos capítols són, d'una banda, el 10 (Meehl *et al.*, 2007), que presenta les projeccions climàtiques globals, i l'11 (Christensen *et al.*, 2007), que les presenta a l'escala regional ja esmentada. També hem consultat el resum destinat als polítics («Summary for policymakers») i l'informe de síntesi («Synthesis Report») del mateix AR4.

Dades i resultats

Escenaris d'emissions

Les projeccions climàtiques s'obtenen majoritàriament com a resultat de la utilització dels models climàtics. En particular, les projeccions més fiables resulten dels models anomenats models acoblats de circulació general atmosfèrica i oceànica (AOGCM), però també s'utilitzen models simplificats del clima (SCM) i models de simulació de la Terra de complexitat intermèdia (EMIC). Les característiques, les limitacions, els avantatges i els inconvenients

de cadascun d'aquests tipus de models els hem tractat ja en capítols anteriors. Simplificant, i pel que aquí ens interessa, es poden entendre els models com a eines que integren tot el coneixement actual del sistema climàtic, de manera que, utilitzant com a dades d'entrada els factors que afecten (o «forcen») el sistema, obtenen com a resultat el clima que cal esperar en un període de temps futur. Pel que fa a aquestes dades d'entrada, que representen la principal incertesa en les projeccions climàtiques, hom parla d'escenaris d'emissions.

El principal factor a l'hora d'intentar estimar quin pot ser el clima del futur és l'evolució de les concentracions de gasos d'efecte d'hivernacle i dels aerosols d'origen antropogènic. Aquests components de l'atmosfera afecten el clima de manera molt important i la seva quantitat depèn en gran manera d'aspectes econòmics, socials i tecnològics vinculats a l'espècie humana. Altres factors que poden afectar el clima són externs al sistema (per exemple, els canvis en la radiació emesa pel Sol o l'erupció d'un volcà) i, per tant, no es poden anticipar de cap manera en les simulacions climàtiques; o són interns al sistema climàtic (per exemple, l'extensió de coberta de glaç en els pols) i, per tant, estan representats pels mecanismes de retroacció inclosos en els models climàtics. En definitiva, per fer projeccions del clima futur cal primer efectuar projeccions de les emissions de gasos i aerosols (com també d'altres factors secundaris, com poden ser els canvis dels usos del sòl) provocades per les activitats humanes.

La incertesa que hi ha en aquesta evolució futura de les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle i d'aerosols és molt gran. Les emissions depenen, entre altres factors, de l'evolució de la demografia, de l'evolució de l'economia i de l'evolució de la tecnologia. Per tant, el que es fa és assumir diverses hipòtesis relatives a aquestes evolucions, que donen lloc als anomenats «escenaris» d'emissions. Els escenaris que s'han analitzat en l'AR4, i també en els models emprats en el tercer informe del GIECC (TAR), provenen d'un informe especial (SRES, Special Report on Emission Scenarios) que es va publicar l'any 2000 (Nakicenovic i Swart, 2000). En aquest informe es desenvolupen fins a una quarantena de possibles evolucions futures, amb la característica comuna a tots els escenaris presentats que cap no inclou explícitament l'aplicació del Conveni marc pel canvi climàtic de les Nacions Unides, ni del Protocol de Kyoto. En canvi, sí que alguns dels escenaris preveuen canvis en les emissions derivats de l'aplicació de regulacions relatives a la contaminació atmosfèrica. Tots aquests escenaris es poden agrupar en quatre famílies, que corresponen a quatre línies evolutives, que s'han anomenat A1, A2, B1 i B2. Les característiques fonamentals de cadascuna d'aquestes famílies, ja presentades també al capítol 4, es descriuen a continuació:

A1. Suposa un creixement econòmic ràpid, un creixement demogràfic fins al 2050 i un decreixement subsegüent, i una ràpida introducció de noves tecnologies més eficients. Suposa també convergència entre les diverses regions del planeta, entenent que això vol dir una disminució substancial de les diferències entre les rendes *per càpita* de les diverses zones de la Terra, que s'aconseguiria simultàniament a un augment de les relacions socials i culturals entre aquestes diverses regions. En aquest grup d'escenaris se'n poden distingir tres subgrups, segons el desenvolupament tecnològic en el camp de l'energia. D'aquesta manera, hom hi troba els escenaris A1FI (ús intensiu dels combustibles fòssils), A1T (ús d'energies no basades en combustibles fòssils) i A1B (ús equilibrat de diverses fonts d'energia, incloses també les basades en combustibles fòssils però acceptant millores tecnològiques en totes).

B1. L'evolució demogràfica suposada és la mateixa que en els escenaris A1. No obstant això, aquí se suposen canvis ràpids en les estructures econòmiques, inclosa una economia basada en els serveis i la informació, la reducció en la intensitat d'ús de materials i la introducció de tecnologies netes i eficients quant a l'ús de recursos. En aquest conjunt d'escenaris, l'aproximació al desenvolupament sostenible, que tendeix també cap a l'equitat, es realitza des d'una perspectiva més aviat global.

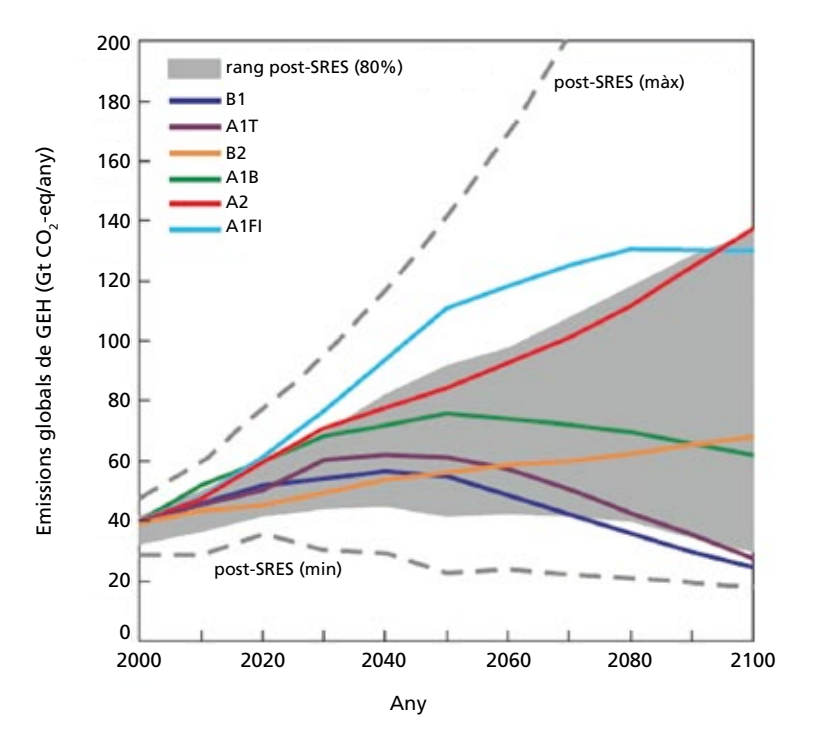
A2. Aquesta família inclou els escenaris que presenten un món heterogeni (com ara el present). És a dir, les diferències en el creixement demogràfic es mantenen, cosa que implica un creixement de població mundial sostingut. Les diferències econòmiques (renda *per capita*) i tecnològiques entre diverses regions del planeta es mantenen o augmenten.

B2. Aquí, la sostenibilitat s'aproxima sota una perspectiva més aviat local o regional. La població creix contínuament, però més lentament que en el cas A2. També el creixement econòmic i els canvis tecnològics són més lents, però, en canvi, s'orienten de més diverses maneres.

Per a cada família (o subfamília, en el cas de la línia evolutiva A1), es van generar una colla d'escenaris diferents. En tot cas, tots els escenaris, fins al total de 40, són en principi igualment plausibles i probables. L'informe no assigna una certesa més gran a cap dels escenaris. Això no obstant, el mateix informe proposa un escenari de cada família (i subfamília) que podem anomenar indicatiu o il·lustratiu, que és el que s'ha utilitzat preferentment en les anàlisis posteriors. Els valors de les emissions dels diferents escenaris indicatius, al llarg del segle XXI, es presenten en la figura 1.

Tots els escenaris previstos indiquen que les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle continuaran creixent, almenys fins a meitat del segle XXI. A més a més, cal dir que, malgrat que en alguns escenaris les emissions comencen a disminuir cap a mitjan segle, la concentració d'aquests gasos a l'atmosfera continua augmentant durant algunes dècades subsegüents, atès que, per exemple, l'escala de temps característica per assolir un nou equilibri en la concentració de CO_2 és d'uns 200 anys.

Figura 1. Les emissions anuals de gasos d'efecte d'hivernacle (com a Gt de CO_2 equivalent) estimades per als diversos escenaris d'emissions, fins a l'any 2100. [Font: IPCC Synthesis Report, 2007].



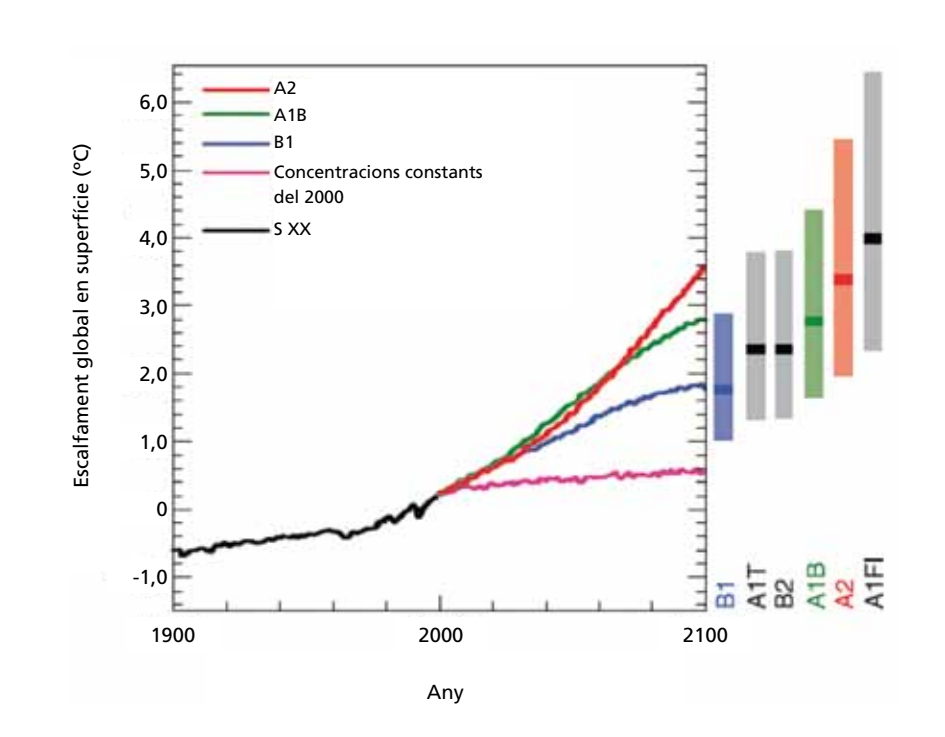
Augment de temperatura

Com a resultat de l'augment continuat de les concentracions de gasos d'efecte d'hivernacle, es continuarà produint un augment de la temperatura mitjana del planeta. Sobre aquesta afirmació ja no queden dubtes, i, si de cas, la qüestió és quantificar aquest augment de temperatura. En la figura 2 es mostren aquests augments,

per a diversos escenaris d'emissions i relatius al període 1980-1999 (cal recordar que la temperatura mitjana d'aquest període és almenys 0,5 °C més alta que la de finals del segle XIX). Cal destacar, doncs, que per a finals del segle XXI, i depenent de l'escenari d'emissions, el rang d'augment de la temperatura és entre 1,1 i 6,4 °C; la millor estimació per a l'escenari més optimista (B1) és d'1,8 °C, i la corresponent al més pessimista (A1FI), de 4 °C (vegeu també la taula 1). Cal també destacar que, per a les properes dècades, tots els escenaris indiquen augments molt similars: per exemple, per al 2040, al voltant d'1,2 °C.

Aquest augment de temperatura no serà uniforme al llarg de tota la Terra. Com a patró general, podem dir que l'augment serà molt més alt que el de la mitjana en les àrees de latituds altes de l'hemisferi nord, i més baix sobre els oceans, en particular sobre l'oceà Antàrtic. Per a la zona on es troba Catalunya, és a dir, la regió anomenada «sud d'Europa i la Mediterrània», per a un dels escenaris (l'A1B, que és a mig camí entre els més optimistes i els més pessimistes), i per a finals de segle (2080-2099), els resultats resumits de les simulacions efectuades amb 21 models globals (AOGCM) són els que es presenten en la taula 2. En concret, es dóna, per a cada estació i també per a l'any sencer, la mediana, els valors mínim i màxim (corresponents a dos models particulars) i els percentils 25 i 75 del conjunt de resultats dels models. En resum, doncs, podríem dir que, segons l'AR4, per a aquesta àmplia regió dins de la qual es troba Catalunya i per a finals de segle, cal esperar per a l'escenari A1B un augment de temperatura mitjana de 3,5 °C [3,0-4,0] (el primer valor és el de la mediana, i el rang entre claudàtors correspon al donat pels percentils 25 i 75). L'augment serà més marcat a l'estiu (4,1 °C [3,7-5,0]) que no pas a l'hivern (2,6 °C [2,5-3,3]). La darrera columna de la taula ens indica que tots els anys de finals de segle, i la majoria d'estacions, serien considerades com a «molt càlides» prenent com a referència el clima actual.

Figura 2. L'evolució de la temperatura mitjana a la superfície de la Terra al darrer segle i la projecció per a aquest segle XXI. Les barres de la dreta mostren el rang de possibles augments de temperatura a finals de segle, basant-se en diversos models AOGCM, com també en models SCM i EMIC. [Font: IPCC Synthesis Report, 2007].



Taula 1. Projeccions globals d'augment de la temperatura i del nivell del mar. Sempre són diferències entre 2080-2099 i 1980-1999. En el cas del nivell del mar, s'ha exclòs la possibilitat de canvis dinàmics ràpids en els fluxos de glaç. [Font: IPCC Synthesis Report, 2007].

Escenari d'emissions	Augment de temperatura (°C)		Augment del nivell del mar (cm)
	Millor estimació	Rang probable	
B1	1,8	1,1-2,9	18-38
A1T	2,4	1,4-3,8	20-45
B2	2,4	1,4-3,8	20-43
A1B	2,8	1,7-4,4	21-48
A2	3,4	2,0-5,4	23-51
A1FI	4,0	2,4-6,4	26-59

Taula 2. Resum de les projeccions de 21 models inclosos en l'MMD (multi-model data set), per a la regió mediterrània, escenari A1B. Diferències de temperatura (°C) entre el període 2080-2099 i el període 1980-1999. [Font: Christensen *et al.,* 2007].

Regió mediterrànea	Estació	Mín.	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Màx.	Estacions càlides (%)
	DGF	1,7	2,5	**2,6**	3,3	4,6	93
30°N, 10°W a	MAM	2,0	3,0	**3,2**	3,5	4,5	98
48°N, 40°E	JJA	2,7	3,7	**4,1**	5,0	6,5	100
	SON	2,3	2,8	**3,3**	4,0	5,2	100
	Anual	2,2	3,0	**3,5**	4,0	5,1	100

Canvis en la precipitació i en l'aigua disponible

Encara que la major part dels models indiquen un augment global de la precipitació, atenent la dispersió més gran entre models i l'heterogeneïtat espacial i temporal sens dubte més alta dels canvis de precipitació (comparat en tots dos casos amb els canvis de la temperatura), l'AR4 no dóna valors mitjans globals d'aquest augment de precipitació. A grans trets, el conjunt de models AOGCM donen augments de precipitació en la zona intertropical i en latituds altes d'ambdós hemisferis (especialment durant l'hivern) i disminucions en les àrees subtropicals.

Anant a l'escala subcontinental, per a la mateixa regió abans comentada (sud d'Europa i la Mediterrània), l'AR4 fa les estimacions de canvis de precipitació que es presenten en la taula 3. Recordem que es tracta d'estimacions per a l'escenari d'emissions A1B, i són canvis relatius (percentuals) per a finals de segle (2080-2099) respecte a l'actualitat (1980-1999). Es dóna, per a cada estació i també per a l'any sencer, la mediana calculada amb els resultats de tots els models, els valors mínim i màxim (corresponents a dos models particulars) i els percentils 25 i 75. En resum, doncs, podríem dir que cal esperar disminucions de precipitació, en mitjana anual del 12% [9-16] (es torna a donar la mediana i els percentils 25 i 75 per indicar el rang de valors que troben la majoria dels models). La disminució seria més marcada a l'estiu (24% [14-35]) que no pas a l'hivern (6% [1-10]). Segons la darrera columna, a finals de segle gairebé la meitat dels anys es considerarien com a «molt secs» prenent com a referència el clima actual, i també molts dels estius. En molt poques ocasions (penúltima columna) es donaran

situacions que actualment correspondrien a valors d'elevada pluviometria. Cal dir que la Mediterrània és una de les regions de les considerades en l'AR4 on hi ha més acord entre els models globals a estimar descensos de la precipitació al llarg de totes les estacions de l'any. Atesa la complexitat de les projeccions pel que fa a la precipitació, es fa difícil donar un valor a la seva possible variació en un horitzó més proper. De totes maneres, interpolant linealment el valor a finals de segle, tenim que pels volts de l'any 2040 la precipitació en aquesta àrea, per a l'escenari A1B que estem considerant, podria disminuir entre el 4% i el 8%.

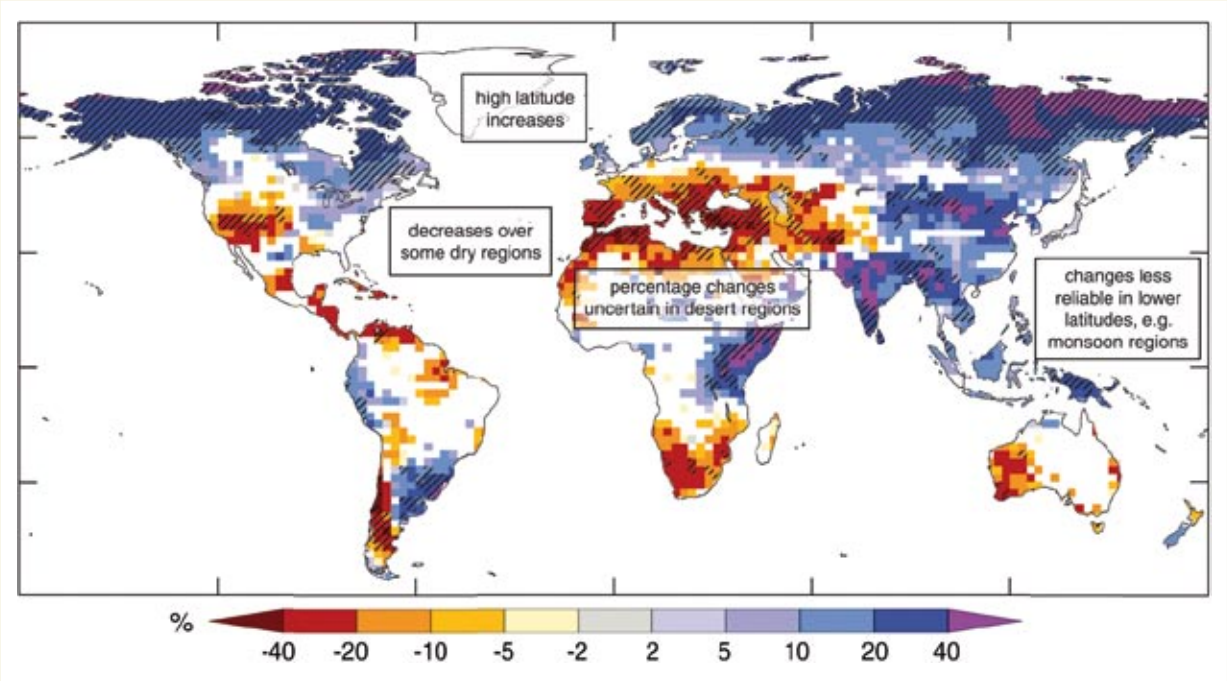
En aquest apartat, cal fer esment també dels anomenats «fenòmens extrems», que en el cas de la precipitació són bàsicament les pluges i les tempestes intenses (amb possibles inundacions associades) i els períodes de sequera. En aquest sentit, l'AR4 (a escala global) assigna una alta probabilitat que hi hagi més situacions de pluges intenses i, també, una certa probabilitat que augmenti la intensitat i la freqüència de períodes de sequera en els llocs on ja n'hi ha en el clima actual.

Taula 3. Resum de les projeccions de 21 models inclosos en l'MMD (multi-model data set), per a la regió mediterrània, escenari A1B. Diferències en la precipitació (en tant per cent) entre el període 2080-2099 i el període 1980-1999. [Font: Christensen *et al.,* 2007].

Regió mediterrànea	Estació	Mín.	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Màx.	Estacions humides (%)	Estacions seques (%)
	DGF	–16	–10	**–6**	–1	6	3	12
30ºN, 10ºW a	MAM	–24	–17	**–16**	–8	–2	1	31
48ºN, 40ºE	JJA	–53	–35	**–24**	–14	–3	1	42
	SON	–29	–15	**–12**	–9	–2	1	21
	Anual	–27	–16	**–12**	–9	–4	0	46

En el mateix informe, s'afirma amb un alt nivell de fiabilitat que algunes àrees del món (actualment semiàrides) patiran una clara disminució dels recursos hídrics. Entre aquestes àrees destaca tota la conca mediterrània. En efecte, en la figura 3 es presenten els canvis en l'escorrentia superficial (conseqüència dels canvis en la precipitació i en la temperatura, bàsicament) i és ben clar que la Mediterrània en general i la península Ibèrica en particular són regions amb un descens ben important (entre el 20% i el 40%) i significatiu. Cal dir, però, que els resultats d'escorrentia no es consideren gaire bons; en el cas d'Espanya, l'aplicació dels mateixos models al període 1960-1990 resulta en importants diferències amb els valors observats. A escala continental, el mateix AR4 confirma que, al sud d'Europa, el canvi climàtic (i en especial l'increment de temperatura i l'allargament dels períodes de sequera) reduirà la disponibilitat d'aigua. Més endavant (vegeu capítols posteriors) es detallen aquests aspectes hidrològics per mitjà d'exemples particulars estudiats a Europa, Espanya i Catalunya.

Figura 3. Canvis relatius (entre el període 2080-2099 i l'actual 1980-1999) de l'escorrentia anual (aigua disponible) a escala global, a partir dels resultats de diversos models climàtics, per a l'escenari A1B. Les zones ratllades indiquen que més del 90% dels models estan d'acord en el signe del canvi. [Font: IPCC Synthesis Report, 2007].



Augment del nivell del mar

El nivell del mar augmentarà globalment, a causa principalment de dos factors: l'expansió tèrmica de l'aigua dels oceans i la fosa de geleres i superfícies cobertes de neu. Ambdós fenòmens són conseqüència de l'augment de temperatura. En el segon cas, cal indicar que l'aportació principal vindria de geleres de muntanyes o àrees fora de l'Antàrtida i de Grenlàndia. De fet, la majoria de models indiquen que la massa de glaç augmentarà sobre el continent antàrtic (com a conseqüència d'un increment significatiu de les precipitacions en forma de neu), mentre que la fosa de glaç de Grenlàndia podria contribuir positivament a l'augment del mar, però menys que el conjunt de la resta de geleres i superfícies nevades continentals. Depenent de l'escenari d'emissions (i dels models emprats per fer les estimacions), els increments del nivell del mar mitjà per a tot el globus oscil·len entre els 18 i els 59 cm, per a finals del segle XXI, en comparació del nivell actual (vegeu la taula 1). Aquest increment no seria uniforme: en algunes àrees podria ser més de 20 cm superior (per exemple, a l'oceà Àrtic) i en altres (l'oceà Antàrtic) podria ser 20 cm inferior (Meehl *et al.*, 2007). Malauradament, en el mapa on l'AR4 reflecteix aquestes diferències regionals, el mar Mediterrani no hi és considerat. L'augment del nivell de l'oceà Atlàntic, a les nostres latituds, seria semblant a la mitjana global. Sigui com sigui, l'informe del GIECC reconeix que hi ha importants dificultats a fer una projecció de l'augment del nivell del mar, derivades de l'escassa comprensió d'alguns factors que hi influeixen. Per això només es donen rangs d'increment, i no una estimació més probable.

Incerteses

Les projeccions climàtiques que es presenten en els informes del GIECC, resumides més amunt, no estan pas exemptes d'incertesa. Tot el contrari, hi ha molts factors que introdueixen incertesa i que expliquen les diferències entre els resultats dels diversos models climàtics emprats. Alguns d'aquests factors tenen a veure amb el desconeixement de les dades i la informació necessària, mentre que altres estan associats a una comprensió limitada del funcionament d'alguns components del sistema climàtic, que afecten d'una manera especialment important les projeccions de les precipitacions futures.

Entre les incerteses associades a la manca o la insuficiència de dades, la més important és la que correspon al desconeixement de les futures emissions de gasos d'efecte d'hivernacle, d'aerosols, i de canvis futurs d'altres factors que afecten el clima (com ara el canvi d'usos del sòl). Aquesta incertesa s'ha mirat d'atacar mitjançant l'anàlisi de diversos escenaris, com ja hem comentat, però no es pot descartar que el que passi finalment estigui fora del rang previst. Per exemple, alguns estudis publicats després de l'informe SRES modifiquen a la baixa les projeccions de l'augment de població. Ara bé, en general també modifiquen a l'alça el creixement econòmic (excepte per a Amèrica Llatina, Àfrica i l'Orient Mitjà), amb la qual cosa les emissions resultants són similars. D'altra banda, l'estimació de les emissions d'aerosols i els seus precursors (inclosos el diòxid de sofre, el carboni negre i el carboni orgànic) també han millorat i, en general, s'estima que seran inferiors a les presentades en els escenaris SRES (disminuint potser el seu efecte de refredament).

Pel que fa als fenòmens que es comprenen només parcialment o qualitativament però no quantitativament, la majoria corresponen a processos de retroacció. Aquests processos poden amplificar o reduir la resposta del sistema climàtic a un determinat forçament. El principal mecanisme de retroacció positiu és el del vapor d'aigua: quan la temperatura augmenta, també ho fa el contingut de vapor a la troposfera, fet que comporta, conseqüentment, l'augment de l'efecte d'hivernacle. Aquest mecanisme s'entén millor ara que en informes anteriors del GIECC, i està més ben representat en els models climàtics. En canvi, els processos de retroacció en què intervenen els núvols (alguns dels quals influenciats també pels aerosols) continuen representant la principal font d'incertesa en les simulacions. Cal afegir aquí que les emissions antropogèniques directes de vapor d'aigua són negligibles pel que fa al forçament radiatiu que afegeixen.

Altres mecanismes semblants que encara requereixen més coneixement són, per exemple, el del cicle del carboni i el de transport de calor cap als oceans. El primer consisteix en la reducció de la capacitat d'absorció de CO_2 per part dels oceans i els ecosistemes continentals amb l'augment de temperatura. La importància d'aquesta retroacció positiva difereix molt entre els diversos models. El segon es refereix a la capacitat calorífica, la inèrcia tèrmica i el ritme amb què els oceans podran transportar la calor des de les capes superficials cap a les grans fondàries. Això influeix en les projeccions de l'escalfament global i també, lògicament, en la de l'augment del nivell del mar. En aquesta darrera projecció també hi ha la incertesa del comportament de les grans masses de glaç continental de Grenlàndia i l'Antàrtida. Precisament el comportament del glaç de Grenlàndia podria influir, en gran manera, en la circulació oceànica global, tot i que els canvis en aquest escenari no s'espera que seran importants, almenys en aquest segle.

Aquestes i altres incerteses expliquen la diversitat de valors del que s'anomena la sensibilitat climàtica en equilibri, que és una mesura de la resposta del sistema climàtic a un forçament radiatiu. Concretament, es tracta de l'augment de temperatura associat a la duplicació de la concentració de CO_2. Actualment, els diversos models indiquen que aquesta sensibilitat està molt probablement en el rang [2-4,4 °C], on la millor estimació és de 3 °C, i es descarten gairebé totalment valors inferiors a 1,5 °C. Sigui com sigui, s'observa que les divergències entre models són encara importants.

Per tant, tal com diu l'AR4, és clar que les projeccions climàtiques i els seus impactes, més enllà del 2050, depenen molt de l'escenari i del model escollit. Per això, els rangs d'augment de temperatura (per no parlar dels encara

més incerts canvis en la precipitació) són força grans. Donant la volta a l'argument, però, podem assenyalar que les projeccions per a les properes 2-4 dècades són força més robustes, gairebé independents de l'escenari d'emissions i poc dependents de la representació de les retroaccions, ja que aquestes retroaccions acostumen a tenir efecte sobre escales temporals més llargues.

Referències bibliogràfiques

Christensen, J. H.; Hewitson, B.; Busuioc, A.; Chen, A.; Gao, X.; Held, I-; Jones, R.; Koll, R. K.; Kwon, W.-T.; Laprise, R.; Magaña Rueda, V.; Mearns, L.; Menéndez, C. G.; Räisänen, J.; Rinke, A.; Sarr, A.; Whetton, P. (2007). «Regional Climate Projections». A: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L. (ed.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit) i Nova York (Estats Units).

Meehl, G. A.; Stocker, T. F.; Collins, W. D.; Friedlingstein, P.; Gaye, A. T.; Gregory, J. M.; Kitoh, A.; Knutti, R.; Murphy, J. M.; Noda, A.; Raper, S. C. B.; Watterson, I. G.; Weaver A. J.; Zhao, Z.-C. (2007). «Global Climate Projections». A: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L. (ed.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit) i Nova York (Estats Units).

Nakicenovic, N.; Swart, R. (ed.) (2000). *IPCC Special report on emission scenarios*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit) i Nova York (Estats Units). 570 pàg.

6. Projeccions regionals: d'Europa a la península Ibèrica

Josep Calbó
Universitat de Girona

Introducció, objectiu i metodologia

Hem vist en el capítol anterior que les projeccions a escala global efectuades mitjançant models de circulació general (o models més simples però ajustats a aquests models) quantifiquen l'augment de temperatura mitjana del planeta depenent de diversos escenaris d'emissions de gasos d'efecte d'hivernacle. Quan s'analitzen a escala continental, aquests models indiquen que l'augment al sud d'Europa pot ser més alt que el de la mitjana global. Les mateixes projeccions diuen que el reforçament del cicle hidrològic portarà a un augment global de la precipitació, però que aquest augment es distribuirà molt heterogèniament per la Terra, de manera que a la zona de la Mediterrània es podria produir un descens.

També hem vist que l'informe del GIECC té, lògicament, un enfocament global, en el sentit que presenta els resultats més significatius per al conjunt del planeta. En general, només disminueix l'escala de les anàlisis i les projeccions fins al que s'anomena «regional», i que de fet correspon a una escala subcontinental. De fet, també en el capítol anterior hem fet referència als resultats que es donen en aquesta escala, per a la regió que ens interessa (sud d'Europa i la Mediterrània). No obstant això, és evident que, per a l'objectiu d'aquest informe, aquesta escala és encara del tot insuficient. Així, en aquest capítol donarem resultats, pel que fa a projeccions climàtiques, per a zones de dimensions entre l'escala subcontinental i la de la península Ibèrica, aproximadament. D'aquesta manera, hom s'aproxima successivament cap a la zona d'interès, que correspon a Catalunya.

La metodologia seguida en aquest capítol es basa en la revisió bibliogràfica de treballs pertinents. D'aquesta manera, en primer lloc hi ha el capítol 11.3 del darrer informe del GIECC (Christensen *et al.*, 2007), que com hem comentat es refereix a la regió anomenada Europa i el Mediterrani (zona definida entre els paral·lels 30ºN i 75ºN i els meridians 10ºW i 40ºE). En aquest cas, hem tractat d'analitzar amb un cert detall algunes de les figures que es presenten, i també alguns resultats que es comenten, i que puguin ser aplicables a la zona euromediterrània més propera a nosaltres i, en particular, a la península Ibèrica. Tanmateix, també hem anat a buscar algunes de les fonts (articles científics) que es consideren en l'informe del GIECC, i hem estès la revisió bibliogràfica a diverses bases de dades de literatura científica. D'aquesta cerca bibliogràfica s'ha conclòs que la major part dels treballs publicats recentment (2005-2007) a l'entorn de les projeccions climàtiques a escala europea estan relacionats amb el projecte Prudence. Per això, en aquest capítol parlarem primer de la modelització regional en general i del projecte Prudence en particular, abans de passar a l'apartat de resultats.

Regionalització de les projeccions climàtiques. El projecte Prudence

Com hem comentat, els models globals són capaços de reproduir la resposta del sistema climàtic a un forçament (com ara el canvi de les concentracions de diversos gasos a l'atmosfera) i, per tant, es poden utilitzar per estimar quin pot ser el clima futur depenent de quin sigui el forçament. Això no obstant, també hem comentat que aquests models d'escala global treballen amb unes malles de càlcul on cada cel·la té unes dimensions característiques de 2-3º de latitud i longitud. D'aquesta manera, els models globals no inclouen una bona descripció de l'orografia, ni tampoc una bona definició de la línia de costa, almenys al nivell que cal quan ens interessem pel clima en àrees

regionals com ara Europa, la península Ibèrica o Catalunya. Una solució a aquest problema seria incrementar la resolució dels models globals, aspecte, però, que està limitat per la potència de càlcul disponible. Mentre els models d'abast global no siguin capaços de produir resultats correctes sobre una malla d'alta resolució (50 km o menys) en un temps raonable, serà necessària alguna tècnica de «regionalització» o de disminució d'escala (*downscaling*), és a dir, alguna metodologia per obtenir més detall espacial de les projeccions climàtiques. Hi ha diverses opcions, però cal remarcar que totes depenen d'alguna manera o altra dels resultats dels models globals, que són en realitat els que projecten l'evolució del clima cap al futur, mentre que els mètodes de regionalització «només» converteixen els resultats d'una escala gran a una escala inferior, de més detall.

Tal com es comenta en capítols anteriors, bàsicament hi ha dues tècniques de regionalització, i se n'utilitzen altres que són variacions o combinacions d'aquestes dues. La primera és la regionalització anomenada dinàmica, que consisteix en l'ús de models climàtics regionals (RCM) niats en models globals. La segona s'anomena regionalització estadística, i consisteix a utilitzar regressions estadístiques multivariables entre les variables climàtiques en un punt concret del territori i els valors que s'obtenen en una o més cel·les d'un model global. En alguns casos, les relacions no s'estableixen entre un punt i els valors d'una cel·la, sinó entre un punt i algun índex que recull informació sinòptica; corresponen, per tant, a diverses cel·les del model global. Aquests índexs sovint es refereixen al comportament d'algun patró sinòptic de baixa freqüència o a algun mecanisme de teleconnexió, com ara l'oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO) o l'oscil·lació àrtica (AO), l'oscil·lació del Pacífic Sud vinculada al fenomen d'*El Niño* (ENSO), o l'oscil·lació de la Mediterrània Occidental (WeMO; López-Bustins *et al.*, 2007).

Així doncs, una determinada projecció climàtica d'abast regional serà el resultat de combinar: *a*) un escenari d'emissions; *b*) la sortida d'un model climàtic global forçat amb l'escenari d'emissions escollit, i *c*) una tècnica de regionalització. És, evident, doncs que el nombre de projeccions que es poden obtenir és molt elevat, i aquest és un dels motius que van justificar el desenvolupament del projecte Prudence.

Prudence («Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining european climate change risks and effects», és a dir, «Predicció d'escenaris regionals i incerteses per definir riscos i efectes associats al canvi climàtic a Europa») és un projecte que va involucrar, entre el 2002 i el 2005, més de vint grups de recerca europeus, amb l'objectiu principal de proporcionar escenaris climàtics d'alta resolució, per a Europa i per al final del segle XXI, mitjançant metodologies de regionalització dinàmica, i explorar les incerteses d'aquestes projeccions (*prudence.dmi.dk*). La Unió Europea va finançar aquest projecte (i dos projectes més estretament vinculats amb aquest projecte, els projectes Stardex i Mice), que han esdevingut exemples per a altres projectes similars arreu del món, i un pas molt important en la recerca climàtica a Europa.

Específicament, el projecte va considerar quatre fonts d'incertesa: *a*) incertesa en el mostreig, en el sentit que el clima simulat s'estima com una mitjana sobre un nombre limitat d'anys (30); *b*) incertesa en els models regionals, per raó que els diversos RCM utilitzen diferents tècniques de solució numèrica de les equacions i diferents parametritzacions per representar els fenòmens d'una escala inferior a la malla de treball; *c*) incertesa en les emissions, a causa de l'elecció que s'ha de fer entre els diversos escenaris d'emissions, i *d*) incertesa en les condicions de contorn, perquè els diversos models globals també donen resultats (que s'utilitzaran com a contorns) diferents entre si.

Els experiments duts a terme a Prudence consistien en una simulació de «control» per representar el període 1961-1990 (que servia per avaluar la capacitat dels models per reproduir el clima, és a dir, per validar-los) i en una altra simulació d'un escenari futur corresponent al període 2071-2100, ambdues efectuades amb diversos models climàtics regionals. La majoria de les simulacions es van fer per a l'escenari A2 i utilitzant la sortida del model HadAM3H (només atmosfèric, resolució 150 km) per establir les condicions de contorn, de manera que es va poder avaluar detalladament les diferències entre els models regionals utilitzats. El model HadAM3H, al seu torn, es va inicialitzar amb les sortides del model global (acoblat atmosfera-oceà) HadCM3. També es van

fer altres simulacions amb l'escenari B2, i també emprant altres models globals (ECHAM4/OPYC3) o diverses execucions del mateix model global (Déqué *et al.*, 2005).

Els models regionals de clima utilitzats per Prudence van ser els següents:

- Hirham: DMI (Danish Meteorological Institute), Dinamarca
- Arpege: CNRM (MeteoFrance), França
- HadRM: HC (Hadley Centre, MetOffice), Regne Unit
- CHRM: ETH (Swiss Federal Institute of Technology), Suïssa
- CLM: GKSS (Institute for Coastal Research), Alemanya
- Remo: MPIM (Max Planck Institute for Meteorology), Alemanya
- RCAO: SMHI (Rossby Centre, Swedish Meteorology and Hydrology Institute), Suècia
- Promes: UCM (Universidad Complutense de Madrid), Espanya
- RegCM: ICTP (International Centre for Theoretical Physics), Itàlia
- Racmo: KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute), Països Baixos

Tots aquests models es van executar amb resolucions a l'entorn dels 50 km, amb un cas una mica especial, el model Arpege, que de fet es tracta d'un model atmosfèric d'abast global que es va emprar amb alta resolució sobre la zona objecte de l'estudi. La zona sobre la qual es van aplicar aquests models és diferent per a cadascun, encara que en tots els casos cobreix tots els països d'Europa.

Resultats

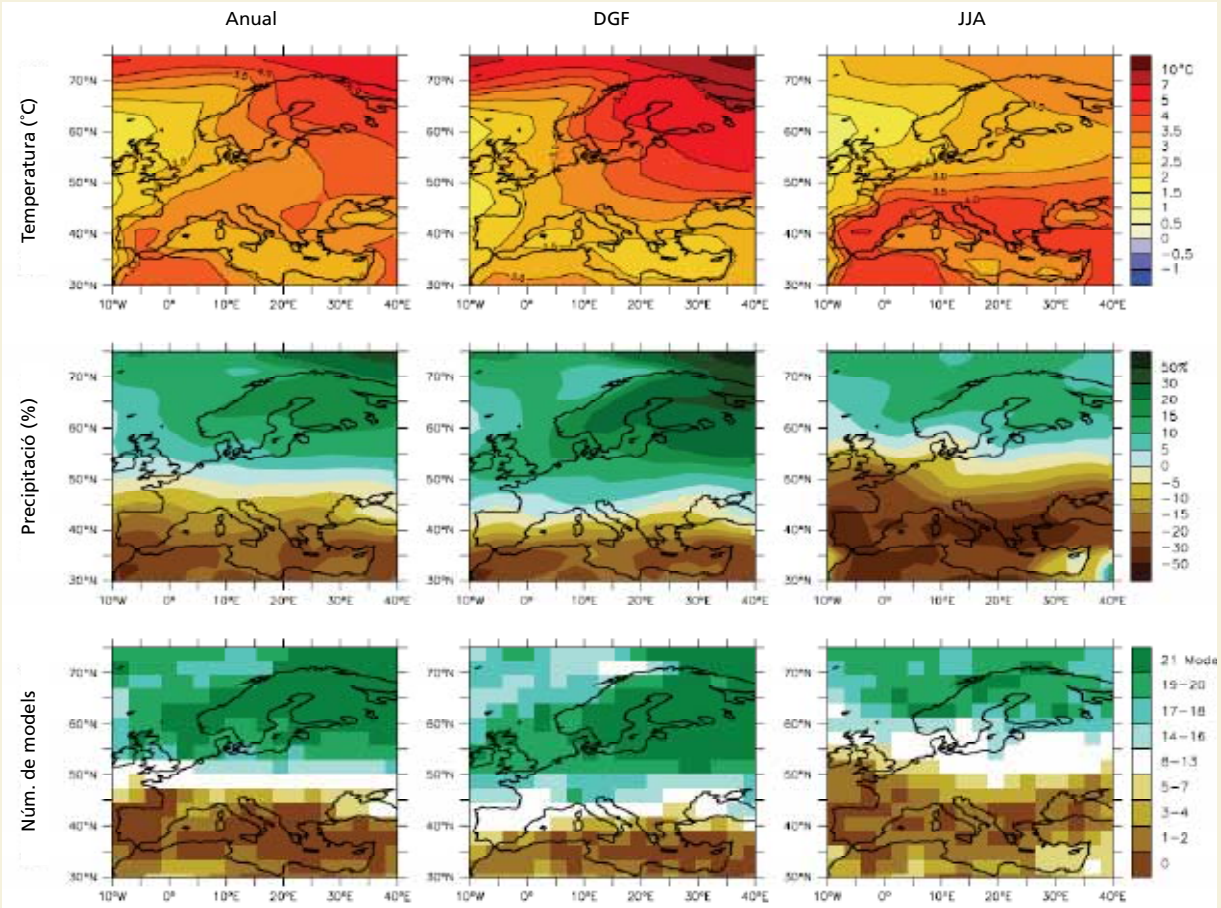
AR4 GIECC. Europa i el Mediterrani

La figura 1 mostra els canvis previstos de la temperatura i la precipitació, per a la regió Europa i Mediterrània, segons els resultats de 21 models globals, inclosos en el Programa de diagnòstic i intercomparació de models climàtics (PCMDI), els resultats del qual donen lloc al que s'anomena «multi-model data set» (MMD). Els resultats corresponen a un escenari d'emissions A1B, es donen per a finals de segle (2080-2099) amb relació a finals del segle passat (1980-1999) i es calculen com la mitjana de les variacions donades per tots els models. Es donen, igualment, per al període anual i també per als mesos d'estiu (juny, juliol i agost) i d'hivern (desembre, gener i febrer). Pel que fa a la temperatura, observem que, per a la península Ibèrica, la temperatura mitjana anual podria augmentar entre 2,5 i poc més de 3,5 °C. Aquesta és una estimació equivalent a la que es fa per al conjunt del globus i inferior a la de la resta d'Europa. Tot Catalunya es troba dins de la línia que delimita un augment entre 2,5 i 3 °C. Estacionalment, el comportament és ben diferenciat. A l'hivern, el patró s'assembla al de l'any sencer, amb augments a la península Ibèrica (i la Mediterrània en general) inferiors (2,5 °C) als de l'Europa nord-oriental. En canvi, a l'estiu, els augments de temperatura a la zona mediterrània són clarament superiors als de la resta del continent i assoleixen valors superiors als 4 °C per a bona part de la península Ibèrica.

Pel que fa a la precipitació, hi ha un marcat gradient latitudinal en la zona analitzada. D'aquesta manera, al sud de la Mediterrània (inclòs el sud de la península Ibèrica), el descens de la precipitació anual, a partir de la mitjana dels 21 models, pot ser superior al 20%. En canvi, al nord d'Europa es projecten augments de la mateixa magnitud. A Catalunya (sempre recordant que les estimacions parteixen de resultats de models globals i, per tant, de baixa resolució espacial), s'esperarien disminucions de la precipitació d'entre el 10% i el 15%, en base anual. Les diferències latitudinals es mantenen en les estacions considerades. A l'estiu, el descens de la precipitació

seria encara més notable a la península Ibèrica (de més del 30%, arribant fins i tot al 50%); en canvi, a l'hivern bona part de la península es trobaria en una zona de poc canvi (0 a -5%). Mentre que per a la temperatura el senyal de tots els models és coincident (indicant augments), cal comentar que per a la precipitació no succeeix el mateix, si més no en algunes àrees. Aleshores, per tal d'avaluar la robustesa de les projeccions de precipitació, s'afegeix també en la figura 1 una representació del nombre de models que indiquen variacions de precipitació en un mateix sentit. D'aquesta manera, veiem que en base anual (i també per a l'estiu) tots els models (excepte un màxim de quatre en algun punt molt concret) estan d'acord a indicar disminucions de precipitació al sud d'Europa, inclosa la península Ibèrica. En canvi, per a l'hivern hi ha aproximadament el mateix nombre de models que indiquen disminució i augment de precipitació i, per això, podem dir que per a aquesta estació el resultat és més incert.

Figura 1. Canvis de la temperatura (a dalt) i de la precipitació (al mig) a Europa, a partir de les simulacions de 21 models globals, per a l'escenari A1B. Diferències entre 2080-2099 i 1980-1999. D'esquerra a dreta, per la mitjana anual d'hivern i d'estiu. A baix, avaluació de la incertesa en la projecció dels canvis de precipitació, indicant el nombre de models que donen augment d'aquesta precipitació. [Font: Christensen *et al.*, 2007].



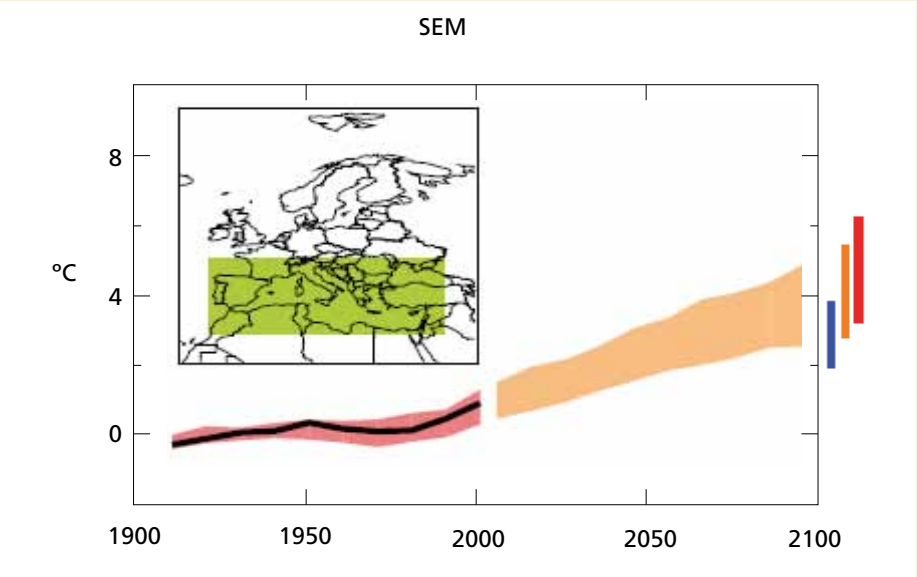
Basant-se en el que es mostra en la figura 1, però també en molts altres resultats (per exemple, altres escenaris, o de l'ús de models regionals com ara els emprats en el projecte Prudence), l'informe del GIECC (Christensen *et al.*, 2007) fa algunes afirmacions força clares amb relació als canvis que hom pot esperar per a Europa, la

Mediterrània o la península Ibèrica. D'aquesta manera, i deixant de banda les qüestions més òbvies, com ara l'augment de temperatura una mica superior a la mitjana global, s'indica que:

- És molt probable que la precipitació mitjana anual disminueixi a la major part de l'àrea mediterrània.
- És molt probable que l'estació de neu (època en la qual hi ha nevades o la neu roman sobre el terra) s'escurci a la major part d'Europa. Igualment, és molt probable que disminueixi el gruix de neu acumulada als hiverns. Malgrat tot, això es matisa lleugerament en indicar que l'augment previst de precipitació al nord d'Europa podria compensar en part l'efecte que l'augment de temperatura té sobre les nevades i la fosa de la neu.
- És molt probable que augmenti la durada i la freqüència de les sequeres, enteses com a dies consecutius sense precipitació, a tota la zona mediterrània.
- És probable que a la península Ibèrica disminueixin els episodis de precipitació intensa (entenent que aquests episodis acumularan menys precipitació o que s'allargarà el període de retorn de valors alts). Això no obstant, només es dóna una referència bibliogràfica per justificar aquest resultat (Frei *et al.*, 2006).
- És probable que s'incrementi el risc de sequera hidrològica (entesa com els resultats dels canvis de precipitació i d'evaporació), en particular a l'estiu al sud d'Europa i la Mediterrània.

Encara amb relació als resultats que es donen en l'informe del GIECC, és interessant comentar també la figura 2, en la qual es presenta l'evolució de la temperatura per a la zona del sud d'Europa i la Mediterrània, al llarg del segle XXI. Es destaca l'escenari A1B, però també es donen els rangs de les projeccions per als escenaris B1 i A2. D'aquesta manera, observem que l'evolució de la temperatura s'espera que serà constant i continuada. Per tant, podríem dir que, pel que fa a les temperatures, els augments per a mitjan segle serien —molt aproximadament— la meitat que els esperats a finals de segle. En canvi, no és evident que es pugui fer la mateixa extrapolació per a les precipitacions.

Figura 2. Anomalies de temperatura (línia negra) i les projeccions dels canvis de temperatura per al segle XXI, en aquest cas respecte a la mitjana del 1901 al 1950. La zona ombrejada de taronja correspon al rang de resultats dels 21 models de l'MMD per a l'escenari A1B. A la dreta de la figura, les barres blava i vermella corresponen als augments per a finals de segle corresponents als escenaris B1 i A2, respectivament. [Font: Christensen *et al.*, 2007].

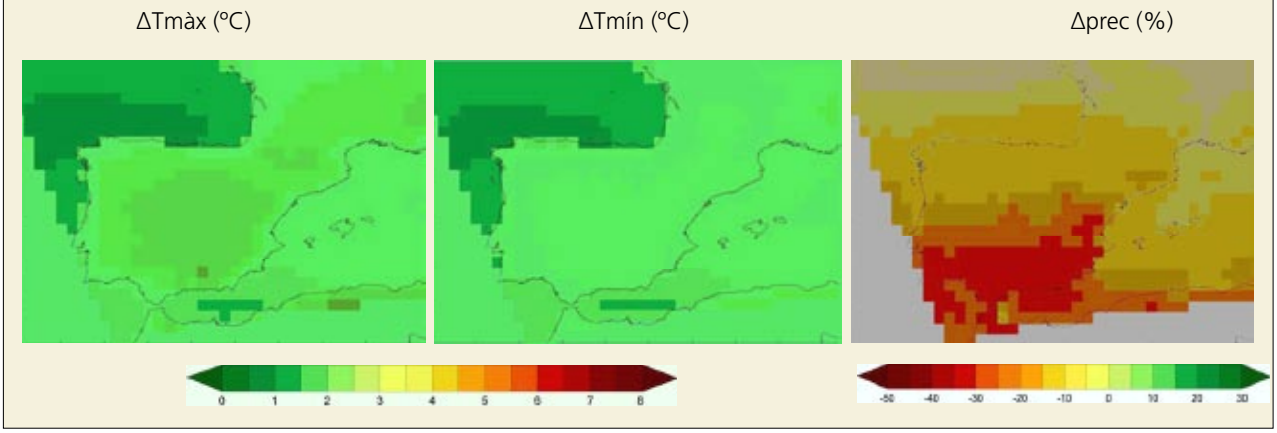


Prudence. La península Ibèrica

El projecte Prudence ha produït una gran quantitat de resultats, alguns dels quals es poden obtenir directament del seu web. En efecte, allà hi ha bases de dades accessibles amb els valors de diverses variables tal com han estat calculats pels diversos models regionals i per als diversos escenaris. Tanmateix, no és objecte d'aquest treball analitzar aquestes dades, sinó que ens limitarem a presentar els resultats ja resumits per altres autors o publicacions. Cal dir que el nombre de publicacions científiques a què ha donat lloc el projecte és també molt important, i aquí no en farem pas una repassada exhaustiva. En aquest apartat donarem alguns resultats obtinguts per Prudence a escala de la península Ibèrica, Espanya o una part d'Espanya, mentre que en el capítol següent disminuirem l'escala per tal de centrar les projeccions en la zona d'interès, Catalunya.

La figura 3 mostra els canvis previstos (el 2071-2100 respecte del 1961-1990) en la temperatura màxima mitjana anual, la temperatura mínima mitjana anual i la precipitació anual. Els tres mapes són el resultat de fer la mitjana dels resultats dels models regionals de Prudence, sempre forçats amb el model global HadAM3H i per a l'escenari d'emissions A2 (INM, 2007). Segons aquestes gràfiques, la temperatura màxima augmentaria entre 3 i 4,5 ºC i la temperatura mínima ho faria entre 2,5 i 3,5 ºC. Aquests resultats estan en la línia dels que hem comentat en l'apartat anterior, malgrat que l'escenari d'emissions A2 és més pessimista (preveu un augment més important de les concentracions de CO_2) que l'A1B. Entre altres motius, aquesta aparent inconsistència s'explica pel fet que aquests resultats s'han obtingut a partir d'un sol model global, a diferència dels anteriors. Pel que fa a la precipitació, la reducció es trobaria entre el 10% i el 35%, que també són valors que recorden els de l'apartat anterior, però que en aquest cas sí que són una mica més extrems, en coherència amb un escenari (A2) amb més gasos d'efecte d'hivernacle.

Figura 3. Variació de temperatura màxima, de temperatura mínima i de precipitació per a l'escenari A2, entre finals de segle XXI i el període de referència 1961-1990. Mitjana dels resultats dels models regionals del projecte Prudence. [Font: INM, 2007].



D'altra banda, en l'informe final del projecte Prudence (Christensen, 2005) es presenten uns valors, relatius als canvis de temperatura i precipitació, que intenten resumir els resultats dels experiments duts a terme en el projecte, per països (o per parts de països quan aquests països són grans). La informació es presenta en base anual i també per a les quatre estacions. Per tal de quantificar la incertesa de les projeccions es donen diverses estadístiques; entre altres, la mitjana, la desviació estàndard, la mediana i els percentils 5 i 95 dels canvis projectats. A partir d'aquesta informació s'ha elaborat la taula 1, que correspon a la part nord d'Espanya (no es diu explícitament, però probablement correspon a la part al nord del paral·lel 40ºN). Malgrat que aquesta zona

és la que inclou Catalunya, també inclou la costa cantàbrica, que té un clima clarament diferent (en particular, les situacions sinòptiques que originen les precipitacions a la costa mediterrània i a la cantàbrica són ben diferents). D'una manera un pèl curiosa, els valors es donen relatius a un augment de temperatura global d'1 °C. Això, que per a la temperatura pot semblar força raonable, és una mica sorprenent per a la precipitació, ja que no respon linealment als augments de temperatura.

Taula 1. Variacions de temperatura i precipitació entre finals de segle XXI i el període de referència 1961-1990, per a l'escenari A2, com a resultat dels models regionals emprats per Prudence, per a la zona nord d'Espanya. Els resultats són relatius a un augment de la temperatura global d'1 °C. [Font: Christensen *et al.*, 2007].

	Temperatura (°C)					Precipitació (%)				
	Any	DGF	MAM	JJA	SON	Any	DGF	MAM	JJA	SON
Mitjana	1,3	1,0	1,1	1,9	1,4	–5,7	1,9	–8,6	–14,4	–5,2
Desv. est.	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	1,6	2,0	2,7	4,2	2,7
Mediana	1,3	1,0	1,0	1,8	1,3	–5,7	1,9	–8,5	–13,9	–5,1
p95	2,0	1,6	1,8	2,7	2,0	–3,1	5,2	–4,1	–7,4	–0,7
p5	0,7	0,4	0,5	1,1	0,7	–8,4	–1,4	–13,1	–21,4	–9,7

Sense intentar utilitzar la taula 1 per determinar valors absoluts dels canvis projectats, hom pot analitzar els nombres de manera relativa. Així, i sempre segons aquests resultats (recordem, models regionals que utilitzen un model global concret com a condició de contorn), tenim que aquesta regió de la península Ibèrica s'escalfarà més que la mitjana global, i més a l'estiu que no pas a l'hivern. La precipitació disminuirà en mitjana anual, a causa de descensos importants a l'estiu i la primavera, menys importants a la tardor, i a augments poc significatius a l'hivern.

Comentaris: incerteses i oportunitats

Els models climàtics globals del tipus AOGCM treballen amb unes malles que tenen unes cel·les d'unes dimensions horitzontals properes als 300 km. Aquestes dimensions impedeixen que els resultats d'aquests models siguin útils, de manera directa, per fer projeccions climàtiques en regions com ara Catalunya. Ara bé, sí que és possible analitzar els resultats de models globals sobre regions de dimensions subcontinentals (longitud característica d'alguns milers de quilòmetres). D'aquesta manera, el quart informe del GIECC (igual que feia el tercer) dóna resultats per a diverses regions del globus, una de les quals és Europa i la Mediterrània. Els resultats per a aquesta regió no són tan robustos com els que donen els models per al conjunt del globus, en el sentit que els diversos models donen resultats més semblants entre si quan se'n fa la mitjana globalment que quan es consideren per a una regió. No obstant això, pel que fa a la temperatura, l'acord entre els models globals, fins i tot a aquesta escala regional, és prou notable, mentre que per a la precipitació hi ha més incertesa, però malgrat tot els trets principals dels canvis de precipitació, que hem comentat més amunt, sembla que estan força ben establerts.

Per tal de superar la limitació de la mida de les malles de treball dels models globals, una primera (i òbvia) possibilitat seria treballar amb malles que continguessin cel·les més petites. Hi ha, en efecte, diverses iniciatives en aquest sentit, però la potència de càlcul és encara un factor limitador a l'hora d'estendre l'ús de models globals d'alta resolució. L'exemple més conegut és el del model japonès, que ha estat executat sobre malles de menys de 50 km en un ordinador especialment dissenyat per a aquest efecte, anomenat Earth Simulator. Més a prop

nostre, al Barcelona Supercomputing Center s'està treballant també sobre la possibilitat d'augmentar la resolució d'un model global.

Una opció alternativa és la dels anomenats models climàtics regionals, que utilitzen resolucions relativament altes (20-50 km) per simular l'evolució de l'atmosfera d'una regió de la Terra, emprant com a condicions de contorn la sortida d'algun model global. Tanmateix, això fa augmentar els factors que generen incertesa: als ja coneguts relatius a l'escenari d'emissions i als models globals, s'hi afegeix ara el de la diversitat de models regionals, cadascun amb les seves pròpies parametritzacions i aproximacions. Per exemple, el projecte Prudence ha mostrat que els diversos models regionals emprats, encara que forçats amb un sol escenari i un sol model global, donen resultats diferents entre si. Això, d'una banda, és interessant, ja que permet quantificar la incertesa, però d'altra banda obre la porta a un gran nombre de possibles simulacions per desenvolupar, combinant escenaris, models globals i models regionals.

Aquest és, explicat d'una manera senzilla, el rerefons del projecte europeu Ensembles, que es desenvolupa entre el 2005 i el 2009. En efecte, aquest projecte (*www.ensembles-eu.org*) està desenvolupant un sistema de predicció climàtica basat en la predicció per conjunts (*ensemble*) que es pugui utilitzar en escales temporals que vagin de l'estacional fins a la decadal i la secular, i en escales espacials que vagin de la global a la local. El sistema s'utilitzarà per generar prediccions probabilístiques del clima futur. Aquesta metodologia de predicció per conjunts s'ha imposat recentment per a la predicció probabilística en els entorns meteorològic i climàtic. L'objectiu final del projecte és acotar les incerteses de les prediccions seculars de canvi climàtic mitjançant la integració amb diferents escenaris d'emissió, diferents models globals, diferents models regionals i, també, diferents tècniques estadístiques de regionalització, com també proporcionar mètodes per pesar i combinar els diferents resultats en una única predicció probabilística. Així doncs, cal esperar que els resultats d'aquest projecte representaran un salt remarcable en l'evolució de les projeccions climàtiques.

Referències bibliogràfiques

Christensen, J. H. (coord.) (2005). *Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeaN Climate change risks and Effects (Prudence) Final Report*. Disponible a *http://prudence.dmi.dk/*.

Christensen, J. H.; Hewitson, B.; Busuioc, A.; Chen, A.; Gao, X.; Held, I.; Jones, R.; Koll, R. K.; Kwon, W.-T.; Laprise, R.; Magaña Rueda, V.; Mearns, L.; Menéndez, C. G.; Räisänen, J.; Rinke, A.; Sarr, A.; Whetton, P. (2007). «Regional Climate Projections». A: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L. (ed.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit) i Nova York (Estats Units).

Déqué, M.; Jones, R. G.; Wild, M.; Giorgi, F.; Christensen, J. H.; Hassell, D. C.; Vidale, P. L.; Rockel, B.; Jacob, D.; Kjellström, E.; De Castro, M.; Kucharski, F.; Van den Hurk, B. (2005). «Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from Prudence results». *Climate Dynamics*, núm. 25, pàg. 653-670. DOI: 10.1007/s00382-005-0052-1.

Frei, C.; Schöll, R.; Fukutome, S.; Schmidli, J.; Vidale, P. L. (2006). «Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models». *Journal of Geophysical Research*, núm. 111, D06105. DOI: 10.1029/2005JD005965.

Institut Nacional de Meteorologia, INM (2007). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. INM, Madrid.

López-Bustins, J.-A.; Martín-Vide, J.; Sánchez-Lorenzo, A. (2007). «Iberia winter rainfall trends based upon changes in teleconnection and circulation patterns». *Global and Planetary Change*. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.002.

7. Projeccions climàtiques per a Catalunya

Josep Calbó, Universitat de Girona
Jordi Cunillera, Servei Meteorològic de Catalunya
Carme Llasat, Universitat de Barcelona
Josep Enric Llebot, Universitat Autònoma de Barcelona
Javier Martín, Universitat de Barcelona

Introducció, objectiu i metodologia

Fins ara, s'ha comentat en capítols anteriors d'aquesta mateixa secció quines són les projeccions climàtiques que es fan, en general, per a finals del segle XXI, amb els models globals del tipus AOGCM (inclosos en el quart informe del GIECC) o amb els models regionals (tal com s'han utilitzat en el projecte europeu Prudence). Aquestes projeccions marquen clarament quines són les tendències a escala global i, també, per a grans regions d'extensió subcontinental. Fins i tot, en l'anàlisi dels resultats del projecte Prudence s'ha pogut arribar a donar tendències a escala de la península Ibèrica. Aquests resultats (i les incerteses que comporten, que també hem comentat) són encara insuficients, en general, per als gestors i els responsables de prendre decisions en els àmbits en què el clima és un factor rellevant (la gestió de l'aigua, l'agricultura, el turisme, l'energia, etc.), en particular quan tenen competències sobre una àrea territorial relativament petita i geogràficament i climàticament diversa com és Catalunya. Una altra qüestió que també sorgeix és la de l'horitzó temporal: si bé és interessant tenir projeccions per a finals de segle, sembla més convenient, amb vista a la presa de decisions, tenir projeccions per a un termini més proper (20-50 anys).

Per tant, aquest capítol té com a objectiu donar respostes a aquestes qüestions pendents: d'una banda, descriure projeccions climàtiques més detallades per a Catalunya i, d'altra banda, donar aquestes projeccions per a escenaris temporals més immediats.

Atès que no es tractava en aquest informe de generar nous resultats com a conseqüència de nova activitat investigadora, la metodologia seguida ha estat, com en els capítols anteriors, la revisió bibliogràfica i documental d'articles i informes publicats fins avui. En concret, el principal document que s'ha utilitzat és l'informe titulat *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España* (INM, 2007), que ha estat elaborat recentment per l'Institut Nacional de Meteorologia espanyol (actualment, Agència Estatal de Meteorologia, AEMET). Les principals tècniques de regionalització i els resultats més destacats d'aquest document es resumiran en els propers apartats. També hem emprat altres articles publicats en revistes científiques, en molts casos derivats del projecte Prudence, que permeten deduir algun resultat aplicable a Catalunya.

Finalment, s'ha fet l'esforç d'integrar tota la informació obtinguda sobre les projeccions climàtiques a diferents escales, per resumir-la en un quadre que indiqui quins són els rangs esperats d'augment de la temperatura i de canvis de la precipitació, per a Catalunya i en tres àrees diferenciades (litoral, interior i Pirineu). En el mateix quadre donem valors corresponents a finals del segle XXI i, també, per al primer terç d'aquest segle. Avancem ja ara que l'elaboració d'aquest resum no ha seguit una metodologia quantitativa o estadística, sinó que s'ha fet integrant de manera qualitativa (i, per tant, no exempta d'una certa subjectivitat) tot el coneixement dels autors, que correspon en principi a l'estat de la qüestió en cercles científics.

El document d'escenaris climàtics a Espanya: mètodes utilitzats

L'estudi desenvolupat per l'Institut Nacional de Meteorologia (INM, i actual Agència Estatal de Meteorologia) per tal d'obtenir uns escenaris climàtics detallats per a Espanya es basa en l'ús de diverses tècniques de regionalització. D'una banda, i de manera semblant a com hem fet en els capítols 5 i 6 d'aquest informe (però amb un mètode més quantitatiu i estructurat, el de generació d'escenaris Magicc-Scengen), analitzem directament els resultats dels models globals. D'altra banda, i com també hem mostrat en el capítol 6, fem servir els resultats de tots els models regionals del projecte Prudence. Finalment, i com a novetat interessant per obtenir l'alta resolució espacial desitjada, emprem tres tècniques de disminució d'escala amb base estadística. Dues són mètodes que incorporen el coneixement dinàmic de l'atmosfera (mètodes d'anàlegs), mentre que la tercera és un mètode purament empíric. En tots els casos, la idea és, donada una situació meteorològica futura (tal com resulta dels models climàtics globals, és a dir, amb baixa resolució espacial), predir quin seria el comportament local del temps meteorològic i, concretament, d'algunes variables d'interès. D'aquesta manera, del model global n'extraurem uns «predictors» que utilitzarem per avaluar uns «predictands». Aquests darrers, en el cas de l'informe que estem resumint, són les temperatures màxima i mínima diària i la precipitació diària. Tots aquests mètodes estadístics requereixen una bona base de dades de les variables meteorològiques en el passat, tant pel que fa a les estacions (punts concrets en el territori) com els camps meteorològics a escala sinòptica. En el cas que ens ocupa, les primeres estan garantides pel mateix INM, mentre que els segons s'obtenen de les reanàlisis que, provinents de diverses institucions internacionals, estan a la disposició dels investigadors. L'altra assumpció que fem en la base d'aquests mètodes estadístics és que les relacions que hi havia en el passat es mantindran igualment vàlides en un clima futur.

Els mètodes dels anàlegs es basen en la cerca dels dies (passats) en què la situació sinòptica va ser més semblant a la del dia (futur) per al qual es vol predir els valors de les temperatures i la precipitació. Per a això, s'utilitzen diferents criteris objectius de proximitat que, aplicats a la base de dades històrica, permeten considerar que una situació és meteorològicament similar, cosa que fa necessari definir les variables per a les quals es buscarà la semblança. Un cop s'han seleccionat els dies més semblants (anàlegs), es prenen els valors que va tenir la variable que es vol predir per a aquells dies, i, d'aquesta manera, es pot tenir una distribució de freqüència que es projecta com una distribució de probabilitats dels valors de la variable en el dia futur. Algunes vegades es treballa amb la mitjana de tots els valors obtinguts per a cada punt, estació meteorològica o regió, a fi d'obtenir un resultat aparentment determinista.

En el cas de l'informe de l'INM, el primer mètode utilitzat és l'anomenat mètode d'anàlegs FIC (Fundación para la Investigación del Clima). La definició de «situació semblant» es fa basant-se en els camps del vent geostròfic a 1.000 i 500 hPa (que descriuen força bé la situació dinàmica en superfície i a nivells mitjans de la troposfera). Després, s'utilitzen els dies anàlegs per determinar directament el valor de la variable que es vol predir (fent la mitjana de tots els valors corresponents a tots els dies), o es busca una relació, lineal, entre algun índex que defineixi la situació sinòptica i el predictand. La primera opció es fa servir per a la precipitació, mentre que la segona s'aplica a les temperatures màxima i mínima. Les tres magnituds s'avaluen pel que fa a l'estació meteorològica, en més de 300 estacions termomètriques i més de 2.300 estacions pluviomètriques. Aquest mètode utilitza els camps de la reanàlisi del Centre Europeu de Predicció a Termini Mitjà (ERA-40), i s'ha aplicat amb els resultats de dos models globals AOGCM (CGCM2 i ECHAM4) i un d'atmosfèric (HadAM3), sempre per a l'escenari d'emissions A2 i per a tres horitzons temporals (2011-2040, 2041-2070 i 2071-2100).

El segon mètode pren el nom de mètode d'anàlegs INM, ja que va ser aplicat pel mateix Institut Nacional de Meteorologia, i és força semblant al que hem descrit més amunt. La diferència principal és que no es treballa a escala d'estació meteorològica, sinó que, per tal de cobrir tot el territori, primer s'han interpolat els valors sobre una malla, que cobreix tot Espanya, amb cel·les d'uns 50 km de costat. Altres diferències són que s'utilitza la

reanàlisi nord-americana NCAR (National Center for Atmospheric Research) com a base de dades històrica pel que fa als camps sinòptics, i que la semblança entre les situacions es defineix no tan sols a partir dels camps del vent geostròfic a dos nivells, sinó també utilitzant altres índexs representatius de la situació. Aquest mètode es va aplicar amb els mateixos models globals i escenaris que l'anterior.

Finalment, un tercer mètode consisteix en una pura regressió lineal múltiple. El mètode pren el nom de SDSM (Statistical DownScaling Method). Es tracta d'establir relacions empíriques entre els predictands a escala local i els predictors d'escala regional, tal com resulten dels models de circulació general. Com en els casos anteriors, s'utilitzen dades històriques (en aquest cas, de les estacions de l'INM i de la reanàlisi de l'NCAR) per calibrar les relacions, que després s'apliquen amb els resultats del model HadCM3 per a l'escenari A2. Una explicació molt més detallada dels tres mètodes es troba en l'informe ja esmentat (INM, 2007) i les referències que s'hi donen.

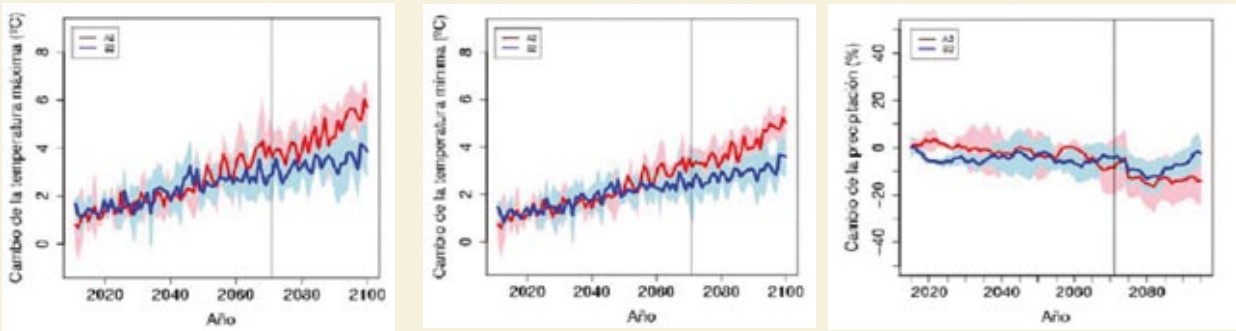
Resultats

Augment de la temperatura a Catalunya

En la figura 1, extreta d'un annex de l'informe INM (2007), es presenta l'evolució prevista de les temperatures màxima i mínima durant el segle XXI a Catalunya, basant-se en els resultats de les diverses tècniques de regionalització i disminució d'escala, incloent-hi a partir de l'any 2071 els resultats del projecte Prudence. A partir d'aquestes figures, hem elaborat la taula 1 amb els valors corresponents als períodes 2011-2040 i 2071-2100, en la qual hem afegit els increments previstos per a la temperatura mitjana, considerant que es pot estimar com la mitjana entre les temperatures màxima i mínima. Encara que aquesta informació és prou interessant, en el sentit que ja assoleix l'escala de treball que ens plantejàvem com a objectiu, el cert és que de l'anàlisi detallada dels mapes que es presenten en l'informe se'n poden obtenir resultats encara una mica més detallats.

Figura 1. Evolucions del canvi de les temperatures màxima i mínima (en °C) i de la precipitació (en %) mitjana anual per a Catalunya, obtingudes agregant tots els resultats de diferents tècniques de regionalització estadística i dinàmica.

ΔTmàx (°C) ΔTmín (°C) Δprec (%)



El període de referència és el 1961-1990. Les línies són la mitjana dels resultats de tots els mètodes; l'ombrejat representa la desviació estàndard. En el cas de la precipitació s'ha aplicat també una mitjana mòbil de deu anys per eliminar la variabilitat interanual. [Font: INM, 2007].

Taula 1. Increments de temperatura (°C) per a Catalunya, per a dos escenaris (B2 i A2) i dos horitzons temporals, a partir de les gràfiques de la figura 1.

	2011-2040		2071-2100	
	B2	A2	B2	A2
Tmàx (°C)	1,5 ± 0,6	1,5 ± 0,6	3,1 ± 1,0	4,7 ± 0,8
Tmín (°C)	1,4 ± 0,5	1,4 ± 0,5	2,8 ± 0,8	4,2 ± 0,7
Tmitjana (°C)	1,4 ± 0,6	1,4 ± 0,6	2,9 ± 1,0	4,4 ± 0,8
Precipitació (%)	–5 ± 5	0 ± 8	–8 ± 6	–12 ± 10

D'aquesta manera, en la taula 2 hem distingit les projeccions en tres àrees geogràfiques, que hem anomenat costa (o litoral), interior i muntanya (Pirineus). En tots els casos donem uns rangs de valors, ja que provenen dels mapes generats amb les diverses tècniques i inclouen també la variabilitat espacial que hi ha dins de les tres àrees definides. D'altra banda, igual que donem mapes a resolució mensual, per a algunes de les tècniques de regionalització també incloem en la taula els rangs esperats d'augment de temperatura a escala estacional. Cal dir que, en aquest cas, l'augment donat correspon a la temperatura màxima, i per a l'escenari de finals del segle XXI. D'aquesta manera, encara que no sigui estrictament comparable amb les projeccions de la temperatura mitjana, dóna una idea de quin és el comportament estacional previst de l'increment de temperatura.

Taula 2. Increments de temperatura mitjana (°C), per a tres zones de Catalunya, per a l'escenari A2 i dos horitzons temporals, a partir dels resultats de diverses tècniques de regionalització (INM, 2007). També, increments estacionals de la temperatura màxima a finals del segle XXI.

	2011-2040	2071-2100	Hivern (DGF)	Primavera (MAM)	Estiu (JJA)	Tardor (SON)
Costa	0,2-1,3	3,5-5,0	2,5-3,5	3,0-4,0	5,0-6,5	3,5-5,0
Interior	0,7-1,8	4,5-5,0	2,5-4,5	3,5-5,0	6,0-7,5	4,5-6,5
Pirineus	0,7-1,8	4,5-5,0	2,5-4,5	3,0-5,0	6,5-7,5	5,0-6,0

A part dels resultats del projecte Prudence i de les tècniques de disminució d'escala aplicades a l'informe INM (2007), hi ha un bon nombre d'articles que es refereixen a projeccions de la temperatura (o variables i fenòmens associats a aquesta temperatura) publicats els darrers anys. Aquests articles, molts dels quals s'han elaborat també al voltant del projecte Prudence, han estat també revisats per fer aquest informe; per tant, ara comentarem alguns dels resultats que considerem especialment interessants. Per exemple, Beniston *et al.* (2007) troben que tots els índexs relacionats amb les onades de calor (nombre, durada màxima, temperatura màxima, etc.) augmenten clarament a Catalunya (entre el 10% i el 25% segons l'índex) a finals de segle en un escenari A2. Sánchez *et al.* (2004), utilitzant només un model i l'escenari A2, troben que les temperatures més extremes (el percentil 90 de les temperatures màximes) poden pujar 5-7 °C a l'estiu i al voltant de 3 °C a l'hivern. Curiosament, segons el mateix treball, les onades de calor podrien disminuir la seva durada a Catalunya, excepte a l'estiu al Pirineu. Pel que fa a les temperatures mínimes més baixes (percentil 10) augmentarien uns 3 °C a l'hivern i uns 4 °C a l'estiu. Les durades de les invasions d'aire fred a l'hivern serien més curtes, però, en canvi, els períodes amb aire relativament més fresc serien més llargs a l'estiu. Aquest darrer resultat és qüestionat pels mateixos autors del

treball, que el justifiquen basant-se en el fet que els períodes «freds» i «càlids» ho són amb relació als valors normals en el nou clima. Finalment, Diffenbaugh *et al.* (2007) combinen la temperatura i la humitat relativa per definir un índex de calor i obtenen que, per a l'escenari A2 i a finals de segle, els dies en què el valor d'aquest índex supera un cert llindar de perillositat passen a ser més de 30 dies a l'any en algunes zones de la costa i el sud de Catalunya, tot i que en el clima actual no són més d'uns deu dies per any.

Canvis en la precipitació a Catalunya

Com en el cas de les temperatures, en la figura 1 presentem l'evolució prevista de la precipitació, durant el segle XXI, a Catalunya, agregant els resultats de diverses tècniques de regionalització, incloent-hi a partir de l'any 2071 els resultats del projecte Prudence. Igualment, els valors numèrics per a dos escenaris temporals es donen en la taula 1. Analitzant detalladament els mapes on es presenta el canvi de precipitació, hem pogut extreure la informació que donem en la taula 3, en la qual hem tornat a distingir de manera aproximada entre les tres àrees geogràfiques: costa (o litoral), interior i muntanya (Pirineus). En tots els casos donem rangs de valors, ja que provenen dels mapes generats amb les diverses tècniques (inclosos els resultats de Prudence quan escau) i inclouen també la variabilitat espacial que hi ha dins de les tres àrees definides. Com que també hi ha mapes a resolució mensual, per a algunes de les tècniques de regionalització, i només per a l'escenari de finals de segle XXI, també hem pogut fer una estimació dels canvis de la precipitació a escala estacional, estimació que també donem en la taula 3. Aquestes taules intenten ser un resum entre els resultats obtinguts amb els diversos mètodes de regionalització i els diversos models globals de base que es consideren en el treball INM (2007). A diferència del cas de les temperatures, aquest resum és més difícil de fer, ja que els valors que es troben presenten una dispersió notable. En particular, els resultats provinents de Prudence (forçats amb HadAM3H) són força més pessimistes que la resta pel que fa a l'estiu, i més optimistes per a la tardor. Un altre exemple és el cas de la segona metodologia d'anàlegs, que forçada amb el mateix HadAM3 tendeix a donar augments de precipitació en la meitat freda de l'any, per a la zona de Catalunya.

Taula 3. Canvis de la precipitació (%), per a tres zones de Catalunya, per a l'escenari A2 i dos horitzons temporals, a partir de diverses tècniques de regionalització utilitzades a INM (2007). També, canvis estacionals de la precipitació, per a finals de segle XXI.

	2011-2040	2071-2100	Hivern (DGF)	Primavera (MAM)	Estiu (JJA)	Tardor (SON)
Costa	–10, 0	–20, –10	–10, 0	–10, 0	–40, –20	–15, –5
Interior	–5, +5	–15, –5	–5, +10	–15, –5	–35, –15	–15, –5
Pirineu	0, +10	–5, +5	+5, +15	0, +10	–15, 0	–10, 0

Igual que en el cas de les temperatures, hi ha també un bon nombre d'articles que, majoritàriament a partir del projecte Prudence, analitzen a escala d'Europa o inferior algun aspecte relacionat amb la precipitació. Destacarem a continuació alguns dels resultats que s'hi esmenten. Gao *et al.* (2006), per exemple, utilitzen un model regional a una resolució de 20 km, per analitzar els canvis en la durada dels períodes sense precipitació i en les precipitacions intenses (definides a partir de la màxima precipitació acumulada en cinc dies consecutius, 5DP), a finals del segle XXI i per a l'escenari A2. Pel que fa als períodes secs, tendeixen a allargar-se el 25-75% a la primavera i fins a més del 100% a l'estiu, mentre que no canvien de manera significativa a la tardor i a l'hivern. Pel que fa a la 5DP, tendiria a disminuir durant l'hivern i la primavera (el 10-25%) però a augmentar (fins al 50%) en el litoral

a la tardor. En un treball anterior, només per a l'estiu, Pal *et al.* (2004) també troben una tendència similar amb l'escenari B2: els períodes sense precipitació podrien allargar-se entre dos i set dies més, mentre que la 5DP no canviaria significativament durant l'estiu. Per la seva banda, Christensen i Christensen (2004) analitzen els possibles canvis en les precipitacions extremes estivals i conclouen que, malgrat el descens de les precipitacions totals, es pot esperar (A2, finals de segle) un cert augment en les precipitacions intenses. Beniston *et al.* (2007), en canvi, basant-se en algunes de les simulacions desenvolupades en el marc de Prudence, conclouen que les precipitacions intenses disminuiran al sud d'Europa, tant a l'hivern com a l'estiu. El mateix treball, però, coincideix amb altres resultats a predir un allargament en la durada dels períodes secs, que a més poden començar més aviat dins de l'any. Això seria vàlid per als dos escenaris analitzats (A2 i B2). Sánchez *et al.* (2004) utilitzen un sol model regional (Promes) i un sol escenari (A2) per mostrar els canvis de la precipitació mitjana i extrema a finals de segle. Per a la precipitació extrema, destaca que a Catalunya les precipitacions intenses podrien disminuir a l'hivern i, en canvi, augmentar a l'estiu (aquest darrer resultat, especialment significatiu a la vall de l'Ebre). Atesa la disminució general de la precipitació, això implicaria una clara disminució dels dies amb precipitacions intenses (disminució superior al 10% a l'hivern i al 25% a l'estiu).

El treball de Lehner *et al.* (2006) és també interessant. Utilitzen les sortides de dos models climàtics globals (HadCM3 i ECHAM4), amb l'escenari A1B, i obtenen que, a Catalunya i per a finals del segle XXI, cal esperar que les inundacions que actualment tenen períodes de retorn de 100 anys els tinguin d'entre 40 i 70 anys, especialment en llocs del litoral i el prelitoral. D'altra banda, i per a tot Catalunya, caldria esperar que les sequeres que actualment tenen períodes de retorn de 100 anys reduïssin aquests períodes clarament per sota dels 50 anys (de fet, en alguns casos l'increment de la freqüència dóna lloc a períodes de retorn de tan sols deu anys). Finalment, un treball recent (López-Moreno *et al.*, 2008) avalua amb detall quina pot ser la precipitació al Pirineu cap a finals de segle (amb vista a la gestió de l'aigua dels rius que neixen en aquesta serralada) i conclou que la importància de la neu en el cicle hidrològic disminuirà clarament, en part pels canvis de la precipitació (que segons aquests autors disminuiria, encara que poc, el 5-10%, a l'hivern en el Pirineu oriental), però sobretot a causa de l'augment de temperatura, que significaria una reducció de l'àrea on s'acumula neu, un avançament del període de fosa i la conseqüent disminució dels cabals durant la primavera. Aquests aspectes de caràcter hidrològic s'amplien als capítols 10 i 12 d'aquest informe.

Canvis en el nivell del mar a la costa catalana

En el capítol 6 hem comentat quin és l'augment del nivell del mar previst a escala global segons els diferents escenaris d'emissions. Per al mar Mediterrani en concret, i més especialment per al seu extrem occidental (és a dir, per a la costa catalana), les projeccions relatives a l'augment del nivell del mar són més aviat escasses. En realitat, fins i tot els estudis relatius al comportament del nivell del mar en els darrers decennis també són relativament limitats i, en tot cas, mostren que les variacions de nivell han tingut comportaments diferents en llocs relativament propers (com ara Mallorca, la Costa Brava i Màlaga). Sigui com sigui, un treball recent (Tsimplis *et al.*, 2008) indica que l'augment del nivell del mar que cal esperar a la Mediterrània és relativament modest, atès que els dos components dels canvis estèrics (és a dir, de densitat), la temperatura i la salinitat, tendiran a compensar-se (no del tot) entre si. D'aquesta manera, l'expansió a conseqüència de l'augment de temperatura s'atenuarà per l'augment de densitat d'una aigua més salina. Els altres factors que influeixen en el nivell del mar (principalment, l'aportació d'aigua per la fosa de geleres i casquets de glaç), contribuiran positivament al nivell del mar, que s'estima que pot pujar uns 30 cm per a finals de segle, en l'escenari A2. Aquest valor podria ser fins i tot inferior en les zones més properes a la costa, però està sotmès a una gran incertesa, pel fet que s'ha obtingut amb un sol model, i perquè tampoc no considera (igual que no es fa en les estimacions globals) la possible aportació d'una fossa més ràpida del glaç de Grenlàndia.

Resum

En la taula 4 hem intentat resumir totes les projeccions que hem comentat fins ara en aquest capítol i en els anteriors, per tal de donar, per a Catalunya i les tres àrees que hem definit, uns rangs de variació de la temperatura i la precipitació que podem considerar probables d'acord amb els coneixements actuals, les tècniques de modelització i regionalització utilitzades pels investigadors i els escenaris considerats. Cal tenir present que els valors de la taula són el resultat d'una síntesi efectuada sense cap metodologia estadística o numèrica, sinó que surten d'una integració més aviat qualitativa de les diverses projeccions, obtingudes per diverses escales i amb diverses metodologies. També cal destacar que en la generació dels valors de la taula s'han considerat també altres referències bibliogràfiques que no han estat explícitament citades en aquests capítols.

Com es pot veure, es donen els rangs esperats d'augment de temperatura i de variació de la precipitació, corresponents a l'escenari A2 i per a finals d'aquest segle. Hem escollit aquest escenari perquè és un dels més pessimistes (quant a les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle), però, tot i així, sembla que s'està superant els darrers anys. A més a més, per a aquest escenari es troben moltes més projeccions (en particular, les que resulten del projecte Prudence) que per a tots els altres. Recordem que l'escenari A1B, per al qual també hem analitzat alguns resultats, no és tan diferent d'aquest escenari A2. D'altra banda, també hem afegit una columna en la qual donem les estimacions de canvi de temperatura i precipitació per als propers decennis (2011-2040) i indiquem que són vàlides per a tots els escenaris. La causa d'això és que, per a aquest horitzó tan proper, les projeccions per als diferents escenaris són gairebé indistingibles. En aquest cas no hem trobat prou informació per generar un detall estacional, però hom pot pensar que el comportament seria semblant al donat per a finals de segle per a l'escenari A2, convenientment escalat a la mitjana anual que es dóna.

En resum, observem que la temperatura mitjana a Catalunya podria pujar entre 4 i 5,5 °C a finals de segle, i aquest augment és molt més important a l'estiu als Pirineus i les comarques interiors (fins a 7 °C), i més moderat a l'hivern per a les zones costaneres (a l'entorn de 3 °C). Pel que fa a la precipitació, per al conjunt de Catalunya i en mitjana anual, podria disminuir entre el 5% i el 15%, i l'estiu és l'estació que patiria descensos més importants de precipitació (fins al 40% menys de precipitació a les zones costaneres). Afortunadament, a la zona dels Pirineus i en estacions més plujoses (tardor), els descensos serien més moderats, semblants o inferiors als de la mitjana anual. En general, les diverses projeccions indiquen una possibilitat d'un lleuger augment de la precipitació durant l'hivern. Per a l'horitzó més immediat (2011-2040), és clar l'augment de temperatura, que probablement serà lleugerament superior a 1 °C. En canvi, la precipitació no patirà canvis significatius per al conjunt de Catalunya, encara que s'espera una lleugera disminució a la costa i un petit augment al Pirineu.

Taula 4. Augments de temperatura (línia superior de cada àmbit, en °C) i canvis en la precipitació (línia inferior de cada àmbit, en %), estimats a partir de tots els treballs i documents revisats (capítols 5, 6 i 7).

	Escenari A2, període 2071-2100					Tots els escenaris, període 2011-2040
	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Any	Any
Costa	2,5-3,5	3,0-4,0	5,0-6,5	3,5-5,0	3,5-5,0	0,4-1,6
	–10, 0	–10, 0	–40, –20	–15, –5	–20, –10	–12, 0
Interior	2,5-4,0	3,5-5,0	6,0-7,0	4,5-6,5	4,0-5,5	0,8-2,0
	+5, +10	–15, –5	–35, –15	–15, –5	–15, –5	–7, +5
Pirineus	2,5-4,0	3,0-4,5	6,5-7,5	5,0-6,0	4,0-5,5	0,8-2,0
	+5, +15	0, +10	–15, 0	–10, 0	–5, +5	–2, +10
Catalunya	2,5-4,0	3,0-4,5	5,5-7,0	4,0-5,5	4,0-5,5	0,7, 1,9
	–5, +10	–10, 0	–30, –10	–15, –5	–15, –5	–7, +5

Comentaris: incerteses i oportunitats

Atès que els valors presentats en la taula 4 provenen de moltes anàlisis diferents i de resultats d'autors diversos, se'ls pot atorgar un cert grau de confiança. No obstant això, la majoria d'aquests treballs (però no tots) es basen en les simulacions del projecte Prudence, que, malgrat utilitzar diversos models regionals, només els executa en condicions de contorn donades per dos models globals. Ara bé, altres treballs independents de Prudence (inclòs el resum per a la regió Mediterrània que forma part de l'AR4 del GIECC a partir de les dades de l'MMD) sembla que avalen la validesa d'aquests valors. Nogensmenys, cal recordar que totes les projeccions climàtiques porten incertesa: des del desconeixement de les futures emissions de gasos d'efecte d'hivernacle fins a la incapacitat de descriure, amb les tècniques actuals, els fenòmens atmosfèrics que es produeixen a petita escala i que poden tenir una gran influència en el clima sobre un territori orogràficament tan complex com és Catalunya (en particular, pel que fa a les precipitacions), passant per altres fonts d'incertesa ja comentades en capítols anteriors.

En aquest marc, en què la incertesa encara és un gran component de les projeccions climàtiques, especialment d'aquelles que es fan a escala regional i local, és lògic que s'estiguin duent a terme diverses activitats de recerca encaminades a millorar les projeccions i reduir la incertesa. D'aquesta manera, hi ha d'una banda el projecte europeu Ensembles, que els propers anys començarà a obtenir projeccions amb base probabilística, en el sentit que s'hauran obtingut d'un gran nombre d'experiments (simulacions). També a Catalunya hi ha diverses iniciatives en marxa. Per exemple, el Servei Meteorològic de Catalunya està treballant en la modelització climàtica, bàsicament de la precipitació, emprant el model MM5 a resolucions de 135, 45 i 15 km, inicialitzant-lo amb les sortides del model global ECHAM5. En les proves de validació que s'han fet fins ara (utilitzant dades de la reanàlisi ERA40) per al període 1971-2000, els resultats són satisfactoris quan es comparen amb les observacions a Catalunya per al mateix període. A la Universitat Autònoma de Barcelona, al Parc Científic de la Universitat de Barcelona, a la Universitat de Girona i, com ja s'ha comentat, al Barcelona Supercomputing Center – Centre Nacional de Supercomputació, també hi ha en marxa projectes de recerca al voltant de la projecció climàtica regional.

Referències bibliogràfiques

Beniston, M.; Stephenson, D. B.; Christensen, O. B.; Ferro, C. A. T.; Frei, C.; Gollete, S.; Halsnaes, K.; Holt, T.; Jylhä, K.; Koffi, B.; Palutikof, J.; Schöll, R.; Semmler, T.; Woth, K. (2007). «Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections». *Climatic Change*, núm. 81, pàg. 71-95. DOI: 10.1007/s10584-006-9226-z.

Christensen, O. B.; Christensen, J. H. (2004). «Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate». *Global and Planetary Change*, núm. 44, pàg. 107-117.

Diffenbaugh, N. S.; Pal, J. S.; Giorgi, F.; Gao, X. (2007). «Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot». *Geophysical Research Letters*, núm. 34, L11706. DOI: 10.1029/2007GL030000.

Gao, X.; Pal, J. S.; Filippo, G. (2006). «Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation». *Geophysical Research Letters*, núm. 33, L03706. DOI: 10.1029/2005GL024954.

Institut Nacional de Meteorologia, INM (2007). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*, INM, Madrid.

Lehner, B.; Döll, P.; Alcamo, J.; Henrichs, T.; Kaspar, F. (2006). «Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental, integrated analysis». *Climatic Change*, núm. 75, pàg. 273-299. DOI: 10.1007/s10584-006-6338-4.

López-Moreno, J. I.; Beniston, M.; García-Ruiz, J. M. (2008). «Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains». *Global and Planetary Change*, núm. 61, pàg. 300-312.

Pal, S. J.; Giorgi, F.; Bi, X. (2004). «Consistency of recent European summer precipitation trenes ans extremes with future regional climate projections». *Geophysical Research Letters*, núm. 31, L133202. DOI: 10.1029/2004GL019836.

Sánchez, E.; Gallardo, C.; Gaertner, M. A.; Arribas, A.; Castro, M. (2004). «Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach». *Global and Planetary Change*, núm. 44, pàg. 163-180.

Tsimplis, M. N.; Marcos, M.; Somotet, S. (2008). «21st century Mediterranean sea level rise: Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model». *Global and Planetary Change*. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.006.