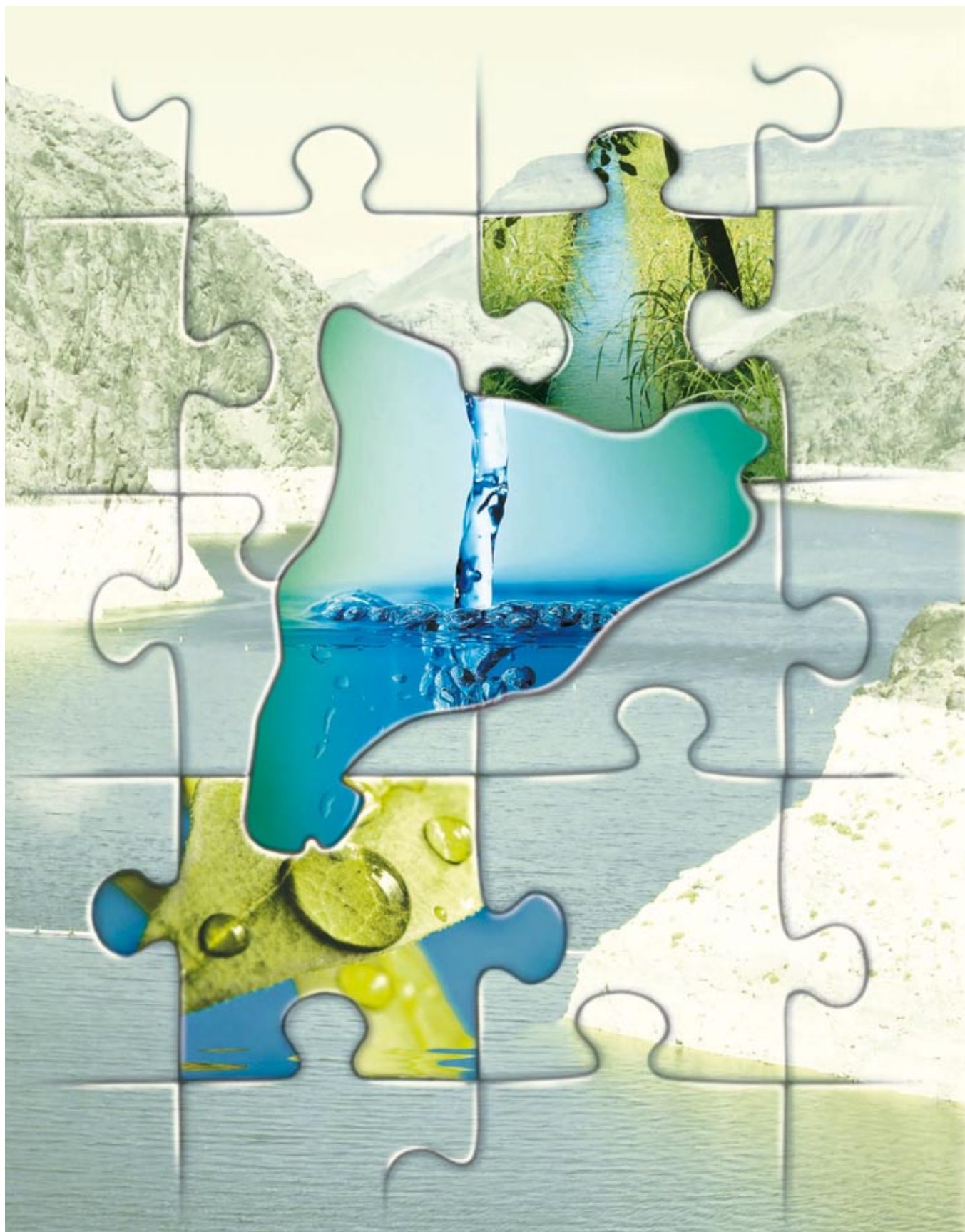


Aigua i canvi climàtic

Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya



Generalitat de Catalunya
**Departament de Medi Ambient
i Habitatge**



**Agència Catalana
de l'Aigua**

Aigua i canvi climàtic

Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya

Aigua i canvi climàtic

Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya

Edita:

Generalitat de Catalunya, 2009

Departament de Medi Ambient i Habitatge

Agència Catalana de l'Aigua

www.gencat.cat/aca

Abril 2009

Disseny gràfic i maquetació:

Imatge i Color

© Agència Catalana de l'Aigua



Índex

Pròleg. Gabriel Borràs	5
-------------------------------------	----------

Resum executiu i taula resum. Narcís Prat i Andreu Manzano.....	7
--	----------

Escenaris climàtics

Resum. Jordi Cunillera.....	25
------------------------------------	-----------

1. Constatacions de caràcter meteorològic a Catalunya	29
Carme Llasat, Javier Martín, Joan Albert López i Toni Barrera	
2. Constatacions biològiques del canvi climàtic a Catalunya.....	43
Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Marc Estiarte, Romà Ogaya [et al.]	
3. Indicadors climàtics per al seguiment.....	53
Jordi Cunillera	
4. Bases de la modelització climàtica	64
Josep Enric Llebot	
5. Projeccions globals; el 4t informe del GIECC	73
Josep Calbó	
6. Projeccions regionals; d'Europa a la península Ibèrica.....	83
Josep Calbó	
7. Projeccions climàtiques per a Catalunya	91
Josep Calbó, Jordi Cunillera, Carme Llasat, Josep Enric Llebot i Javier Martín	

Impactes hidrològics

Resum. Josep Mas-Pla.....	101
----------------------------------	------------

8. Canvis temporals observats en les sèries de cabals	105
Francesc Gallart	
9. Els boscos i l'evapotranspiració	115
Santi Sabaté	
10. Exemples de modelització hidrològica del règim mitjà dels rius catalans en escenaris futurs	127
Andreu Manzano	
11. Canvi climàtic i recàrrega d'aqüífers a Catalunya	143
Felip Ortuño, Jorge Jódar i Jesús Carrera	
12. Efectes sobre la variabilitat hidrològica i els fenòmens extrems; exemples de modelització hidrològica d'aiguats i sequeres en escenaris futurs	153
Andreu Manzano	

13.	Canvi climàtic i qualitat química del medi aquàtic	167
	Joan Grimalt i Antoni Ginebreda	
14.	Anàlisi territorial de la vulnerabilitat dels recursos hídrics davant del canvi climàtic	183
	Josep Mas-Pla i Felip Ortuño	
15.	Riscos sobre la gestió dels recursos hídrics	195
	Jordi Molist i Andreu Manzano	

Impactes sobre els ecosistemes aquàtics

Resum.	Narcís Prat i Antoni Munné	209
16.	Els estanys d'alta muntanya com a sensors del canvi climàtic	215
	Marc Ventura	
17.	Els efectes als embassaments i la seva rellevància en la quantitat i la qualitat de l'aigua per a la garantia del recurs	221
	Rafael Marcé, Joan Armengol i Josep Dolz	
18.	Impacte sobre els peixos continentals	229
	Emili García-Berthou	
19.	Cabals migrats i més temporalitat als rius	237
	Narcís Prat i Antoni Munné	
20.	Ecosistemes amb risc elevat: els deltes i les llacunes litorals	249
	Carles Ibáñez	
21.	El mar i les costes catalanes ja noten l'efecte del canvi climàtic	259
	Joandomènec Ros	

Implicacions socioeconòmiques entorn del sector de l'aigua

Resum.	David Saurí	279
22.	Incidències del canvi climàtic sobre l'abastament urbà, l'oci i el turisme	283
	Ignasi Puig	
23.	Canvi climàtic i incidències sobre la disponibilitat d'aigua en l'agricultura	289
	David Saurí	
24.	Implicacions del canvi climàtic sobre la disponibilitat d'aigua en el sector industrial. Situació i perspectives en el sector energètic	297
	Vicent Alcántara i Emilio Padilla	
25.	Transició i integració en la planificació de l'aigua a Catalunya davant el repte del canvi climàtic	307
	Joan David Tàbara	
26.	La Directiva marc de l'aigua i el canvi climàtic	323
	Lorenzo Galbiati	



Pròleg

Gabriel Borràs

Director de l'Àrea de Planificació per a l'Ús Sostenible de l'Aigua

Aquest llibre que teniu a les mans suposa el colofó a un any d'intensos treballs fruit del III Conveni entre l'Agència Catalana de l'Aigua i la Fundació Nova Cultura de l'Aigua, una experiència que com va succeir en els dos convenis anteriors ha merescut la implicació activa de tècnics d'ambdues organitzacions estructurats en Taules de treball específiques: cabals ambientals, participació ciutadana, centres d'intercanvi de drets públics de l'aigua i canvi climàtic.

En el cas de la Taula de treball d'aigua i canvi climàtic, ha estat possible l'activa col·laboració de destacades personalitats del món científic i universitari. La simbiosi entre administració, fundació i ciència ha permès reunir totes i cadascuna de les col·laboracions en quatre grans eixos: escenaris climàtics, impactes hidrològics, impactes sobre els ecosistemes aquàtics i implicacions socioeconòmiques. L'objectiu de reunir tots aquests treballs és el d'oferir un document de divulgació i útil que actuï com a referent de la importància del vector aigua dins del conjunt dels impactes previstos per l'IPCC i, amb tota la modèstia, com a antecedent d'una qüestió que la Directiva Marc de l'Aigua no ha considerat prou a hores d'ara.

La diagnosi que trobareu aquí continguda ha de servir-nos per bastir una estratègia adaptativa i, paral·lelament, de mitigació. Ningú no hauria de posar en dubte que el fenomen general del canvi climàtic ha merescut l'acord científic internacional, amb evidències a escala planetària més que observables. Bo és recordar-ho ara, quan certes onades de creacionisme dubten, fins i tot, de l'origen i evolució de les espècies.

M'agradaria subratllar dues qüestions que segons el meu parer es fan evidents amb la lectura d'aquest llibre. En primer lloc, en tant que responsables de la gestió de l'aigua a Catalunya, cal progressar i intensificar el seguiment dels efectes durant els pròxims anys a nivell del nostre país i de la nostra regió bioclimàtica, malgrat haguem adoptat un plantejament prudent i preliminar que considera una reducció d'aportacions superficials i de recàrrega als aqüífers de l'ordre del 5% per a l'any 2030 respecte els registres de les sèries històriques. Però, tant o més important que la reducció d'aportacions, ho és la constatació de la variabilitat del règim hidrològic i, com a conseqüència, el dubte sobre la representativitat dels registres històrics sobre els quals es basa la planificació per a planejar escenaris futurs.

En segon lloc, en tant que responsables per a vetllar l'acompliment dels objectius de bon estat ecològic, químic i quantitatiu de les masses d'aigua, és més necessari que mai assolir la màxima transversalitat i coordinació de les polítiques sectorials d'agricultura, urbanisme, energia, indústria i turisme amb la política de l'aigua. Créixer en funció de les disponibilitats d'aigua, de l'estat dels nostres ecosistemes aquàtics i de la internalització dels costos associats al cicle de l'aigua és, sense cap mena de dubte, la millor de totes les polítiques adaptatives que podem emprendre. No fer-ho és d'una irresponsabilitat absoluta.



Resum executiu i taula resum

Narcís Prat, Universitat de Barcelona i Fundació Nova Cultura de l'Aigua

Andreu Manzano, Agència Catalana de l'Aigua

En el seu últim informe presentat el 2007, el Panell Intergovernamental del Canvi Climàtic (IPCC) ha determinat que l'origen de l'escalfament global i del consegüent canvi climàtic, ja inqüestionable, és, fonamentalment, antròpic. Redactat i/o avalat per la més àmplia comunitat científica internacional i, independentment del llenguatge més o menys tècnic utilitzat i sovint expressat en termes de probabilitats o nivells d'incertesa, el que es reconeix amb aquest informe suposa un important pas respecte anteriors, en confirmar l'origen humà de les causes del canvi climàtic a través de la contaminació que ocasiona l'emissió de gasos d'efecte hivernacle. A més, aprofundeix de forma molt destacada en la diagnosi dels impactes previstos amb la millora paulatina del coneixement i la seva escala en diferents camps. El canvi com a tal ja ningú no el qüestiona. Ara, a més, es demostren les seves causes i per tant les mesures tan necessàries per a mitigar-lo són plenament justificades i es legitimen.

El canvi climàtic, però, només és una part del denominat canvi global, el procés que s'està donant a pràcticament tot el món amb la intensa modificació de les condicions naturals dels ecosistemes, fruit d'un creixement demogràfic exorbitant al llarg de tot el passat segle i un desenvolupament extrem en tots els camps; la generació d'energia, la gestió agrícola i forestal, la urbanització, la sobreexplotació hídrica, etc.

Aquests canvis, o els seus efectes, es manifesten i s'afronten en molts diferents àmbits i de forma molt diversa arreu del món. L'aigua només és un dels sectors implicats, tot i que es preveu que serà un dels que podran patir impactes més destacats. Per posar-ho de manifest, l'IPCC ha publicat recentment (juny de 2008) un informe específic sobre aigua que desplega els continguts ja esbossats en el seu darrer informe general de 2007, tot i que, pel seu caràcter i abast mundial, només presenta una imatge regional (per continents) de les problemàtiques, aprofundint a nivell més local només en una sèrie de casos tipus.

En general, es pot dir que les estratègies per afrontar els impactes del canvi climàtic en el sector de l'aigua, com en altres, passen per la diagnosi dels seus impactes, la mitigació de les seves causes (en la mesura del que correspon) i l'adaptació a les condicions futures. De fet, les estratègies d'adaptació a les noves condicions del canvi climàtic requereixen primer desenvolupar una diagnosi el més detallada i fiable possible sobre quines seran les condicions futures de referència. En el cas que ens toca, aquestes condicions es refereixen a les de caràcter hidrològic en el seu sentit més ampli, i a escala local. Aquest és precisament l'objectiu general d'aquest treball; determinar amb el major detall possible els impactes que el canvi climàtic produirà en l'àmbit de l'aigua, en totes les seves dimensions i a nivell de Catalunya d'acord amb el millor estat de l'art actualment disponible.

El present informe s'estructura en 4 blocs amb la intenció d'ordenar el coneixement de la qüestió en base a la cadena d'efectes previstos; en primer lloc, els canvis de clima com a tal, baixant a l'escala local-regional de Catalunya; en segon lloc, la seva repercussió sobre els sistemes hidrològics; a continuació, les influències d'aquests canvis sobre els ecosistemes aquàtics; i, finalment, els impactes i influències sobre la gestió i els usos de l'aigua.

No és objecte d'aquest treball entrar en l'explicació prèvia de què és el canvi climàtic en sí o quin és el seu origen, doncs aquests elements són àmpliament tractats en altres treballs i no tenen un caràcter local, lligat específicament a Catalunya, com succeeix amb els efectes derivats que aquí es tracten. El treball plantejava la redacció "seqüencial" dels blocs i capítols, però tot i que per qüestions d'organització de feines i agendes no ha estat absolutament possible, sí que s'ha mantingut aquesta estructura en la presentació i s'han realitzat els

l·ligams necessaris entre unes matèries i altres per conservar aquest ordre entre causes i efectes. Cadascun dels capítols prové d'una col·laboració específica d'experts en la matèria, i aquestes s'han d'agrair especialment tant per l'interès i la predisposició mostrada com per l'esforç fet per ajustar-se a cada temàtica. Cal recordar que els treballs són fruit del III Conveni entre l'Agència Catalana de l'Aigua i la Fundació Nova Cultura de l'Aigua, una experiència que com va succeir en els dos convenis anteriors ha merescut la implicació de tècnics d'ambdues organitzacions, estructurats en Taules de treball específiques i complementats en aquesta ocasió per l'activa col·laboració de destacades personalitats del món científic i universitari.

A més d'aquesta estructura general, s'ha intentat realitzar una presentació dels diferents temes, quan ha estat possible, des de la visió global a la local, passant per la regional, especialment en els aspectes climàtics i hidrològics. Finalment, abans de passar a la descripció resumida de les principals conclusions d'aquests treballs (que s'amplien en resums específics a l'inici de cada bloc), cal tenir present en la lectura dels diferents capítols el diferent grau de coneixement actual entre els temes climàtics i hidrològics, amb major recorregut i treballs força detallats, respecte els ambientals i socioeconòmics, que es comencen a explorar i a desenvolupar amb primeres estimacions més generalistes i qualitatives que és previst que es vagin enriquint en el futur.

Bloc 1: Escenaris climàtics

L'objectiu d'aquest primer bloc del present informe és donar a conèixer, d'una banda, els resultats obtinguts amb l'estudi de l'evolució del clima a Catalunya, especialment en el que a precipitacions es refereix durant, fonamentalment, el segle xx i, d'altra, els resultats d'estudis realitzats per estimar l'evolució del clima a Catalunya al llarg del segle xxi, que seria pròpiament dit l'estudi dels possibles escenaris climàtics futurs. El bloc es completa amb la presentació d'altres constatacions de caràcter biològic del canvi climàtic així com d'alguns dels elements que envolten la modelització climàtica (escenaris socioeconòmics de referència i tècniques de càlcul com a tals), clau en tots aquests treballs.

Constatacions climàtiques i biològiques

Existeixen nombrosos treballs que constaten l'increment de temperatura experimentat arreu del món i també a Catalunya. S'estima que aquest increment ha estat d'uns 0,15 °C per dècada de mitjana a Catalunya, al llarg de bona part del segle passat, de forma més acusada a l'estiu i per a les temperatures màximes diàries. El reflex d'aquests canvis en la temperatura de l'aigua del mar ha estat de 0,35 °C per dècada segons enregistrament a l'Estartit des del 1974. Els canvis sobre les precipitacions, però, són molt més difícils d'establir o constatar de forma clara, especialment en el nostre àmbit mediterrani de gran variabilitat pluviomètrica estacional i interanual, a més de la seva característica distribució espacial irregular. Per tant, donades les nombroses evidències que ja existeixen al voltant del fenomen d'escalfament i, en canvi, els importants interrogants que encara existeixen sobre l'evolució del règim pluviomètric - que a més és més determinant del règim hidrològic l'estudi del qual és l'objectiu central del present treball -, les anàlisis d'aquest informe s'han centrat fonamentalment en l'evolució observada de la precipitació.

Les sèries de pluges dels darrers 150 o 200 anys disponibles a Catalunya, amb una variabilitat temporal enorme, no mostren cap tendència estadísticament representativa. Les dades dels Observatoris de l'Ebre (Tortosa) i Fabra (Barcelona) han estat estudiades a partir de 27 índexs climàtics relacionats amb la temperatura de l'aire i la precipitació. 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 només per a



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).

Cal destacar que si s'estudien períodes més curts, dels últims 50 o 60 anys, es pot arribar a conclusions diferents, parcialment esbiaixades, en observar-se una lleu tendència negativa (o de disminució) de la precipitació, més important a la primavera i a les comarques pirinenques i prepirinenques. Aquest senyal, però, s'ha de considerar fruit de l'interval analitzat, ja que per contrapartida la primera meitat del segle xx ens proporciona una forta tendència positiva, d'augment de precipitacions.

Des d'altres perspectives, cal destacar com l'increment de temperatura de les darreres dècades està donant lloc a importants alteracions fenològiques en el cicle anual de moltes plantes i animals. Les fulles de molts arbres, les flors de moltes plantes o molts insectes associats avancen la seva aparició entre 10 i 20 dies abans del que ho feien fa 30 a 50 anys. El desfasament del rellotge ecològic, que determina l'habilitat competitiva entre espècies, pot posar en risc la conservació de certs ecosistemes. Caldrà seguir de prop aquests fenòmens, així com l'evolució de la capacitat adaptativa davant de l'enorme velocitat dels canvis observats en el clima i de les seves projeccions per al futur.

Escenaris socioeconòmics de referència i modelització climàtica

Una de les principals fonts d'incertesa de les simulacions d'escenaris regionals de canvi climàtic resideix en 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 planeta durant les properes dècades.

Entre el ventall d'horitzons i escenaris de referència a nivell mundial, definits fa gairebé 10 anys, cal tenir present que la situació global actual sembla dirigir-se cap als de majors nivells d'emissions (els més lleus fins i tot seran superats en breu). D'altra banda, les projeccions climàtiques generals, basades en ells i presentades per l'IPCC, es poden considerar gairebé "de mínims", en el sentit de què mostren uns escenaris i resultats de consens, acceptats per majoria en un fòrum científic i polític, i per tant no ofereixen les visions més extremes, entre les quals la més pessimista va guanyant pes a mesura que el desenvolupament mundial actual no mostra tendències clares i significatives de canvi o d'estabilització dels nivells creixents de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera (més aviat el contrari).

Altres reflexions que també cal tenir present en la qüestió dels escenaris futurs és com els més pròxims, abans aproximadament del 2040, estan fortament condicionats per la situació actual, en tant que només a partir dels horitzons 2040-2060 s'observa la convergència en els resultats dels principals models climàtics globals en baixar a escala regional, doncs abans d'aquestes referències la dispersió entre les diferents projeccions és elevada.

Més enllà dels escenaris socioeconòmics, la pròpia modelització climàtica també presenta incerteses destacades, en part intrínseques als models (només es pot predir el comportament d'alguns sistemes deterministes per un temps limitat, que depèn de l'exactitud amb què s'han mesurat les condicions inicials, de manera que com més allunyada sigui la predicció, més incertesa presentarà), en part degudes al coneixement només parcial de certs processos físico-químics que intervenen en el sistema climàtic (manca de coneixement complet del cicle del carboni, de la dinàmica de les escorces de gel, etc.) i en part associades a limitacions actuals de càlcul, que van millorant paulatinament.

Dels pocs models climàtics globals disponibles al món (de l'ordre de poc més d'una dotzena), es pot dir que, per fiabilitat i representativitat amb el nombre de casos estudiats, fonamentalment dos d'ells (el del Hadley Center britànic i l'alemany de l'Institut Max Planck) constitueixen la referència de bona part de treballs, especialment a Europa i inclòs els de l'IPCC. A partir d'ells, s'han desenvolupat nombrosos models climàtics regionals que, aplicats en àmbits menors a partir de l'aniuament sobre els globals, ofereixen resultats més particulars i de major detall

espacial, tot i que amb importants diferències entre uns i altres. Actualment s'avança en la integració d'aquests diferents models regionals, amb diferents escenaris i diferents tècniques estadístiques de regionalització, a la vegada que es progressa directament en ampliar la capacitat dels models globals amb nous simuladors cada vegada més potents que amplien la resolució dels càlculs realitzats fins ara pràcticament al nivell dels models regionals actuals.

Projeccions climàtiques

Les projeccions globals que proporciona el 4t informe de l'IPCC (AR4) no ofereixen cap dubte en relació a què durant el segle XXI s'espera un augment de la temperatura mitjana del planeta. 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. 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 (emissions mitjanes), cal esperar un augment de la temperatura mitjana a finals del segle XXI al voltant 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, doncs l'escalfament planetari comportarà una major dinàmica hidrològica general, malgrat que amb una distribució heterogènia que podrà repercutir en situacions més seques en certes regions. En concret, l'AR4 també proporciona resultats per a la zona "Sud d'Europa i Mediterrània", considerant l'escenari d'emissions A1B i per al període 2080-2099, que estimen una disminució de la precipitació al voltant del 12% en relació a la precipitació mitjana del període 1980-1999, amb una disminució més marcada a l'estiu que no pas a l'hivern. Cal dir que la Mediterrània és una de les regions on hi ha més acord entre els models globals en estimar descensos de la precipitació en totes les estacions de l'any.

L'anàlisi dels resultats dels més recents estudis regionals, a escala de la península Ibèrica, ofereix uns rangs de canvis previstos que no s'allunyen massa dels esmentats amb els models globals. En resum, i baixant a l'escala de Catalunya, s'estima que la temperatura mitjana podria pujar entre 4 i 5,5 °C a finals de segle, essent aquest augment molt més important a l'estiu als Pirineus i comarques interiors (fins a 7 °C), i més moderat a l'hivern per zones costaneres (a l'entorn de 3 °C). Pel que fa a la precipitació, pel conjunt de Catalunya i en mitjana anual, podria disminuir entre un 5 i un 15%, essent l'estiu l'estació que patiria descensos més importants (fins un 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 la possibilitat d'un lleuger augment de la precipitació durant l'hivern, tot i que també s'espera que els períodes secs s'allarguin. Per l'horitzó més immediat (2011-2040) està clar l'augment de temperatura, que probablement serà lleugerament superior a 1 °C. En canvi, la precipitació no patirà canvis significatius pel conjunt de Catalunya; s'espera una lleugera disminució a la costa i un petit augment als Pirineus.

Amb caràcter general, el nivell del mar s'incrementarà entre 20 i 60 cm fonamentalment a causa de l'expansió tèrmica dels oceans. A la Mediterrània, pel seu caràcter tancat, és possible que s'atenuï lleugerament aquest efecte. D'altra banda, en aquests càlculs no es contempla encara la fosa del gel de Groenlàndia.

Bloc 2: Impactes hidrològics

Aquest segon bloc té per objectiu baixar a la perspectiva hidrològica les futures condicions climàtiques previstes. Abans, però, es realitza una revisió dels principals factors d'influència en els règims hidrològics, com a integradors



tant de canvis purament climàtics com d'altres elements inclosos en el denominat canvi global, entre els quals destaquen els usos del sòl, els consums d'aigua o la seva contaminació. S'analitzen sèries històriques d'aportacions fluvials per posar de manifest aquesta imbricació i es realitza una descripció detallada de l'important pes específic dels boscos sobre el cicle hidrològic.

L'avaluació dels impactes previstos al llarg del segle XXI es realitza tant per als règims hidrològics mitjans com per a l'evolució esperada de la seva variabilitat estacional i interanual, diferenciant les components de les aigües subterrànies, analitzant els efectes sobre la qualitat química del medi aquàtic i amb un intent d'establir una diagnosi territorial diferenciada.

El bloc es completa amb algunes reflexions sobre el previsible increment de la vulnerabilitat i l'anàlisi preliminar d'aquests efectes purament hidrològics sobre l'actual i futura disponibilitat d'aigua en un sistema de gestió, que combina infraestructures i consums d'aigua, com és el de l'abastament a la Regió Metropolitana de Barcelona.

Constatacions hidrològiques i canvi global

En les modificacions que implica el canvi climàtic sobre els sistemes hidrològics, a més dels processos físics naturals intrínsecs, hi tenen una gran rellevància d'altres de caràcter antròpic, com els lligats a l'evolució de la cobertura vegetal i, en general, a l'ús del territori o les extraccions i els abocaments associats a usos humans de l'aigua. En la pràctica, la integració de tots aquests elements en els sistemes hidrològics és tal que es fa difícil diferenciar l'origen i les causes de certes tendències observades en sèries històriques d'aforament de cabals o de nivells piezomètrics. Les alteracions del cicle hidrològic que es poden observar en certs registres, amb una longitud i fiabilitat significativament menor que les de temperatures i pluges, sovint amaguen, a més, canvis en el règim de les extraccions d'aigua o modificacions de les característiques hidrològiques del territori a una part més o menys gran de l'àrea d'aportació.

L'anàlisi detallat dels cabals anuals dels rius més significatius de Catalunya no mostren tendències clares lligades exclusivament a factors climàtics. Solament s'observen alguns canvis lleus del règim a les capçaleres on el paper del desglaç primaveral és important i on es podria estar reduint les últimes dècades i/o avançant fruit de temperatures més elevades. De fet, la desaparició de les glaceres pirinenques es considera una de les principals constatacions del canvi climàtic a Espanya (i arreu del món en general), tot i la dificultat que existeix per a la seva avaluació quantitativa i a què el seu paper a la hidrologia catalana és pràcticament inexistent. Les escasses dades sobre la neu tampoc ofereixen més llum sobre tendències estadísticament versemblants, malgrat el gruix d'impressions i records de la gent més gran de les comarques dels Pirineus sobre antigues grans nevades que han anat a la baixa.

D'altra banda, poden ser molt més importants els efectes dels canvis de cobertura vegetal acumulats en àrees extenses, sovint de capçaleres i atribuïts a l'abandonament d'espais tradicionalment conreats o que es feien servir com a pastures i que avui són parcialment reforestats de manera espontània, amb el conseqüent increment de demanda d'aigua per aquesta nova coberta vegetal. Les estimacions d'aquest efecte calculen una pèrdua mitjana per any de l'ordre del 0,25 a 0,60% del cabal mitjà mesurat d'acord a la dinàmica dels anys més recents.

Aquest efecte posa de manifest la gran importància dels boscos en el cicle hidrològic a través de la captura d'aigua i la seva evapotranspiració al balanç hidrològic. Amb l'escalfament global és previsible a més que la demanda evaporativa i de respiració per a la producció de biomassa s'incrementi (és probable que ja ho hagi fet lleugerament) i això aguditzi la reducció de reserves d'aigua al sòl. La modelització d'aquests processos i el monitoreig en petites conques experimentals durant certs episodis de sequera posen de manifest que les condicions futures que s'estimen amb el canvi climàtic, amb augments significatius de temperatura i reduccions lleus de la pluviometria mitjana, podrien comportar una reducció de l'ordre del 10 al 20% de les reserves d'aigua al sòl al llarg d'aquest segle. Molts dels nostres boscos, amb una disponibilitat d'aigua reduïda, estaran sotmesos

a condicions més àrides, d'estrès hídric, que podrien afectar la distribució de moltes espècies, especialment a les zones més extremes o exposades, així com podrien produir la pèrdua de capçada o estructura, traduint-se segurament en menys cobertura en algunes zones.

Canvis hidrològics previstos

La casuística hidrològica, en un territori tan heterogeni com és Catalunya, tant a nivell climàtic com orogràfic i hidrogeològic, és molt gran, però, en conjunt, el cert és que la perspectiva d'un món més càlid també tendeix a oferir una visió d'un món més sec a tot el nostre àmbit mediterrani.

Un increment de la temperatura mitjana d'uns 2 °C per a Catalunya, el que podria correspondre a un horitzó temporal entorn a l'any 2030-2050, podria donar lloc a reduccions de les aportacions de l'ordre del 15% en acompanyar-se de disminucions de la pluviometria mitjana del 10%. Cal tenir present, però, que molts escenaris climàtics donen lloc a un cert increment de pluja en els mesos d'hivern, precisament quan l'evapotranspiració potencial i la real presenten valors més pròxims i la hidrologia és per tant menys sensible a augments de temperatura, de manera que es podria donar l'aparent paradoxa de què certes reduccions als mesos càlids es compensessin anualment amb certs increments als mesos freds.

A títol orientatiu, es pot considerar factible una reducció de l'ordre del 5% de les aportacions mitjanes per a horitzons més pròxims, en els quals se centra la Planificació Hidrològica (2015-2027). De fet, aquests escenaris tan pròxims no són suficientment acotats encara per a plantejar elements per a la gestió, però sí poden ser adequats per al plantejament preliminar d'estratègies d'adaptació, que requeriran iniciar un seguiment per valorar, confirmar o revisar les prediccions actuals en base a les observacions que es vagin acumulant els propers anys.

A més llarg termini, més enllà del 2070, la convergència entre els diferents models és més gran i amb increments de temperatura que podrien superar els 3 °C, i fins i tot els 4 en els pitjors dels escenaris, la reducció mitjana d'aportacions, amb disminucions de precipitació que oscil·larien entre el -10 i -16%, arribarien a importants valors de l'ordre del -16 a -28%.

En quant a la distribució territorial d'aquests efectes, s'espera que seran acusats a les conques de característiques més mediterrànies, en tant que a les d'una certa influència pirinenca la menor reducció de pluja atenuaria la disminució d'aportacions.

Pel que fa a la component subterrània del cicle hidrològic, s'estima, amb caràcter general, una reducció mitjana de la recàrrega d'aigües subterrànies de l'ordre del 20% cap al 2070-2100. Aquest fenomen estaria relacionat amb una concentració més elevada dels períodes de precipitació, amb la reducció de l'eficiència en la infiltració. Com a conseqüència, s'espera una pèrdua del cabal de base de la major part dels rius, alimentats fonamentalment pel drenatge de les aigües subterrànies.

Molt probablement s'aguditzarà el règim hidrològic estacional, amb una marcada reducció d'aportacions a l'estiu (fins a -40%) que, en alguns casos i com ja s'ha indicat, es podria compensar parcialment amb certs increments a l'hivern (+10%). El pes de la neu serà més dèbil del que ho és avui en dia, tant en quantitat caiguda com en el seu efecte regulador en avançar-se la fusió. Aquesta extremització estacional del règim també serà acusada a nivell interanual, malgrat que els diferents models no ofereixen una tendència clara i aquest increment només seria significatiu per a horitzons a llarg termini. Les aportacions mínimes anuals difícilment baixaran més de les ja observades en el registre històric, però sí que es podria incrementar la freqüència del que avui considerem anys secs (es podrien arribar a doblar), així com els dèficits hídrics associats.

De la mateixa manera, també és molt probable que es dupliqui la freqüència d'aiguats extrems, amb cabals màxims fins a un 20% superiors als de les actuals estimacions per a períodes de retorn de 10 a 100 anys. Aquesta



situació comprometrà el disseny de moltes infraestructures i produirà afeccions destacades en zones inundables, especialment a les planes litorals, degut a la suma d'efectes amb la pujada del nivell del mar.

Aquest ascens del nivell del mar, conjuntament amb la disminució de la recàrrega prevista als aqüífers, també farà augmentar la vulnerabilitat dels sistemes litorals amb aqüífers deltaics associats, degut a l'evolució de la falca salina cap al continent, amb un notable increment de la concentració de clorurs a l'aigua subterrània.

En tot cas, es posa de manifest amb aquests treballs com la variabilitat pròpia interanual dels rius mediterranis és tan destacada, sovint superior a la tendència associada al canvi climàtic, que pensem que situacions extremes puntuals que vivim actualment ja són manifestacions, més o menys clares, del canvi climàtic, quan en realitat poden entrar dintre de "la normalitat" del nostre clima i no hi ha arguments sòlids (encara) per a fer aquestes associacions. De fet, cal subratllar de nou el caràcter orientatiu d'aquests resultats, doncs el detall dels models climàtics i hidrològics actuals no es pot considerar encara suficient i parteixen a més d'uns escenaris futurs d'emissions que mostren un ventall ampli de futurs plausibles. Cal interpretar aquests resultats, i els efectes del canvi climàtic en general, en termes de tendències, no de situacions concretes, i cal recordar, i insistir, en què en l'agreujament de moltes de les condicions futures probablement tindrà un pes relatiu major, que ja avui s'observa, l'increment de vulnerabilitat per causes humanes o antropogèniques que no pas per causes del mer risc climàtic. Això ho pot relativitzar, però, evidentment, no minimitza els seus efectes.

Una determinada tendència a l'increment dels riscos associats a fenòmens extrems (sequeres o aiguats) intrínsecs a causes climàtiques o meteorològiques, també observarà l'augment de la vulnerabilitat als seus efectes amb caràcter conjuntural, determinada en bona part per aspectes no meteorològics, com poden ser els lligats a una major i indiscriminada ocupació del territori, a la mala gestió forestal o la manca d'ella, a la gestió insostenible dels recursos hídrics, etc. Per exemple, la inundabilitat que pot produir un mateix xàfec avui o fa 50 anys en certs àmbits urbans del Maresme ha canviat profundament a causa de l'ocupació urbana, de la mateixa manera que la manca de pluges i la gravetat de la conseqüent sequera no és la mateixa en estudiar les afeccions sobre uns conreus de secà o uns de regadiu en una zona amb limitacions a la disponibilitat d'aigua. El risc climàtic pot ser el mateix, però la vulnerabilitat, en aquests casos, canvia considerablement. De les mesures d'adaptació que es desenvolupin els pròxims anys en dependrà el nivell dels impactes previstos.

Afeccions sobre la qualitat i la gestió de l'aigua

L'escalfament previst i l'increment de la variabilitat pluviomètrica seran especialment importants per a contaminants persistents que tenen una forta dependència de la temperatura en la seva distribució ambiental i que veuran facilitada la seva volatilització, amb un major impacte directe d'aquests compostos sobre la població i la seva salut. Així, es pot esperar una major concentració de compostos organohalogenats en l'atmosfera perquè s'afavorirà la desorció dels sòls. També suposarà una menor retenció d'aquests en les àrees de muntanya i una major presència en l'aire d'aquestes zones. En canvi, la previsible disminució de la precipitació també podria reduir les taxes d'incorporació d'aquests compostos en les aigües i ecosistemes terrestres.

Un altre grup de compostos que es trobarà en major concentració en el medi ambient serà el dels hidrocarburs aromàtics, que resulten de la combustió i per tant és de preveure que un consum major d'energia els generi en major quantitat segons l'actual estructura de producció energètica. Cal destacar la possibilitat de què, en el futur, els increments màxims de generació d'aquests compostos els tinguem a l'estiu en lloc de l'hivern, el que podria suposar una presència més gran a la fase gas que a la de partícules.

Una reducció dels cabals dels rius comportarà també una menor capacitat de dilució de certs contaminants. Aquest problema exigirà uns procediments més eficients de control i gestió de tot tipus d'aportacions contaminants al medi aquàtic, ja siguin d'origen puntual o difós. D'altra banda, temperatures més elevades (de l'aire i també de

l'aigua) incrementaran la dissolució de sals i la reducció de l'oxigen a les masses d'aigua, amb els conseqüents riscos de salinització i/o anòxia (i eventual eutrofització).

Si bé un previsible augment de les riuades (en magnitud i freqüència) augmentaria l'arrossegament i dissolució de compostos, també en facilitaria la resuspensió i el transport, i n'augmentaria la concentració (temporalment) a les aigües superficials. Aquest efecte, observat amb relativa freqüència al riu Llobregat, mostra com les grans avingudes solen presentar major conductivitat de les aigües, amb certes problemàtiques per al seu aprofitament i tractament, atès que la dissolució de sal en superfície compensa l'efecte de dilució per augment de cabal.

En quant a la planificació de la disponibilitat hídrica als sistemes de gestió, caldrà tenir present que el clima no és estàtic i les assumpcions fetes sobre el futur, basades en el clima del passat recent, poden ser inapropiades per manca de representativitat. Els gestors de l'aigua hauran de considerar les potencials condicions futures sota el canvi climàtic en el disseny de les noves infraestructures i les assumpcions sobre la probabilitat, la freqüència o la magnitud d'esdeveniment extrems hauran de ser revisades amb cura.

D'altra banda, actualment ja hi ha un important estrès hídric en bastants sistemes de gestió, en absència del canvi climàtic. Els previsible creixements de demanda futura fruit de la dinàmica demogràfica i dels usos del sòl mostren a més una tendència a l'increment important d'aquest estrès. Tot i les millores que es vagin desenvolupant (estalvi i eficiència en l'ús de l'aigua, reutilització i altres recursos nous o recuperats), el canvi climàtic pot representar l'increment d'estrès hídric addicional que avanci o anticipi la superació, generalitzada, de la màxima capacitat de servei de molts sistemes. Avui, el sistema Ter – Llobregat té una capacitat màxima de servei de l'ordre dels 495 hm³/any, que tot i ser inferior a la demanda anual (d'uns 575 hm³ comptant abastaments i regs), encara es pot considerar suficient per a bona part dels anys i només és crítica en els més secs. La major freqüència i intensitat de sequeres futures per efecte del canvi climàtic pot reduir aquesta capacitat de servei entre un 7 i un 15%, de forma que aquests períodes crítics poden créixer en gravetat i freqüència de forma molt destacada, fins assolir situacions gairebé continuades, amb un dèficit crònic.

En aquests càlculs encara no s'han inclòs, i caldrà fer-ho a mesura que s'avanci en la caracterització d'aquests fenòmens, altres efectes indirectes sobre la disminució de la disponibilitat d'aigua, com seran d'una banda l'empitjorament de la qualitat dels recursos (que també suposarà un encariment del seu tractament) i, d'una altra, els canvis que la major variabilitat dels règims fluvials i la creixent possibilitat d'aiguats majors ocasionarà en la revisió dels resguards dels embassaments i en la disminució dels seus volums de regulació disponibles.

La planificació prevista contempla el desenvolupament de noves infraestructures hidràuliques, fonamentalment per a l'aportació de nous recursos que compensaran el creixement de demanda previst (atenuat per les polítiques, ja en marxa, de gestió i estalvi de la demanda). L'horitzó temporal per aquests escenaris és relativament proper (entorn al 2015 a 2027), en tant que bona part dels horitzons en els treballs de canvi climàtic s'han orientat més enllà del 2030 o 2040. Malgrat això, cal anar incorporant aquests plantejaments en la planificació actual, per al desenvolupament de mesures d'adaptació. Donades les incerteses que encara envolten els pronòstics a nivell local sobre els recursos hídrics, caldrà preveure l'adequació continuada de les mesures d'adaptació, segons s'observi l'evolució dels efectes del canvi climàtic a partir del seguiment acurat que cal realitzar des d'ara.

Bloc 3: Impactes sobre els ecosistemes aquàtics

El canvi climàtic comportarà canvis de caràcter hidrològic als rius, estanys, embassaments, zones humides, etc. A la vegada, les alteracions dels règims fluvials i/o de les característiques i la qualitat de l'aigua tindran una incidència tant directa com indirecta sobre l'estructura i el funcionament dels ecosistemes associats. L'objectiu d'aquest tercer bloc és ordenar i presentar la informació que tenim avui en dia sobre aquests impactes, tot i que encara és molt limitada i es podria dir que exclusivament de caràcter orientatiu.



Constatacions als ecosistemes aquàtics

Existeixen algunes constatacions de què ja s'han produït certs efectes sobre els organismes o el funcionament dels ecosistemes aquàtics degut a l'augment de temperatura, tant de l'aire com de l'aigua. Es poden assenyalar els canvis de comunitats planctòniques que s'han detectat en els sediments dels llacs de muntanya o en l'abundància de cists de crisofícies, la persistència de l'estratificació tèrmica i els seus efectes (anòxia) en embassaments situats en trams mitjans i baixos com és el cas de l'embassament de Sau, l'increment de les espècies més termòfiles de peixos dels rius i els canvis altitudinals d'algunes espècies (com la bagra que es troba a latituds superiors), canvis en l'emergència (més primerenca) d'alguns insectes aquàtics, com és el cas de les "palometes" del riu Ebre, o canvis en les pautes de distribució de diferents organismes marins i l'augment de les mortalitats en massa que es donen a la Mediterrània. Podem dir que l'evidència del canvi climàtic, almenys a petita escala, ja és palesa entre nosaltres, tot i la incertesa de la seva persistència o evolució.

Efectes previstos en l'estructura i funció dels ecosistemes aquàtics

D'altra banda, les previsions pel futur són en molts casos preocupants i, més enllà dels efectes ja observats i esmentats, en podem preveure d'altres. A la muntanya, els estanys petits corren risc de desaparèixer o quedar greument disminuïts en el seu volum, mentre que el funcionament dels més grans poden canviar notablement al disminuir l'extensió i durada de la neu i la capa de gel. Això pot influir en un canvi de les comunitats d'organismes i la proliferació d'espècies invasores. Aquesta situació de canvi de comunitats i proliferació d'espècies nouvingudes es pot donar també en tots els ecosistemes aquàtics des de l'alta muntanya fins al mar. En el cas dels peixos, és d'esperar una reducció de les poblacions dels autòctons i, alhora, una major proliferació dels termòfils (habitualment espècies al·lòctones), així com una reducció de l'àrea de distribució dels peixos d'aigües més fredes com ara la truita.

En els rius, tant l'increment de les sequeres com de les riuades pot repercutir de forma important en les comunitats biològiques, afavorint alguns grups en front d'altres. Per exemple, els insectes aquàtics propis d'aigües sense corrent poden incrementar la seva presència en front als més típicament reòfils, tal com s'ha vist en estudis recents en períodes de sequera a petits rius poc pertorbats per part de l'home. Les sequeres seran més freqüents i rigoroses i això tindrà també un reflex en les comunitats de peixos, que poden arribar a desaparèixer en alguns trams fluvials. Especialment vulnerables seran aquelles espècies endèmiques lligades a petits cursos d'aigua, especialment si ja avui són efímers o temporals. No s'ha estudiat en aquest treball l'efecte sobre les zones humides continentals, però és d'esperar també una reducció de la seva àrea i un augment de la seva contaminació que, evidentment, pot fer desaparèixer unes espècies i fer aparèixer (o ser més abundants) unes altres, sobretot (altra vegada) aquelles invasores més termòfiles.

Al mar i a la zona litoral els efectes sobre les comunitats també seran rellevants. En el cas de les llacunes litorals l'increment del nivell de mar és la pitjor amenaça, així com en els deltes, que podrien desaparèixer parcialment per efecte de la pujada del nivell de l'aigua. Pel que fa als ecosistemes marins també l'expansió de les espècies exòtiques és la principal amenaça, en la línia del que es comença a observar ja a la Mediterrània.

Un esment especial cal fer a l'afectació dels serveis ambientals que els ecosistemes aquàtics ens proveeixen. En el cas dels embassaments, no només es tracta d'una disminució de recursos sinó que per efecte de la major taxa de residència disminuirà la qualitat amb el previsible encariment dels tractaments necessaris per potabilitzar l'aigua. El mateix podem dir de les aigües dels rius, en general. Per exemple, un major nombre d'algues potencialment tòxiques causat per la major contaminació deguda a uns cabals menors en el Llobregat (menor dilució) pot fer encara més car el tractament de les aigües a la seva part baixa. Evidentment, la pesca es veurà afectada tot i la seva ja poca importància a nivell econòmic, però podríem pensar en la pesca recreativa que practiquen milers

d'aficionats (i que de fet empitjora el tema de la preponderància de les espècies introduïdes que són les més buscades i pescades). Tots els serveis ambientals dels deltes i zones costaneres es veuran considerablement modificats, siguin la pesca o el bany.

És evident que en el camp de la gestió i la diagnosi de l'estat de les masses d'aigua (rius, estanys, zones humides, etc.), els canvis en el règim de cabals induïts a través del canvi global i el canvi climàtic hauran de fer replantejar els valors de referència avui dia usats, i modificar si s'escau els possibles programes de mesures dimensionats per a cada cas. Els objectius de qualitat es poden veure greument afectats i probablement hauran de ser revisats per ajustar-los al nou context ambiental. Existeixen diversos anàlisis que demostren que en períodes de sequera són diversos els indicadors biològics i estàndards de referència avui usats que pateixen significatius canvis.

En síntesi, pels ecosistemes aquàtics en general, les perspectives són d'una reducció accelerada de la biodiversitat amb simplificació de les comunitats que passaran a dominar en primera instància espècies vingudes d'altres llocs o espècies que s'adaptin a les condicions més termòfiles i més canviants que sembla que predominaran en el futur. De l'abast i extensió de les mesures de mitigació i adaptació que es prenguin dependrà també el grau de pèrdua d'identitat dels nostres ecosistemes aquàtics.

Bloc 4: Implicacions socio-econòmiques entorn al sector de l'aigua

Aquest últim bloc explora les principals implicacions dels canvis en la disponibilitat de recursos hídrics derivats del canvi climàtic en els grans sectors usuaris de l'aigua: agricultura, indústria i energia, usos residencials, comerç, serveis i turisme. A partir d'estimacions preliminars basades en les matrius input-output de l'economia catalana (segons l'estructura actual), l'impacte econòmic d'episodis de manca d'aigua més o menys generalitzada, com els que es podrien arribar a donar en el futur amb una certa freqüència si no s'articulessin noves infraestructures de disponibilitat d'aigua, s'estima aproximadament en un 7,2% del PIB català. Aquesta xifra, de caràcter exclusivament orientatiu, posa de manifest la importància d'un eventual desabastament d'aigua, com un dels riscos més visibles dels impactes del canvi climàtic.

Agricultura

Avui en dia el sector agrícola només suposa, com a contribució directa, l'1'5% del PIB català total, tot i que a través del sector industrial agroalimentari aquesta aportació supera el 15%, a més de tractar-se d'un element fonamental i estratègic del re-equilibri territorial, així com d'altres beneficis gairebé intangibles com la conservació del paisatge i la biodiversitat, el control de riscos com ara el d'incendis rurals, etc.

Les condicions futures més càlides i seques poden comprometre l'actual estructura de conreus. L'agricultura de secà, i especialment els cereals, poden veure compromesa la seva productivitat actual, com ja es ressenteix en els pitjors escenaris de sequeres recents. En els conreus llenyosos com la vinya o l'olivera es podria generalitzar l'actual tendència de reg de suport que s'observa a les àrees més seques. Però serà el sector del regadiu el més afectat, doncs es podrien donar augments de la demanda d'aigua per efecte d'una major evapotranspiració i sumar aquest efecte al d'una menor disponibilitat de cabals, quan ja avui disposen, en general, d'una garantia relativament ajustada. Els increments de zones regables previstos al Pla de Regadius de Catalunya, que planteja unes noves 125.000 hectàrees afegides a les 260.000 ja existents, faran imprescindible aprofitar totes les possibilitats tecnològiques amb l'ús de noves fonts de recurs (com ara la reutilització d'aigües regenerades) de la manera més eficient possible i incrementar la productivitat de l'aigua aplicada a l'agricultura per a produir més per metre cúbic emprat, tal i com ja es fa en molts sectors industrials.



Indústria i energia

Existeix una forta vinculació entre el creixement econòmic i el consum d'energia a Catalunya. Les principals fonts són el petroli (50%), el gas natural (25%) i la nuclear (20%), essent la dependència de l'exterior d'un 96% i el pes de les energies renovables inferior al 3% (fins al 8 a 14% amb la hidroelèctrica, en funció dels anys). L'increment anual mitjà del consum d'energia primària va ser de l'ordre del 3% entre el 1990 i el 2005, havent-se estabilitzat els últims anys, amb una lleu millora de la intensitat energètica associada.

Els efectes directes del canvi climàtic sobre el sector energètic dependran sobretot de les oscil·lacions en la quantitat d'aigua disponible a rius i embassaments per a la producció d'electricitat, per a la refrigeració de centrals tèrmiques convencionals o nuclears, o per a la transformació de combustibles (consum d'aigua en refi). Probablement, els cabals d'aigua disponibles per aquest ús seran menors, estaran sotmesos a més oscil·lacions que en l'actualitat i major competència amb altres usos creixents (urbans, ambientals, agrícoles). A nivell estatal, la disminució de la producció hidroelèctrica com a conseqüència de la disminució de recursos hídrics s'ha estimat entre un 20 i un 50% respecte la situació actual, que cal recordar que ha anat a la baixa, en termes relatius respecte la resta de productors, de forma destacada les últimes dècades.

Aquestes necessitats també variaran en funció dels canvis que es donin en l'oferta energètica en resposta al canvi climàtic i de la major escassetat d'algunes fonts energètiques, com el petroli. D'altra banda, en la mesura que s'intensifiqui l'ús de recursos no convencionals, com els de les aigües dessalinitzades o les aigües regenerades, o s'avanci en la millora de l'eficiència en el seu ús (com en certs projectes de modernització de regadius), es pot produir un augment notable de la demanda d'energia.

L'augment de la demanda d'aigua de la indústria degut al canvi climàtic es preveu que sigui relativament petit, de menys del 5% pel 2050, majoritàriament per necessitats creixents de refrigeració, i, en general, es preveu que els sectors industrials siguin menys vulnerables als impactes del canvi climàtic que altres sectors com l'agricultura. Les principals excepcions són les instal·lacions situades en àrees sensibles a fenòmens extrems (àrees inundables) i els sectors industrials dependents d'inputs sensibles al clima.

El sector industrial català absorbeix directament un 9,7% del consum total d'aigua. Aquesta xifra augmenta, però, fins un 38% quan considerem els inputs que li són subministrats per altres sectors. El seu pes en el PIB català és de l'ordre del 22 al 26% i s'estima que l'impacte d'una sequera extrema sobre ell (incloent-hi també la producció d'energia) es podria situar aproximadament en un 7,5% del PIB corresponent. Pel que fa al sector de la construcció (amb un pes del 6 al 8% del PIB català), aquest impacte podria assolir de l'ordre del 5,6% del PIB del sector.

Consums urbans: domèstics, comercials i turístics

Aquest sector constitueix un element fonamental de l'economia catalana (el turisme per ell mateix suposa entorn d'un 10% del PIB català) i, de diferents maneres, podria veure's també afectat pels canvis en la disponibilitat i demanda d'aigua derivats del canvi climàtic.

Globalment, es considera que una pujada de la temperatura mitjana de l'ordre dels 2 °C a l'horitzó temporal del 2025 pot donar lloc a increments d'usos domèstics per efectes tèrmics de l'ordre d'un 5%, tot i que algunes referències parlen de fins al 12% i altres fonts apunten increments de l'ordre d'un 3% per cada grau centígrad de pujada de la temperatura mitjana. Aquests creixements vindrien donats per una major demanda per a higiene i confort personals, per l'increment de la demanda de parcs, jardins i altres àmbits públics, així com per un possible creixement i desestacionalització d'activitats d'oci i lleure (piscines, parcs aquàtics, etc.). La demanda d'aigua per a usos residencials també podria augmentar si se segueix expandint el model de creixement de baixa densitat, amb proliferació de jardins i piscines, d'una manera fins i tot més acusada que pel mer efecte climàtic.

En la resta del sector serveis no es preveuen impactes massa significatius, llevat del turisme, els consums del qual varien molt en funció del model de desenvolupament dominant, concentrat o dispers, i poden augmentar, però també desestacionalitzar-se reduint així, de forma parcial, l'actual problemàtica de concentració dels consums punta estiuencs. A les àrees de muntanya, la principal afecció sobre els sectors econòmics s'espera a les estacions d'esquí, que veurien reduïda la innivació, tant per la pujada de les temperatures com per la major irregularitat en les tendències de precipitació esperades i, en general, un escurçament de la temporada.

Amb caràcter molt preliminar, s'estima que un episodi de sequera extrema amb certs desabastaments podria comportar reduccions del PIB del sector serveis, que suposa gairebé el 57% del total català, d'entre un 8% pel que fa a l'hosteleria i un 5% pels serveis socials. Els hipotètics costos de l'eventual desabastament dels usos domèstics és molt més difícil de quantificar pel seu caràcter intangible, però evidentment suposaria una afecció enorme i un trasbals gairebé inimaginable en funció de la seva durada, freqüència i distribució.

Sense haver d'arribar a aquestes situacions extremes, és previsible que la reducció de cabals i reserves subterrànies, tot i que sigui lleu, comporti un cert empitjorament de la qualitat de l'aigua. Com ja s'ha viscut en alguns episodis de sequera, això tindria també com a conseqüència un sobrecost en els tractaments necessaris, malgrat que cal esperar que sigui relativament lleu davant els increments i esforços que avui s'estan realitzant per a l'adaptació de noves normatives de qualitat cada vegada més exigents.

Algunes reflexions finals més

Aquest últim bloc i el document com a tal acaben amb algunes reflexions sobre el model de desenvolupament actual i les seves tendències i implicacions amb el canvi climàtic, així com amb la Directiva marc de l'aigua.

Cal recordar, un cop més, que molts d'aquests impactes climàtics podran ser eliminats o suavitzats per les mesures de mitigació i/o adaptació que es vagin desenvolupant els pròxims anys i per tant dependran, a més del desenvolupament socioeconòmic mundial, del model de gestió hídrica que s'adopti a partir d'ara. D'altra banda, els impactes pròpiament climàtics només suposen una part dels associats en conjunt al canvi global i, en bona part, al model de desenvolupament previst, en el seu sentit més ampli.

Com ja s'ha avançat, els canvis en el règim de cabals induïts a través del canvi global i el canvi climàtic hauran de fer replantejar els valors de referència avui dia considerats, i modificar si s'escau els possibles programes de mesures dimensionats per a cada cas. Els objectius de qualitat es poden veure greument afectats i probablement hauran de ser revisats per ajustar-los al nou context ambiental. De la mateixa manera, la validesa de les sèries històriques en què es basen molts dels estudis sobre garantia i disponibilitat de recursos es pot veure qüestionada en el futur degut a les alteracions dels patrons estadístics que es pensaven estàtics. A més, aquests elements de canvi es podrien estar avançant, de manera que els horitzons més pròxims de la Planificació Hidrològica, molt anteriors al 2040 que s'utilitza sovint com a referència clau en els estudis de canvi climàtic, hauran d'incorporar la necessitat de plantejar-los a partir d'ara. De fet, es pot dir que la Directiva marc de l'aigua no ha contemplat fins ara aquests elements futurs, però des d'Europa ja s'estan realitzant importants reflexions i plantejaments per a incorporar el canvi climàtic a l'agenda de la Directiva i als esquemes de Planificació Hidrològica.

Finalment, i arribats a aquest punt, val la pena recordar quin és l'autèntic significat del concepte de desenvolupament sostenible; aquell que cobreix les necessitats del present sense comprometre la capacitat de les generacions futures per a cobrir les seves pròpies necessitats. L'avanç tecnològic permetrà ampliar les possibilitats actuals, però no es poden plantejar els horitzons futurs amb una confiança cega en aquestes possibilitats sense admetre les limitacions absolutes dels sistemes que ens proveeixen, així com les relacions i interconnexions (positives i negatives) entre ells. Sovint, desequilibris causats per un determinat element es manifesten a través d'efectes indirectes i traslladats en el temps. En l'actual conjuntura econòmica mundial podem tenir un bon exemple, així



com, més concretament, en l'evolució del binomi aigua i energia, cada vegada més interrelacionades. Millorar en l'eficiència de l'ús de l'aigua o cercar noves fonts de recurs més sostenibles des del punt de vista hidrològic pot revertir, en alguns casos, en majors despeses energètiques i majors impactes en altres àmbits i sectors.

Amb aquesta perspectiva, la implementació d'un model de gestió de transició o adaptatiu pot arribar a ser l'única via que garanteixi la provisió de serveis d'aigua de qualitat a llarg termini i que permeti reduir la vulnerabilitat del sistema "sociohídric" català davant el canvi climàtic. Aquest model de transició es fonamentaria, entre d'altres, en els següents aspectes: (1) Determinació de límits quantitatius clars i en termes absoluts, encara que dinàmics amb l'oferta i la demanda d'aigua; (2) Promoció d'estructures institucionals més descentralitzades, a on es fomenti la participació social sota una perspectiva de gestió de conca; (3) Increment de la flexibilitat dels sistemes de dotació d'aigua; (4) Desenvolupament de polítiques transversals i integrades entre diferents àmbits i sectors; i (5) Derivació dels excedents aconseguits mitjançant millores d'estalvi, l'aplicació de mesures de mercat i/o fonts alternatives de recursos a la progressiva restauració integral dels ecosistemes aquàtics, en lloc de dirigir-se a crear noves demandes. Tot això passa per entendre la planificació de l'aigua com un procés d'aprenentatge social orientat principalment a la transformació i adaptació dels agents socials (en lloc de cap a la transformació del medi) i conferir a la planificació de l'aigua una posició molt més central i coherent respecte la resta d'altres polítiques com l'agricultura, l'energia, la planificació territorial o la conservació de la natura i el mateix canvi climàtic. Cal avançar en la millora del coneixement de les causes i els impactes del canvi climàtic, a la vegada que la Planificació Hidrològica, en el seu sentit més ampli, ha d'integrar tots aquests elements així com la necessitat d'un desenvolupament que faci més èmfasi en el mig i llarg termini que no pas en el curt.

Taula resum dels principals indicadors o impactes analitzats, amb els seus respectius graus de certesa dels ja constats i de versemblança dels futurs.

Els percentatges d'increment o reducció s'expressen respecte la situació actual, d'acord als valors mitjans de les diferents variables, amb caràcter general, al llarg dels últims 30 anys.

(E) = Grau de certesa o versemblança elevat, (M) = Mitjà; (B) = Baix

Variable o indicador	Actual (constatacions)	Curt-mig termini (2025-2040)	Llarg termini (2070-2100)
Clima			
Temperatura de l'aire	S'ha incrementat en 0,15 °C per dècada en mitjana, de forma més acusada a l'estiu i per a les temperatures màximes diàries, cada vegada amb més dies càlids i menys nits fredes (E).	L'increment serà superior a 1 °C, amb majors onades de calor (E).	S'incrementarà de 4 a 5,5 °C (E), de manera més important a l'estiu i als Pirineus (M).
Temperatura de l'aigua del mar	S'ha incrementat en 0,35 °C per dècada (l'Estartit) (M).		
Precipitació	Les precipitacions mitjanes anuals no presenten tendències estadísticament representatives en sèries històriques de més de 50 anys (E). La precipitació estacional sembla mostrar una reducció lleu a la primavera (M). La intensitat de pluja (diària) sembla presentar un lleu increment (M).	En conjunt, no es donaran canvis significatius de la pluja anual (M), tot i possibles efectes lleus d'increment als Pirineus i disminució a la costa (M) així com una certa tendència a una major concentració en xàfec (M).	La reducció mitjana anual serà, amb caràcter general, del 5 al 15% (M), amb un possible augment lleu a l'hivern (M). Al litoral i a l'estiu la reducció mitjana podrà arribar fins al 40% (M). Es donarà una certa tendència a la major concentració en xàfec (M).
Nivell del mar	S'ha observat un increment de 3,1 mm/any per al conjunt del planeta (E) i de 1,2 (Marsella i Gènova, els últims 50 a 100 anys) a 4,0 mm/any (l'Estartit, des del 1990) a la Mediterrània (M).		Pujarà de 20 a 60 cm (E).
Hidrologia			
Evapotranspiració	Es barregen efectes pròpiament climàtics amb canvis d'usos i de la cobertura vegetal a gran escala (canvi global), de manera que és complex conèixer de forma exacta la importància relativa del canvi climàtic (M).	Els increments mitjans mínims seran del 5% (E).	Els increments mitjans seran del 15 al 30%, especialment concentrats a l'estiu (M).
Aportació anual i règim dels rius	Les reduccions observades barregen efectes climàtics pròpiament dits amb creixements de consums i canvis d'usos i de la cobertura vegetal a gran escala (canvi global) i per tant la importància relativa del canvi climàtic no és completament coneguda (M).	La reducció preliminar serà, en general, de l'ordre del 5% (M). La disminució serà més acusada als rius més mediterranis i més lleu a les capçaleres i als Pirineus en general (M).	La reducció mitjana general serà del 10 al 30% (M), i es podrà concentrar a l'estiu, amb disminucions de fins al 40%, compensades en part per lleus increments de fins al 10% a l'hivern (M). La disminució serà més acusada als rius més mediterranis i més lleu a les capçaleres i als Pirineus en general (M).



Variable o indicador	Actual (constatacions)	Curt-mig termini (2025-2040)	Llarg termini (2070-2100)
Neu i desglaç	Es podria estar observant una certa tendència, estadísticament no significativa, a l'avançament del desglaç (B).		Menors superfícies innivades (a major altura), major sublimació i l'avançament del desglaç reduiran de forma destacada les aportacions nivals (M).
Recàrrega d'aigües subterrànies	Altres factors generals associats al canvi global (increment d'extraccions, pèrdua de zones d'infiltració) no permeten assegurar en quin grau el canvi climàtic és responsable de fenòmens i tendències dels últims anys més recents (M).		La reducció mitjana general serà del 20% (M).
Salinització d'aqüífers costaners			Creixerà el risc de salinització per efecte de la reducció de la recàrrega i la pujada del nivell del mar (E).
Sequeres	Altres factors generals associats al canvi global (increment de demandes) no permeten assegurar els factors exclusivament climàtics de la major freqüència de sequeres els últims anys més recents (M).		Podran arribar a doblar la freqüència (E), i créixer la seva durada, mantenint la intensitat (associada a precipitacions mínimes) (M).
Aiguats	Altres factors generals associats al canvi global (ocupació urbanística de zones inundables) no permeten assegurar l'origen exclusivament de caràcter climàtic en les tendències recents, amb impactes econòmics dels efectes dels aiguats cada vegada majors (B).		Podran arribar a doblar la freqüència (M) i els cabals punta associats (per a períodes de retorn elevats) podran incrementar-se de l'ordre d'un 20% (M). Aquest efecte se sumará al de la pujada del nivell del mar al litoral (E).
Qualitat físico-química de les aigües (continentals)	El gran increment de contaminació observat fins ara no es pot dissociar d'altres efectes antropogènics (canvi global) (M). L'increment de temperatura de l'aigua s'ha estimat a l'Ebre en uns 2 °C de mitjana al llarg dels últims 30 anys (M).		Es produirà una menor dilució de certs contaminants durant llargs períodes, però amb major risc de ser remoguts durant aiguats (M). Es donarà una major concentració i dinàmica dels organohalogenats en l'atmosfera, amb menor taxa d'incorporació al medi aquàtic (M).
Capacitat de servei dels sistemes de gestió	Altres factors generals associats al canvi global (increment de demandes) i a un cert dèficit estructural de molts sistemes de gestió no permeten assegurar les causes de caràcter climàtic exclusivament del creixent estrès hídric en episodis recorrents i cada vegada més crítics al llarg dels últims anys (M).	Les mesures previstes atenuaran la situació actual. Sense elles, la capacitat de servei de molts sistemes de gestió es podria reduir de l'ordre d'un 7% (M).	La capacitat de servei de molts sistemes de gestió es podria arribar a reduir un mínim d'un 15% (M).

Variable o indicador	Actual (constatacions)	Curt-mig termini (2025-2040)	Llarg termini (2070-2100)
Ecosistemes			
Arbres, plantes, flors i insectes associats	Molts cicles fenològics s'avancen uns 15 dies (M).	S'intensificarà el desfasament entre l'arribada d'espècies migradores i les condicions ambientals que els hi són necessàries, posant en risc la conservació de les poblacions de molts ocells i insectes si el ritme d'adaptació a les noves condicions no és prou ràpid (M).	La reducció de la disponibilitat d'aigua als sòls afectarà la distribució d'espècies a les zones més exposades, amb pèrdua de capçada i menor cobertura dels boscos (M).
Estanys de muntanya	S'ha incrementat la producció de plàncton o biomassa (M).	Cada vegada els estanys estaran menys temps coberts de neu o glaç, de manera que s'avançarà la primavera i s'allargarà l'estratificació tèrmica (M) i, fruit d'això, creixerà més la producció de plàncton o biomassa (M).	Podran desaparèixer totalment o parcialment nombrosos estanys (M).
Embassaments	S'ha incrementat lleugerament l'estabilitat tèrmica (Sau) (E).	S'incrementarà notablement l'estabilitat tèrmica (M).	Creixerà la zona anòxica per sobre del 10 % (M).
Població de peixos als rius	S'observen canvis altitudinals en la distribució d'algunes espècies (E) i l'increment de les més característiques d'aigües càlides (E).	Es podrien donar extincions locals de les espècies de distribució més limitada, sobretot, endemismes (M).	A rius de les nostres dimensions i latituds és previst que es redueixin les poblacions de moltes espècies i en alguns casos es podrien arribar a fragmentar i fins i tot extingir localment, de manera destacada amb les espècies pròpies d'aigües més fredes (M).
Insectes aquàtics	S'observa l'avançament lleuger de la seva emergència (riu Ebre) (M).	S'avançarà més l'emergència de certs insectes (M).	Es donaran canvis importants en les comunitats dels rius (M).
Ecosistemes litorals i marins	La temperatura de les aigües superficials de la Mediterrània ha augmentat al voltant d'1 °C l'últim terç de segle, de manera més destacada a 20 de fondària (E). Es donen canvis en les pautes de distribució de certs organismes (E) i mortalitats en massa a la Mediterrània a causa del manteniment excepcional de la termoclina estival (M).	Es preveu l'increment dels canvis en la distribució i de la mortalitat en massa de certs organismes (M).	Deltas i llacunes litorals podrien desaparèixer totalment o parcialment per efecte de la pujada del nivell del mar (E). Es tendirà a una simplificació de les comunitats marines (M).
Biodiversitat, en general	Augment d'espècies invasores (M) i recessió d'espècies endèmiques (M).	Canvis destacats de la biodiversitat als organismes de les basses, més propenses a assecar-se (M). Disminució de la biodiversitat general, amb més possibilitats encara per a noves espècies invasores (M) i major recessió d'espècies endèmiques (M).	Les tendències del període anterior es faran encara més evidents (B).
Objectius de qualitat de la Directiva marc de l'aigua	Es fixaran pròximament (2009) en el Pla de Gestió de Conca	Caldrà estudiar la seva evolució i possibles modificacions adaptades a les variacions que pateixen les condicions de referència de cada tipus de massa d'aigua (M).	



Variable o indicador	Actual (constatacions)	Curt-mig termini (2025-2040)	Llarg termini (2070-2100)
Implicacions socio-econòmiques entorn al sector aigua			
Sector urbà (domèstic, comercial i turístic)	S'han constatat estalvis importants i destacats increments de l'eficiència en l'ús de l'aigua, sobre tot en moments de crisi (E).	Els usos domèstics i urbans en general podran incrementar la seva demanda d'aigua per efectes tèrmics entre el 5 i el 12% (M). S'encariran els tractaments de l'aigua (M) i les infraestructures necessàries per a compensar els impactes previstos sobre el subministrament d'aigua i el creixement de demandes podrien requerir augments d'inversions de l'ordre del 10% (B). Davant d'un episodi de restricció i/o desabastament en sequeres cada vegada més greus i freqüents es podria arribar a reduccions del PIB d'entre el 5 i el 8% al sector serveis (B).	Sectors com la pesca, l'esquí o el turisme de platja veuran afectats els seus patrons actuals (M).
Sector agrícola	Els nous requeriments ambientals i l'increment de demanda amb noves 125.000 hectàrees de regadiu previstes posen en un greu compromís la seva garantia (E).	L'agricultura de secà podrà veure compromesa la seva productivitat actual (B) i les problemàtiques dels conreus de regadiu seran més freqüents i intenses (M). Podria créixer el reg de suport a conreus com la vinya o l'olivera (B).	Creixeran les demandes d'aigua de l'ordre d'un 5% fruit d'una major evapotranspiració (M). Les mancances en la disponibilitat d'aigua faran disminuir de manera generalitzada les dotacions i garanties en el reg si no es compensa amb la màxima modernització i eficiència i l'aprofitament de nous recursos com el de la reutilització d'aigües regenerades (M).
Sector energètic-hidroelèctric	La producció hidroelèctrica actual és relativament petita i ha anat a la baixa, en termes relatius, els últims anys (E), tot i la pressió per al seu increment, amb les contradiccions que suposa amb les exigències de la Directiva marc de l'aigua.	La dessalinització, altres nous tractaments no convencionals o la modernització dels regadius contribuiran a fer créixer la demanda energètica (M), mentre que la producció hidroelèctrica disminuirà (M).	Disminució de més d'un 20% de la producció hidroelèctrica (M).
Sector industrial	En general, el sector ha realitzat una important tasca de disminució de consum els últims anys.	S'incrementarà la demanda per a refrigeració entorn del 5% (M). Podria arribar a reduir-se el PIB del sector (incloent la producció d'energia) de l'ordre del 7,5% davant d'un episodi de restricció i/o desabastament en sequeres cada vegada més greus i freqüents (B).	
Conjunt de sectors	L'aigua és un element clau i crític en el creixement econòmic (E).	Podria arribar a produir-se una reducció del PIB global de fins al 7,7% davant d'un episodi de restricció i/o desabastament en sequeres cada vegada més greus i freqüents (B). A nivell local o regional, es podrien posar de manifest limitacions en la disponibilitat d'aigua (M).	Creixerà el risc d'inundabilitat en àrees urbanes, industrials i agrícoles deprimides i/o a les planes litorals (M), així com de possibles limitacions en la disponibilitat d'aigua a bona part de Catalunya (M).





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 entre 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 s'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 (Štěpánek, 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'obtingria 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.

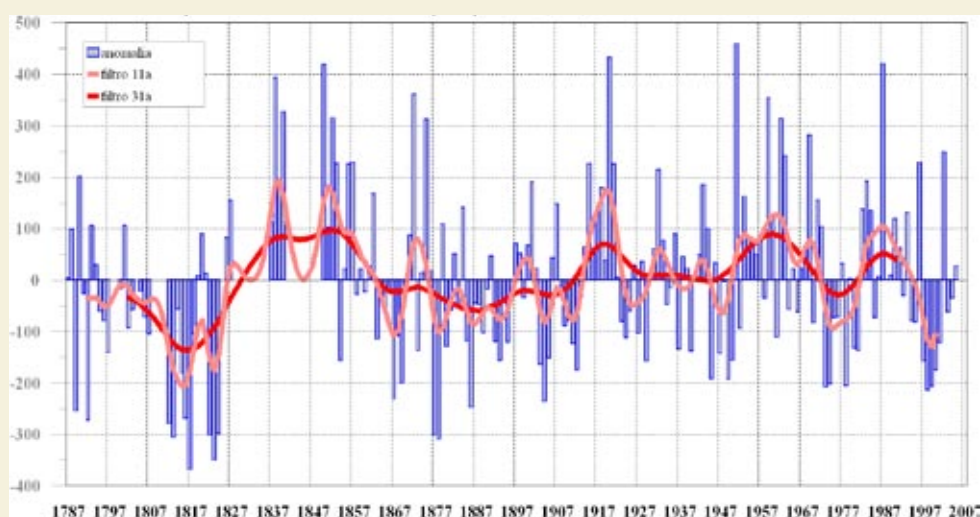
Taula 1. Resultats de l'aplicació dels mètodes de Montecarlo i Mann-Kendall a l'estudi de les tendències en la precipitació estacional i anual a la ciutat de Barcelona (1786-2005).

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 contínues representen l'evolució suavitzada amb filtres passa-baix 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 està 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).

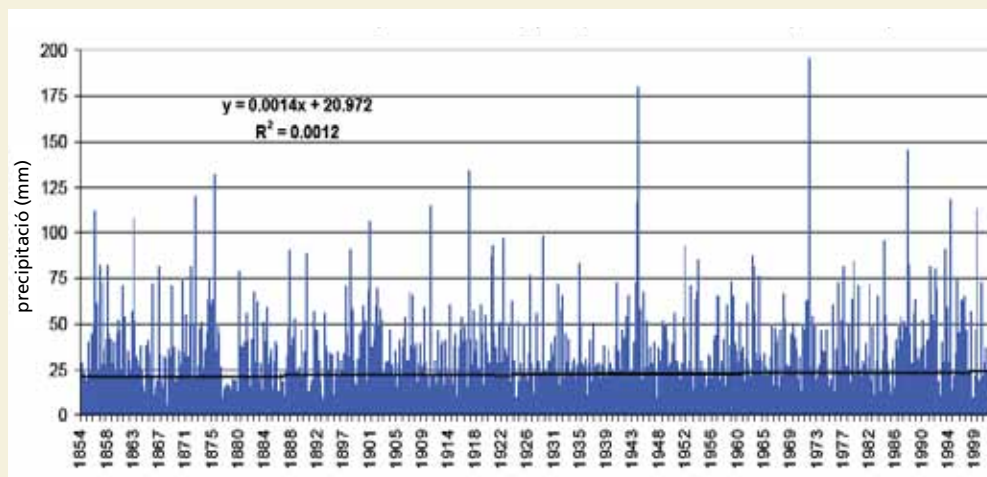
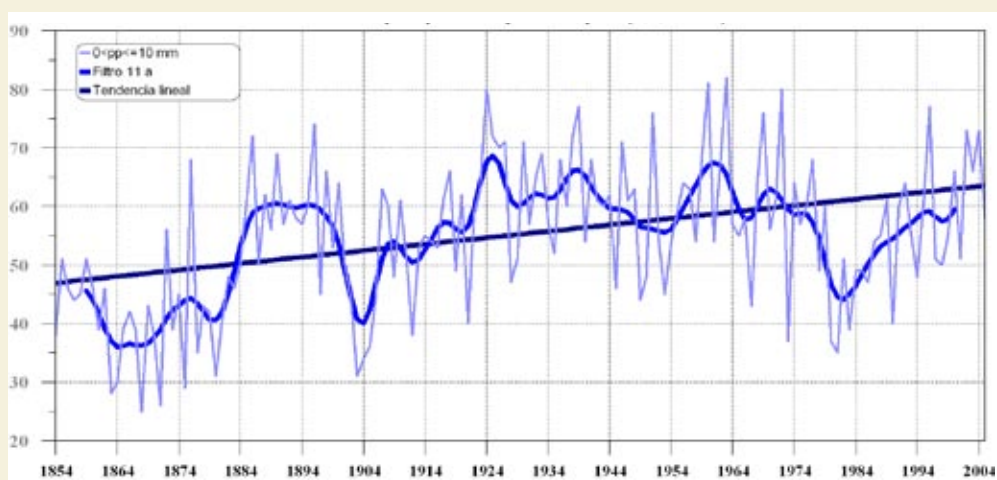


Figura 3. Evolució temporal dels dies anuals amb precipitació apreciable per a l'interval [0,1;10 mm] a la ciutat de Barcelona de 1854 a 2005. Es mostra la tendència lineal i l'evolució suavitzada amb un filtre passa baix gaussià d'11 anys.





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	-5·10 ⁻³ esdev./a	+0,011 esdev./a	-0,011 esdev./a	No
20 mm < Nre. dies ≤ 30 mm	+7·10 ⁻³ esdev./a	+0,007 esdev./a	-0,007 esdev./a	No*
30 mm < Nre. dies ≤ 45 mm	+4·10 ⁻⁴ esdev./a	+0,006 esdev./a	-0,006 esdev./a	No
45 mm < Nre. dies ≤ 60 mm	-1·10 ⁻⁴ esdev./a	+0,003 esdev./a	-0,003 esdev./a	No
Nre. dies anuals > 60 mm	+2·10 ⁻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
SALLEN (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.).

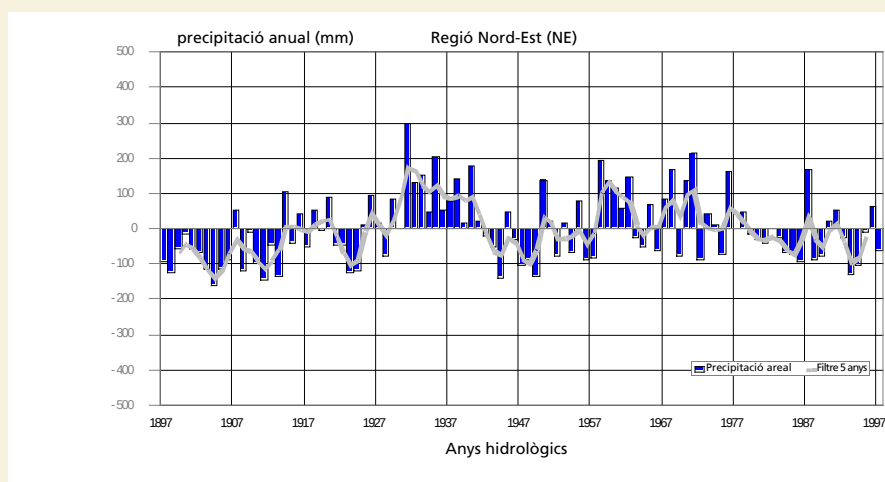




Figura 5. Evolució de la mitjana mòbil estacional amb una longitud de finestra de 30 anys (Barrera et al., en prep.).

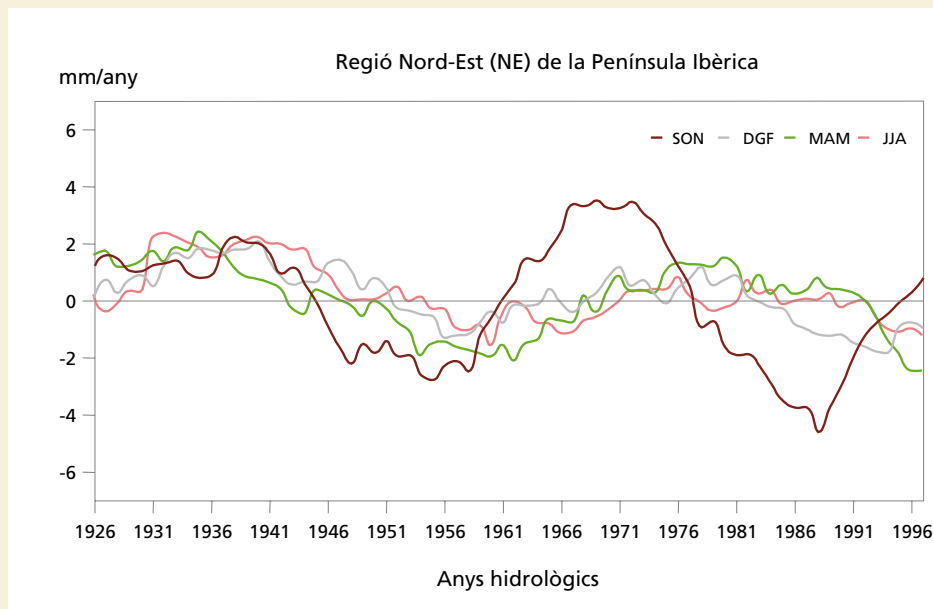


Figura 6. Evolució de les anomalies absolutes de precipitació (valor de precipitació menys la mitjana) de tardor (SON) a les conques de l'Ebre i a les conques internes per al període 1897-1998 (Barrera et al., en prep.).

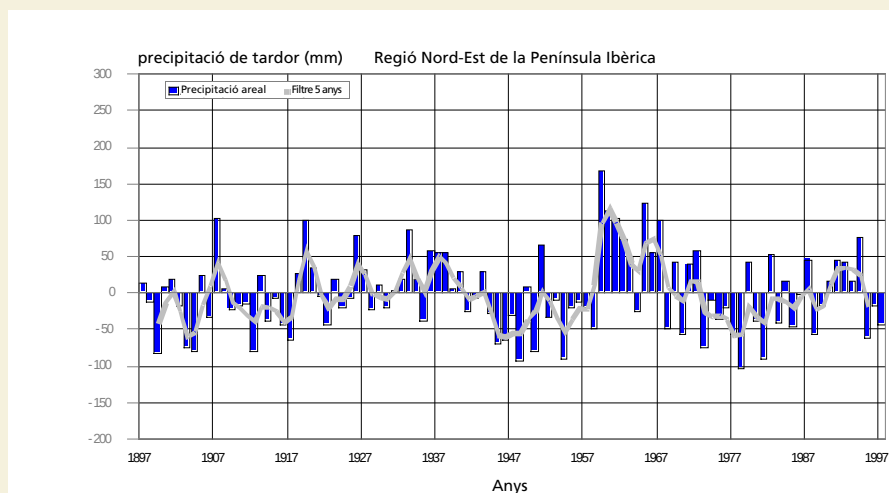
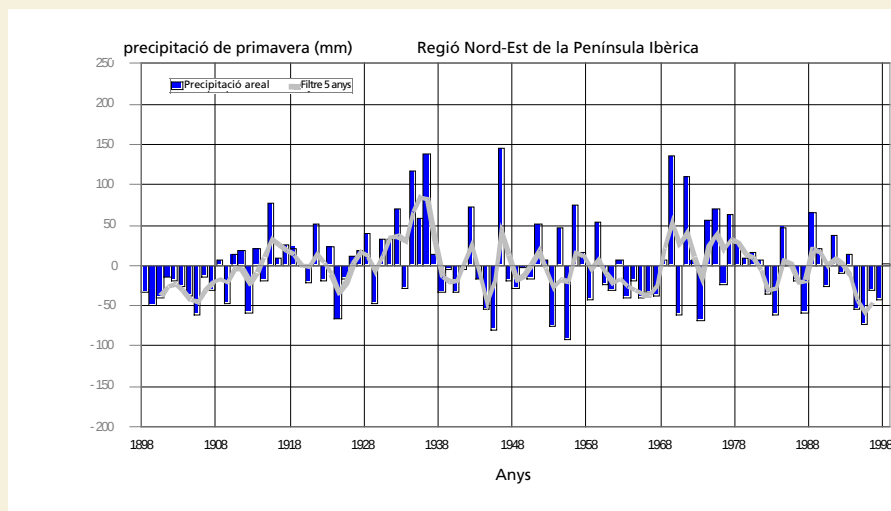


Figura 7. Evolució de les anomalies absolutes de precipitació (valor de precipitació menys la mitjana) de primavera (MAM) a les conques de l'Ebre i a les conques internes per al període 1897-1998 (Barrera et al., en prep.).



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%?
NE	SON	+0,08	+0,37	-0,37	NS
	DGF	+0,19	+0,29	-0,29	NS
	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%?
NE	1897/98 1939/40	+5,49	+2,42	-2,43	Sign.
	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 ($\alpha = 0,05$).
- 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 (*Arctic 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’altres 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 advectiones 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)	Coefficient de variació 1951-1975	Coefficient 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
Campdevàrol	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
Torrellebreia	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
Ràimat	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
Coefficient de variació (%)	molt baix <15	baix 15-19	moderat 20-24	moderat alt 25-29	alt 30-34	molt alt >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.; ŠTÍPÁNEK, 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 Peninsular 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.

ŠTÍPÁNEK, 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 Llusà, 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

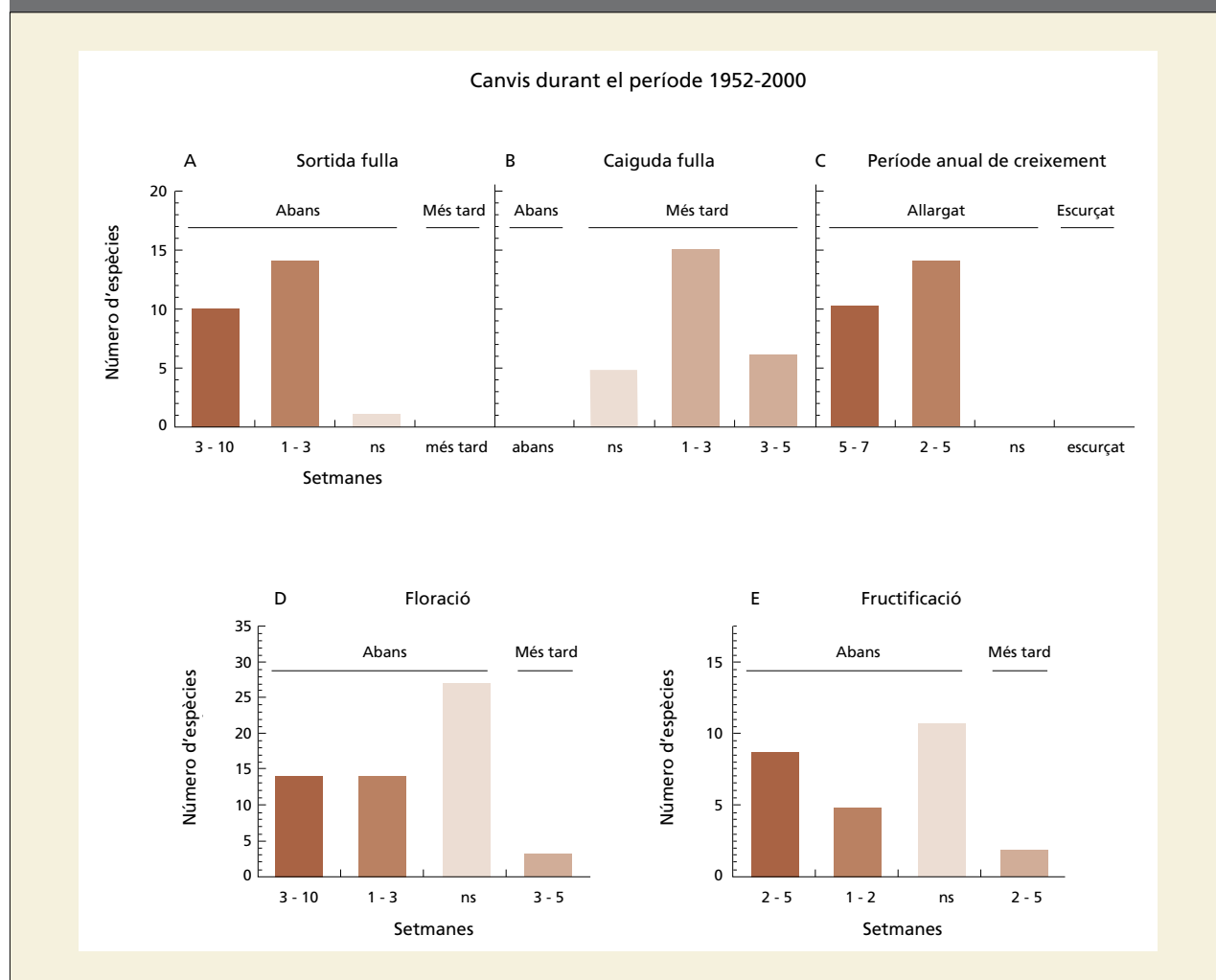
La nostra activitat i l'activitat de tots els organismes vius està fortament influïda per la temperatura. No podem esperar altra cosa que alteracions d'aquesta activitat en escalfar-se el país per sobre d'1 °C. No ens ha d'estranyar, així doncs, que l'escalfament s'hagi traduït ja en canvis significatius 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 guatlà 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 consegüent 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 40° . 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

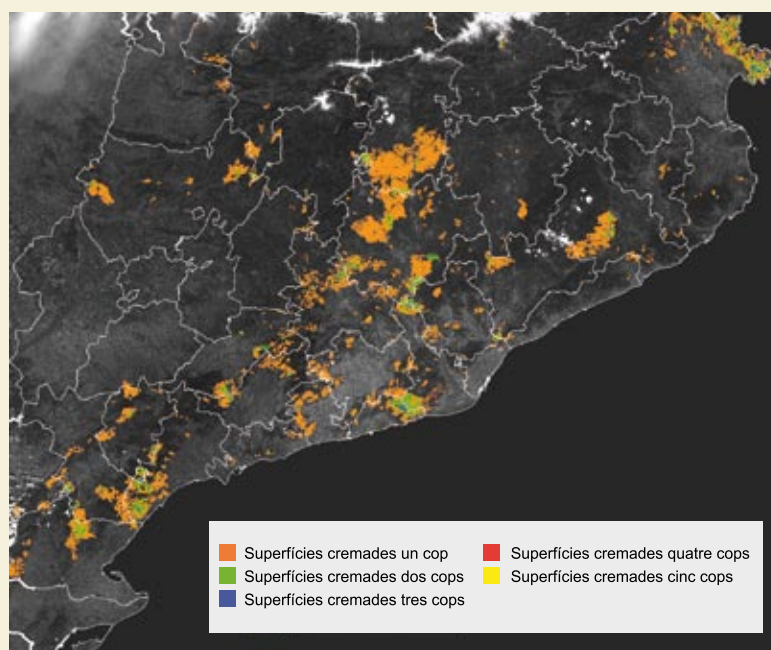
Els models GCM preveuen per al nostre país un augment de la freqüència i la intensitat dels períodes de sequera. Dels efectes de períodes càlids i/o secs en tenim exemples recents en els episodis calorosos i secs de 1986, 1994, 2003 i 2005. Cada un d'aquests episodis va afectar profundament la vegetació 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 predictable 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 CO₂, 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

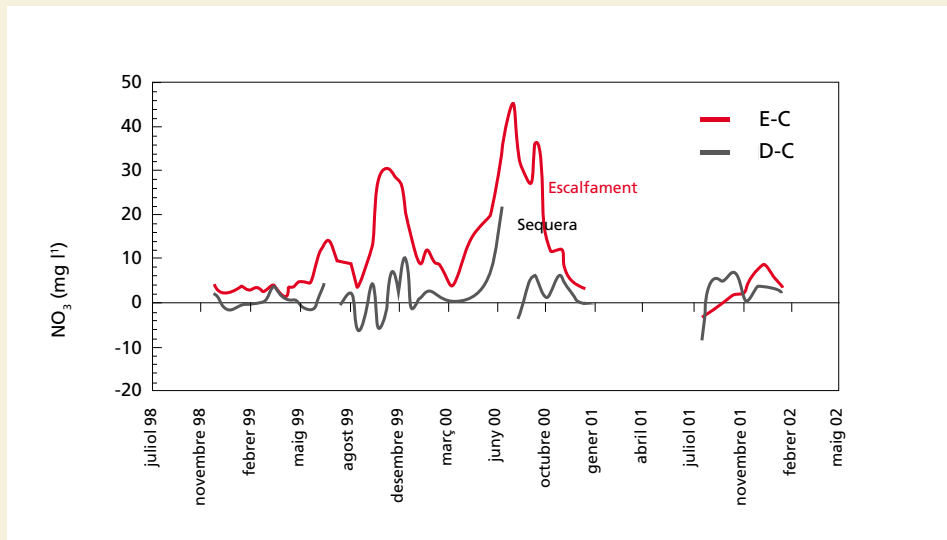
L'augment de temperatura té molts altres efectes directes sobre l'activitat dels organismes vius. Un d'important ambientalment és l'augment exponencial de l'emissió biogènica de compostos orgànics volàtils (COV). Aquestes emissions biogèniques de COV afecten la química atmosfèrica, no solament pel que 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, NO_x, O₃...). 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 CO₂ 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).

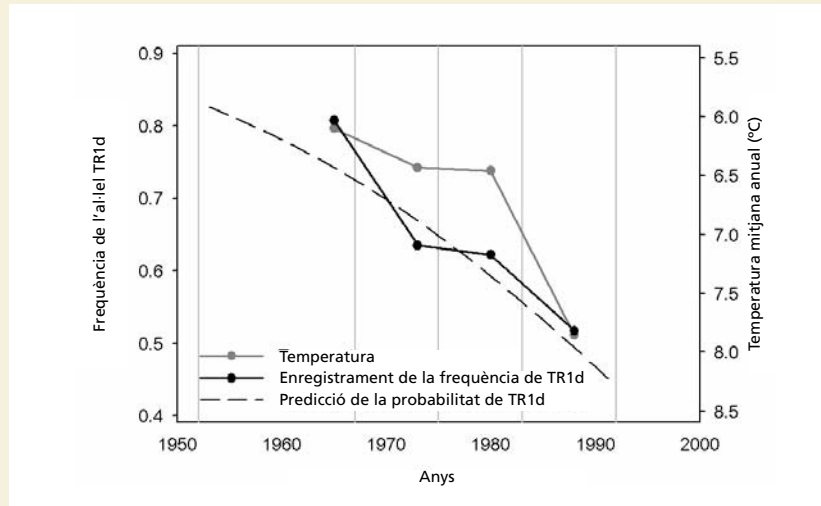


Adaptabilitat de les espècies i les poblacions als canvis

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'escoriment 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).

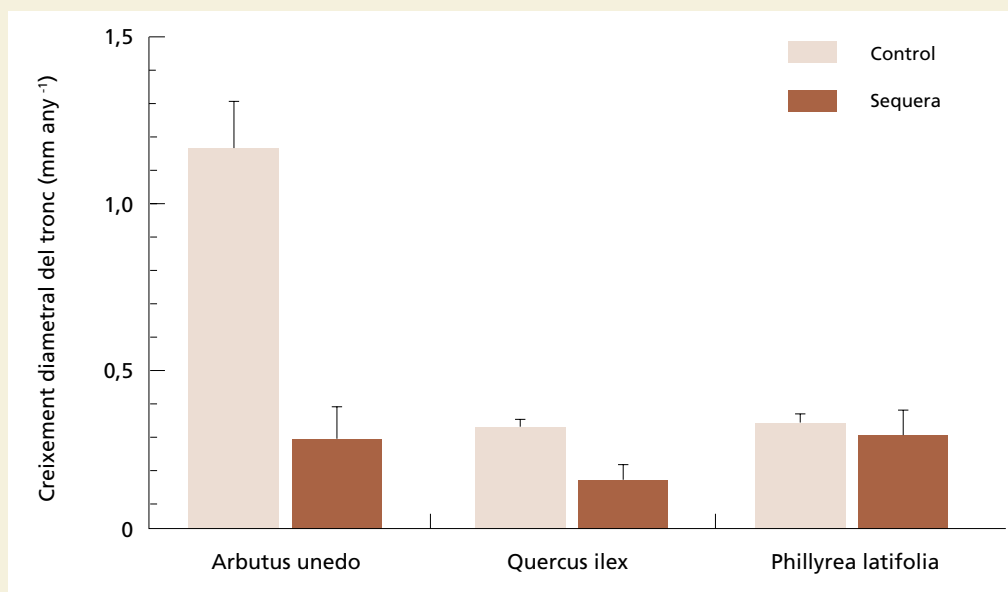
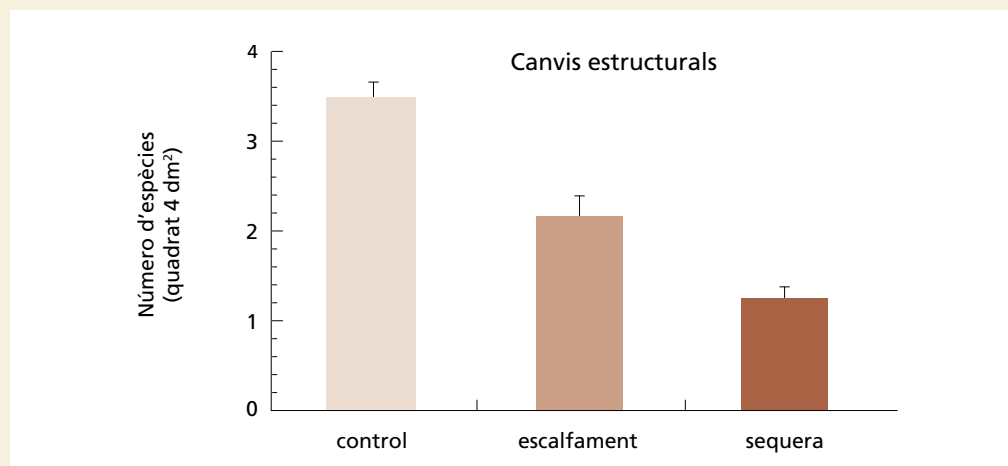


Figura 6. Exemple de canvis ecosistèmics estructurals produïts pel canvi climàtic. Disminució de la riquesa d'espècies reclutades en parcel·les de brolles mediterrànies del Garraf sotmeses a 1 °C d'escalfament o a una disminució de la humitat del sòl del 20% (basat en l'estudi de Lloret et al., 2004).





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 (CCI) de l'OMM, dins del Programa de Recerca Climàtica Mundial (WCRP), i de la Joint Commission 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 $TN < 0^{\circ}C$	dies
2	DE25	SU25	Dies d'estiu	Summer days	Nombre de dies en 1 any en què $TX > 25^{\circ}C$	dies
3	DGa0	ID0	Dies glaçats	Ice days	Nombre de dies en 1 any en què $TX < 0^{\circ}C$	dies
4	NT20	TR20	Nits tropicals	Tropical nights	Nombre de dies en 1 any en què $TN > 20^{\circ}C$	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 $TG > 5^{\circ}C$ i la primera ratxa després de l'1 de juliol amb, com a mínim, 6 dies amb $TG < 5^{\circ}C$	dies
6	TXx	TXx	Màxima de TX	Maximum TX	Valor màxim anual de la temp. màxima diària	$^{\circ}C$
7	TNx	TNx	Màxima de TN	Maximum TN	Valor màxim anual de la temp. mínima diària	$^{\circ}C$
8	TXn	TXn	Mínima de TX	Minimum TX	Valor mínim anual de la temp. màxima diària	$^{\circ}C$
9	TNn	TNn	Mínima de TN	Minimum TN	Valor mínim anual de la temp. mínima diària	$^{\circ}C$
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	$^{\circ}C$
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 $PPT \geq 1$ mm	mm/dia
20	DP10	R10	Dies de $PPT \geq 10$ mm	Annual count of days when precipitation ≥ 10 mm	Nombre anual de dies en què $PPT \geq 10$ mm	dies
21	DP20	R20	Dies de PPT abundant	Annual count of days when precipitation ≥ 20 mm	Nombre anual de dies en què $PPT \geq 20$ 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 > 95 th 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 > 99 th 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.

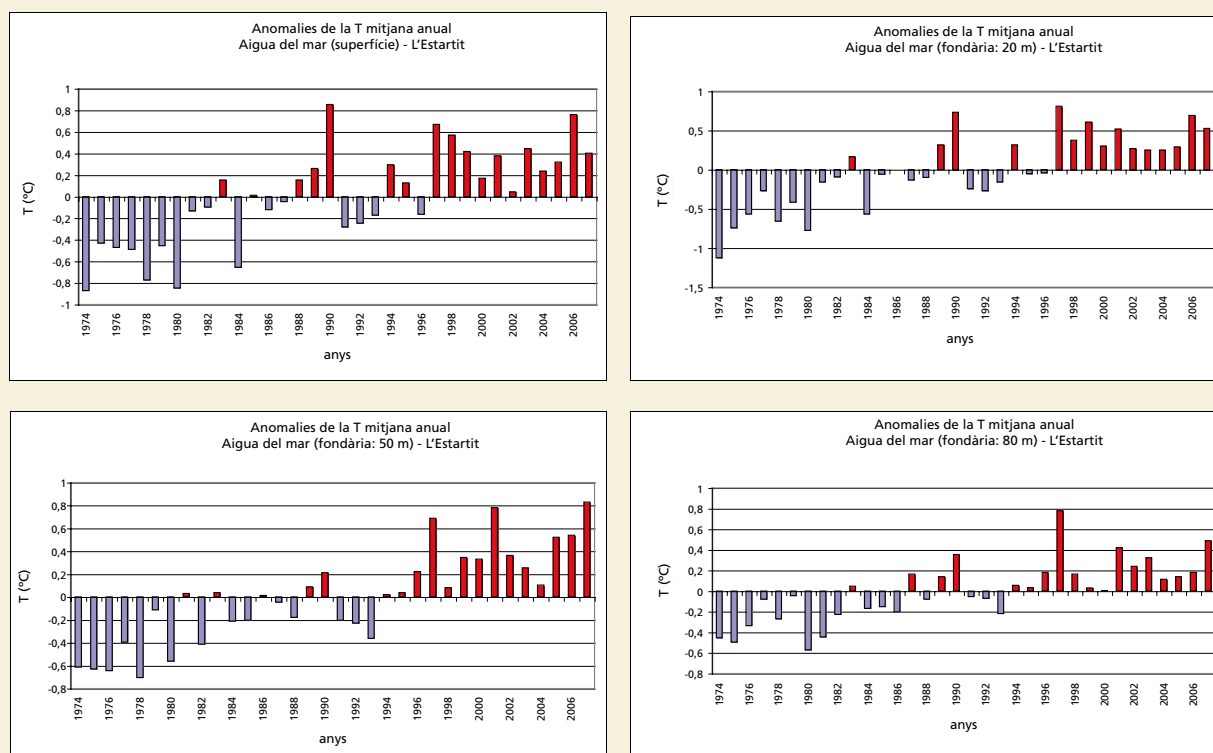
L'anàlisi d'aquesta sèrie mostra una tendència paral·lela a la que ha experimentat la temperatura de l'aire en altres observatoris que s'han estudiat. Així, la temperatura de l'aigua del mar ha augmentat significativament a totes les fondàries, en especial a les tres més superficials, a un ritme proper 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 discontinua), 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

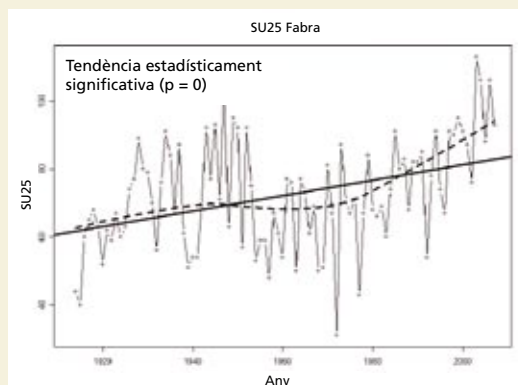
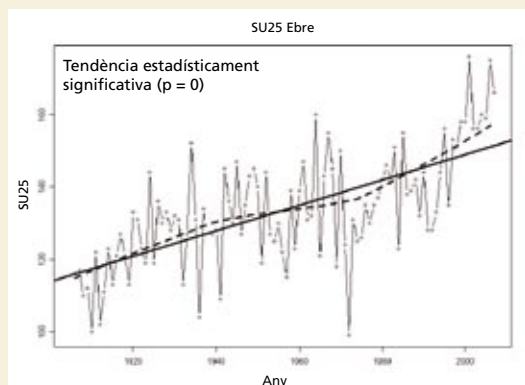


Figura 3. Evolució de l'índex climàtic TN10p per a l'Observatori de l'Ebre (esquerra) i per a l'Observatori Fabra (dreta), superposant l'ajust lineal (línia contínua) i l'ajust polinòmic (corba discontinua), i mostrant el valor de l'estadístic p (tendència estadísticament significativa).

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	%

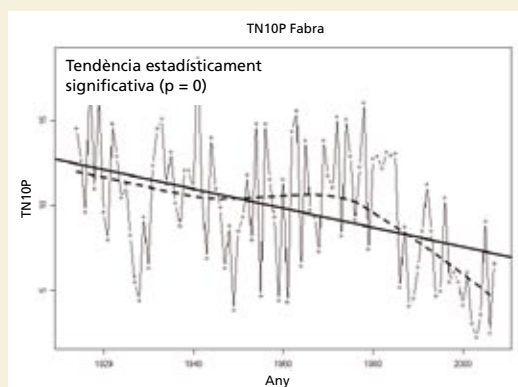
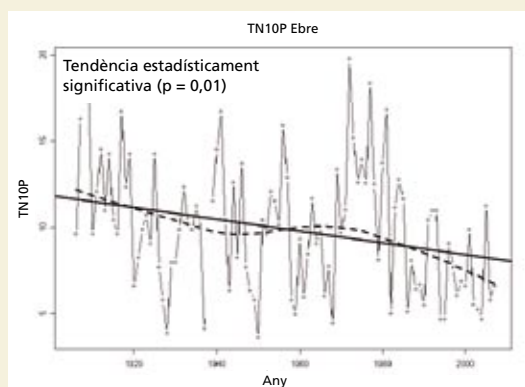




Figura 4. Evolució de l'índex climàtic ISID per a l'Observatori de l'Ebre (esquerra) i per a l'Observatori Fabra (dreta), superposant l'ajust lineal (línia contínua) i l'ajust polinòmic (corba discontinua), i mostrant el valor de l'estadístic p (tendència estadísticament significativa).

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	%

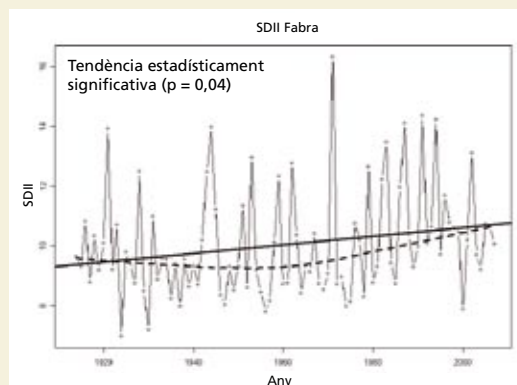
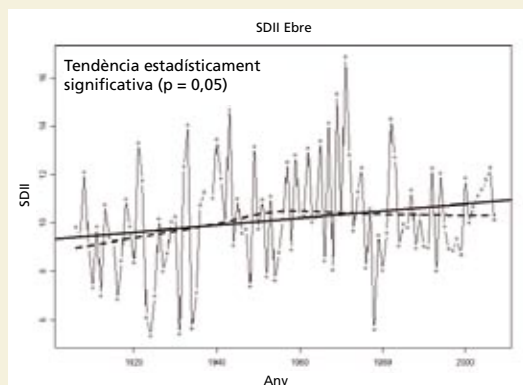
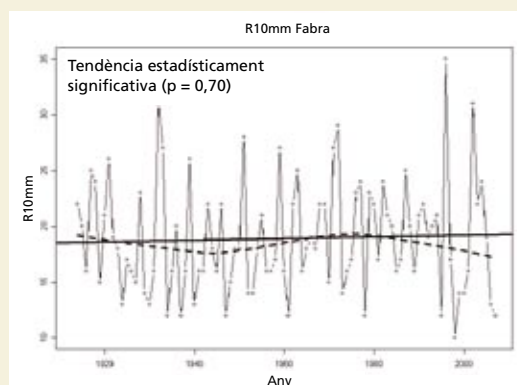
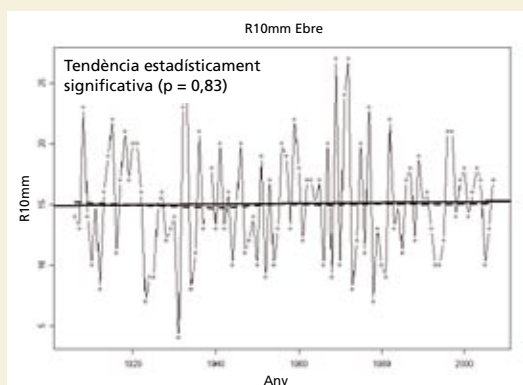


Figura 5. Evolució de l'índex climàtic DP10 per a l'Observatori de l'Ebre (esquerra) i per a l'Observatori Fabra (dreta), superposant l'ajust lineal (línia contínua) i l'ajust polinòmic (corba discontinua), i mostrant el valor de l'estadístic p (tendència estadísticament significativa).

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, algorismes que descriuen un procés determinat a partir de variables fonamentals. Per exemple, la nuvolositat en una cel·la de 100 km² 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'indole 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 mareas de l'oceà i la predicció del clima o del temps del futur. Tanmateix, a la darrereria 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 físicomatemàtic 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.

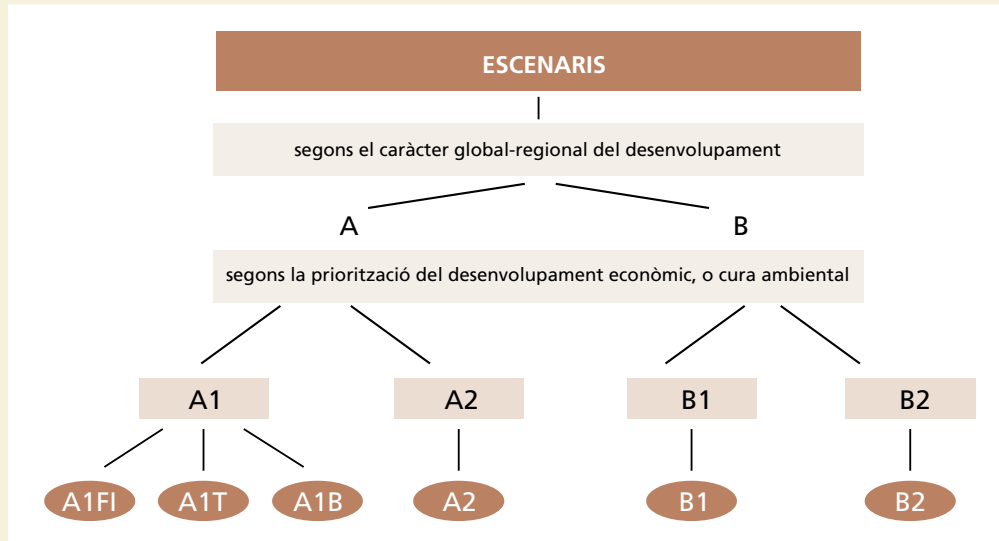
En els models es pren l'atmosfera com el sistema principal. El segon subsistema que es té en compte són els oceans. Atès el fort acoblament entre l'atmosfera i els oceans per a obtenir una bona modelització, convé incloure les interrelacions mútues entre els dos sistemes. La contribució dels altres subsistemes 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, consegüentment, 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 fons 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 3° i 1° 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 propietats 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 prioritització del desenvolupament econòmic o cura ambiental 1 o 2, respectivament.



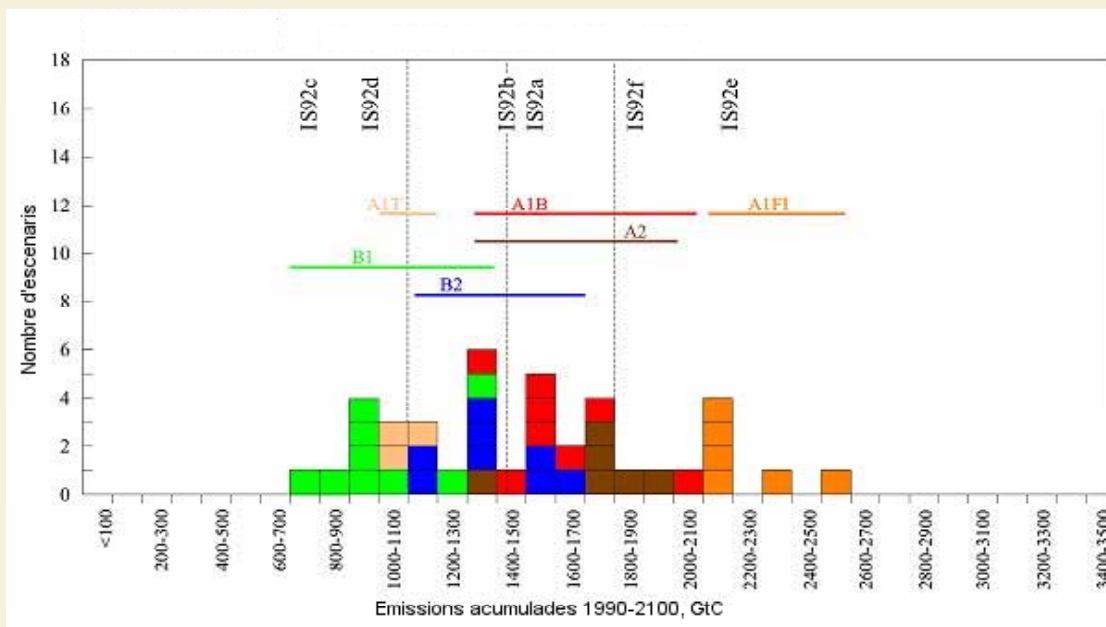
Figura 1. Escenaris plantejats per l'Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC).



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 CO₂ força diferents (vegeu la figura 2) i, naturalment, a concentracions de CO₂ 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).

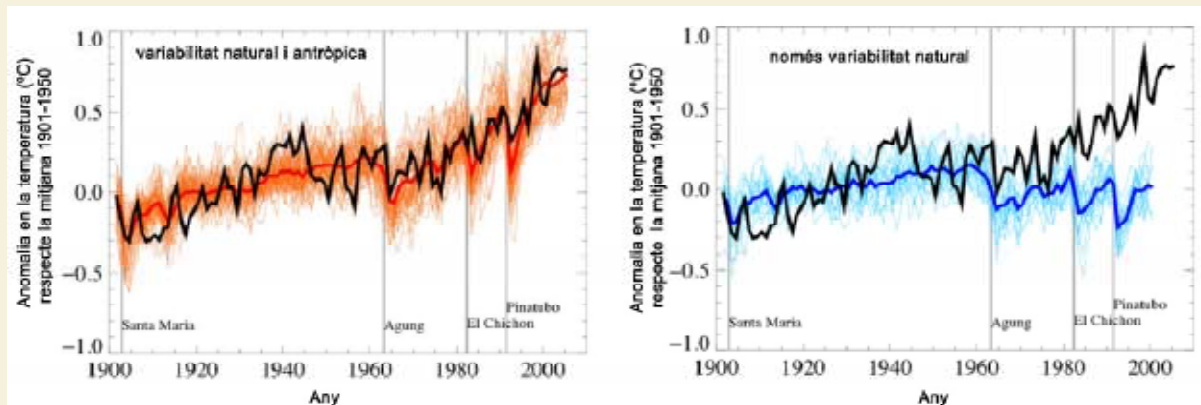


Resultats

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) afegixen 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». *Tellus*, 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 30°N i 75°N i els meridians 10°W i 40°E. En algun moment es distingeix el nord d'Europa (a partir del paral·lel 48°N) 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 càpita*) i tecnològiques entre diverses regions del planeta es mantenen o augmenten.

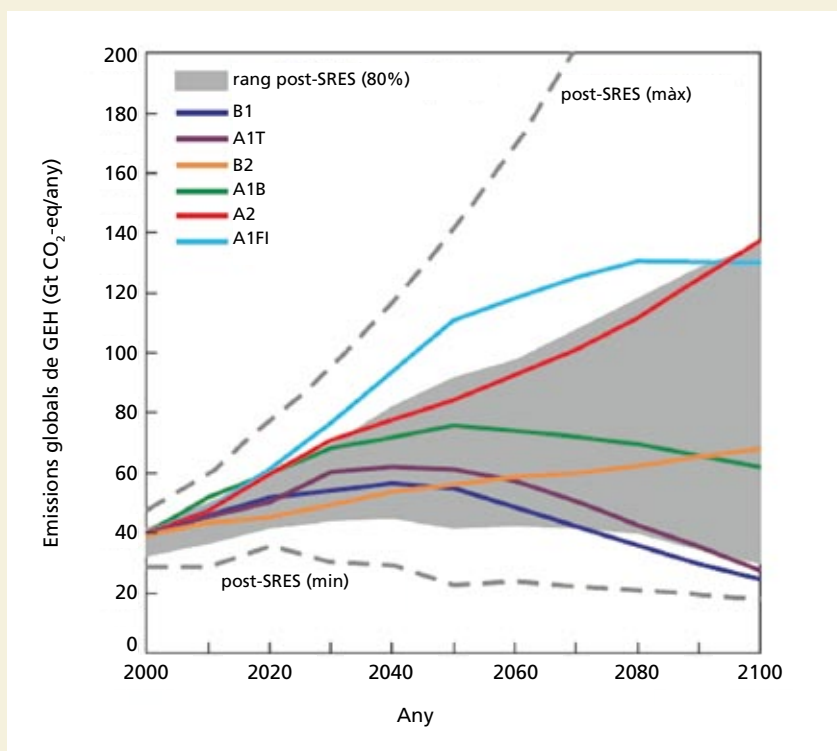


B2. Aquí, la sostenibilitat s'aproxima sota una perspectiva més aviat local o regional. La població creix contínuament, però més lentament que en el cas A2. També el creixement econòmic i els canvis tecnològics són més lents, però, en canvi, s'orienten de més diverses maneres.

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 CO₂ és d'uns 200 anys.

Figura 1. Les emissions anuals de gasos d'efecte d'hivernacle (com a Gt de CO₂ equivalent) estimades per als diversos escenaris d'emissions, fins a l'any 2100. [Font: IPCC Synthesis Report, 2007].



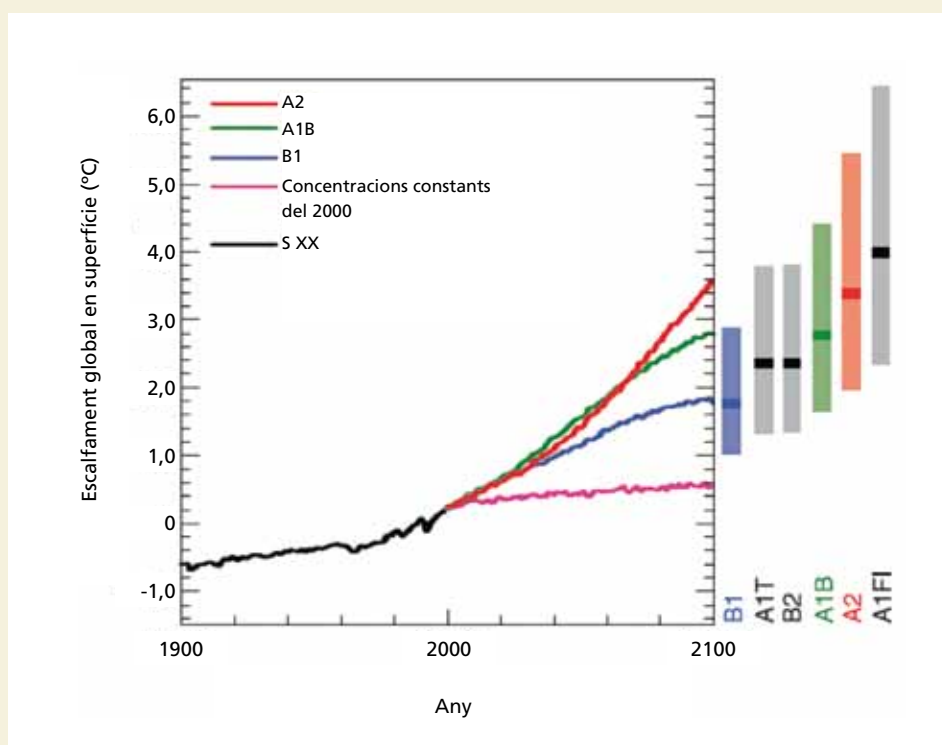
Augment de temperatura

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 dona, 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 mediterrània	Estació	Mín.	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Màx.	Estacions càlides (%)
30°N, 10°W a 48°N, 40°E	DGF	1,7	2,5	2,6	3,3	4,6	93
	MAM	2,0	3,0	3,2	3,5	4,5	98
	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 dona 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 dona, 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.

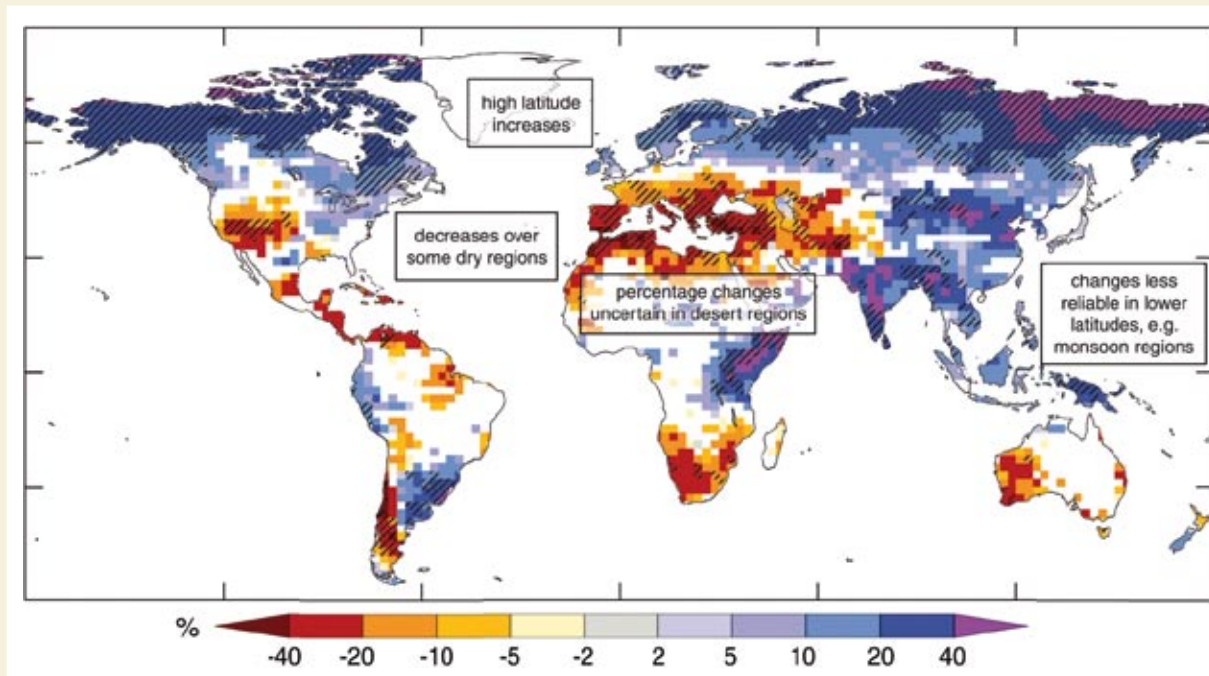
Taula 3. Resum de les projeccions de 21 models inclosos en l'MMD (multi-model data set), per a la regió mediterrània, escenari A1B. Diferències en la precipitació (en tant per cent) entre el període 2080-2099 i el període 1980-1999. [Font: Christensen *et al.*, 2007].

Regió mediterrànea	Estació	Mín.	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Màx.	Estacions humides (%)	Estacions seques (%)
	DGF	-16	-10	-6	-1	6	3	12
30°N, 10°W a	MAM	-24	-17	-16	-8	-2	1	31
48°N, 40°E	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, consegüentment, 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 Groenlàndia i l'Antàrtida. Precisament el comportament del glaç de Groenlàndia 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.; MEARN, 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 30°N i 75°N i els meridians 10°W i 40°E). 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 2-3° 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

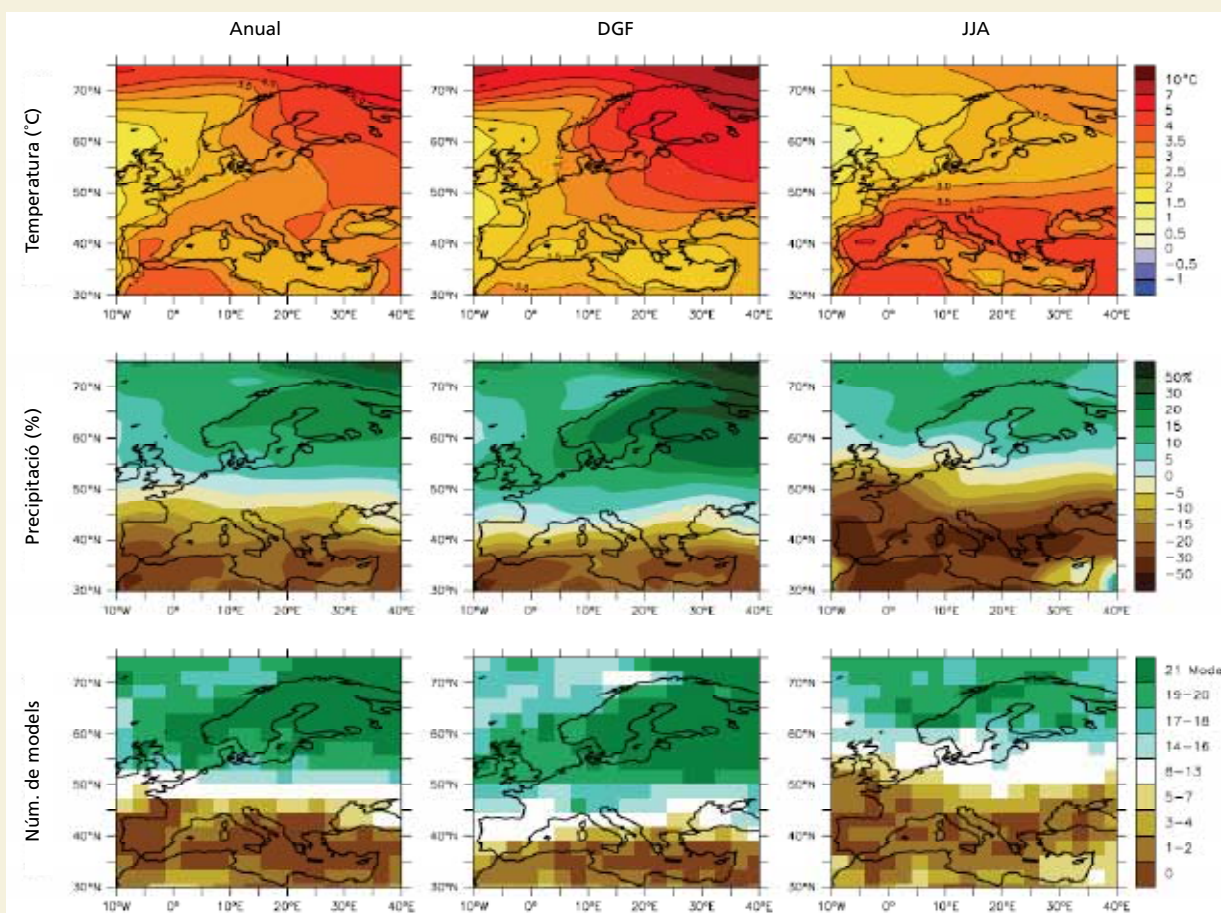
AR4 GIECC. Europa i el Mediterrani

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

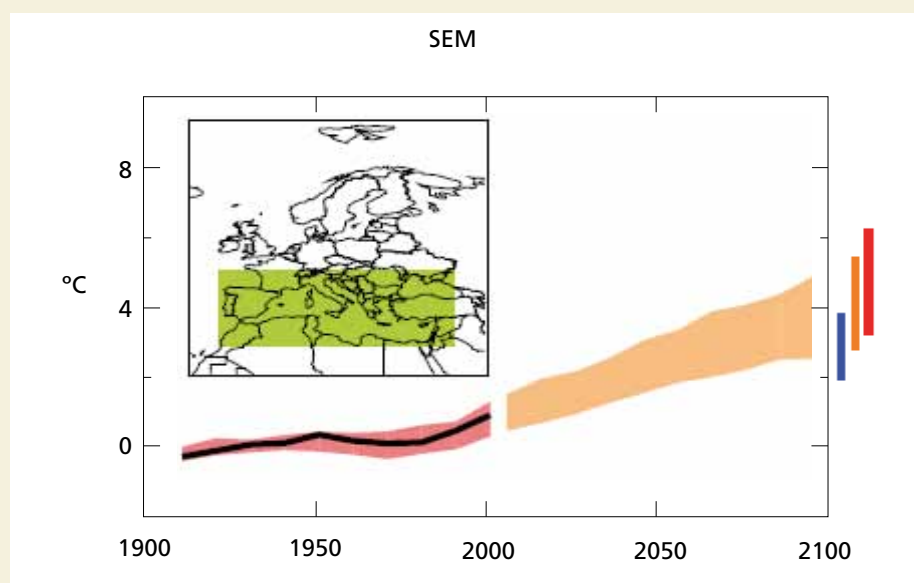


Mediterrània o la península Ibèrica. D'aquesta manera, i deixant de banda les qüestions més òbvies, com ara l'augment de temperatura una mica superior a la mitjana global, s'indica que:

- 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].

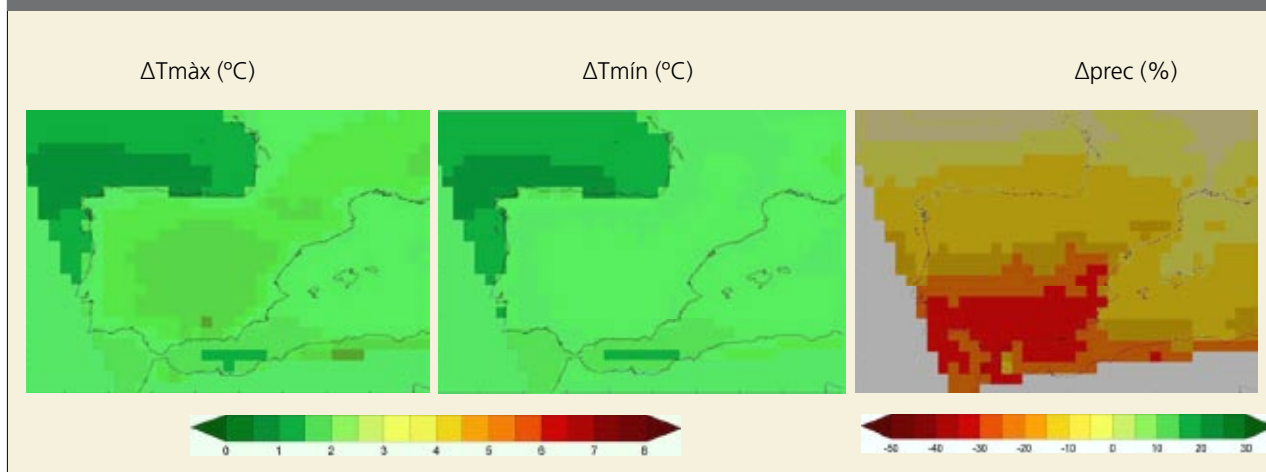


Prudence. La península Ibèrica

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 disminuïrem 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 °C i la temperatura mínima ho faria entre 2,5 i 3,5 °C. 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 CO₂) 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 40°N). 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) dona 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 seculares 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.; MEARN, 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, fem 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 geostrofic 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 geostrofic 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.

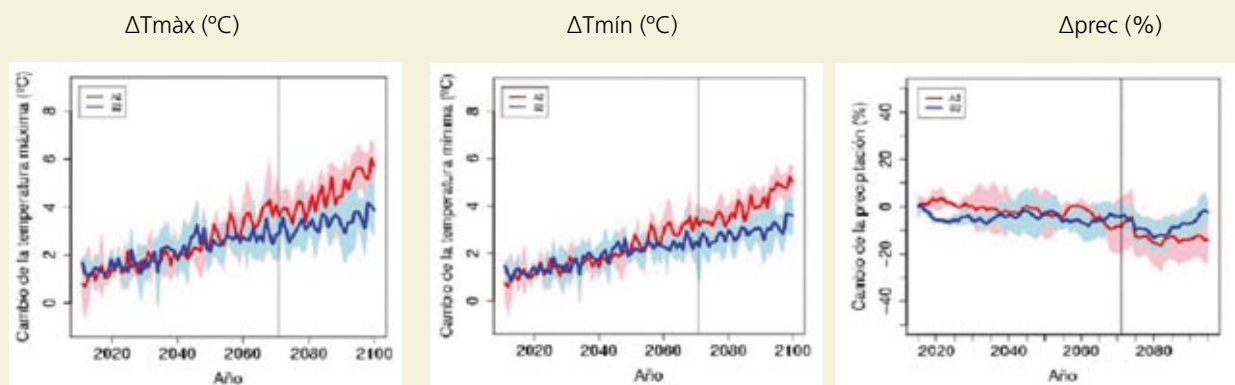
Finalment, un tercer mètode consisteix en una pura regressió lineal múltiple. El mètode pren el nom de SDSM (Statistical DownScaling Method). Es tracta d'establir relacions empíriques entre els predictands a escala local i els predictors d'escala regional, tal com resulten dels models de circulació general. 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 assolix 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.



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. Incrementos 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. Incrementos 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 (DJF)	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 (DJF)	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 dona 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 consegüent 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 dona.

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 -10, 0	3,0-4,0 -10, 0	5,0-6,5 -40, -20	3,5-5,0 -15, -5	3,5-5,0 -20, -10	0,4-1,6 -12, 0
Interior	2,5-4,0 +5, +10	3,5-5,0 -15, -5	6,0-7,0 -35, -15	4,5-6,5 -15, -5	4,0-5,5 -15, -5	0,8-2,0 -7, +5
Pirineus	2,5-4,0 +5, +15	3,0-4,5 0, +10	6,5-7,5 -15, 0	5,0-6,0 -10, 0	4,0-5,5 -5, +5	0,8-2,0 -2, +10
Catalunya	2,5-4,0 -5, +10	3,0-4,5 -10, 0	5,5-7,0 -30, -10	4,0-5,5 -15, -5	4,0-5,5 -15, -5	0,7, 1,9 -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.
- DIFENBAUGH, 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.; HENRICH, 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 trends and 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.





Impactes hidrològics

Resum

Josep Mas-Pla
Universitat de Girona

El canvi climàtic comporta implícitament una alteració del cicle hidrològic en tots els seus components. En aquesta modificació, a més dels processos físics que habitualment es consideren en descriure el cicle de l'aigua, hi tenen una gran rellevància el comportament de la cobertura vegetal, l'ús del territori i les extraccions d'aigua per a usos humans.

En l'apartat corresponent als impactes hidrològics del canvi climàtic en el context de les conques hidrogràfiques de Catalunya es constata amb certesa que, ateses les prediccions dels models climàtics, tindrà lloc una disminució de la quantitat d'aigua disponible en els rius i els aqüífers que, finalment, permet abastar la demanda que requereixen els processos ecològics i les necessitats humanes.

L'anàlisi de les prediccions climàtiques en clau hidrològica permet definir aquesta tendència a la pèrdua de recursos hidrològics. Cal tenir en compte, però, que tot i ser implícita aquesta tendència en les estimacions de temperatura i precipitació per al proper segle, el nivell de representativitat de les dades hidrològiques mesurades i la complexa idiosincràsia de les conques de Catalunya, fan que encara hi hagi importants dubtes en els efectes hidrològics més específics, més enllà de la relació immediata que sovint s'utilitza entre clima i hidrologia. Les conclusions d'aquesta anàlisi reflecteixen l'estat actual del coneixement dels impactes i aporten arguments que s'han de prendre en consideració en els futurs plans hidrològics.

Les aportacions dels diferents autors consideren els recursos d'aigua superficials i subterranis, l'efecte de la massa forestal i les afeccions antròpiques com a elements interrelacionats i indissociables en el context del cicle hidrològic. D'aquesta manera, les alteracions que produeixen les variacions climàtiques, si bé s'analitzen sectorialment per a cada un dels components del cicle, són complexes i amb vincles entre tots aquests components.

Amb relació als cabals de les conques hidrogràfiques, l'estudi estadístic rigorós de les sèries de cabals conclou un descens versemblant (és a dir, amb el 66-90% de confiança) dels *cabals climàtics* en el període 1940-1997, tant a les conques internes com a la conca de l'Ebre (capítol 8). En aquest descens observat s'accepta l'efecte del clima en el descens del cabal; si bé l'augment dels regadius i els canvis a les capçaleres, concretament l'augment de l'evapotranspiració associat a l'increment de la cobertura forestal, fins ara tenen un rol probablement més important en la disminució del cabal superficial dels rius amb un nivell de confiança superior al 99%.

Atesa la importància de l'evapotranspiració en el balanç hidrològic, els boscos tenen un paper rellevant en tant que el canvi climàtic en modificarà l'estructura i les seves funcions biològiques, la qual cosa afectarà la producció de biomassa i, consegüentment, la captura de recursos d'aigua. La modelització de les noves condicions que el canvi climàtic imposarà als ecosistemes s'ha realitzat amb el model Gotilwa+, que permet analitzar la resposta dels boscos amb relació al balanç hidrològic (capítol 9). A grans trets, l'augment de la temperatura implica més demanda evaporativa i respiració, per la qual cosa cal més aigua per a mantenir la producció de biomassa. Això comporta una reducció de les reserves d'aigua al sòl. Tanmateix, atès que la pluviometria tendeix a créixer segons les prediccions climàtiques, els ecosistemes patiran més sequera. Finalment, un canvi progressiu en l'estructura forestal pot produir diverses afeccions al cicle hidrològic; per exemple, un augment de la torrencialitat.

La modelització dels processos hidrològics aporta una estimació quantitativa de les alteracions al cicle hidrològic (capítols 10 i 11). En particular, el règim d'aigües superficials mostrarà una reducció de les aportacions mitjanes

del 10 al 25% en les àrees mediterrànies, com a valoració general, i de fins al 16% a les conques internes i de l'Ebre per a la segona part d'aquest segle (capítol 10). En l'àmbit local, els diferents exercicis de simulació en diverses conques pilot de Catalunya per a l'horitzó 2070-2100, basats en escenaris climàtics determinats per augments de temperatura i disminucions de precipitació fixos, o bé en les sèries climàtiques diàries del projecte Prudence, mostra una variació de les aportacions del règim de cabals (generalment, negatives associades a un increment de l'evapotranspiració) amb percentatges molt variables (entre +3,5 i -51,7%, que cal interpretar d'acord amb el fet que es tracta de prediccions preliminars i/o del model climàtic específic en què es basen). Aquests resultats són, això no obstant, orientatius i difícilment aplicables a horitzons més propers, així com a conques concretes, degut a la incertesa dels règims pluviomètrics previstos. Tot i l'àmplia dispersió observada, les tendències són coherents entre els diferents models emprats, de manera que es posa de manifest com la modelització hidrològica és l'eina que ha de permetre valorar les tendències predites i les implicacions que tinguin en la gestió hidrològica a mesura que augmentin les observacions i la qualitat de les prediccions climàtiques per al segle XXI.

Amb relació als recursos subterranis, el balanç hidrològic de l'aigua al sòl permet estimar la recàrrega dels aquífers un cop quantificats els altres components del cicle hidrològic (capítol 11). La modelització aquí presentada ha consistit a estimar el percentatge de recàrrega ateses les prediccions climàtiques a partir d'un calibratge del règim hidrològic basat en dades històriques i l'evolució piezomètrica a tres zones de Catalunya, considerades poc influïdes per les extraccions humanes i que reflecteixen, per tant, les condicions naturals del balanç. Aquest exercici conclou que la recàrrega disminuirà en el període 2071-2100 en el 25% de mitjana com a conseqüència d'una pluviometria més baixa i de l'augment de l'evapotranspiració i l'escorriment. Aquest darrer factor està relacionat amb una concentració més elevada de les precipitacions, el que pot modificar el règim hidrològic i l'eficiència en la infiltració. Els resultats apunten a una pèrdua del cabal de base dels rius.

La magnitud i la freqüència dels fenòmens extrems (inundacions i sequeres) és una de les conseqüències de l'augment de variabilitat que comporta el canvi climàtic (capítol 12). L'augment de la temperatura suposarà un augment del 10% dels dies secs respecte al clima actual. En el cas de la precipitació, els models no ofereixen una reducció clara de la pluviometria mitjana, però adverteixen d'una concentració dels dies de pluja i de la intensitat. Ambdues modificacions intraanuals del cicle s'associen a un increment de la probabilitat de patir fenòmens extrems. Interanualment, les simulacions a la Muga i al Francolí mostren que les aportacions d'una determinada periodicitat es reduiran al llarg del segle. Amb relació a les sequeres, cal ser prudent per a distingir entre les tendències associades al clima i l'existència d'anys secs en la normalitat esperada. Amb tot, les estimacions alerten sobre el possible increment de períodes secs, si bé en l'àmbit català els diferents models no ofereixen una tendència clara i aquest increment només seria significatiu per a horitzons a llarg termini (2070). En la meteorologia complexa pròpia del clima mediterrani, els aiguats a Catalunya amb magnitud corresponent a períodes de retorn d'entre 50 i 100 anys podrien augmentar notablement la freqüència i els cabals punta.

Les variacions de temperatura i precipitació associades al canvi climàtic modificaran els patrons de comportament químic de determinats contaminants, la dinàmica transport i l'evolució dels contaminants en el medi hídic (capítol 13). La temperatura influeix en els processos de volatilització, que en el cas dels composts organoclorats persistents genera un efecte de destil·lació global i augmenta la seva presència a l'atmosfera. Els sediments dels llacs dels Pirineus han assolit concentracions estables d'aquests composts des que es van començar a emprar de manera habitual a mitjan segle XX, la qual cosa denota la rellevància del transport aeri i de la seva persistència en el medi hídic i, per extensió, biòtic. L'augment de temperatura incrementaria, doncs, la capacitat de volatilització i d'expansió aèria d'aquests composts. Altres contaminants, com els hidrocarburs aromàtics, estan associats a l'ús de combustibles fòssils. Conseqüentment, la seva concentració va lligada a la millora dels processos de combustió i a l'ús d'energies renovables.



El control de la solubilitat dels composts químics en funció de la temperatura pot agreujar l'anòxia a les aigües superficials, atès que la dissolució de l'oxigen és inversament proporcional a la temperatura, cosa que dóna lloc a condicions d'eutrofització.

La tendència decreixent de la precipitació podria comportar una entrada més lleu en el cicle de l'aigua dels contaminants que hi ha a l'atmosfera, si bé un augment de les riudes (en magnitud i freqüència) augmentaria l'arrossegament i la dissolució de composts, en facilitaria la resuspensió i el transport, i n'augmentaria la concentració a les aigües superficials. Aquest efecte s'ha observat tant al riu Llobregat, on les grans avingudes solen tenir més conductivitat, atès que la dissolució de sal en superfície compensa l'efecte de dilució per augment de cabal. Una observació similar té lloc a l'Ebre, on l'arrossegament dels sediments contaminats de Flix comporta un augment de la concentració dels diferents contaminants que contenen.

En aquest context, cada conca mostrarà una capacitat d'adaptació als efectes adversos del canvi climàtic, la qual cosa definirà la vulnerabilitat de cadascuna a aquests impactes (capítol 14). La valoració de la vulnerabilitat comprèn els efectes sobre les reserves hídriques, la seva qualitat i, tanmateix, també inclou la manera en què cada conca pot adaptar-s'hi segons la seva idiosincràsia hidrològica i la seva estructura socioeconòmica. En aquest sentit, l'anàlisi territorial de la vulnerabilitat al canvi climàtic es fonamenta en: 1) una gestió adequada dels recursos d'acord amb les expectatives vinculades al canvi climàtic explicitada en els plans de gestió derivats de la Directiva marc de l'aigua; 2) la modelització dels sistemes hidrològics, com a eina de càlcul dels balanços i de les relacions entre els diferents components del cicle de l'aigua; i 3) la valoració de la capacitat d'adaptació de cada conca d'acord amb indicadors que ofereixin una visió integrada de la vulnerabilitat. L'ús d'indicadors permet reduir la complexitat associada a la modelització i considerar variables de caire socioeconòmic.

L'ascens del nivell del mar a Catalunya augmentarà la vulnerabilitat dels sistemes litorals (capítol 14). La modelització d'aquest efecte a l'aquífer del delta del Llobregat, associat a una disminució de la recàrrega, mostra una evolució de la falca salina continent endins i un increment notable de la concentració de clorur a l'aigua subterrània.

La gestió de l'aigua ha de reflectir els impactes sobre els recursos hidrològics, atès que els horitzons de futur comporten una reducció del recurs en les aportacions esperades i/o una major dificultat per al seu aprofitament (la qual cosa podria implicar preveure capacitats superiors d'embassament, en el cas que sigui possible, per a satisfer la demanda amb criteris de mantenir la garantia), un increment dels riscos i efectes sobre els usos del territori. El nou model de gestió en l'horitzó del 2025 (capítol 15) considera un increment de l'abastament relacionat amb l'augment demogràfic, comptant, però, amb més eficiència en l'ús i la distribució del recurs. Els volums addicionals se satisfaran des de plantes dessalinitzadores i amb la recuperació d'aquífers i el foment de la reutilització. Un aspecte rellevant en la gestió rau en la necessitat de tenir present a partir d'ara que el clima no és estàtic i les assumpcions fetes sobre el futur, basades en el clima del passat recent, poden ser inapropiades per manca de representativitat. Els gestors de l'aigua hauran de considerar les potencials condicions futures sota el canvi climàtic en el disseny de les noves infraestructures i les assumpcions sobre la probabilitat, la freqüència o la magnitud d'esdeveniment extrems hauran de ser revisades amb cura doncs el canvi climàtic pot representar l'increment d'estrès hídric addicional al que ja es viu en l'actualitat, que avanci o anticipi la superació, generalitzada, de la màxima capacitat de servei de molts sistemes. Avui, el sistema Ter – Llobregat té una capacitat màxima de servei que, tot i ser inferior a la demanda anual, encara es pot considerar suficient per a bona part dels anys i només és crítica en els més secs. La major freqüència i intensitat de sequeres futures per efecte del canvi climàtic pot reduir aquesta capacitat de servei entre un 7 i un 15%, fins assolir situacions gairebé continuades, amb un dèficit crònic.

Finalment, les aportacions d'aquest grup de treball amb relació als impactes hidrològics posen de manifest la necessitat d'enregistrar intensament dades representatives, tenint en compte la feblesa d'algunes sèries

històriques i la manera com això afecta les extrapolacions, i l'avantatge dels models per a preveure situacions futures; i, tanmateix, tenint present la incertesa de les previsions climàtiques en què es basen aquests models, ja que no es disposa d'una resolució espacial prou detallada per a simulacions regionals a Catalunya. D'altra banda, la integració d'aquests impactes derivats del canvi climàtic en el debat hidrològic genera nombroses oportunitats, en el camp del coneixement i de la recerca, i noves aportacions per a una gestió apropiada dels recursos hídrics en el context d'incertesa que comporta l'alteració del clima.



8. Canvis temporals observats en les sèries de cabals

Francesc Gallart

Centre Superior d'Investigacions Científiques, Institut Jaume Almera

Introducció i conceptes bàsics

En aquest capítol es recullen alguns exemples de canvis temporals en els recursos d'aigua observats en conques hidrogràfiques dins o a prop del territori de Catalunya i s'analitza la seva relació amb el canvi climàtic. L'objectiu no és solament posar de manifest l'eventual alteració de recursos hídrics, sinó també entendre millor quines són les causes d'aquesta alteració i com aquest coneixement es pot utilitzar per a fer una previsió més bona dels impactes hidrològics futurs del canvi climàtic i per a dissenyar estratègies per a pal·liar-los.

La detecció dels efectes del canvi del clima en els recursos d'aigua de les conques es troba amb tres dificultats principals.

La primera resideix en el fet que els canvis en el balanç d'aigua d'una conca depenen dels canvis del clima (volums i règim de precipitació, temperatura, humitat, vent i radiació), però també dels canvis de les característiques variables de la conca (cobertura vegetal, àrees impermeables) i dels usos de l'aigua, sobretot els que en representen un consum per evapotranspiració (regadiu). Aquesta complexitat fa que no puguem atribuir solament al clima els canvis observats, i que sovint sigui difícil identificar-ne les causes.

La segona rau en la forta variabilitat interanual del clima; aquesta és tan elevada a la Mediterrània que sovint dificulta la identificació de tendències temporals que són rellevants des del punt de vista dels recursos implicats. Aquest aspecte es discuteix més àmpliament en els apartats següents.

La tercera dificultat consisteix en la poca adequació de les observacions climàtiques i hidrològiques a Catalunya (densitat i localització de les observacions, longitud de les sèries i qualitat de les dades).

Partició de l'aigua de pluja

L'aigua de precipitació es distribueix en diferents compartiments en arribar a la superfície terrestre, de manera que solament una part constitueix el que anomenem recurs hídic.

En primer lloc, la precipitació mulla les parts aèries de la vegetació i és evaporada directament sense arribar al sòl (intercepció). També el sòl, els paviments i els coberts es mullen i l'aigua s'evapora posteriorment. El percentatge d'aigua de precipitació que s'evapora directament és màxim en els boscs (de l'ordre del 20%), i és menor com menys densa i alta és la vegetació (Llorens i Domingo, 2007).

La major part de l'aigua que arriba al sòl s'infiltra, humiteja els sòls i és utilitzada per les plantes (transpiració). En els estudis actuals de recursos aquesta part de l'aigua es considera un recurs hídic (*aigua verda*), ja que és la que genera els recursos forestals, i de pastures i agricultura de secà (Falkenmark *et al.*, 2001).

Finalment, l'aigua que no s'evapora ni és transpirada contribueix a l'escolament superficial o s'infiltra profundament i contribueix a la recàrrega dels aquífers; aquests dos compartiments d'aigua (aigua superficial i aigua freàtica) constitueixen els recursos hídrics clàssics i s'anomenen actualment *aigua blava*, que es pot emmagatzemar i transportar. En endavant, quan parlem de recursos ens referirem a aquest tipus d'aigua.

Efectes dels canvis de clima sobre la partició d'aigua i generació de recursos

Els canvis de precipitació i de temperatura (demanda evapotranspirativa) no es tradueixen linealment en augments i disminucions dels recursos d'aigua.

En climes secs, on la precipitació és marcadament menor que la demanda evapotranspirativa, un augment de la precipitació provoca principalment un augment de l'evapotranspiració real, mentre que una disminució de la precipitació o un augment de la temperatura provoquen principalment un augment de l'estrès hídric de la vegetació. En aquests climes un canvi en la concentració temporal de la precipitació té més repercussió en la generació de recursos d'escolament i recàrrega que la variació dels totals anuals.

En climes humits, on la precipitació és igual o superior a la demanda evapotranspirativa, els canvis de precipitació i demanda evapotranspirativa es tradueixen molt més linealment en la generació de recursos.

En àrees d'alta muntanya, on una part important de la precipitació forma un mantell estacional de neu, a més dels canvis de balanç esmentats, un augment de la temperatura pot representar una reducció o una modificació apreciables del paper regulador de la neu, en reduir-ne el volum o avançar-ne la fusió.

Efectes dels canvis d'ús i de cobertura vegetal sobre la generació i el consum de recursos

S'ha establert clarament que, en una conca, l'augment de la superfície ocupada per bosc determina una disminució dels recursos d'aigua, i que una reducció de la superfície de bosc en determina un augment. Aquesta relació s'ha establert, amb rares excepcions, per a un ampli ventall de climes i espècies vegetals a tot el món, i es deu al fet que els arbres evapotranspiren més aigua que altres tipus de vegetació més baixa (Bosch i Hewlett, 1982; Zhang *et al.*, 2001).

Podem generalitzar que els arbres tenen més biomassa aèria i més alçada, i que les seves arrels són més profundes. En climes humits, on la limitació a l'evapotranspiració és l'energia, l'intercanvi més gran de massa i energia de les capçades amb l'atmosfera afavoreix els arbres. En climes secs, on la limitació és la disponibilitat d'aigua, la profunditat més gran de les arrels també afavoreix els arbres.

Els sòls forestals són generalment més permeables que els sòls de les pastures i de les terres agrícoles, de manera que s'ha proposat que el bosc ha d'afavorir la recàrrega dels aqüífers i els cabals de base dels rius. Els estudis experimentals mostren el contrari. En realitat, els sòls forestals estan típicament més secs que els de les clarianes o pastures en condicions iguals, de manera que necessiten quantitats netament superiors de precipitació per arribar a les condicions de recàrrega efectiva, i aquestes es produeixen durant períodes més curts.

L'augment de les superfícies impermeables (paviments, coberts) disminueix marcadament l'evapotranspiració, al mateix temps que afavoreix la generació d'escolament i la recàrrega. L'augment de recursos, però, pot ser contrapesat per la generació de puntes de crescuda si no es gestionen adequadament les aigües pluvials.

El regadiu representa un augment notable de l'evapotranspiració i, per tant, una reducció dels recursos de la conca. A escala de conca, les tècniques de regadiu no representen canvis gaire importants en el balanç, perquè les aigües sobrants retornen als cursos, però sí que poden ser importants per a la qualitat de l'aigua, en enriquir-se les aigües de retorn en sals i productes agroquímics.



Mètodes de treball

Anàlisi de les tendències de les sèries

Com s'ha indicat anteriorment, els cabals que surten d'una conca depenen de diversos factors a més dels climàtics. L'anàlisi de tendència en una sèrie de cabals anuals ens informa, per tant, de si hi ha hagut canvis en els recursos al llarg del temps, independentment de les causes d'aquests canvis. Quan ens interessa verificar el paper del clima, cal estudiar la tendència de sèries de cabals simulats amb un model hidrològic (pluja-escolament) adequat, que utilitzi sèries adequades de precipitació i evapotranspiració potencial. Aquests cabals s'anomenen usualment *en règim natural*, però aquesta denominació és incorrecta, ja que aquestes sèries solament tenen en compte l'efecte del clima sobre el balanç d'aigua, per la qual cosa les anomenarem *sèries de cabals climàtics*. En el cas del riu Ebre a Tortosa, les simulacions s'han pres del Plan Hidrológico Nacional (MIMAM, 2000), en el qual es va utilitzar el model mensual Simpa (Ruiz-García, 1999). En el cas de les conques internes, s'ha utilitzat el recull de dades de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA, 2002), per al qual s'ha utilitzat el model diari Sacramento.

Les sèries anuals de cabals climàtics obtingudes amb els models se sotmeten a proves estadístiques per a detectar tendències temporals positives o negatives. Aquestes proves estadístiques consisteixen a estimar la probabilitat de la hipòtesi nul·la (no hi ha tendència), que es rebutja quan aquesta probabilitat és inferior a un llindar preestablert (típicament 0,05 o 0,01).

La probabilitat de la hipòtesi nul·la disminueix en augmentar la tendència (positiva o negativa) de la sèrie, però augmenta amb la seva variabilitat, de manera que tendències rellevants des del punt de vista dels recursos implicats (pèrdues de més del 15% del cabal en 50 anys) poden no ser estadísticament significatives si la variabilitat és elevada. Per a eludir aquest problema, els resultats de les proves estadístiques es poden expressar d'una manera menys estricta que els que s'usen en la refutació científica d'hipòtesis, però més adequada a la presa de decisions, utilitzant l'escala semiquantitativa de versemblança que es detalla a l'apartat següent.

Posteriorment és necessari estudiar si la sèrie de residuals (diferències entre els valors de cabal mesurats i els cabals climàtics simulats amb el model) és estacionaria o té una tendència. L'existència d'una tendència dels residuals ens indica que hi ha altres factors a més del climàtic que contribueixen al canvi dels recursos de la conca (o que les dades o el model són incorrectes). Aquests factors poden ser els canvis de cobertura vegetal i d'ús de l'aigua a la conca.

Anàlisi dels canvis d'ús i de cobertura vegetal del territori i dels seus efectes sobre el balanç d'aigua

L'estudi de les modificacions que ha experimentat una conca per a estudiar les causes dels canvis del seu comportament hidrològic (mostrat per una tendència de la sèrie de residuals del model hidrològic). s'ha fet solament en el cas de la conca de l'Ebre (Gallart i Llorens, 2002; Gallart i Llorens, 2004).

En aquests treballs de Gallart i Llorens s'han estudiat els canvis en la superfície forestada de la conca de l'Ebre entre els dos inventaris forestals (MA, 1968-1974; MAPA, 1990-1997) i per als canvis de la superfície dels conreus irrigats s'ha pres la informació del *Plan Hidrológico Nacional* (MIMAM, 2000).

L'estimació de la diferència d'evapotranspiració anual entre una àrea de bosc i de pastura o vegetació baixa s'ha estimat per comparació amb el recull de resultats experimentals publicats per Bosch i Hewlett (1982) i mitjançant l'equació de Zhang *et al.* (2001). L'estimació del consum d'aigua dels conreus irrigats a la conca de l'Ebre s'ha pres de Casterad i Herrero (1998).

Convencions utilitzades per a indicar la versemblança de les conclusions i les prediccions

Seguint el mateix criteri que s'utilitza en els informes internacionals del canvi climàtic (IPCC, 2001), s'assigna una escala semiquantitativa per a indicar els diferents nivells de confiança de les conclusions i les prediccions, basats en les observacions i els models emprats. Els termes que s'utilitzen són *virtualment cert* (confiança superior al 99% que un resultat és cert), *molt versemblant* (90-99% de confiança), *versemblant* (66-90% de confiança), *mitjanament versemblant* (33-66% de confiança), *inversemblant* (10-33% de confiança) i *extremament inversemblant* (menys de l'1% de confiança). Aquests termes s'indiquen en cursiva en el text quan tenen aquests significats.

En el cas d'aplicació de proves estadístiques usals a les tendències de les sèries, els percentatges indicats es corresponen amb la probabilitat de la hipòtesi alternativa (hi ha tendència), calculades considerant una sola cua de les distribucions per a poder-ne identificar el sentit. Com a exemple, si la sèrie de cabals d'un riu mostra una tendència de $-1,357 \text{ hm}^3 \text{ any}^{-2}$, i un error típic d'1,123, la prova de Student de la hipòtesi nul·la (tendència 0) dona $t = -1,209$. La probabilitat de la hipòtesi nul·la (dues cues) és $p_0 = 0,240$, de manera que no la podem rebutjar. En canvi, per a la presa de decisions, ens interessa remarcar que la probabilitat que hi hagi un descens dels cabals és molt més gran que la probabilitat que es mantinguin o augmentin. La probabilitat de la hipòtesi alternativa (que el pendent sigui menor que 0) és $p_1 = 1 - 0,5 p_0$, amb el resultat $p_1 = 0,88$, de manera que la conclusió l'expressarem de la manera següent: «És *versemblant* que el curs d'aigua hagi experimentat un descens del cabal, i la millor aproximació és un descens d'1,357 hm^3 anual cada any». En aquests casos, en els quals solament hi ha dues possibilitats oposades (augment o descens), utilitzarem l'escala de versemblances del sentit observat de la tendència, de manera que, com a mínim, tindrà una probabilitat de 0,5 i serà *mitjanament versemblant*; la probabilitat de la tendència de sentit contrari és complementària i, per tant, menor però no nul·la.

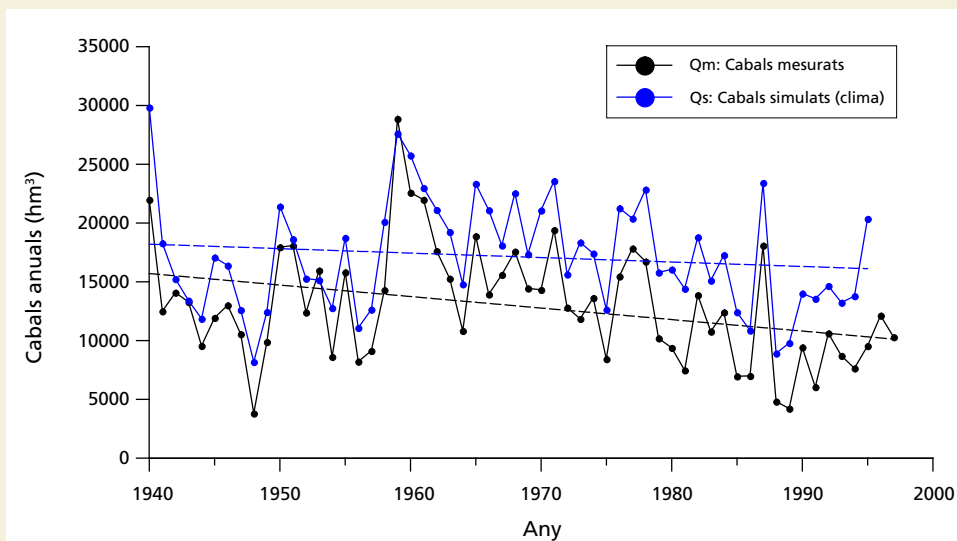
Alguns resultats obtinguts

Canvis en els recursos de l'Ebre

Els treballs realitzats per al Plan Hidrológico Nacional (MIMAM, 2000) mostren un fort descens dels cabals mesurats de l'Ebre a Tortosa durant el període 1949-1941 a 1995-1996 (figura 1), que es pot considerar *virtualment cert*. Aquest descens representa la pèrdua anual de $98 \text{ hm}^3/\text{any}$, corresponents al 0,76% del cabal anual mitjà mesurat.



Figura 1. Cabals observats i simulats a partir de les dades climàtiques del riu Ebre a Tortosa (dades de MIMAM, 2000).



L'efecte del clima

Els mateixos treballs mostren un descens menys pronunciat dels cabals climàtics simulats que representa la pèrdua per any de 38 hm³ anuals i correspon a una pèrdua anual del 0,29% del cabal mitjà mesurat (figura 1). Aquest descens climàtic dels cabals no és considerat significatiu en aquells treballs perquè la hipòtesi nul·la (invariabilitat temporal dels cabals), analitzada amb diverses proves estadístiques, no es pot rebutjar amb un nivell de confiança del 5%, però aquí el considerarem *versemblant* ($t_{54} = -0,972$, $p_1 = 0,83$).

Cal remarcar que en el mateix treball (MIMAM, 2000) s'estudia una sèrie llarga de precipitació generalitzada per a tota la conca (1881-1994), amb el resultat d'una tendència positiva, que no considera significativa al nivell de confiança del 5%, però que aquí considerarem *molt versemblant* ($t_{111} = 1,41$, $p_1 = 0,92$). Aquesta tendència es deu sobretot a la baixa precipitació registrada en el període 1893-1912.

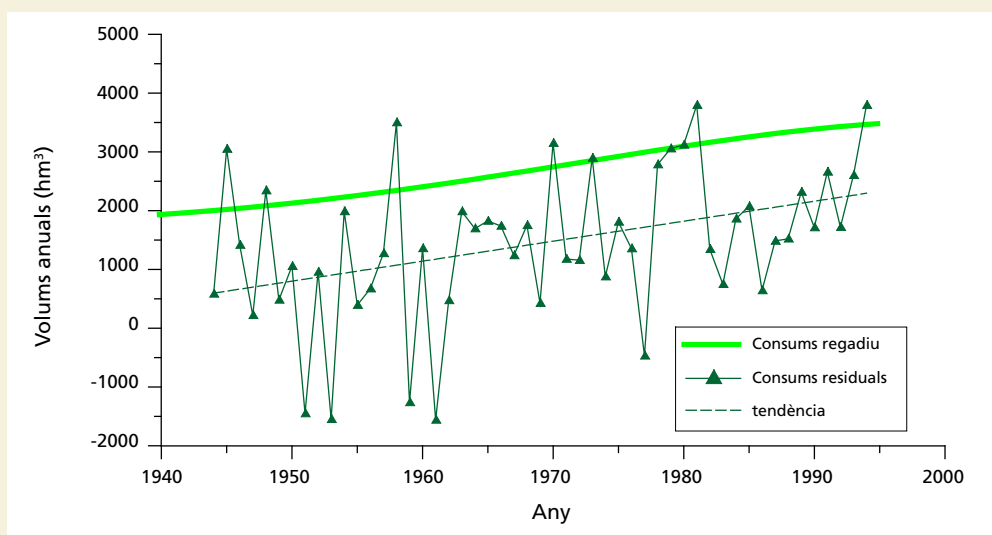
Els regadius

La diferència entre la sèrie de cabals observada a Tortosa i la sèrie de cabals climàtics és atribuïda per MIMAM (2000) a l'augment dels consums d'aigua de regadiu a la conca, estimant un consum mitjà net de 6.440 m³/ha/any d'aigua de regadiu. Aquest consum està clarament sobrevalorat (Gallart i Llorens, 2002), ja que la precipitació mitjana a les àrees de regadiu a la conca és de 450 mm/any i l'evapotranspiració potencial mitjana es pot estimar en 770 mm/any, de manera que en una primera aproximació el consum mitjà màxim seria de la meitat del proposat pel MIMAM (2000).

Una estimació experimental realitzada en una àrea que es pot considerar representativa d'àmplies zones de regadiu de la conca (Casterad i Herrero, 1998) dona un consum net anual de 4.400 m³/ha. A la figura 2 es mostra l'evolució de l'estimació de la variació en el consum d'aigua per a regadiu obtinguda amb aquesta darrera xifra, després d'ajustar una corba polinomial a la superfície regada a la conca (presa de MIMAM, 2000).

El resultat d'aquesta estimació és que durant el període estudiat hi ha hagut un augment del consum *virtualment cert* que es pot simplificar en un augment mitjà anual de 32 hm³ anuals, que corresponen a una reducció anual del 0,24% del cabal mitjà mesurat de l'Ebre a Tortosa.

Figura 2. Variació temporal dels consums d'aigua per a regadiu a la conca de l'Ebre i dels consums no explicats pel clima ni pels regadius.



Els canvis a les capçaleres

Les reduccions de cabals degudes al clima i al regadiu no expliquen el descens dels cabals de l'Ebre que s'han observat, sinó que queden uns «consums» residuals indicats a la figura 2 amb una tendència positiva *virtualment certa* ($t_{49} = 2,99$, $p_1 = 0,998$) que representa una pèrdua mitjana per any de 34 hm³ anuals, corresponents a un 0,26% del cabal mitjà mesurat.

Aquesta darrera reducció s'ha d'atribuir a l'augment d'evapotranspiració a les capçaleres de les conques com a conseqüència de l'augment de la cobertura forestal. Comparant els dos inventaris forestals disponibles (MA, 1968-1974; MAPA, 1990-1997), es pot deduir que, durant el període entre els dos inventaris, la conca ha experimentat la forestació d'aproximadament 200 km² anuals, o un 0,24% de la conca (vegeu Gallart i Llorens, 2002, per a més detalls).

Suposant que el ritme de forestació de la conca hagués estat uniforme durant tot el període del registre de cabals, podem utilitzar l'equació de Zhang *et al.* (2001), per a estimar en primera aproximació la reducció de cabals que caldria esperar com a conseqüència de la forestació segons els resultats obtinguts experimentalment arreu del món. Suposant que la precipitació mitjana a l'àrea forestada és de 800 mm/any, l'equació esmentada indica una reducció de l'escolament per forestació de 150 mm/any, que, aplicada als 200 km² anuals, representaria una pèrdua anual aproximada de 30 hm³ anuals, que es comparen molt bé amb els 34 hm³ anuals per any estimats en el balanç d'aigua. Si utilitzem el recull més antic de Bosch i Hewlett (1982), la pèrdua anual d'escolament seria aproximadament de 51 hm³ anuals en el cas de les coníferes i de 32 hm³ en el cas dels caducifolis.



L'anàlisi dels balanços d'aigua en una mostra de 23 conques de la capçalera de l'Ebre, on la variació temporal dels consums d'aigua es pot considerar insignificant, dona resultats que també confirmen aquesta atribució (Gallart i Llorens, 2004), que ha estat confirmada en altres treballs (Beguería *et al.*, 2003).

Canvis en els recursos a les Conques Internes

Per a fer una anàlisi preliminar de l'ampli volum disponible de dades i simulacions (ACA, 2002), s'han pres les sèries corresponents a quatre embassaments, tres de les conques internes: Boadella (Muga), Sau (Ter) i la Baells (Llobregat), i un que no en forma part, el de Siurana (Siurana), que pertany a la conca de l'Ebre, però que es pot considerar similar als de les conques internes tarragonines. S'han escollit aquests punts pel gran valor estratègic que tenen, perquè estan escassament afectats per canvis dels consums a les seves conques, perquè les estructures de mesura són poc susceptibles d'haver experimentat canvis en el temps, i pel fet de ser representatius de diverses àrees geogràfiques. Els resultats es mostren a la taula 1.

Tots els registres disponibles mostren tendències descendents, d'entre els quals és especialment remarcable el de Sau (període de 1980-81 a 1999-2000), que és *versemblant* i representa la pèrdua anual de 5,4 hm³ anuals o el 0,98% dels seus recursos. El descens de l'embassament de Siurana (període de 1972-73 a 1999-2000) és encara més remarcable, ja que és *molt versemblant* i representa la pèrdua anual de 0,29 hm³ anuals o el 3,35% dels seus recursos, encara que aquesta forta tendència està condicionada a la influència dels cabals elevats dels anys setanta del segle passat al principi de la sèrie. La sèrie dels totals acumulats dels quatre embassaments mostra una marcada tendència negativa que només és *mitjanament versemblant* per causa de la curta durada del registre comú a tots els embassaments (16 anys). Al capítol 17 d'aquest informe s'amplia l'anàlisi de les aportacions del riu Ter entrants a Sau.

Taula 3. Tendències de les sèries de quatre embassaments representatius de les conques internes, indicats en valors absoluts i en percentatge dels recursos mitjans estimats. El tipus de lletra indica el nivell de versemblança del pendent: (*) virtualment cert, (+) molt versemblant, (^) versemblant, i (-) mitjanament versemblant (a partir de dades d'ACA, 2002).

	Boadella	Sau	La Baells	Siurana	Total
observada (hm ³ /any)	-0,045 (-)	-5,415 (^)	-2,275 (-)	-0,290 (+)	-2,062 (-)
climàtica (hm ³ /any)	0,244 (^)	0,275 (-)	0,364 (^)	0,007 (-)	0,921 (-)
residual (hm ³ /any)	-0,754 (^)	-3,672 (*)	-1,357 (^)	-0,187 (*)	-4,538 (+)
observada (% anual)	-0,068 (-)	-0,981 (^)	-1,020 (-)	-3,351 (+)	-0,242 (-)
climàtica (% anual)	0,370 (^)	0,050 (-)	0,176 (^)	0,079 (-)	0,111 (-)
residual (% anual)	-1,145 (^)	-0,655 (*)	-0,660 (^)	-2,168 (*)	-0,610 (+)

L'efecte del clima

Contràriament, totes les sèries de cabals climàtics (període de 1940-41 a 2000-01) mostren lleugeres tendències creixents, que solament arriben a *versemblants* per a Boadella i la Baells. La sèrie climàtica acumulada per a tots els embassaments té una tendència creixent *mitjanament versemblant* (64% de confiança).

Els canvis a les capçaleres

Totes les sèries de cabals residuals mostren tendències decreixents accentuades, que són *virtualment certes* per a Sau i Siurana, i *versemblants* per a Boadella i la Baells. La sèrie de cabals residuals acumulada per als quatre embassaments mostra una pèrdua anual de 4,53 hm³ anuals, que representa una pèrdua anual del 0,61% dels recursos mitjans, i és *molt versemblant*, malgrat la curta durada de la sèrie comuna (16 anys).

Aquesta disminució dels recursos s'ha d'atribuir principalment a l'augment de la cobertura forestal a les capçaleres, encara que alguna de les conques pot haver experimentat un augment del consum d'aigua per a regadiu.

Canvis en les crescudes i els règims fluvials

En una sèrie de conques de la capçalera de l'Ebre al Pirineu Central (López-Moreno *et al.*, 2006) han observat durant el període 1959-1995 una disminució de la freqüència dels cabals elevats i crescudes, i una incidència més elevada de cabals baixos a l'hivern i a la primavera. Aquests canvis no estan relacionats amb variacions de la precipitació, de manera que són atribuïts pels autors a l'augment de la cobertura forestal en aquestes conques durant la segona meitat del segle xx.

També al Pirineu Central (López-Moreno, 2005) dedueix una disminució del mantell de neu a l'alta muntanya durant la segona meitat del segle XX, que atribueix principalment a una disminució de la precipitació hivernal; aquesta reducció (López-Moreno i García-Ruiz, 2005) causaria una disminució dels cabals hivernals generats per sota dels 1.600 m d'altitud i una reducció dels cabals de primavera per disminució dels cabals de fusió.

A l'Alt Segre (Manzano, 2007) s'ha observat que els cabals màxims anuals, a partir del 1985, s'avancen lleugerament de juny a maig o deixen d'estar lligats, parcialment, al desglaç primaveral. Aquest canvi de règim sembla relacionat amb l'increment de la temperatura mitjana (entorn d'1,5 °C de mitjana al llarg dels darrers 30 anys a la Molina a 1.700 m d'altitud).

Conclusions, oportunitats i accions derivades dels resultats

Els resultats no mostren efectes clars de tendències dels cabals anuals lligades al clima. Solament a l'Ebre hi ha un descens *versemblant* dels cabals climàtics en el període 1940-1997, però que seria substituït per un augment *molt versemblant* si consideréssim un període més llarg (1881-1994). Solament s'observen alguns canvis en el règim dels rius que tenen les capçaleres a l'alt Pirineu, en disminuir el paper del desglaç primaveral en el seu règim.

Contràriament, en totes les sèries analitzades s'observen tendències negatives clares dels cabals residuals (cabals observats-cabals climàtics) que s'han d'atribuir a l'augment de l'evapotranspiració a les capçaleres per l'increment de la cobertura forestal. Aquesta tendència negativa és *virtualment certa* per a l'Ebre, on representa una pèrdua mitjana per any de 34 hm³ anuals, corresponents al 0,26% del cabal mitjà mesurat, i, en primera aproximació, seria *versemblant* per a les conques internes, amb una pèrdua mitjana per any de 4,54 hm³ anuals, corresponents al 0,61% del cabal mitjà mesurat.

És evident, doncs, que les sèries de cabals obtingudes a partir de dades climàtiques antigues o generades per models climàtics són insuficients per a la gestió dels recursos d'aigua a Catalunya. Els efectes dels canvis de la cobertura vegetal a les capçaleres es mostren més importants que les tendències climàtiques, i per tant aquests canvis s'han de considerar específicament en els escenaris de futur a les conques per a una predicció científicament vàlida dels recursos d'aigua.

Es proposa la substitució del terme *règim natural* pel de *règim climàtic* per a anomenar els cabals generats amb models hidrològics a partir de sèries climàtiques, ja que aquestes sèries (amb els models hidrològics actuals) no



tenen en compte els canvis del comportament de les conques originats per canvis «naturals» de la cobertura vegetal.

Referències bibliogràfiques

- ACA (AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA) (2002). *Els recursos hídrics en règim natural a les conques internes de Catalunya*. «Documents tècnics», 2. Agència Catalana de l'Aigua. Barcelona.
- BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; LORENTE, A.; SEEGER, M.; GARCÍA-RUIZ, J. M. (2003). «Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees». *Ambio*, núm. 32(4), pàg. 283-286.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. (1982). «A Review of Catchment Experiments to Determine the Effect of Vegetation Changes on Water Yield and Evapo-Transpiration». *Journal of Hydrology*, núm. 55(1-4), pàg. 3-23.
- CASTERAD, M. A.; HERRERO, J. (1998). Irrivol: «A method to estimate the yearly and monthly water applied in an irrigation district». *Water Resources Research*, núm. 34(11), pàg. 3045-3049.
- FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J.; SAVENIJE, H. H. G. (2001). *Feeding Eight Billion People. Time to Get Out of Past Misconceptions*. A: D. Trouba (ed.). *Stockholm Water Front. A Forum for Global Water Issues*. Stockholm International Water Institute. Estocolm (Suècia).
- GALLART, F.; LLORENS, P. (2002). *La cubierta forestal de la cuenca del Ebro: Caracterización espacio-temporal y afección en la disminución de recursos hídricos*. Confederación Hidrográfica del Ebro. Saragossa.
- GALLART, F.; LLORENS, P. (2004). «Observations on land cover changes and the headwaters of the Ebro catchment, water resources in Iberian Peninsula». *Physics and Chemistry of the Earth*, núm. 29(11-12), pàg. 769-773.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANNEL FOR CLIMATE CHANGE) (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit) i Nova York (Estats Units). 398 pàg.
- LÓPEZ-MORENO, J. I. (2005). «Recent Variations of Snowpack Depth in the Central Spanish Pyrenees». *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, núm. 37(2), pàg. 253-260.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S.; GARCÍA-RUIZ, J. M. (2006). «Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change?». *Hydrological Sciences Journal*, núm. 51(6), 1039-1050.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; GARCÍA-RUIZ, J. M. (2005). «Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees». *Hydrological Sciences Journal*, núm. 49(5), pàg. 787-801.
- LLORENS, P.; DOMINGO, F. (2007). «Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe». *Journal of Hydrology*, núm. 335(1-2), pàg. 37-54.
- MA (MINISTERIO DE AGRICULTURA) (1968-1974). *Primer inventario forestal de España*. Ministerio de Agricultura, Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial. Madrid.
- MANZANO, A. (2007). *L'evolució de les aportacions del riu Segre fins a l'embassament d'Oliana*. Agència Catalana de l'Aigua, Barcelona.
- MAPA (MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN) (1990-1997). *Segundo inventario forestal nacional: 1986-1995*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Madrid.
- MIMAM (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE) (2000). *Plan Hidrológico Nacional. Análisis de los sistemas hidráulicos*, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

RUIZ-GARCÍA, J. M. (1999). *Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos*. «Monografías del CEDEX», núm. 67. Ministerio de Fomento. Madrid.

ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. (2001). «Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale». *Water Resources Research*, núm. 37(3), pàg. 701-708.



9. Els boscos i l'evapotranspiració

Santi Sabaté

Universitat de Barcelona i Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)

Introducció i objectius

Els boscos i el balanç hídric. Conceptes bàsics

En aquest capítol es presenta la importància dels boscos en el balanç hídric i com les condicions ambientals poden afectar el comportament d'aquest balanç. A la primera part es mostren resultats de mesures de balanços hidrològics integrats en l'àmbit de conca, es fa una estimació de l'aigua necessària (equivalència fotosíntesi-aigua) per a mantenir les estructures del bosc i créixer, i, finalment, a partir de la modelització dels processos implicats en el balanç d'aigua i carboni (utilitzant el model Gotilwa+, que s'explica més endavant) s'analitza com poden respondre els boscos, amb relació a l'aigua, davant el canvi climàtic.

Als nostres ecosistemes forestals l'aigua evapotranspirada pot ser d'entre el 70% i el 90% de l'aigua de pluja. Això és possible perquè en aquesta zona mediterrània la demanda evaporativa de l'atmosfera, o energia disponible per a evaporar aigua, és superior a l'aigua de pluja, i pot arribar al doble dels valors de pluja. La demanda evaporativa de l'atmosfera s'anomena evapotranspiració potencial. L'evapotranspiració realitzada o real és la quantitat de la potencial que ha estat possible partint de la base de l'aigua disponible (que prové de la pluja en els ecosistemes forestals, però que també pot venir del reg en els sistemes agrícoles).

L'aigua, per a ser evapotranspirada, ha d'haver quedat retinguda a l'ecosistema, o bé mullant-ne les estructures (sobretot les capçades, però també la superfície del sòl) o bé emmagatzemada al sòl i a la vegetació. Aquestes quantitats depenen sobretot de les quantitats d'estructura susceptibles de ser mullades i de la naturalesa de l'estructura (granulometria, matèria orgànica i profunditat del sòl), però també del pendent en què es troba. L'aigua no retinguda s'escola en superfície i genera l'escolament superficial o a més fondària. Quan l'escolament és profund, l'aigua es pot drenar fins a escapar-se de l'abast de les arrels de la vegetació.

L'evapotranspiració, per tant, té dos components. El primer és l'evaporació, que és l'aigua interceptada, que, quan plou, mulla totes les superfícies de l'ecosistema i que s'evapora quan s'eixuguen, sempre que hi hagi energia disponible. Com més superfície de les estructures que es poden mullar exposi l'ecosistema, més gran serà la quantitat d'aigua interceptada. Als ecosistemes forestals, l'ocupació tridimensional del volum que ocupa un ecosistema és gran en comparació d'altres ecosistemes, com ara els matollars i els herbassars. En sistemes on la cobertura vegetal és important, l'evaporació directa des del sòl és petita, comparada amb la de les capçades, més ventilades i exposades a la radiació. El segon component és la transpiració, que és l'aigua del sòl absorbida per les arrels i que retorna a l'atmosfera seguint un camí per dins la planta: circula pels vasos conductors del xilema de les plantes i s'evapora a la superfície de les fulles, de les quals surt a través dels estomes, si estan oberts. En aquest cas, l'aigua transpirada prové de l'aigua emmagatzemada al sòl que pot ser explorat per les arrels, i també és important, atès que les arrels exploren un volum important del sòl.

L'aigua que entra per les arrels és principalment transpirada, i en aquest procés la planta pot transportar nutrients cap a les fulles, on són necessaris per a la construcció de matèria orgànica (saba bruta que ascendeix pel xilema); alhora, l'aigua transpirada, en evaporar-se a la superfície de les fulles, també les refrigera (funció important, en la qual les fulles reben molta radiació). En sortir l'aigua pels estomes de les fulles quan estan oberts, també

permet l'entrada de diòxid de carboni, necessari per a la fotosíntesi. L'aigua també és el vehicle de transport dels productes fotosintètics produïts a les fulles cap a la resta dels teixits vius de la planta (saba elaborada que descendeix pel floema). L'aigua que entra a les plantes també és important perquè n'hidrata els teixits i és el medi on es produeix l'activitat metabòlica. També és el substrat per a la fotosíntesi, que quan té lloc allibera oxigen, protons i electrons, que serveixen per a reduir el carboni.

A partir d'aquesta presentació, els objectius d'aquest estudi són presentar i comentar:

- La importància dels boscos en el balanç hídric, fent èmfasi en els sistemes mediterranis.
- Com es distribueix aquesta aigua quan és utilitzada i circula pel bosc.
- Com els canvis de disponibilitat d'aigua i l'increment de temperatura poden afectar el funcionament de la cobertura vegetal i del balanç hídric, tant actualment com en el context del canvi climàtic.

Metodologia

El monitoratge de conques

Les mesures dels balanços d'aigua en conques forestades s'han utilitzat per a avaluar la influència de la cobertura vegetal sobre la quantitat d'aigua que surt pel corrent natural (riera, torrent, etc.) i les càrregues d'elements exportats per aquestes. La conca és una unitat geogràfica que correspon a una definició hidrològica: l'aigua precipitada dins dels límits d'una conca ha de seguir una d'aquestes vies: 1) evapotranspiració, 2) escolament superficial, 3) drenatge subterrani, i/o 4) acumulació en un compartiment d'emmagatzematge (neu, sòl o aqüífer). Quan la pèrdua d'aigua en profunditat és negligible, quan la litologia té característiques que la fan impermeable, l'aigua que entra a la conca ha de sortir o bé per la riera o bé és evapotranspirada. De manera que si es monitoren les sortides amb mesures del cabal a la sortida de la conca, també es té una bona estimació de l'aigua evapotranspirada. En aquest apartat es presenten dades d'aquest tipus de mesura que serveixen per a il·lustrar la importància de la cobertura vegetal en el balanç hídric de les conques forestades, i es compara un sistema mediterrani cobert per alzinar (a la zona de Prades) amb els sistemes de zones no limitades per l'aigua dels Estats Units (Piñol, 1990; *Piñol et al.*, 1999); així com de la península Ibèrica, en conques on hi ha més precipitació que a les de la nostra zona. També es presenten dades de l'Estació Experimental de Ventós (Alacant), on es va analitzar durant uns quants anys la resposta hidrològica de parcel·les amb diferents tipus de cobertura vegetal (pineda repoblada amb sotabosc de matolls, herbassars i sòl nu), anàlisi que serveix per a diferenciar el comportament hidrològic dels diferents tipus de cobertura.

Què fan de l'aigua els boscos

L'aigua que entra als ecosistemes terrestres és utilitzada en diversos processos i en determina el funcionament. En aquest apartat es presenta una estimació de com l'aigua és utilitzada pel bosc. Aquest exercici, sense voler ser exacte, vol posar-nos sobre la pista dels ordres de magnitud pel que fa a les quantitats d'aigua necessàries per al bosc per a poder mantenir les seves estructures i créixer, ordres de magnitud de les quals sovint no som prou conscients. En aquest exercici hem recopilat informació vària de l'alzinar de les muntanyes de Prades, on s'ha treballat molt des dels darrers 30 anys. Molta de la informació es pot trobar a Rodà *et al.* (1999) i a Roman i Terradas (1992). Per a l'exercici s'assumeix que el 80% de l'aigua de pluja es transpira, el 10% és interceptada i el 90% és evapotranspirada. La respiració de manteniment es calcula en funció de la temperatura del lloc ($R_m = 3 \cdot Q_{10}^{(T-15)/10}$, on $Q_{10} = 2$). La respiració de creixement es basa en la necessitat d'invertir 1,45 g de glucosa per 1 g de matèria orgànica que constitueix la biomassa. La fracció de biomassa que respira en el cas de les fulles és el 50% (l'altre 50% és estructural), i la fracció de la biomassa dels troncs que respira és l'1% del 30% que és



funcional (se n'exclou el duramen). Els càlculs fets a partir d'una eficiència en l'ús de l'aigua mesurada al camp de 4,98 mmols de CO_2 /mol d'aigua transpirat revelen que s'han de transpirar 301 kg d'aigua per quilo de carboni fixat en la fotosíntesi. Les dades meteorològiques són les següents: la precipitació mitjana del període 1980-1994 a l'estació meteorològica de Poblet és de 548 mm/any, i a Riudabella (període 1958-1988) també és propera a la xifra de 658 mm/any; la temperatura mitjana utilitzada en el càlcul és de 12,9°C (amb una correcció de $-1^\circ\text{C}/100$ m per a l'altitud, increment d'altitud respecte a Poblet). A la taula 1 es presenten dades estructurals i de producció d'aquests alzinars utilitzats en els càlculs.

Taula 1. Dades estructurals de referència de la capçada, la biomassa i la producció a l'alzinar de Poblet (Recopilades de fonts diverses; vegeu Rodà et al., 1999, i López et al., 2001).

Biomassa de fulles	(g/m ² terreny)	600
Índex foliar (superfície fulla/superfície terreny)	(m ² /m ²)	3,4
Massa específica foliar	(g/m ²)	175
Producció de fulles	(g/m ² terreny/any)	230
Biomassa de troncs, branques i arrels gruixudes	(g/m ² terreny)	23.220
Producció de troncs, branques i arrels gruixudes	(g/m ² terreny/any)	1.136
Biomassa d'arrels fines	(g/m ² terreny)	71
Producció d'arrels fines	(g/m ² terreny/any)	260

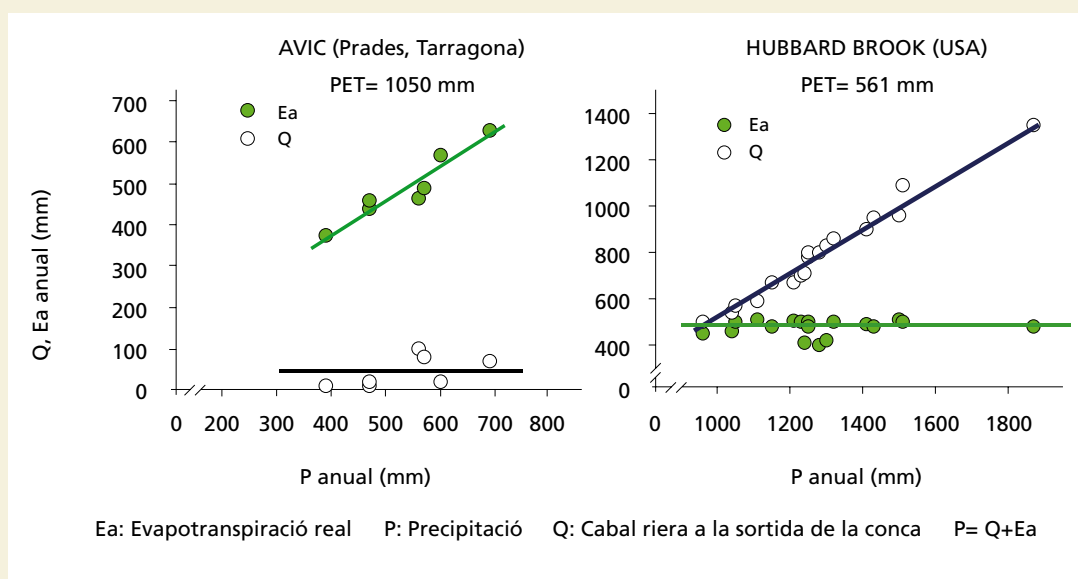
La modelització de l'evapotranspiració. El model Gotilwa+

Si s'entenen i es descriuen satisfactòriament els processos involucrats, per exemple, en els balanços de carboni i d'aigua als boscos en funció de les condicions ambientals, se'ns obre la possibilitat de construir eines molt útils per a explorar com unes noves condicions ambientals podrien afectar aquests balanços. Aquestes eines són els models de processos, que tot i simplificar la realitat i tenir les seves limitacions, ens permeten analitzar escenaris difícilment avaluable experimentalment, com ara les noves condicions que s'imposaran en els ecosistemes davant el canvi climàtic (Keenan et al., 2008). El model funcional de creixement forestal Gotilwa+ (acrònim de *Growth of Trees is Limited by Water*), desenvolupat per C. Gracia i S. Sabaté, simula el creixement del bosc, considerant la dinàmica de l'aigua en el sistema com a factor determinant i principal en el funcionament de les comunitats forestals (per a saber detalls podeu consultar www.creaf.uab.cat/gotilwa+ i el marc dels diferents projectes europeus en que ha estat aplicat i validat Gotilwa+ a Sabaté et al. (2002), Kramer et al. (2002), Morales et al. (2005) i Schröter et al. (2005)). Gotilwa+ descriu els processos de producció, assignació del carboni i respiració, i explora com aquests processos són condicionats pel clima, l'estructura del bosc i del rodal, els diferents règims de gestió, les propietats del sòl i el canvi climàtic. Els arbres del rodal que formen part d'una mateixa classe diamètrica s'assumeixen com a idèntics. El balanç entre la producció primària assignada al creixement, la respiració de manteniment i la respiració de creixement, dóna lloc a la producció primària neta, que determina, al seu torn, els processos de formació i abscisió de fulles, la formació d'anells de creixement, la taxa de pas d'albeca a duramen i, en conseqüència, els canvis funcionals i estructurals dins de cada classe diamètrica. Les dades climàtiques són analitzades diàriament. La precipitació que no ha estat interceptada s'incorpora al sòl que l'emmagatzema segons la seva estructura i el contingut de matèria orgànica. Aquesta aigua del sòl és utilitzada pels arbres en ser transpirada. L'evapotranspiració depèn de l'energia disponible per a evaporar aigua. Tanmateix, la planta hi posa el control de la pèrdua d'aigua mitjançant el control de la conductància estomàtica, que alhora condiciona l'entrada de CO_2 per la fotosíntesi.

Dades, resultats i conclusions principals

A la figura 1 es mostra la repartició anual de l'aigua de pluja entre el cabal de la riera i l'evapotranspiració real a la conca de l'Avic, a Prades, i a la de Hubbard Brook, a New Hampshire (Estats Units) (Piñol, 1990). En el cas del bosc Mediterrani, com és l'alzinar de Prades a l'Avic, s'observa que l'evapotranspiració real augmenta linealment amb l'augment de pluja, mentre que el cabal de la riera roman molt baix (prop del 10% de la pluja), independentment de la pluja. En canvi, a les conques de països més freds i humits que el nostre, com és el cas de la de Hubbard Brook, a New Hampshire, la resposta de les sortides de la conca en funció de la pluja és diferent. En aquest cas, la resposta a l'augment de pluja es tradueix en un augment de la sortida d'aigua del corrent fluvial, que augmenta el cabal de manera lineal amb la pluja. L'aigua evapotranspirada es manté pràcticament constant entorn dels valors que permet la demanda evaporativa o evapotranspiració potencial del lloc, que és de 561 mm. Si entra més aigua al sistema, no pot augmentar l'aigua evapotranspirada perquè no hi ha més energia disponible, i per tant si entra més aigua amb la pluja, sortirà més aigua per la riera.

Figura 1. Repartició anual de l'aigua de pluja entre el cabal i l'evapotranspiració en dues conques de disponibilitat d'aigua contrastada: la conca de l'Avic (Prades, Tarragona), de la nostra zona mediterrània, on la demanda evaporativa supera la demanda evaporativa, i la de Hubbard Brook (New Hampshire, Estats Units), on la pluja supera la demanda evaporativa.



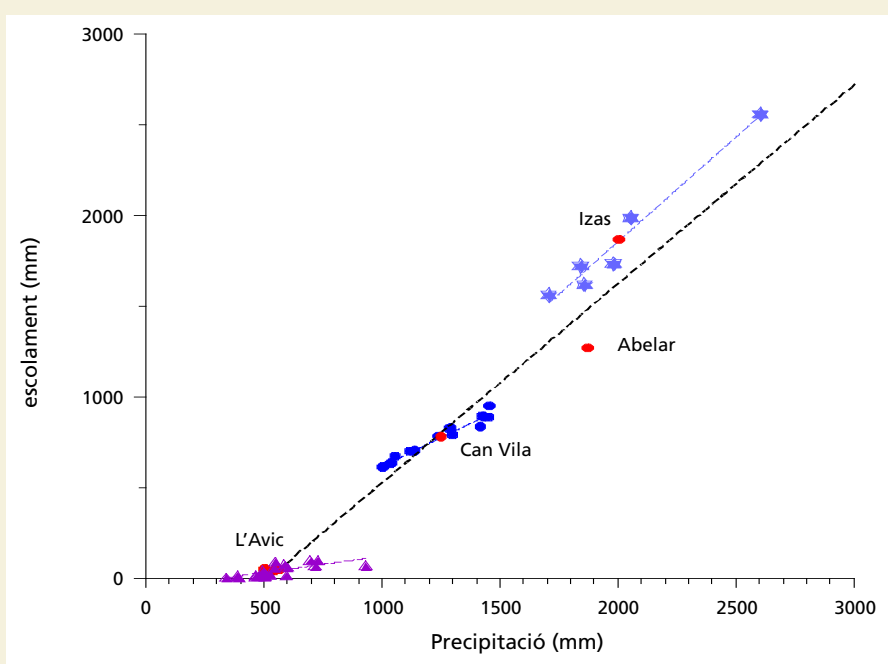
En aquestes conques, com que són impermeables, l'aigua de pluja (P) surt o bé per escolament i drenatge cap a la riera (Q), o bé s'evapotranspira (Ea). Si l'aigua retinguda al sòl no ha canviat, $Q + Ea = P$. (Adaptat de Piñol, 1990, i d'altres treballs seus posteriors Piñol *et al.*, 1992, 1999).

En el cas de l'Avic, la demanda evaporativa és molt més elevada, pràcticament el doble de l'aigua de pluja, i per tant quan entra més aigua a la conca, aquesta respon amb més evapotranspiració real, o, dit d'una altra manera, la pluja no satura la demanda evaporativa ni de bon tros. Aquest exemple serveix per a il·lustrar la gran limitació hídrica que tenen els nostres ecosistemes forestals, que aprofiten tanta aigua com sigui possible i que evapotranspiren prop del 90% de l'aigua de pluja. Val a dir que aquestes conques són totalment forestades. El comportament de les conques mediterrànies, com és el nostre cas, contrasta amb el de les conques humides, on si plou més tenen més cabal als corrents drenants. En el marc del canvi climàtic, l'augment de les temperatures es tradueix amb un augment de la demanda evaporativa i, per tant, de l'energia disponible per a evapotranspirar



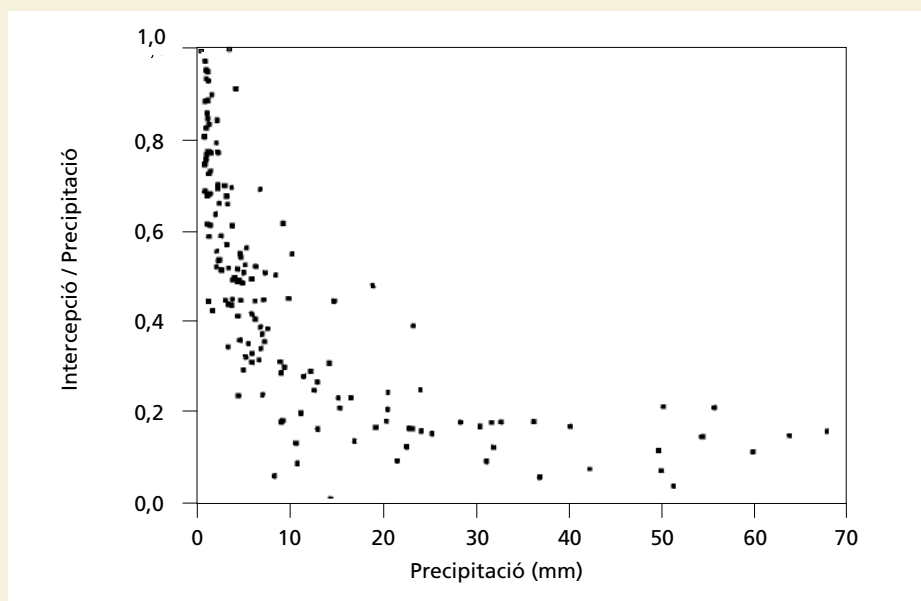
i eixugar encara més la conca. D'altra banda, no es projecta un augment de la pluviometria, sinó més aviat una disminució segons l'escenari climàtic que es considera, la qual cosa implica que els nostres ecosistemes patiran més sequera. Les sortides de la conca van, però, lligades al règim de pluja. Si la pluja és torrencial i persistent, l'aigua satura temporalment l'evapotranspiració potencial i l'emmagatzematge possible al sòl, i provoca un augment important del cabal que depèn de la persistència d'aquesta torrencialitat. En el cas de les pluges de la tardor del 1994, que van provocar inundacions a les parts baixes del Francolí, les sortides d'aquestes conques com la de l'Avic no es van poder mesurar per la immensitat del cabal.

Figura 2. Escolament anual en funció de la precipitació anual en diverses conques de la xarxa RESEL monitorades en el marc del projecte LUCDEME (Rojo, en premsa).



A la figura 2 es mostra la relació entre la pluja i l'escolament (dades anteriors de l'Avic incloses) per a diverses conques de la xarxa RESEL monitorades en el marc del projecte LUCDEME (Rojo, en premsa). A les zones de la Península on les precipitacions superen els 1.000 mm, la resposta a l'entrada de més pluja es correspon amb més escolament o més cabal de la sortida d'aquestes conques. El tipus de resposta de les conques com Can Vila, Abellar i Izas són més semblants al cas comentat anteriorment sobre les respostes a Hubbard Brook.

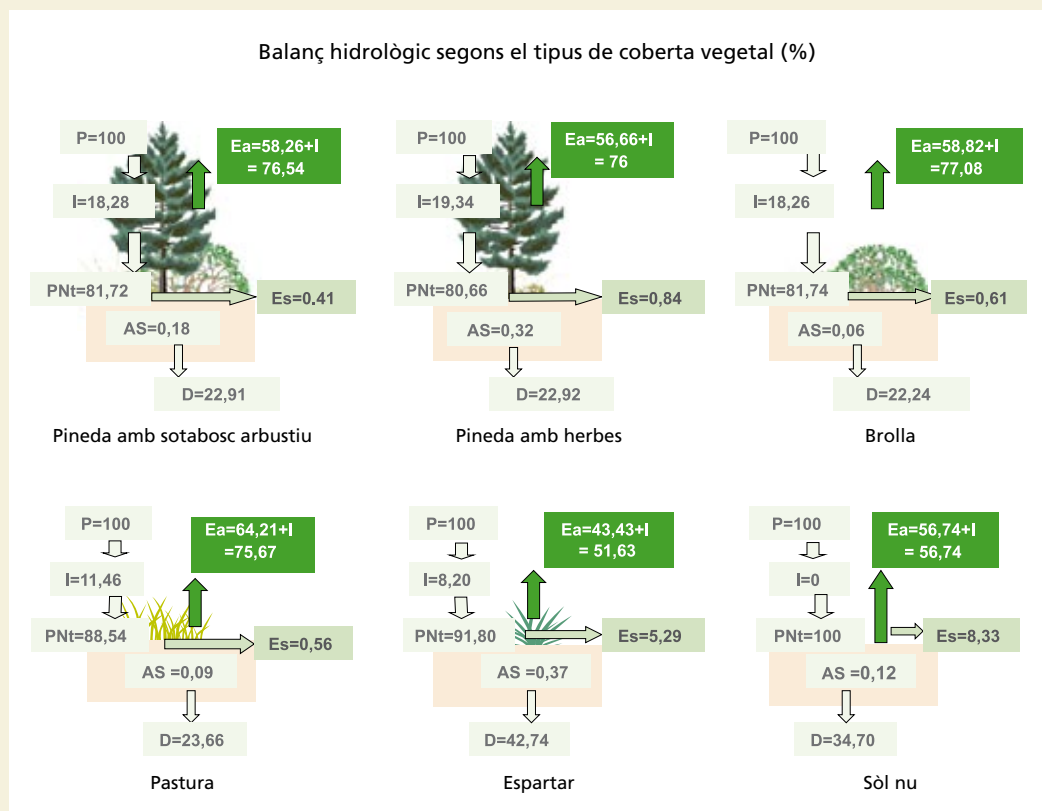
Figura 3. Relació entre la precipitació i la proporció que n'és interceptada, en un bosc de pi roig (*Pinus sylvestris*) (de Llorens et al., 1997).



Com hem comentat abans, una part de l'aigua que entra a l'ecosistema és interceptada i evaporada, però la quantitat depèn del tipus de cobertura. I, a més del tipus de cobertura, de la intensitat de la pluja. A la figura 3 s'il·lustra com en el cas de pluges petites, inferiors a 10 mm, l'aigua tendeix a ser interceptada en una gran proporció, i com en el cas de pluges aproximadament superiors a 10 mm, els valors d'intercepció tendeixen a situar-se prop del 20% de la precipitació o, fins i tot, en valors inferiors. Aquest patró de la figura 3, que mostra dades d'un bosc de *Pinus sylvestris* (Llorens et al., 1997), es pot generalitzar, encara que les quantitats no siguin exactament les mateixes. A la figura 4 es volen il·lustrar les diferències segons el tipus de cobertura amb les dades obtingudes durant uns quants anys al Ventós, situat en una zona relativament seca d'Alacant, on el grup de Joan Bellot (Universitat d'Alacant) va avaluar de quina manera diferents tipus de cobertura afecten la circulació de l'aigua. Les cobertures vegetals en aquest cas comprenen pinedes de pi blanc (*Pinus halepensis*) amb sotabosc arbustiu, pinedes amb herbes, brolles o matollars, herbassars de pastura o espartars i, finalment, sòl nu. Sota cobertures superiors al 70%, la resposta hidrològica (i la pèrdua de sòl, provocada per l'escolament superficial) no difereix estadísticament, encara que l'estructura vegetal no sigui l'arbòria. En canvi, si el sòl és nu, l'escolament augmenta substancialment. La intercepció de l'aigua representa prop del 18% de la pluja a la pineda i a la brolla, i el drenatge representa entorn del 22-23% de la pluja i augmenta si la cobertura es redueix, com és el cas del sòl nu. L'evapotranspiració és relativament alta en tots els casos, però inferior a la de l'alzinar de l'Avic, comentat anteriorment (90%), que té valors, en general, una mica superiors al 55% de l'aigua que ha entrat amb la pluja. Val a dir que aquesta zona és relativament més seca que la de Prades, amb menys recobriment vegetal, i que tot i que la intercepció pot tenir valors similars, la transpiració ha de ser inferior, atès que la superfície foliar vegetal i la densitat d'arrels en el sòl són inferiors a les pinedes i brolles que a l'alzinar.



Figura 4. Repartició i flux d'aigua segons el tipus de cobertura vegetal al Ventós (Alacant)
(de Joan Bellot *et al.*, Universitat d'Alacant).



P: precipitació. PNT: precipitació neta. Ea: evapotranspiració real o realitzada. Es: escolament. I: intercepció. D: drenatge. AS: aigua emmagatzemada en el sòl.
(Modificat de Rojo, en premsa).

Si l'aigua de pluja disminueix de manera important en el cas de l'alzinar de Prades, podríem trobar-nos davant de sistemes més semblants al del Ventós, atès que amb una entrada d'aigua inferior es provocaria una reducció de l'estructura de les capçades del bosc, que al seu torn comportaria la reducció de la transpiració, la fotosíntesi i la producció neta del bosc, a més de que provocaria també una pèrdua de capçades. L'augment de temperatura incrementa, a més de la demanda evaporativa, la respiració, la qual cosa també fa que es necessiti més aigua per a mantenir la mateixa quantitat de biomassa. Per situar aquesta possibilitat, hem fet l'exercici que es mostra a les taules 2 i 3, en el qual hem intentat fer una estimació dels valors de com l'alzinar utilitza l'aigua, i en quins processos es veuria l'efecte d'una reducció de la pluja. En primer lloc, si ens fixem en la taula 2, cal destacar que la major part de l'aigua que entra a l'alzinar és transpirada: si plouen 551 mm/any, 441 mm/any són transpirats per a poder créixer i mantenir la biomassa viva. En segon lloc, cal tenir present que una eficiència en l'ús de l'aigua, a partir de l'intercanvi de gasos a les fulles, de 4,98 mmols de $\text{CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, equival a transpirar 301 kg d'aigua per cada quilo de carboni que entra a la fulla per la fotosíntesi. Per tant, si la planta ha de mantenir els seus teixits vius i ha de créixer, quanta aigua s'ha d'haver transpirat per a cobrir la fotosíntesi necessària per al manteniment d'estructures i el creixement dels diferents components? Doncs bé, 142 mm/any es transpiren per a compensar la respiració de manteniment i la producció de les fulles, 247 mm/any per a compensar la respiració de manteniment i la producció de troncs i arrels gruixudes, i 52 mm/any per a la producció i el manteniment de les arrels fines. Però l'aigua que es transpira no és tota l'aigua que cau amb la pluja. Una part és interceptada i

evaporada, i una altra s'escala i es drena. Si es drena el 10% de la pluja i se n'intercepta el 10%, el 80% restant és transpirada. Això vol dir que per a transpirar 441 mm/any n'han de ploure 551 mm/any. Si en el context del canvi climàtic disminueix l'aigua de pluja, l'alzinar en patirà les conseqüències i perdrà producció i estructura. Si, a més, la temperatura augmenta, la respiració de manteniment augmentarà, i per tant es necessitarà més aigua per a compensar aquesta respiració. D'altra banda, això es pot alleugerir si en augmentar la concentració de CO₂ augmenta l'eficiència en l'ús de l'aigua (de manera que disminueixin els 301 kg d'aigua necessaris per a fixar 1 kg de carboni). Tot i així, aquest augment de l'eficiència en l'ús de l'aigua no sembla persistent en gaires casos, a causa dels canvis estructurals de les fulles i d'altres limitacions, com ara la disponibilitat de nutrients.

Taula 2. Estimacions de la transpiració necessària per a compensar el creixement i el manteniment de la biomassa a l'alzinar de Prades.

Components de la biomassa	Transpiració pel creixement mm/any	Transpiració pel manteniment mm/any	Tota la transpiració mm/any
Fulles	46	96	142
Troncs, branques i arrels gruixudes	225	22	247
Arrels fines	52	0,1	52
Tota la transpiració necessària	322	119	441
Precipitació necessària si es transpira el 80% de la pluja	403	148	551

Un altre aspecte que volem destacar, i que presentem a la taula 3, és que en aquest context l'aigua transpirada supera de molt l'aigua utilitzada a la fotosíntesi, que només representa, atesa la producció bruta d'aquest alzinar, una mica més d'uns 2 mm/any, la qual, a més, en part és recuperada en la respiració: 1 mm/any. Finalment, cal dir que en tots aquests processos la biomassa ha d'estar necessàriament hidratada, però que aquesta aigua, tot i que és variable, encara representa poca quantitat, uns 11 mm, en comparació de l'aigua transpirada a l'alzinar, 441 mm/any, que es presenta en aquesta estimació i que significa una pluja total de 551 mm/any.

Taula 3. Estimacions d'utilització d'aigua en transpiració, fotosíntesi, generació d'aigua per respiració i contingut d'aigua en els teixits. Quantitats d'aigua transformades a mm (= l/m²) per fer-les totes comparables.

Components de la biomassa	Transpiració per a assolir la fotosíntesi anual mm/any	Aigua substrat per a la fotosíntesi mm/any	Aigua originada per la respiració mm/any	Aigua que hidrata els teixits (mm)
Fulles	142	0,7	0,5	0,4
Troncs, branques i arrels gruixudes	247	1,3	0,4	10,0
Arrels fines	52	0,3	0,1	0,6
Total	441	2,3	1	11



Per tant, remarcar que la major part de l'aigua dels nostres boscos mediterranis, quan aquests cobreixen les nostres conques, és evapotranspirada i que les noves condicions ambientals, si són de més temperatura i menys pluja, és traduiran en unes pitjors condicions de creixement pels boscos, que transpiraran tant com puguin, i si no poden, perdran capacitat de créixer i estructura. Un altre aspecte és l'estacionalitat del règim de pluges. El creixement i acumulació de reserves en forma de carbohidrats als nostres boscos, per afrontar les respiracions de creixement esmentades, es fa sobretot a la primavera. Si aquesta pluja disminueix, la situació potser encara pitjor per l'alzinar en particular, i la resta de boscos en general. Aquests càlculs relativament senzills aplicats a l'alzinar de Prades (taules 2 i 3) es poden complicar més amb la seva modelització dinàmica. Això és el que ens permet l'aplicació de models com GOTILWA+, del que mostrem aplicacions a continuació. Les dades climàtiques d'entrada que utilitza el model han estat l'aplicació a Europa (incloent Catalunya) dels models de circulació general, en aquest cas HadCM3, que s'han fet servir en el marc dels projectes europeus ATEAM i ALARM (CREAF: Santi Sabaté, Carles Gracia, Eduard Pla i Jordi Vayreda). D'aquestes dades hem extret els píxels de Catalunya classificats com píxels mediterranis i píxels de muntanya. A la figura 5 es mostren les dades pel període 1901-2000 (en blau) i les projeccions segons diferents escenaris socioeconòmics d'emissions de CO₂, des del més sever (A1F1), passant per un intermedi (A2) i fins el més optimista (B1). L'evolució de la temperatura en tots els casos és d'un increment tant en els píxels de muntanya com als de clima més pròpiament mediterrani i la precipitació anual mostra una lleugera tendència a la disminució durant el segle XXI, però amb gran variabilitat, tant als píxels de muntanya com als de clima mediterrani.

Figura 5. Evolució de les dades climàtiques utilitzades pel model Gotilwa+. a) Temperatura mitjana anual i b) precipitació mitjana anual a Catalunya durant el període 1900-2000 (CRU, en blau) i durant el període de projecció, 2001-2100, segons el model climàtic de circulació general HadCM3, fent servir diferents escenaris socioeconòmics. A Catalunya es diferencien els píxels de muntanya dels píxels mediterranis.

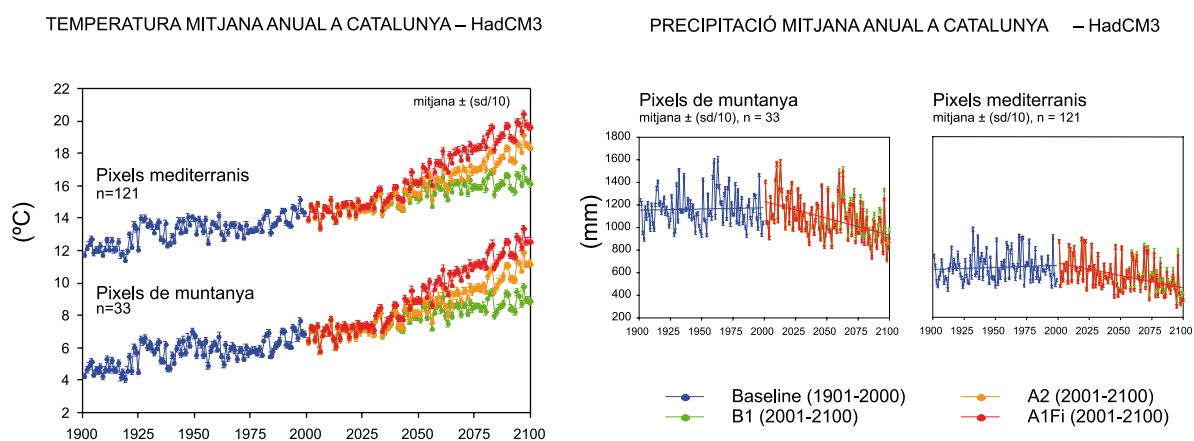
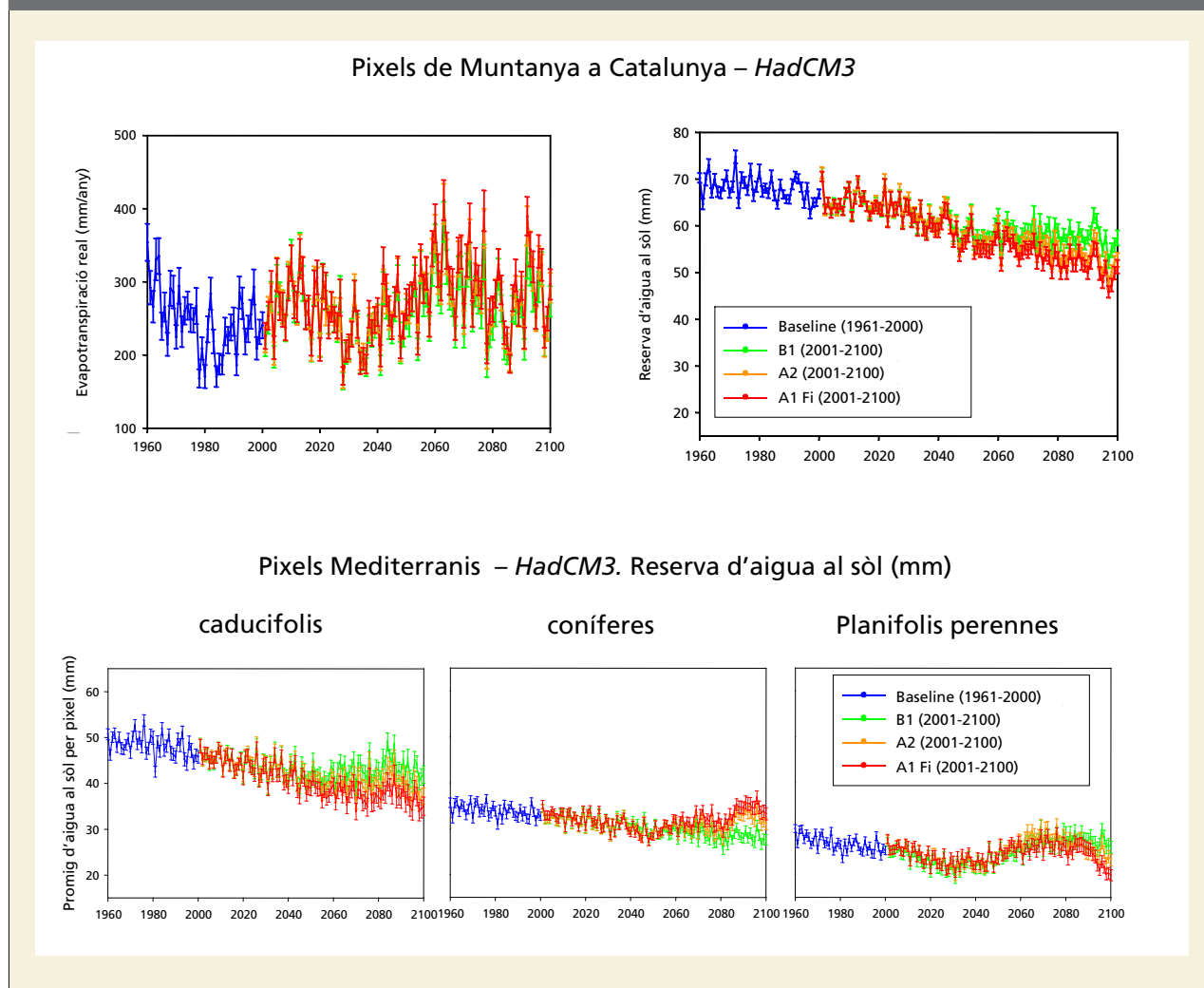


Figura 6. Evolució de l'evapotranspiració i de les reserves d'aigua al sòl segons el model Gotilwa+ en els píxels de muntanya, i reserves d'aigua al sòl en els píxels mediterranis amb diferents tipus de bosc (caducifoli, perennifoli i planifolis perennes), durant el període 1961-2000 (CRU, en blau) i durant el període de projecció, 2001-2100, a partir del model climàtic de circulació general HadCM3 i diferents escenaris socioeconòmics.



A la figura 6 es presenten els resultats de les projeccions d'evapotranspiració i de reserva d'aigua al sòl en els píxels de muntanya dels boscos de Catalunya simulades amb Gotilwa+ i escenaris del HadCM3. Mentre que l'evapotranspiració real tendeix a mantenir-se, s'observa una clara disminució de les reserves d'aigua al sòl. Aquesta disminució de l'aigua al sòl també disminueix als píxels mediterranis, fet que pot provocar un increment dels esdeveniments de mortalitat en els boscos de Catalunya (no mostrat), i que alhora explica la remuntada d'aigua al sòl, ja que es redueix l'evapotranspiració real, perquè amb la mortalitat disminueix la cobertura vegetal.

Certeses i incerteses

Si la temperatura augmenta tal com es projecta per als escenaris de canvi climàtic i la disponibilitat d'aigua disminueix en disminuir la pluja, no hi ha dubte que els nostres ecosistemes estaran sota condicions més àrides i que això afectarà la distribució d'algunes espècies, que deixaran de ser viables en les zones més extremes o exposades. També es perdrà capçada o estructura, la qual cosa segurament es traduirà en menys cobertura



en algunes zones. Hi ha dificultat a determinar amb certitud quines són aquestes zones i quan pot ser que es col·lapsin, perquè les condicions ambientals locals són heterogènies i pot ser que quedin refugis on encara siguin viables. Hem vist, els darrers anys, alguns episodis de sequera que van afectar grans zones de carena de les serralades del sistema prelitoral català. La vegetació va quedar seca, i tot i que alguns arbres i plantes s'han recuperat, han quedat en condicions precàries. Les alzines poden haver rebrotat, però els pins no. A Catalunya va ser especialment intensa la sequera del 1994, però se n'han repetit unes quantes els darrers 20 anys.

Com afectarà tot això el balanç hídric del territori depèn de l'escala en què es donin aquestes condicions de sequera. També hi ha una gran certesa del fet que la vegetació aprofitarà tant com pugui l'aigua per a transpirar, però, d'altra banda, els canvis de règim estacional podrien afectar els balanços de manera encara no prou clara. Per exemple, si plou menys a la primavera, que és quan la vegetació està activa i necessita aquesta aigua, però es manté la pluja d'hivern en moments de baixa activitat i menys demanda evaporativa, o augmenta la torrencialitat, aquesta aigua s'escaparà de les arrels i no es podrà utilitzar. L'augment del període vegetatiu, fet del qual es té una gran certesa, pot afectar la longitud d'activitat evapotranspirativa dels nostres boscos i disminuir les sortides d'aigua als rius i rieres de les conques.

Altres incerteses provenen de les projeccions climàtiques i de la capacitat dels models climàtics de recollir l'heterogeneïtat del territori. Actualment es fa un gran esforç per a millorar aquests models i s'estan desenvolupant models regionals cada vegada més solvents, com ja s'ha mostrat en capítols anteriors. Òbviament, això afecta les prediccions de models com Gotilwa+, que depenen de la disponibilitat de dades i de projeccions. La disponibilitat de dades no és només un problema del clima, sovint manquen dades d'estructura dels nostres sòls que ajudin a implementar avaluacions més realistes.

Un altre bloc d'incerteses prové de les mateixes descripcions dels processos que fan els models, que simplifiquen la realitat, però, sobretot, de l'aparició potencial d'interaccions que ara no es prenen en consideració i que poden modificar els detalls i els resultats finals de les respostes dels ecosistemes. Però, tot i això, es té la certesa, a grans trets, del que s'ha descrit amb els models, i les evidències ja mesurades certifiquen algunes de les previsions. No hem parlat aquí dels incendis forestals (vegeu capítol 2), però també hem d'apuntar que l'augment de l'aridesa, amb tota certesa, n'augmentarà la presència al territori, i és segur que els canvis de cobertura que comporten els incendis, encara que temporalment, modifiquen les cobertes vegetals i afecten no tan sols les respostes hidrològiques, és a dir, les quantitats d'aigua evapotranspirades i de cabal als rius i les rieres, sinó també la seva qualitat química, en aquest cas de manera negativa.

Oportunitats

L'acoblament de totes aquestes recerques que hem presentat millora el coneixement i la comprensió de com funcionen els nostres ecosistemes forestals. També ens anuncia la necessitat de plantejar canvis de gestió del territori a una escala espacial més gran de la que fins ara s'ha aplicat, però també amb una necessitat d'acció temporal més intensa, anticipant-nos als problemes. Això representa un esforç, un repte, però també una oportunitat. Només així es podran evitar els impactes o, si més no, pal·liar-los.

La gestió forestal pot mitigar, en alguns casos, els impactes del canvi climàtic, però el marge és petit i segurament haurem d'acceptar canvis significativament ràpids en un terreny en què les decisions tenen molta inèrcia.

En el conjunt del territori, en algunes zones s'hauria de reduir la densitat i la continuïtat de les masses forestades, però, d'altra banda, les receptes no són generalitzables i s'hauria d'avaluar cas per cas.

Referències bibliogràfiques

- GRACIA, C. A.; TELLO, E.; SABATÉ, S.; BELLOT, J. (1999). «GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth». A: F. Rodà, J. Retana, C. Gracia, J. Bellot (eds.). *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*. Ecological Studies, vol. 137. Springer-Verlag. Heidelberg (Alemanya). Pàg. 163-179.
- KEENAN, T.; SABATÉ, S.; GRACIA, C. (2008). *Forest Eco-Physiological Models and Carbon Sequestration*. A: F. Bravo (ed.). *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change*. Springer Netherlands.
- KRAMER, K.; LEINONEN, I.; BARTELINK, H. H.; BERBIGIER, P. [et al.] (2002). «Evaluation of 6 process-based forest growth models based on eddy-covariance measurements of CO₂ and H₂O fluxes at 6 forest sites in Europe». *Global Change Biology*, núm. 8, pàg. 213-230.
- LÓPEZ, B.; SABATÉ, S.; GRACIA, C. A. (2001). «Annual and seasonal changes of fine roots biomass of a *Quercus ilex* L. forest». *Plant and Soil*, núm. 230, pàg. 125-134.
- LLORENS, P.; POCH, R.; LATRON, J.; GALLART, F. (1997). «Rainfall interception by *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results to event scale». *Journal of Hydrology*, núm. 199, pàg. 331-345.
- LLORENS, P.; DOMINGO, F. (2007). «Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe». *Journal of Hydrology*, núm. 335, pàg. 37- 54.
- MORALES, P.; SYKES, M. T.; PRENTICE, I. C.; SMITH, P. [et al.] (2005). «Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes». *Global Change Biology*, núm. 11, pàg. 2211-2233.
- PIÑOL, J. (1990). *Hidrologia i Biogeoquímica de conques forestals de les Muntanyes de Prades*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.
- PIÑOL, J.; ÁVILA, A.; ESCARRÉ, A.; LLEDÓ, M. J. [et al.] (1992). «Comparison of the hydrological characteristics of three small experimental holm oak forested catchments in NE Spain in relation to larger areas». *Vegetatio*, núm. 99/100, pàg. 169-178.
- PIÑOL, J.; ÁVILA, A.; ESCARRÉ, A. (1999). *Water balance in catchments*. A: F. Rodà, J. Retana, C. Gracia, J. Bellot (eds.). *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Springer. Berlín (Alemanya). Pàg. 273-282.
- RODÀ, F.; RETANA, J.; GRACIA, C.; BELLOT, J. (eds.). *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Springer. Berlín (Alemanya).
- ROJO, L. (en premsa). *Red de estaciones de seguimiento y control de la erosión y la desertificación del Proyecto LUCDEME (RESEL)*. Dirección General de Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente y Rural y Marino. Madrid.
- ROMAN, F.; TERRADAS, J. (eds.) (1992). «*Quercus ilex* L. Ecosystems: function, dynamics and management». *Advances in Vegetation Science*, núm. 13 (reimprès de *Vegetatio*, núm. 99/100). Kluwer Academic Publishers. Dordrech Netherlands.
- SABATÉ, S.; GRACIA, C. A.; SÁNCHEZ, A. (2002). «Likely effects of climate changes on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the mediterranean region». *Forest Ecology and Management*, núm. 162 (1), pàg. 23-37.
- SCHRÖTER, D.; CRAMER, W.; LEEMANS, R.; PRENTICE, I. C. [et al.] (2005). «Ecosystem Service Supply and Human Vulnerability to Global Change in Europe». *Science*, núm. 310(5732), pàg. 1333-1337.



10. Exemples de modelització hidrològica del règim mitjà dels rius catalans en escenaris futurs

Andreu Manzano

Agència Catalana de l'Aigua

Introducció, objectiu i abast

Les estratègies d'adaptació a les noves condicions del canvi climàtic constitueixen, conjuntament amb les de mitigació de les seves causes, els grans reptes mediambientals actuals i futurs. Amb l'objectiu de plantejar aquestes estratègies i propostes d'adaptació en matèria de gestió de l'aigua, primer cal desenvolupar una diagnosi prèvia tan fiable com sigui possible sobre quines seran les condicions hidrològiques futures de referència. Aquest és l'objectiu general d'aquest treball, pel que fa a un dels impactes més destacats: el que es produirà en l'àmbit de l'aigua, en totes les seves dimensions. Específicament, en el cas d'aquest capítol, l'objectiu és l'anàlisi dels impactes sobre els recursos hídrics des del punt de vista dels canvis que podrien experimentar els règims mitjans dels rius catalans a mitjà i llarg termini.

Cal tenir present, primer, que aquests elements ja estan actualment fortament condicionats per factors directament antròpics, i que ho continuaran estant previsiblement de manera més accentuada, per efecte del denominat canvi global, dins del qual es pot considerar que el canvi climàtic n'és una de les cares. La importància d'aquest factor antròpic és fonamental a l'hora de valorar els futurs escenaris socioeconòmics que determinaran els nivells d'emissions de CO₂, i, per tant, l'escalfament global, però també té un pes molt més local i directe sobre el creixement dels consums d'aigua, la invasió de zones inundables, la desaparició d'ecosistemes aquàtics, etc.

Aquest capítol se centra en la «quantificació» de l'impacte del canvi climàtic sobre el règim mitjà de les aportacions superficials i, per tant, no s'entra en la descripció de la hidrologia o de la dinàmica hidrològica, ni tracta de la disponibilitat i la gestió dels recursos hídrics, temes que s'abasten en altres capítols d'aquest informe.

Els treballs que es presenten a continuació es basen, fonamentalment, en l'aplicació de models hidrològics de conca. En primer lloc s'analitzen alguns antecedents d'àmbit regional, i a continuació es valoren els darrers treballs de detall específics d'algunes conques pilot catalanes. Amb caràcter general, aquests models es basen en la simulació dels diferents processos involucrats en la generació d'escorrentiu dins de la part terrestre superficial del cicle hidrològic a partir de la precipitació (intercepció, evapotranspiració potencial i balanç real, infiltració, recàrrega «profunda» i resultat d'escorrentius directe, base i total), amb pas temporal, habitualment, de detall diari. Els dos principals models que es referiran són el Sacramento (*Soil Moisture Accounting Model*) i el Gotilwa+ (*Growth of Trees is Limited by Water*). El primer és un model clàssic de dipòsits i de paràmetres agregats a escala de subconca, mentre que el segon és un model ideat per a la simulació dels processos de creixement forestal, els resultats del qual han estat adaptats o interpretats des d'un punt de vista més purament hidrològic per a aquests treballs.

Només a títol orientatiu, abans d'entrar en la descripció d'aquests treballs, val la pena comentar el cas de les estimacions «simples» d'evapotranspiració (potencial) a partir de formulacions més o menys generalistes basades en estimacions empíriques puntuals o valoracions parcialment teòriques, com, en aquest cas, la de Thornwaite. A la figura 1 es mostra, amb caràcter preliminar, com l'increment de temperatura de l'ordre d'uns 2 °C i la reducció de la precipitació d'uns 50 mm (aproximadament el 8 % per a la mitjana a Catalunya) poden significar increments

de l'evapotranspiració de l'ordre del 10 %, amb la consegüent reducció de l'escorrentiu total als rius. Aquest tipus d'anàlisi té limitacions importants (adequació al cas d'estudi, simplicitat en l'enfocament de la variabilitat interanual i intraanual, etc.), però ofereix una primera aproximació que es pot considerar vàlida per a determinats objectius de referència general. Altres formulacions, com les de la llei de Budyko ($A = P \cdot \exp(-\frac{ETP}{P})$), en aquest cas per a aportacions i àmpliament utilitzada en alguns dels primers treballs sobre l'impacte del canvi climàtic sobre les aportacions superficials dels rius (MIMAM-CEDEX, 1998), coincideixen sensiblement amb aquests resultats, amb la possibilitat d'oferir-ne una imatge més regionalitzada.

Figura 1. Percentatge d'evapotranspiració respecte de la precipitació total anual en termes de mitjana anual, segons la formulació de Thornwaite, amb la indicació dels valors típics a Catalunya.

P(mm/any) \ Tª (°C)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
100	88	91	93	94	95	95	96	96	97	97	97	97	98	98	98	98
150	81	86	89	91	92	93	94	95	95	95	96	96	96	97	97	97
200	75	81	85	88	90	91	92	93	93	94	94	95	95	95	96	96
250	69	77	82	85	87	89	90	91	92	92	93	94	94	94	95	95
300	63	72	78	82	84	86	88	89	90	91	92	92	93	93	94	94
350	56	68	74	79	82	84	86	87	88	89	90	91	92	92	93	93
400	50	63	71	76	79	82	84	86	87	88	89	90	90	91	92	92
450	44	58	67	73	77	80	82	84	85	86	88	88	89	90	90	91
500	38	54	63	70	74	77	80	82	84	85	86	87	88	89	89	90
550	31	49	60	66	71	75	78	80	82	83	Amb canvi climàtic: l'evapotranspiració s'incrementa el 10%					
600	25	44	56	63	69	73	76	78	80	82						
650	19	40	52	60	66	70	74	76	79	80						
700	13	35	49	57	64	68	72	75	77	79	81	82	83	84	85	86
750	6	31	45	54	61	66	70	73	75	77	79	81	82	83	84	85
800	0	26	41	51	58	64	68	71	74	76	78	79	81	82	83	84
850	0	21	38	48	56	61	66	69	72	74	76	78	80	81	82	83
900	0	17	34	45	53	59	Situació actual: el 70% de la precipitació s'evapotranspira						78	80	81	82
950	0	12	30	42	51	57							77	79	80	81
1000	0	7	26	39	48	55							76	77	79	80
1050	0	3	23	36	45	52	58	62	65	68	71	73	75	76	78	79
1100	0	0	19	33	43	50	56	60	64	67	69	72	74	75	77	78
1150	0	0	15	30	40	48	54	58	62	65	68	70	72	74	76	77
1200	0	0	12	27	38	45	52	57	61	64	67	69	71	73	75	76

Cal tenir present que a partir d'aquests resultats és possible desenvolupar sèries climàtiques i/o d'aportacions «sintètiques», construïdes a partir de les històriques mitjançant l'aplicació de coeficients per reduir-les o amplificar-les, canviar-ne la variabilitat, etc. Els models hidrològics, en canvi, permetran obtenir com a resultat, directament, noves sèries d'aportacions, independentment de la manipulació de les històriques, a partir de l'entrada o la simulació en continu de les sèries climàtiques obtingudes en treballs previs amb els models climàtics que determinen els grans escenaris (globals o regionals) futurs (capítols 4, 5, 6 i 7).



Dades, resultats i conclusions principals

Estimacions de caràcter global

Al capítol del 4t informe de l'IPCC, AR4 (IPCC, 2007) sobre els impactes en els recursos d'aigua dolça i la seva gestió, s'indica literalment (amb una afirmació d'una gran fiabilitat, segons la nomenclatura d'aquest treball): «Es preveu, a meitat de segle, un augment de l'escorrentia mitjana anual dels rius i de la disponibilitat d'aigua de l'ordre del 10-40% a les latituds altes i en algunes regions tropicals humides, i una disminució del 10-30% en algunes regions seques situades a latituds mitjanes i al tròpic sec, algunes de les quals ja estan sotmeses a l'estrès hídric». L'IPCC ha treballat més recentment en un document més específic sobre aigua (publicat en aquestes dates de 2008), que desplega els continguts d'aquest capítol general de l'AR4.

Amb aquesta perspectiva encara general, cal destacar els treballs desenvolupats amb el model hidrològic WaterGAP (*Water Assessment and Prognosis*) de la Universitat de Kassel (2005) i recollits parcialment al darrer informe de l'Agència Europea de Medi Ambient (EEA, 2004). WaterGAP treballa a macroescala, per a tot el món, tot i que amb una anàlisi més acurada a escala europea, i un detall que baixa a cel·les de 0,5 °C (uns 60 x 60 km en les nostres latituds), amb la qual cosa difícilment pot arribar a simular les característiques orogràfiques de territoris accidentats com el nostre. Pren com a referència els models climàtics globals HadCM3 i ECHAM4 sota condicions del 3r informe de l'IPCC de l'any 2001 (conegut com a TAR) i es pot considerar que, a causa del grau de detall i al fet que el seu calibratge va considerar només dos punts, situats al Duero i al Guadalquivir, per a tota la península Ibèrica (d'un total de més de 100 arreu del món), els seus resultats són merament orientatius per a Catalunya. De fet, aquestes simulacions mostren, precisament, com en la nostra regió mediterrània no és clara la tendència quant a aportacions mitjanes a mitjà termini (horitzó del 2020), ja que, segons el model climàtic que es considera, les simulacions indiquen recursos resultants diferents, des de similars als actuals (referència 1961-1990) fins a lleugerament superiors, fins i tot. En tot cas, aquesta tendència dels valors mitjans també s'acompanya de més extremització del clima o de més variabilitat hidrològica (vegeu els capítols següents), factors que determinarien un règim d'aportacions més difícilment aprofitable que l'actual i, per tant, amb repercussions destacades sobre la gestió. A més llarg termini (horitzó del 2070), les diferents simulacions coincideixen més i mostren que la reducció d'aportacions mitjanes serà clara, entre el 10% i el 25% respecte als valors de referència actuals.

Treballs a escala estatal

Les primeres referències publicades amb caràcter oficial sobre els impactes del canvi climàtic en els recursos hídrics a Espanya són al Libro Blanco del Agua (2000), i provenen, en bona part, de les estimacions d'Ayala-Carcedo (actualitzades el 2001). En aquests treballs es va considerar la utilització d'un model agregat per a cadascuna de les grans conques hidrogràfiques espanyoles, i l'aplicació de lleis anuals per al règim d'aportacions, prenent com a base el període 1940-1985. Els escenaris de canvi climàtic van ser els proposats per l'Institut Nacional de Meteorologia (INM, actual Agència Estatal de Meteorologia, AEMET) el 1995, de mitjanes de precipitació i temperatura anuals a partir de les simulacions del model del Hadley Center del 1990. Per al 2060 es considerava un increment de temperatura d'uns +2,5 °C i una reducció de la precipitació mitjana de l'ordre del 8% al 10% en el conjunt peninsular, que pot superar del 20% al 22% en els escenaris previstos per a final de segle. Els resultats d'aquests treballs estimaven una reducció de les aportacions mitjanes del 6% i el 16% en el conjunt de les conques internes de Catalunya i a l'Ebre, respectivament. Tot i que es feien valoracions qualitatives sobre altres aspectes d'increment de variabilitat o possibilitats de certes tendències en l'observació de fenòmens extrems, no se n'oferien quantificacions.

Posteriorment s'intensifica la publicació de treballs, entre els quals destaquen l'avaluació preliminar recollida pel Ministeri de Medi Ambient el 2005 sobre tot el conjunt d'impactes a Espanya i el Plan Nacional de Adaptación al

Cambio Climático (2006), tot i que, a la pràctica, tots dos treballs recullen i utilitzen referències prèvies de MIMAM-CEDEX (1998) i Fernández (2002). Les primeres referències es poden resumir en els escenaris següents, que, aproximadament, es poden considerar d'aplicació als horitzons temporals del 2030 i del 2060 respectivament:

1. A partir d'escenaris «sintètics» de variació mitjana de les variables meteorològiques:
 - 1.1. Un increment de temperatura mitjana d'1 °C ocasionaria una disminució mitjana de les aportacions hídriques en règim natural del 5% a les conques internes de Catalunya i a l'Ebre.
 - 1.2. Un increment de temperatura mitjana d'1 °C i una reducció de la precipitació mitjana del 5 % comportarien una disminució mitjana de les aportacions hídriques en règim natural del 15 % a les conques internes de Catalunya i a l'Ebre.
2. A partir d'escenaris climàtics generals i considerant les simulacions climàtiques del model PROMES (variant la temperatura, però no la precipitació) i les hidrològiques del model distribuït Simpa, s'observava una reducció d'aportacions a les conques internes de l'ordre del 14% al 20 %.

Amb caràcter general per a la península Ibèrica, aquests mateixos treballs oferien una previsió de l'augment futur de la variabilitat hidrològica a les conques atlàntiques a causa de la intensificació de la fase positiva de l'índex NAO. Això podria fer que la freqüència d'avingudes disminuís, tot i que no ho fes la seva magnitud. A les conques mediterrànies i d'interior, tot i la incertesa més elevada, es preveuria que la irregularitat més accentuada del règim de precipitacions comportés un augment en la irregularitat del règim de crescudes i en el nombre i la magnitud de crescudes llampec (vegeu el capítol 12, específic sobre factors extrems).

Val la pena destacar els treballs de Fernández (2002), que utilitza el model hidrològic distribuït Simpa, amb pas mensual, en el període 1945-1995, per a comparar l'evolució respecte al període 2040-2049 a partir de les sèries de precipitació i temperatura resultants del model climàtic regional PROMES en les simulacions d'1xCO₂ i 2xCO₂. Combina aquesta metodologia amb altres escenaris o amb l'ús de lleis regionals anuals (com la de Budyko, comentada anteriorment), i observa diferències significatives entre models. Entre les 19 conques espanyoles que analitza n'hi ha dues catalanes, la del riu Llàmena (pràcticament completa) i la del Francolí, fins a Montblanc. En totes dues s'observa un bon calibratge del model hidrològic en termes d'aportació anual respecte als aforaments disponibles, però, en contra del que altres anàlisis mostren, les precipitacions d'entrada per als escenaris climàtics futurs són curiosament més elevades que les del registre històric, de manera que aquests increments, tot i que lleus, no es compensen completament amb una evapotranspiració creixent i donen lloc als resultats certament contradictoris següents, amb augment d'aportacions molt importants:

Taula 1. Escenaris de canvi climàtic per a les aportacions dels rius Llàmena i Francolí (Fernández, 2002).

	Variació de precipitació (segons PROMES)	Variació d'ETP	Variació d'ET	Variació d'aportació (segons Simpa)	Variació d'aportació (segons Budyko)
Riu Llàmena (81 km ²)	7%	21%	-5%	38%	-5%
Riu Francolí (343 km ²)	8%	19%	4%	39%	-8%



Les simulacions mensuals amb Simpa mostren reduccions importants d'aportacions durant els mesos de tardor (de fins a -40%), però que es compensen amb un increment important de pluges d'hivern (que arribarien a doblar les del règim mitjà actual). Al capítol 12 es valoren els aspectes que fan referència als canvis futurs en el règim i la variabilitat hidrològica.

Treballs de l'Agència a escala local

Amb l'objectiu de caracteritzar, quantificant, els impactes previstos, el 2002 l'Agència va desenvolupar una primera estimació de la possible repercussió que aquests canvis en els patrons de precipitacions i temperatures podrien tenir sobre el règim d'aportacions dels rius catalans. En aquell moment es va fer una avaluació de caràcter preliminar d'aquests efectes a la conca (pilot) del riu Cardener fins a l'embassament de la Llosa del Cavall (figura 2). Aquests resultats s'han d'interpretar amb prudència, com a indicadors de tendències, i tenint present les incerteses importants que encara mostren els models actuals, la gran variabilitat climàtica i hidrològica, i la difícil representativitat o uniformitat dels resultats obtinguts. També s'ha de tenir present que aquests escenaris no són prediccions sinó models de futurs climàtics plausibles, i les inferències que se'n facin no són pronòstics com a tals, sinó il·lustracions del caràcter i de la magnitud de les conseqüències potencials.

Figura 2. Situació dels estudis hidrològics d'impacte local del canvi climàtic sobre les aportacions hídriques fets per l'Agència Catalana de l'Aigua a Catalunya. En marró fosc s'identifiquen els realitzats mitjançant el model hidrològic Gotilwa+ i en marró més clar els desenvolupats mitjançant el model Sacramento.



De manera resumida, i prenent com a base les recomanacions generals d'organismes internacionals com l'IPCC (en aquest cas, en el seu 3r informe de 2001) sobre els futurs escenaris climatològics (precipitacions i temperatures que cal introduir al model hidrològic Sacramento, amb el qual s'havien fet les sèries històriques de referència

d'aportacions superficials en règim natural per al conjunt de les conques internes de Catalunya), els resultats van ser els següents:

- En un primer escenari per a les primeres dècades del segle XXI, considerat favorable quant al ritme d'emissions de GEH, amb un augment de la temperatura mitjana anual d'1 °C, es produiria un augment de l'evapotranspiració del 5% i una disminució de recursos del 3% respecte als valors mitjans actuals.
- En un segon escenari per al mateix horitzó temporal, però amb un ritme d'emissions contaminants més desfavorable, en què es considera l'increment de temperatura de l'escenari anterior, però, en paral·lel, una disminució de la precipitació del 5%, les aportacions a la Llosa del Cavall disminuirien l'11%.
- Finalment, en l'escenari extrem, estimat per a la segona meitat del segle XXI, en què augmentaria la temperatura 4 °C i disminuiria la precipitació el 15% respecte a la situació inicial, es produiria un augment de l'evapotranspiració del 22% i una disminució de recursos del 34%.

Taula 2. Escenaris de canvi climàtic per a les aportacions del riu Cardener fins a l'embassament de la Llosa del Cavall (2002) mitjançant el model Sacramento i a partir d'escenaris TAR.

Escenari	Horitzó	Emissions de CO2	Variació de precipitació	Variació de temperatura	Variació d'ET	Variació d'aportació superficial
1	Cap al 2030	Estables	—	+1 °C	+5%	−3%
2	Cap al 2050	Increment fort	−5%	+1 °C	+5%	−11%
3	Cap al 2070	Increment lleuger	−15 %	+4 °C	+22%	−34%

Aquestes anàlisis posen de manifest la sensibilitat i la importància que tenen la temperatura i l'evapotranspiració en els processos hidrològics i els models que els simulen, més enllà de la pluja, factor principal. Davant les incerteses que existeixen entorn de l'evolució futura de la pluviometria, aquests resultats ens mostren com en els escenaris futurs més càlids (+2 a +4 °C), tot i que de mitjana continués plovent «igual» que actualment, l'evapotranspiració podria reduir les aportacions mitjanes entre el 5% i el 10% exclusivament per efecte d'aquest increment tèrmic.

Un nou treball realitzat els anys 2006 i 2007 a la capçalera del riu Tordera fins a la Llavina (figura 2) va mostrar resultats similars, en aquest cas mitjançant el model Gotilwa+ i a partir de les sèries directament subministrades pel model climàtic global del Hadley Center (amb escenaris del TAR)¹ en lloc de la generació de sèries sintètiques. Les característiques de la conca d'estudi, amb força bosc i una pluviometria elevada fruit de l'alçada, determinarien una hidrologia bastant regular fins i tot amb condicions de canvi climàtic, de manera que la reducció mitjana d'aportacions (del 8% al 15%) no va ser tan acusada com es podria esperar en altres àmbits hidrològicament més irregulars. Val la pena destacar d'aquests resultats la sensibilitat de les aportacions al règim de temperatures

¹ Les dades climàtiques de partida mostren efectes importants ja a la primera meitat del segle XXI i, curiosament, aquests efectes es mostren menors més endavant, tot i que això pot ser resultat senzillament d'un cert comportament cíclic o es pot tractar d'un efecte local del model general. Noves simulacions climàtiques més actuals i de més detall regional, com les del projecte Prudence, se'n van, en canvi, a l'horitzó 2070 per començar a observar una certa convergència entre els diferents models globals disponibles i reduir, així, les diferències que hi ha entre ells. Per tant, cal pensar que el 2020-2050, i potser fins al 2050-2070, constitueix un període d'una certa «progressió lineal» dels efectes, tot i que en aquestes simulacions no s'observi així.



i al mateix cicle foliar de les plantes; en igualtat de variacions o reduccions de precipitació, es poden observar comportaments diferents de les aportacions en funció de les variacions de temperatura. Però increments més grans de temperatura no són sinònim directe de més evapotranspiració i menys aportacions si aquests increments tèrmics es concentren en èpoques de l'any en què l'evapotranspiració és menys significativa, sigui perquè hi ha menys disponibilitat d'aigua o perquè la massa foliar de les plantes i la consegüent transpiració són menors.

Taula 3. Escenaris de canvi climàtic per a les aportacions de capçalera del riu Tordera a la Llavina (2007) mitjançant el model Gotilwa+ i a partir d'escenaris TAR.

Escenari	Horitzó	P (mm)	T mín. (°C)	T màx. (°C)	Aportació (hm³)	Variació de precipitació	Variació de temperatura (°C)	Variació d'aportació superficial
Control o règim històric	1961-1990	856	7,5	16,0	10,3	—	—	—
B1	1991-2020	817	8,1	16,8	8,9	-4.6%	0,7	-13,5%
	2021-2050	790	8,5	17,2	8,9	-7.8%	1,1	-14,1%
	2051-2070	813	9,7	17,9	9,6	-5.0%	1,8	-7,5%
A2	1991-2020	818	8,1	16,8	9,1	-4.4%	0,7	-11,1%
	2021-2050	792	8,6	17,2	9,3	-7.5%	1,1	-9,3%
	2051-2070	801	9,7	18,4	9,4	-6.4%	2,3	-8,7%
A1FI	1991-2020	820	8,1	16,8	9,0	-4.2%	0,7	-12,6%
	2021-2050	791	8,8	17,4	9,0	-7.6%	1,4	-12,5%
	2051-2070	792	10,4	19,3	9,3	-7.5%	3,1	-10,5%

S'ha continuat treballant en altres àmbits complementaris (de nou, vegeu la figura 1) i a partir d'escenaris i sèries climàtiques generades per models climàtics més actuals i detallats. En concret, s'han de destacar els treballs a partir del projecte europeu Prudence amb models climàtics regionals d'última generació (capítols 6 i 12). A partir de la selecció de tres models regionals d'aquest projecte, s'han introduït les seves dades en el model hidrològic Sacramento i s'han fet les anàlisis corresponents per als escenaris A2 i B2 en els horitzons temporals del 2070–2100 en dues conques pilot més: la Muga a Boadella i el Francolí a Montblanc.

El resum d'aquests treballs, en termes de mitjanes anuals, es presenta a la taula 4.

Taula 4. Escenaris de canvi climàtic per a les aportacions de capçalera dels rius Muga a l'embassament de Boadella i Francolí a Montblanc a partir de diferents models climàtics del projecte Prudence (2007).

	Model Prudence	P (mm)	T (°C)	ETP (mm)	Aportació (hm³)	Variació de P (%)	Variació de T (°C)	Variació d'ET (%)	Variació d'aportació (%)
La Muga a Boadella									
Règim històric		985	13,7	761	65,8				
Escenari B2	SMHI	879	16,0	873	55,1	-10,7%	2,3	14,8%	-16,3%
(2070-2100)	ICTP	858	16,4	907	54,1	-12,9%	2,7	19,2%	-17,7%
	UCM	815	16,8	926	45,0	-17,2%	3,1	21,7%	-31,6%
Escenari A2	SMHI	890	17,2	939	53,4	-9,7%	3,5	23,5%	-18,9%
(2070-2100)	ICTP	833	17,7	982	47,2	-15,4%	4,0	29,2%	-28,4%
	UCM	815	17,7	975	40,5	-17,2%	4,0	28,2%	-38,4%
El Francolí a Montblanc									
Règim històric		518	13,8	762	15,7				
Escenari B2	SMHI	493	16,1	890	16,2	-4,8%	2,3	16,8%	3,5%
(2070-2100)	ICTP	478	16,5	912	15,3	-7,8%	2,7	19,7%	-2,5%
	UCM	438	17,0	937	10,5	-15,5%	3,2	23,0%	-32,6%
Escenari A2	SMHI	457	17,5	969	11,8	-11,7%	3,7	27,1%	-24,3%
(2070-2100)	ICTP	478	17,8	991	12,4	-7,7%	4,0	30,0%	-21,1%
	UCM	410	17,9	990	7,6	-20,9%	4,1	29,9%	-51,7%

Curiosament, el projecte Prudence s'ha centrat en horitzons allunyats (a partir del 2070) perquè, abans, els models globals en els quals es nien els regionals no observaven canvis significatius o «indiscutibles» i les diferents simulacions base divergien considerablement. D'altra banda, a més de l'horitzó temporal, també cal observar que la major part de treballs adopten actualment l'escenari A2 com a probable en vista de l'evolució dels darrers anys (en canvi, el B2 sembla descartat per escàs o ja previsiblement superat). De fet, s'aprecia com els resultats per a horitzons més pròxims (2020-2050) no depenen tant de l'escenari IPCC-SRES escollit com de la inèrcia de la situació actual. Per aquest motiu, pot ser preferible parlar d'escenaris en funció de les emissions assolides respecte a la situació actual, tipus 2xCO₂ (que avui se situaria entorn dels anys 2050-2070, segons si l'evolució futura és A2 o B2), en lloc de referències temporals concretes.

En definitiva, dels resultats anteriors, cal destacar els amplis marges obtinguts per a les variacions d'aportacions futures, en funció dels models climàtics i els àmbits considerats. La sensibilitat en els escenaris A2 i B2, en canvi, és relativament menor si exceptuem el cas del Francolí, que sempre mostra diferències més acusades, fruit



probablement d'incerteses més grans en les dades climàtiques de partida, poc representatives dels registres reals amb què es van contrastar. En tot cas, el que sí que es pot concloure és que les reduccions d'aportacions d'aquest treball ofereixen uns escenaris futurs més acusats que els mostrats anteriorment, però cal recordar que l'horitzó temporal és més allunyat i que els models climàtics en què es basen parteixen d'increments de temperatura i disminucions de precipitació superiors.

Aquests treballs de detall a les conques de la Muga i el Francolí també han permès caracteritzar els canvis que pot experimentar l'estacionalitat o la variabilitat intraanual d'aquestes aportacions (taula 5). En general, es constata una extremització de les estacions en el règim hidrològic, com ja apuntaven altres treballs climàtics i d'àmbits més generals (vegeu també capítol 12), segons els valors següents per a la mitjana dels models considerats anteriorment.

Taula 5. Resum dels principals resultats a escala estacional de les anàlisis dels impactes del canvi climàtic sobre les aportacions de capçalera dels rius Muga a l'embassament de Boadella i Francolí a Montblanc.

		% de les variacions més destacades en termes d'aportació mensual respecte al registre històric				
		Tardor	Hivern	Primavera	Estiu	Mitjana anual
Muga	Escenari B2	Mín. -20%			Màx. -30%	-17 a -30%
	Escenari A2	Mín. -15%			Màx. -40%	-20 a -38%
Francolí	Escenari B2		-20 a +20% (1) (2)		Màx. -35%	2 a -30% (1)
	Escenari A2		Mín. -15%		Màx. -55%	-24 a -50%

(1) La dispersió (especialment en el model Promes de la UCM) és molt més elevada al Francolí que a la Muga, i fins i tot dificulta la interpretació dels resultats.

(2) Als hiverns pot arribar a ploure més que en l'actualitat.

Hi ha altres treballs amb escenaris climàtics amb un increment de pluja en els mesos d'hivern més important, precisament quan la hidrologia és menys sensible a augments de temperatura i, per tant, l'evapotranspiració potencial i la real presenten valors mínims i més pròxims. Es pot donar, sota aquestes situacions, la paradoxa que, en termes anuals, aquestes precipitacions i aportacions hivernals experimentin un creixement superior a la reducció prevista a la resta de l'any i, per tant, en còmput global la situació futura tendeixi a ser més humida.

Al capítol 12 s'amplien aquests temes de l'increment de variabilitat, així com de l'evolució que s'espera de fenòmens extrems.

Finalment, pel que fa a aquests estudis amb models hidrològics a escala de conques pilot, el treball més recent és el realitzat de nou amb el model Gotilwa+ a la capçalera del riu Llobregat fins a la Baells, també amb les sèries climàtiques del projecte Prudence (models ICTP i UCM), per als escenaris d'emissions A2 i B2, completats amb el model global HadCM3 per a l'escenari A2, amb la qual cosa s'aporta l'evolució de les variables climàtiques al llarg de tot el període de simulació, ja que Prudence només ofereix resultats per al període 2070-2100. En aquest treball, l'aplicació de les sèries climàtiques s'ha fet directament sobre els models, sense fer l'adaptació o la transformació d'aquestes sortides climàtiques al règim de referència, tal com es va fer en treballs previs. A la taula 6 següent es pot consultar el resum dels resultats, on s'observa la gran dispersió entre models, en part

deguda a l'aplicació directa de les sèries climàtiques. L'ICTP es pot considerar el model més ajustat a les condicions de referència, tant en precipitacions com en temperatures mitjanes, però ofereix molt poca sensibilitat a les reduccions de precipitacions (de l'ordre del 5 a 6%) i als increments de temperatura (de 2,4 a 3,7 °C), cosa que dóna lloc a disminucions baixes de les aportacions, com a màxim de l'ordre del 2%, la qual cosa planteja molts dubtes sobre aquestes simulacions. Els altres models ofereixen un futur considerablement més sec, però tenen poc ajustament a les dades de control i mostren una gran heterogeneïtat de resultats.

Quant al pes relatiu entre els canvis esperats de precipitació i temperatura, els resultats mostren una situació força equilibrada, de la mateixa manera que els escenaris A2 poden mostrar una reducció de les aportacions lleugerament més elevada i en canvi el B2 dóna lloc a situacions sensiblement amb més variabilitat.

Taula 6. Escenaris de canvi climàtic per a les aportacions de capçalera del riu Llobregat a la Baells (2008) mitjançant el model Gotilwa+ i a partir d'escenaris del projecte Prudence.

	Model climàtic	P (mm)	T (°C)	ETP (mm)	Aportació (hm³)	Variació de P (%) (*)	Variació de T (°C) (*)	Variació d'ET (%) (*)	Variació d'aportació (%) (*)
El Llobregat a la Baells									
Control	Dades								
(1961-1990)	mesurades	789	9,5		196,6				
	ICTP	735	9,6		188,6				
	UCM	1.036	4,4		402,3				
	HadCM3	1.082	6,9		319,5				
Escenari B2	ICTP	696	12,0		185,2	-5,3%	2,4	-5,0%	-1,8%
(2070-2100)	UCM	939	7,5		389,0	-9,4%	3,1	-16,9%	-3,3%
Escenari A2	ICTP	688	13,3		187,9	-6,4%	3,7	4,6%	-0,4%
(2070-2100)	UCM	898	8,6		358,4	-13,3%	4,2	-8,9%	-10,9%
	HadCM3	826	12,1		199,1	-23,7%	5,2	11,6%	-37,7%
(*) Les variacions s'expressen respecte a les referències de cada model en el període de control, no respecte a la referència de control de les dades mesurades de precipitacions, temperatura o aportacions que figuren a la taula.									

Un element que no s'ha considerat explícitament en les anàlisis anteriors amb models hidrològics és la reducció eventual d'aportacions exclusivament nivals, ja que els models climàtics no distingeixen de manera específica entre precipitacions en forma d'aigua o de neu, i la major part de models hidrològics presenten encara problemes per a simular la neu de manera satisfactòria.

Tot i que en volum el pes específic de la neu és poc rellevant a la major part dels rius catalans, exceptuant les capçaleres pirinenques de les Nogueres i la Garona i, en menys mesura, del Segre, el cert és que el seu efecte regulador sobre el règim hidrològic és molt important, fins i tot en els rius on les nevades són menys significatives. De fet, les zones d'alta muntanya es consideren entre les més vulnerables al canvi climàtic, i són llocs on els seus



impactes, per la gran sensibilitat als increments de temperatura, poden ser més crítics. En el cas dels Pirineus, en la mateixa línia del que passa en les muntanyes d'arreu del món, la pràctica desaparició de les glaceres es podria considerar un avís prou significatiu.

En general, el que cal esperar és un increment, difícil de valorar encara, de la freqüència d'anys amb nevades escasses, amb les repercussions que això pot tenir sobre els rius, tal com ja hem notat en anys recents d'hiverns especialment secs. Des d'un altre punt de vista, estudis francesos han determinat, per als Alps, un risc de que per cada grau centígrad de pujada de la temperatura, la cota de neu «assegurada» pugui pujar uns 150 m. Si als Pirineus la cota «estable» de neu se situa avui entorn dels 1.800 m, en el futur fàcilment podria pujar per sobre dels 2.200 m o fins i tot més. Això, en termes de superfícies nevades, significaria una reducció superior al 50%, amb un reflex immediat sobre les aportacions fluvials, fet agreujat a més per una fusió més avançada i accelerada i un risc més gran de pèrdues de recursos per sublimació a conseqüència de temperatures més altes. Un exemple d'aquest comportament podria ser el que sembla que s'observa en els rius Segre o Ter en les seves aportacions fins als embassaments d'Oliana i Sau, respectivament. Per exemple, en el cas del segon, no es pot concloure que les aportacions mitjanes en els darrers 30 anys hagin observat una tendència a la reducció continuada, atès que fins al 1997 el que s'observava era el contrari, un cert creixement. En canvi, a la primavera sí que s'observa al llarg de tot el període una tendència a la reducció certament constant. Aquest efecte, concentrat en la primavera, fa pensar que podria tenir un cert origen en la reducció d'aportacions nivals, ja que en termes pluviomètrics no s'observen disminucions significatives i altres règims com el del Fluvià, sense el pes de la neu, tampoc mostren aquesta tendència. En el cas del Segre, com en altres afluents pirinencs de l'Ebre i potser també en el Ter, aquests efectes es poden barrejar amb canvis de tipus global, amb l'abandonament dels conreus de mitja i alta muntanya i la reforestació d'aquests espais (vegeu també capítols 8 i 17).

En tot cas, el cert és que fins ara no hi ha hagut estudis de detall suficientment determinants i cal continuar investigant sobre aquests processos.

De la mateixa manera, també caldrà continuar explorant fenòmens de retroalimentació, com ara l'increment eventual de temperatura de l'aigua dels rius per efecte de les aportacions i calats menors (vegeu, també, els capítols següents). Per exemple, al riu Ebre s'ha estimat preliminarment que l'increment d'uns 2 °C observat al llarg dels últims 20 o 30 anys podria ser degut en part a una reducció de l'ordre del 15% en les aportacions mitjanes.

Incerteses i oportunitats

L'ample rang de valors que es mostren dels percentatges de reducció de les aportacions mitjanes dels rius catalans, posa de manifest el gran nombre de possibles escenaris i l'àmplia casuística actual i futura, en part fruit de l'heterogeneïtat hidrològica i la singularitat del clima català i en part a causa del gran ventall d'escenaris i horitzons temporals que mostren els models climàtics de referència. Tot i aquests dubtes i disparitat de resultats importants, cal no confondre això amb una probabilitat escassa de l'arribada d'aquests impactes i una consegüent infravaloració del risc associat. El significat d'aquestes incerteses rau en la consideració i la interpretació dels resultats com a escenaris plausibles, i no en termes de prediccions o pronòstics estrictes de situacions concretes. Cal entendre que la informació d'origen dels models climàtics, que no meteorològics, té la seva aplicabilitat en dominis regionals i en escales temporals llargues. Els seus resultats s'han d'interpretar de manera integrada en l'espai i en el temps i amb caràcter probabilístic, de manera que en aplicar-los a dominis locals, reduïts, amb models hidrològics, els resultats poden ser parcialment esbiaixats o no representatius. Els seus resultats adquireixen valor amb una perspectiva de conjunt.

De fet, afegides a les incerteses sobre l'evolució dels escenaris d'emissions determinats pels models socioeconòmics considerats a escala mundial, que determinen les simulacions climatològiques, ja per si mateixes força irregulars, i a les incertes en el nostre entorn mediterrani, en baixar al nivell dels impactes hidrològics s'hi sumen noves incògnites i incerteses inherents al procés hidrològic. Bàsicament, aquests elements provenen de l'evolució dels usos del sòl en el territori, que condicionaran l'evapotranspiració i la infiltració i la recàrrega d'aigües subterrànies. En aquest sentit, cal tenir present que no es disposa de projeccions solvents sobre l'evolució futura dels usos del sòl per a horitzons que vagin més enllà de 10 a 15 anys. D'altra banda, els mateixos models hidrològics suposen una limitació important, atès simulen situacions sovint estàtiques quant a les condicions hidrològiques, al llarg de tot el llarg període de simulació. En gairebé un segle, aquests canvis poden ser profunds en moltes zones, tant d'origen antròpic directe (a través de polítiques forestals i agrícoles) com originats o retroalimentats pel mateix canvi climàtic (increment del nombre d'incendis, tendència a la desertització, etc.). Models com el Gotilwa+ permeten salvar alguna d'aquestes limitacions, tot i que encara les simulacions cal entendre-les com a aproximacions dels processos reals.

Un element d'incertesa més que cal destacar és el del pes de la neu dins del cicle hidrològic, i les dificultats actuals que hi ha tant per a valorar-la com per a simular-la.

D'altra banda, la variabilitat pròpia interanual dels rius mediterranis, entre anys secs i humits, és comparativament molt superior a aquestes noves tendències associades als impactes del canvi climàtic i, per tant, els percentatges de reducció mitjana són poc significatius enfront, per exemple, d'una sequera. Això vol dir que l'arribada d'un fenomen extrem com ara una sequera no ha de ser forçosament simptomàtic dels efectes del canvi climàtic i caldrà acumular-ne més «evidències» al llarg d'un període suficient per a extreure'n conclusions adequades sobre les tendències que avui sovint es plantegen amb poc rigor.

Aquests impactes també ofereixen oportunitats per a continuar-ne l'estudi, entre les quals es poden destacar:

- El perfeccionament en el seguiment i el control dels recursos hídrics per tal de verificar les tendències actuals, analitzar amb noves observacions si aquestes tendències es van intensificant a curt o mitjà termini, etc.
- L'acumulació de nous treballs, com els que engega el CEDEX amb metodologies similars i l'ús del model Simpa en l'àmbit de tot Espanya, que aportaran més exemples i una base de dades més àmplia per a establir tipologies i probabilitats associades als impactes.
- El treball amb una pròxima generació d'escenaris climàtics regionals (projecte Ensemble a partir del 2009), així com l'ús de models hidrològics més complexos que integrin més elements per a aproximar-se a l'autèntica simulació del cicle hidrològic (evapotranspiració més «sofisticada» que reculli la complexitat del fenomen, canvi en els paràmetres hidrològics amb el temps, infiltracions i recàrregues variables, etc). Finalment, també és previst que els models climàtics i els hidrològics s'integrin (Projecte danès HYACINTS; proposta HIRHAM+MIKE SHE).

Conclusions

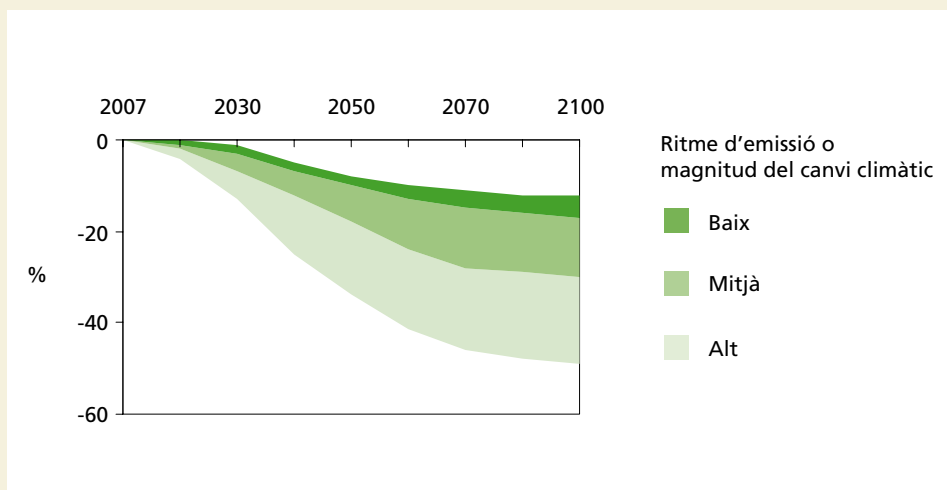
L'escalfament global dona lloc a un món considerablement més càlid i, a priori en el nostre entorn, també menys plujós, tot i que sobre aquest segon efecte encara hi ha incerteses importants i disparitat de resultats. En els horitzons més pròxims (2020-2030) alguns models climàtics globals ofereixen una imatge que podria ser més plujosa per a la Península, tot i que a més llarg termini (2070) les simulacions convergeixen i mostren un futur considerablement més sec. D'altra banda, les diferències entre els escenaris d'emissions A2 i B2 són relativament lleus entre si, amb la qual cosa es fa difícil fixar horitzons temporals clars, perfectament identificats amb una data concreta associada als nivells d'emissions de GEH.



Els estudis disponibles sobre aquests efectes en el cicle hidrològic mostren canvis importants en els processos d'evapotranspiració, amb increments de l'ordre del 10% al 20%, fruit de temperatures de 2 a 4 °C més elevades de mitjana a partir de la meitat del segle XXI. Alhora, s'ha mostrat que el procés hidrològic de generació de cabals és altament sensible als processos d'evapotranspiració, amb una gran influència de la massa foliar de les plantes allà on la cobertura vegetal és important.

Com s'ha vist, la casuística, en un territori tan heterogeni com és Catalunya, tant des del punt de vista climàtic com orogràfic i hidrogeològic, és molt gran. En tot cas, el cert és que la perspectiva d'un món més càlid també tendeix a oferir una visió d'un món més sec a les nostres latituds, amb estacions humides més curtes. Tenint present que ja s'ha observat un increment d'1 a 1,5 °C de mitjana al llarg de la segona part del segle XX, un increment de la temperatura mitjana d'uns 2 °C per a Catalunya en el que es podria ajustar a un horitzó temporal entorn de l'any 2030-2040, podria donar lloc a reduccions de les aportacions de l'ordre del 15%, en ser acompanyades de disminucions de la pluviometria mitjana del 10%. Altres simulacions menys sensibles a canvis de la pluja (–5%) gairebé no mostren canvis sobre les aportacions. Com que molts escenaris climàtics donen lloc a un increment de pluja en els mesos d'hivern, precisament quan l'evapotranspiració potencial i la real presenten valors més pròxims i la hidrologia és, per tant, menys sensible a augments de temperatura, es pot donar la paradoxa que, en termes anuals, aquestes precipitacions i aportacions signifiquin un creixement superior a la reducció prevista a la resta de l'any i, per tant, en còmput total anual la situació futura pugui arribar a ser més humida. La possibilitat és real, tot i que sembla poc probable i, en tot cas, donaria lloc a un règim considerablement més irregular que l'actual.

Figura 3. Reducció mitjana de les aportacions anuals, a partir del conjunt de simulacions de caràcter local en conques hidrogràfiques catalanes petites i mitjanes.



A més llarg termini, més enllà del 2070, amb increments de temperatura que podrien superar els 3 °C i fins i tot els 4 °C en els pitjors dels escenaris, amb disminucions de precipitació que oscil·larien entre el –10% i el –16%, la reducció mitjana d'aportacions arribaria a valors importants de l'ordre del –16% a –28%.

Els horitzons més pròxims (2025-2030) no s'acostumen a tractar en aquest tipus d'estudis, ja que es busquen escenaris més allunyats en què els impactes siguin més significatius. Però la planificació hidrològica se centra en aquests horitzons més pròxims i, per tant, si es vol començar a considerar els impactes del canvi climàtic en la

planificació, caldrà fer un supòsit per a l'horitzó 2025-2030. Prenent com a base el conjunt de resultats anteriors i la figura 3, que els resumeix, es pot considerar factible, a títol orientatiu, una reducció de l'ordre del 5% de les aportacions mitjanes per als pròxims 15-20 anys.

Quant a la distribució territorial dels impactes sobre el règim hidrològic mitjà, l'efecte serà més acusat a les conques de característiques més mediterrànies, mentre que a les conques d'una certa influència pirinenca la reducció de pluja s'atenuaria (mantenint-se, això sí, l'efecte tèrmic amb major evapotranspiració). És difícil, però, obtenir patrons clars a partir dels resultats parcials de què es disposa, però una possible regionalització en la distribució d'aquestes reduccions a partir de valors mitjans es podria basar en el resum de la taula següent:

Taula 7. Síntesi dels treballs de modelització hidrològica del canvi climàtic a escala local a Catalunya.

Àmbit	Lloc i característiques	Condicions de la simulació	Resultats principals sobre les aportacions mitjanes
General	Llibre Blanc i altres treballs a escala estatal o continental, per a Catalunya	a) A partir de lleis anuals, amb +2,5 °C i de -8 a -10% de precip. per a l'horitzó 2060 b) I mitjançant el model Simpa, escenari 2xCO ₂ Promes: aprox. +1 °C i fins a -5% de precip.	a) -6% b) -14 a -20%
Alta muntanya pirinenca	El Cardener a la Llosa del Cavall (195 km ²)	Model Sacramento, escenaris «sintètics», amb diferents increments de temperatura i reduccions de precipitació uniformes; +1 °C; +1 °C i -5% de precip.; +4 °C i -15% de precip.	-3 a -34%
	El Llobregat a la Baells (503 km ²)	Model Gotilwa+, escenaris A2 i B2 del projecte Prudence (models regionals ICTP i UCM) i A2 del model global HadCM3: aprox. +3 °C i -6% de precip. a partir del 2070.	-2% (resultat preliminar)
Mitja muntanya mediterrània	La Tordera a la Llavina (47 km ²)	Model Gotilwa+, escenaris A2, B1 i A1FI del model global HadCM3 (TAR): aprox. +1,1 °C i -7,5% de precip. a partir del 2020 i de +2 a 3 °C i -7% de precip. a partir del 2050.	-9 a -14%
	La Muga a Boadella (191 km ²)	Model Sacramento, escenaris A2 i B2 del projecte Prudence (models regionals SMHI, ICTP i UCM): aprox. de +2,3 a 4 °C i de -10 a -13% de precip. a partir del 2070.	-16 a -32%
	El Francolí a Montblanc (332 km ²)	Model Sacramento, escenaris A2 i B2 del projecte Prudence (models regionals SMHI, ICTP i UCM): aprox. de +2,3 a 4 °C i de -8 a -16% de precip. a partir del 2070.	0 a -24% (i fins a -50% amb el model UCM, que mostra més diferències)



Referències bibliogràfiques

- AYALA-CARCEDO, F. (2001). *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad del Plan Hidrológico Nacional 2000*. En Arrojo ed. *El Plan Hidrológico Nacional a debate*, Bakeaz, Fundación Nueva Cultura del Agua, 51-66.
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY) (2004). *Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment*. (http://reports.eea.europa.eu/climate_report_2_2004/en)
- FERNÁNDEZ, P. (2002). *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Aplicación en 19 cuencas en España*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (ETSICCPM), Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- GRACIA, C.; SABATÉ, S.; PLA, E.; VAYREDA, J. (2007). *Aplicació del model Gotilwa+ a la conca pilot de la capçalera de la Tordera*. Agència Catalana de l'Aigua (ACA). Barcelona.
- HENRICH, T.; ALCAMO, J. (2002). *Europe's water stress today and in the future*. (http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente/kwss/5/ew_5_waterstress_low.pdf)
- HOWE, C.; JONES, R. N.; MAHEEPALA, S.; RHODES, B. (2005). *Implications of Potential Climate Change for Melbourne's Water Resources*. (http://www.melbournewater.com.au/content/library/news/whats_new/Climate_Change_Study.pdf)
- IGLESIAS, A.; ESTRELA, T.; GALLART, F. (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Capítulo 7: Impactos sobre los recursos hídricos*. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Madrid. Pàg. 303-353.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE) (2007). *IV Informe d'avaluació de l'IPCC. Base científica, impactes, adaptació i mitigació*. Traducció del Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS) i del Departament de Medi Ambient i Habitatge. Barcelona.
- MARTÍNEZ, E. (2008). *Avaluació de l'impacte produït pel canvi climàtic sobre els recursos hídrics a les conques de capçalera de la Muga i el Francolí*. Inclam i Agència Catalana de l'Aigua (ACA).
- MAS-PLA, J. (2005). *B 8. Recursos hídrics, dinàmica hidrològica i canvi climàtic. Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS).
- MIMAM-CEDEX (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE-CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS) (1998). *Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y demandas de riego en determinadas regiones de España*. Madrid.
- MIMAM (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE) (2000). *Libro Blanco del Agua*. Madrid.
- MIMAM-Oficina española de cambio climático (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE) (2006). *Plan nacional de adaptación al cambio climático*. Madrid.
- SABATÉ, S.; PLA, E.; VAYREDA, J. (2008). *Aplicació del model Gotilwa+ a la capçalera del Llobregat fins La Baells sota les hipòtesis del canvi climàtic previst*. Universitat de Barcelona (UB) - Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) i Agència Catalana de l'Aigua (ACA). Barcelona.



11. Canvi climàtic i recàrrega d'aqüífers a Catalunya

Felip Ortuño, Agència Catalana de l'Aigua

Jorge Jódar i Jesús Carrera, Grup d'Hidrologia Subterrànea, Institut Jaume Almera, CSIC

Introducció

Les aigües subterrànies representen prop del 99% de les aigües dolces que ens envolten, tot incloent-hi els llacs i els embassaments. Això és veritat a gairebé totes les escales (ciutat, país, continent, planeta). És per això que es poden considerar com a aigües que són presents i que donen persistència al cicle hidrològic. Són les aigües que permeten que els rius portin aigua quan no plou, que la vegetació de ribera pugui sobreviure o que hi hagi humitat a l'aire a l'estiu.

En condicions naturals i a mitjà termini, la quantitat d'aigua que es pot dedicar a aquestes funcions és la que entra als aqüífers, la recàrrega. En condicions influïdes per l'acció humana, és la recàrrega menys el que se n'extreu. Per això, quan els aqüífers s'exploten excessivament, els rius perden aigua i fins i tot desapareixen, els boscos de ribera moren i es perden, i el territori tendeix a assecar-se. Per això, la recàrrega és el paràmetre crític per a la gestió de les aigües subterrànies. Malauradament, als països àrids i semiàrids la recàrrega és difícil d'estimar.

La recàrrega es pot produir bàsicament per tres mecanismes: recàrrega superficial de la pluja, recàrrega lateral d'altres aqüífers i entrades d'aigua des dels rius. El primer mecanisme de recàrrega, i quantitativament més important, és la pluja que cau a la superfície del sòl. Una part d'aquesta pluja genera un escolament superficial (important en zones amb pendent i sòls poc permeables), una altra part s'emmagatzema al sòl i permetrà el creixement de les plantes durant l'estiatge, i la recàrrega superficial és només la resta. És a dir, l'escolament total (superficial i subterrani) resulta de restar d'una quantitat gran una altra de semblant (pluja i evapotranspiració). El seu càlcul és, per tant, molt incert. El segon mecanisme de recàrrega, les entrades d'aigua des dels aqüífers adjacents, té les mateixes incerteses que la recàrrega superficial. De fet, els aqüífers adjacents també han estat recarregats superficialment per la pluja. El darrer mecanisme, la recàrrega des dels rius, és negligible en condicions naturals, ja que els rius porten aigua quan no plou gràcies a la descàrrega de les aigües subterrànies. Dues excepcions són els deserts o territoris àrids situats al peu de les muntanyes, on l'escolament superficial dona lloc a rius que desapareixen en arribar a la plana, i els aqüífers molt explotats, on el règim natural i el flux s'han invertit, de manera que es pot produir una recàrrega important, sobretot durant avingudes (Vázquez-Suñé *et al.*, 2006).

Ateses les dificultats d'estimació, hi ha molts mètodes per a calcular la recàrrega (Lerner i Custodio). Els més precisos es basen a estudiar la resposta hidràulica, hidroquímica i/o isotròpica de l'aqüífer a la pluja. Són, per tant, mètodes que només es poden aplicar per a interpretar dades del passat, però que no serveixen per a fer prognosis sobre l'evolució futura de la recàrrega. Per a estudiar la resposta de la recàrrega al canvi climàtic, l'únic mètode possible és fer balanços hidrometeorològics. És a dir, fer estimacions de com evolucionarà l'evapotranspiració donades les variacions previsible de la temperatura i d'altres variables climàtiques. Sabent l'evapotranspiració i les variacions previsible de la pluja, es poden estimar les variacions de la recàrrega.

L'objectiu d'aquest capítol és, per tant, fer aquestes estimacions de la recàrrega en els aqüífers de Catalunya i quantificar-la d'acord amb les condicions que preveuen els actuals escenaris de canvi climàtic.

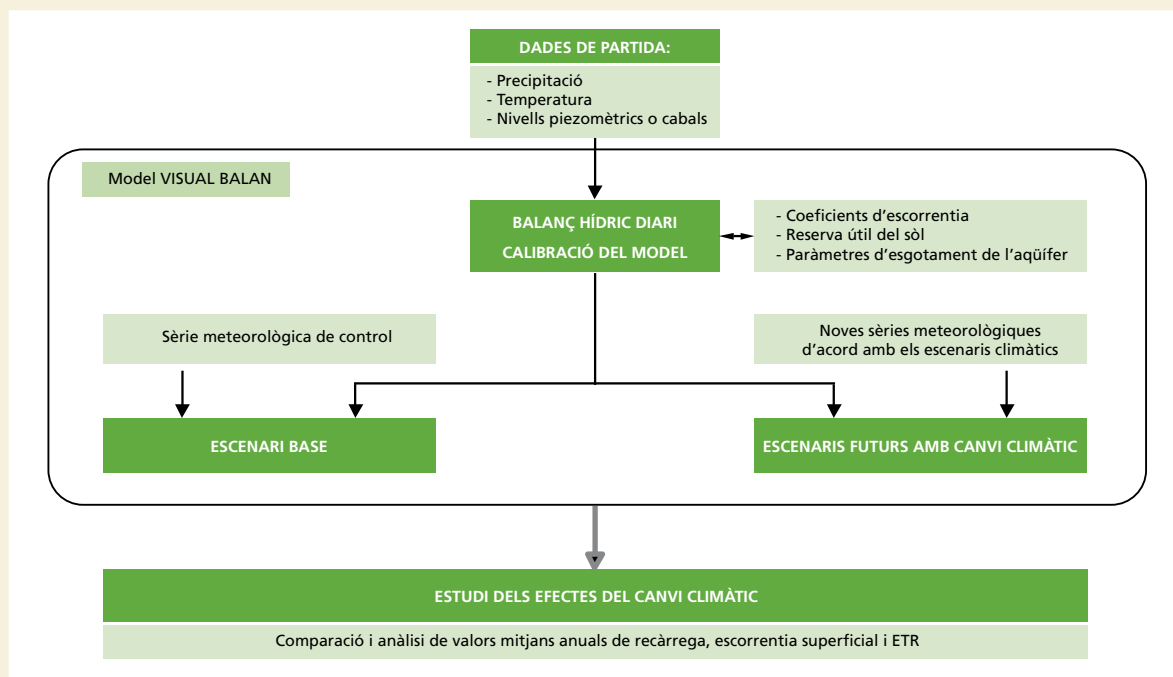
Metodologia

Càlcul de la recàrrega

La recàrrega en els aqüífers es calcula, entre altres mètodes, mitjançant la realització del balanç hidrometeorològic d'aigua al sòl. De tota l'aigua que plou, la major part de l'aigua infiltrada surt per evapotranspiració, de manera que la recàrrega resulta que és la diferència entre la pluja eficaç (el total del que plou menys l'escolament superficial) i l'evapotranspiració. El balanç d'aigua al sòl requereix calcular primer la infiltració a partir de les dades meteorològiques i de les propietats del sòl, i estimar després l'evapotranspiració amb aquestes dades. Una vegada se saben la infiltració, l'evapotranspiració i la capacitat de retenció d'aigua al sòl, es calcula la recàrrega.

El canvi climàtic preveu un augment de la temperatura, una reducció de la precipitació, almenys a l'àrea del Mediterrani Occidental, i un augment de la variabilitat d'aquests paràmetres, incrementant-se els episodis de tempestes. Com a conseqüència d'això, cal esperar que augmenti l'evapotranspiració i l'escorrentia superficial. Tot això farà que el sòl tingui menys aigua disponible per infiltrar, i que la recàrrega als aqüífers disminueixi. Per a analitzar els canvis en el balanç d'aigua per efecte del canvi climàtic el que es fa és calcular la recàrrega actual calibrant els seus paràmetres, tornar a fer el balanç amb les noves sèries meteorològiques dels escenaris dels models climàtics assumint que no hi ha canvis d'altres variables o paràmetres i comparar els dos resultats (figura 1). El codi o model de simulació que s'ha fet servir aquí és el Visual Balan v 2 (Samper *et al.*, 1999), el qual permet fer el balanç d'aigua al sòl i calibrar els principals paràmetres a partir dels nivells piezomètrics de l'aqüífer o amb estacions d'aforament considerades representatives de l'àrea d'estudi.

Figura 1. Metodologia per a l'estudi dels efectes del canvi climàtic sobre la recàrrega dels aqüífers.





Aquesta metodologia s'ha aplicat a tres piezòmetres i a una estació d'aforament a Catalunya (figura 2):

- Piezòmetre Cercs-1: Calcàries Pre-Pirineu
- Piezòmetre riera de Santa Coloma S-11. Al·luvial de la Tordera
- Piezòmetre Peralada S-12. Al·luvial de la Muga mitjana
- Estació d'aforament A00066 a Peralada. Llobregat de la Muga

S'ha prioritzat que els piezòmetres i les estacions estiguin situats en règims poc influïts per extraccions i que tinguin sèries de dades prou representatives per al calibratge, cosa poc habitual.

Figura 2. Piezòmetres i estacions d'aforament d'estudi per a l'anàlisi de la recàrrega.



Adquisició i tractament de les dades dels models climàtics regionals i transformació

Per al càlcul de la recarrega mitjançant la metodologia proposada anteriorment, és necessari saber com evolucionaran en el temps les variables climàtiques d'interès (precipitació i temperatura). Per a saber aquesta evolució s'ha utilitzat un subconjunt de les sèries climàtiques obtingudes en el marc del projecte europeu PRUDENCE. A l'adreça <http://prudence.dmi.dk> es poden descarregar lliurement totes les sèries climàtiques calculades dins d'aquest projecte (vegeu també el capítol 6 d'aquest document).

Les sèries climàtiques considerades en aquest estudi es corresponen amb les calculades per als models climàtics regionals ITCP, SMHI i UCM (taula 1) per als escenaris d'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle (GEI) i aerosols

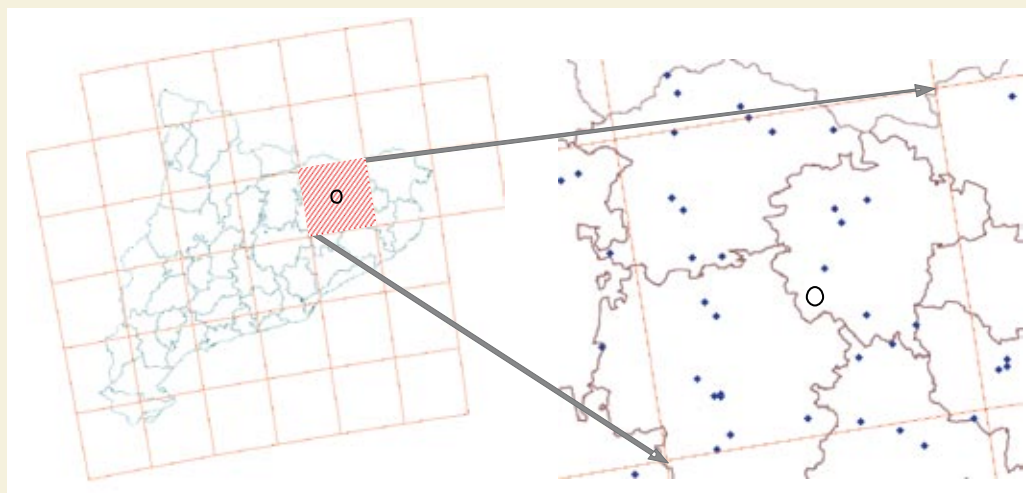
sulfat (SUL) A2 i B2. D'una banda, hi ha el denominat experiment de control, que reflecteix l'evolució observada o de referència del contingut global de GEI i SUL entre els anys 1961 i 1990. D'altra banda, també es tenen les dades dels escenaris d'emissió antropogènica d'aquests gasos SRS-A2 i SRS-B2, de 2071 a 2100, definits i publicats pel Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) en el seu informe especial d'escenaris d'emissió (Nakicenovic *et al.*, 2000) segons s'ha tractat en capítols anteriors.

Taula 1. Models regionals del projecte europeu PRUDENCE considerats en aquest estudi.

Centre	Model global en el qual nia	Model regional mm/any	Resolució horitzontal i nombre de cel·les
ITCP (Centre Internacional de Física Teòrica d'Itàlia)	HadAM3H	RegCM	50 km Lambert 119 x 80
SMHI (Institut Meteorològic i Hidrològic de Suècia)	HadAM3H	RCAO	0,44° (50 km) 90 x 86
UCM (Universitat Complutense de Madrid)	HadAM3H	PROMES	50 km Lambert 112 x 96

Per a obtenir l'evolució temporal d'una variable climàtica en un punt geogràfic determinat, s'ha buscat la cel·la del model regional a la qual pertanyen els punts geogràfics d'estudi on hi ha situats els piezòmetres i les estacions d'aforament (figura 3), i s'ha extret de l'arxiu general de la base de dades l'evolució temporal de les variables desitjades (precipitació i temperatura) pels models indicats i als escenaris A2 i B2 disponibles. En termes generals, no es pot treballar directament amb les dades extretes de les sèries calculades pels models climàtics, ja que les variables meteorològiques simulades contenen errors sistemàtics que poden arribar a ser importants. Les diferències relatives existents entre els diversos models regionals, així com les diferències entre aquests models i les observacions, poden ser tant en amplitud com en freqüència.

Figura 3. Cel·les per a Catalunya del model climàtic regional ICTP del projecte Prudence. El punt vermell correspon al punt d'interés i en blau s'indiquen les estacions meteorològiques reals de la xarxa EAMET

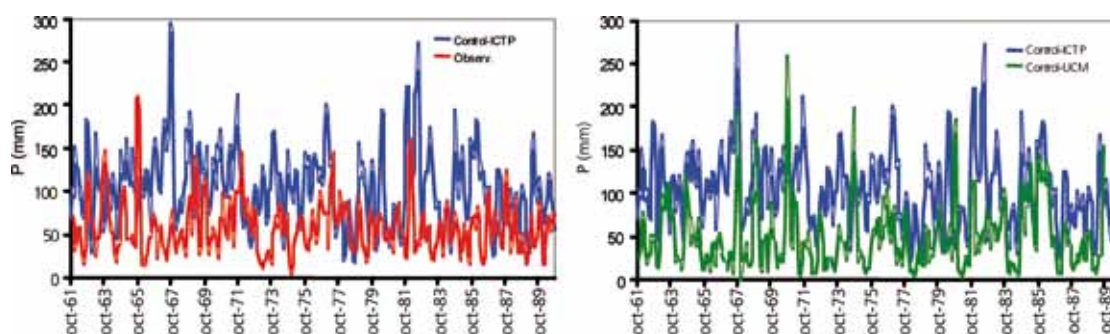




Esquerra: malla corresponent al model climàtic regional ICTP en l'àmbit de Catalunya. El punt vermell es correspon amb la posició geogràfica del punt d'interès. L'evolució climàtica de les variables associades a aquest punt serà la calculada pel model per a la cel·la que el conté. Dreta: ampliació de la cel·la que conté el punt d'interès. Els punts blaus es corresponen amb la posició geogràfica de les estacions de mesura de la xarxa d'observació de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET, antic INM) incloses en la cel·la d'interès del model ICTP.

Les variables meteorològiques s'han de regionalitzar utilitzant les dades disponibles històriques en totes les estacions meteorològiques existents dins del domini abastat per la cel·la del model, comparant-les amb la «sèrie de control». Així, les sèries climàtiques es modifiquen mitjançant un tipus d'interfície de correcció abans d'aplicar-les com a dades d'entrada en els models hidrològics (figura 4). Els dos mètodes més usuals per a corregir aquestes sèries són la interfície «delta de canvi» i la interfície «directe escalat» (Lenderink *et al.*, 2007). La variabilitat climàtica i la freqüència d'extrems de les sèries obtingudes mitjançant aquest últim mètode són més consistents amb les simulacions dels models, raó per la qual s'ha utilitzat aquest mètode per a corregir les sèries calculades d'evolució climàtica.

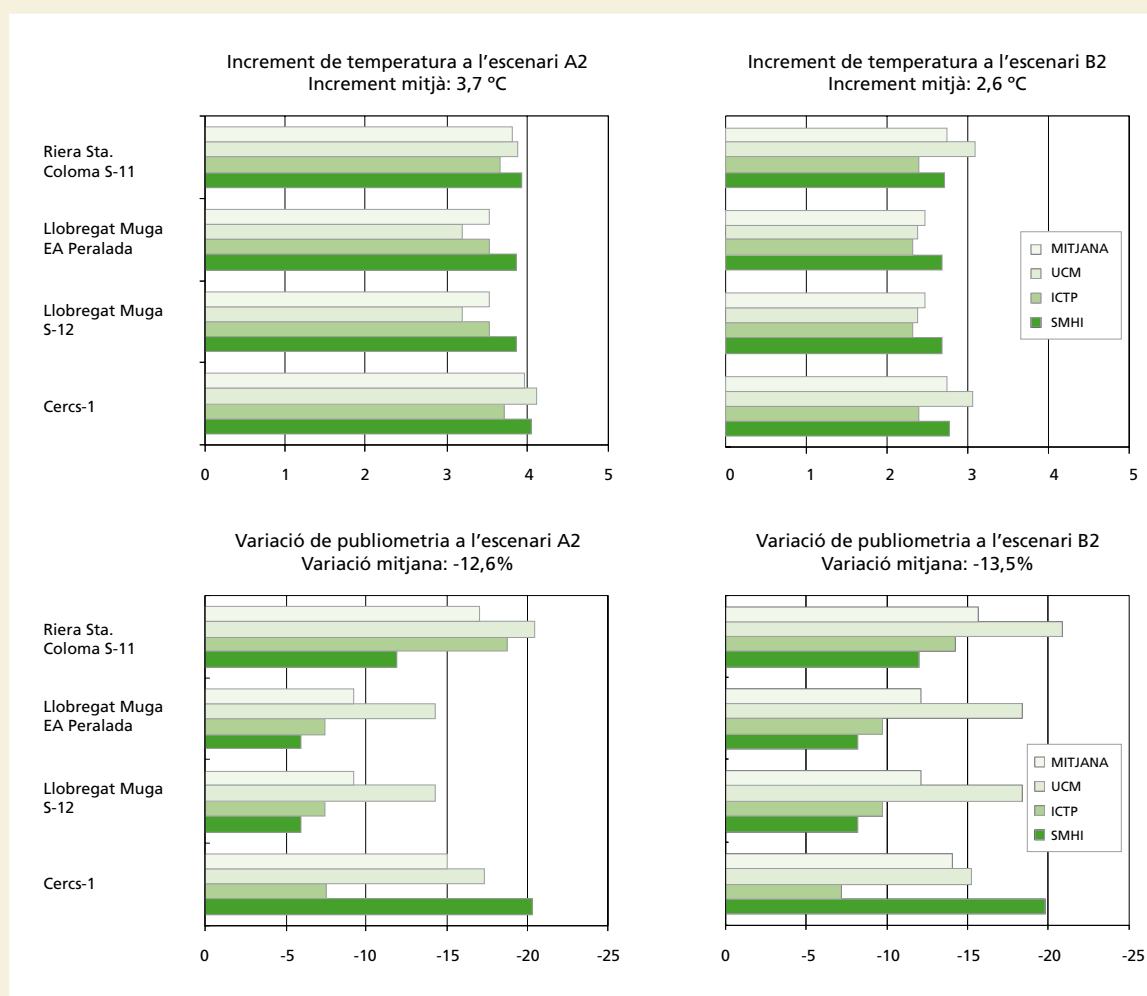
Figura 4. Sèries de precipitació del període de control 1961-1990 per al punt d'interès indicat a la figura 3. Es mostra la sèrie observada (vermell), la calculada pels models climàtics ICTP (blau) i UCM (verd).



Esquerra: precipitació calculada pel model ICTP (línia fina i blava) per a l'escenari de control i precipitació observada (línia gruixuda i vermella) per al mateix període. Dreta: precipitacions calculades pels models ICTP (línia fina i blava) i UCM (línia gruixuda i verda) per a l'escenari de control.

Els valors mitjans de les variacions de temperatura i de precipitació de les sèries climàtiques als escenaris A2 i B2 respecte als seus períodes de control en els punts d'estudi es poden observar a la figura 5. En valors mitjans, l'increment de temperatura dels 3 models per a l'escenari A2 2071-2100 és de 3,7 °C respecte a la seva sèrie de control 1961-1990, i de 2,6 °C per a l'escenari B2. Els increments de temperatura són bastant semblants en tots els models d'un mateix escenari, i el seu grau d'incertesa és molt reduït. Pel que fa a les precipitacions, les reduccions en valors mitjans són del -12,6% per a l'escenari A2, i de -13,5% per al B2. No obstant això, el grau d'incertesa i la variabilitat dels valors de la pluviometria és gran, depenent en aquest cas del model que es consideri i del punt d'estudi.

Figura 5. Increment mitjà de temperatura i variació mitjana de la pluviometria respecte a les seves sèries de control per als escenaris A2 i B2 dels 3 models SMHI, ICTP i UCM.



Els resultats han estat calculats pels tres piezòmetres i per l'estació d'aforament d'aquest estudi. Els increments mitjans de temperatura són de 3,7 °C i de 2,6 °C per als escenaris A2 i B2, respectivament. La precipitació mitjana disminueix -12,6% i -13,5% per als mateixos escenaris.

Resultats

Els resultats obtinguts indiquen que la recàrrega directa als aqüífers serà sensiblement modificada pels efectes del canvi climàtic. En tots els punts d'estudi, i per als escenaris A2 i B2, es verifica que la recàrrega disminuirà en el període 2071-2100 respecte als valors de les sèries més actuals, principalment com a conseqüència de tres factors que afecten el balanç hídric (figura 6):

1. El percentatge d'aigua que s'evapotranspira augmenta respecte al total de la precipitació.
2. El percentatge d'aigua d'escorrentia directa també augmenta.
3. La pluviometria total serà menor.

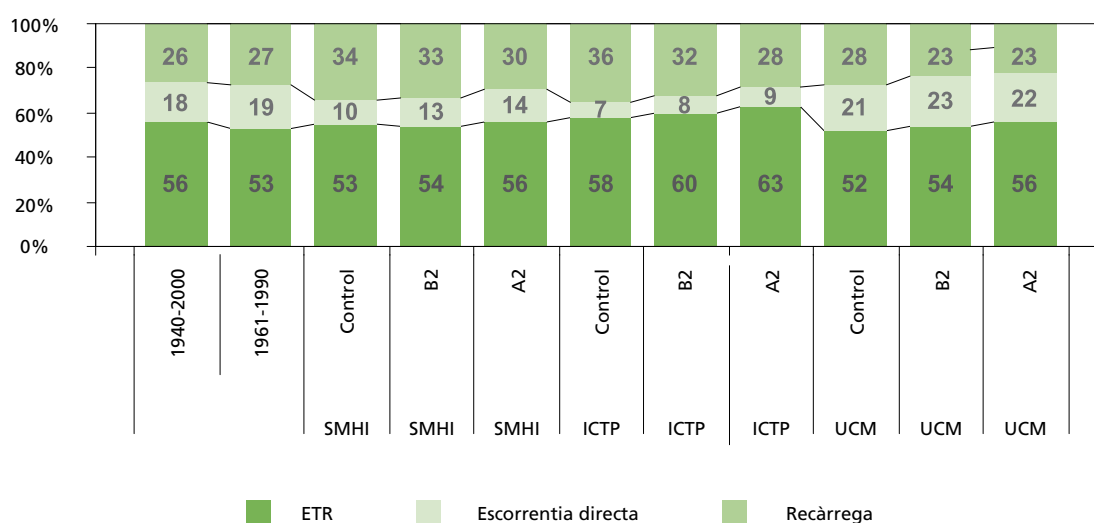
Si augmenten els termes del balanç hídric d'evapotranspiració i escorrentia directa, ha de disminuir la recàrrega.



Adicionalment, el total d'aigua disponible per a infiltrar també es menor, ja que la pluviometria mitjana es redueix.

Respecte al total d'aigua que plou, augmentarà el percentatge d'aigua que s'evapotranspira com a conseqüència de l'augment de la temperatura, i aquest increment serà més elevat en els escenaris A2 que en els B2 com a conseqüència del fet que l'increment de temperatura serà més gran en el primer cas (3,7 °C) que en el segon (2,6 °C). L'escorrentia directa també augmentarà com a resposta a una concentració més elevada de les pluges, la qual cosa es pot interpretar com un augment dels episodis de tempesta.

Figura 6. Percentatges dels termes del balanç hídric a la Riera de Santa Coloma (S-11)



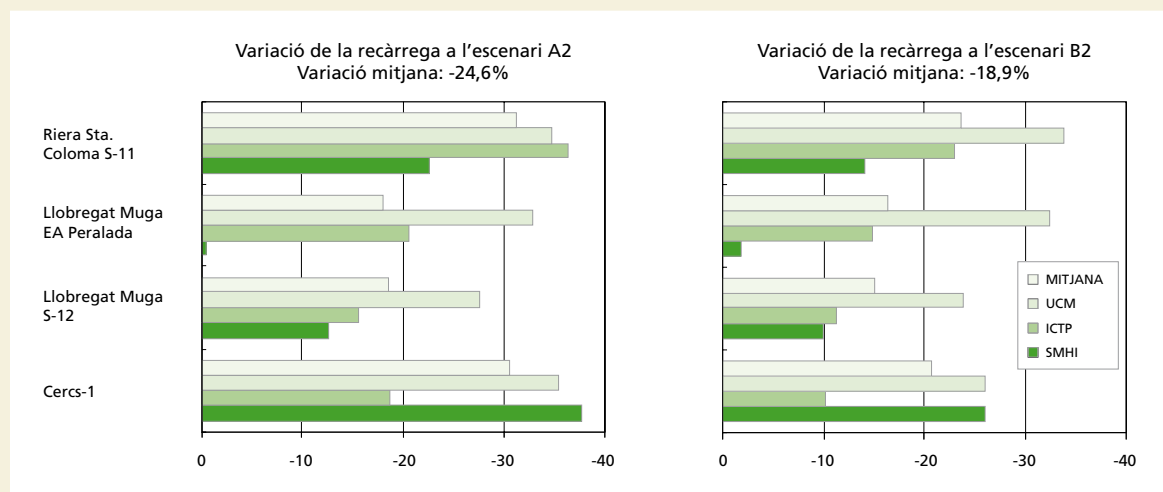
Percentatges mitjans de recàrrega, evapotranspiració i escorrentia directa respecte al total de pluviometria en tots els escenaris simulats pels models SMHI, ICTP i UCM en el piezòmetre S-11 de la riera de Santa Coloma. L'evapotranspiració i l'escorrentia directa augmenten sempre des dels escenaris de control en els escenaris B2 i A2 (2071-2100), amb la qual cosa la recàrrega disminueix.

Els valors mitjans de disminució de la recàrrega en els 4 punts d'estudi per als 3 models SMHI, ICTP i UCM i per als escenaris A2 i B2 (2071-2100) es mostren a la figura 7. La recàrrega disminuirà aproximadament el 25% de mitjana en el període 2071-2100 per a l'escenari A2 respecte a la sèrie 1961-1990. Per als piezòmetres de Cercs-1 i de la riera de Santa Coloma S-11 s'obtenen valors de disminució de la recàrrega del 31%, mentre que al Llobregat de la Muga S-12 i a l'estació d'aforament de Peralada la reducció de la recàrrega es pot situar per sobre del 18%. En referència a l'escenari B2, els models indiquen que la reducció mitjana de la recàrrega serà del 19%, lleugerament inferior a l'escenari A2. Aquest percentatge oscil·la des del 21-24% dels piezòmetres de Cercs-1 i de la riera de Santa Coloma S-11, fins al 15-16% del Llobregat de la Muga S-12 i de l'estació d'aforament de Peralada.

La disminució més gran de la recàrrega a l'escenari d'emissions A2 (25%, amb un interval del 18% al 31%) que al B2 (19%, del 15% al 24%) s'atribueix a un increment de temperatura més elevat al primer escenari, ja que la reducció de la pluviometria és molt similar en els dos casos. Cal destacar la gran variabilitat dels resultats obtinguts, comparant tant un únic model en diferents localitats com diferents models aplicats a la mateixa

localització geogràfica, la qual cosa sens dubte és conseqüència de la gran variabilitat dels models climàtics pel que fa a la pluviometria.

Figura 7. Variació de la recàrrega als escenaris A2 (esquerra) i B2 (dreta) per als models SMHI, ICTP i UCM en els piezòmetres i les estacions d'aforament d'estudi a Catalunya.



La mitjana de reducció de la recàrrega a l'escenari A2 és del 25% (del 18% al 31%), mentre que a l'escenari B2 és del 19% (del 15% al 24%).

Conclusions

Discussió

Els resultats dels treballs són clars. La recàrrega és reduirà. La reducció és deguda, en primer lloc, a la reducció de la pluja i, en segon lloc, a la reducció de la fracció infiltrada. Aquesta segona reducció és conseqüència del previsible augment de la fracció d'evapotranspiració (deguda a l'augment de temperatura) i de l'augment de la fracció de pluja que s'escola superficialment (causada per l'augment de la variabilitat climàtica i hidrològica i dels fenòmens extrems). Es podria pensar que, com que augmenta l'escolament superficial, els rius continuaran portant la mateixa quantitat d'aigua. Malauradament, aquesta segona lectura és errònia. L'escolament superficial es concentra en uns pocs dies a l'any i ho fa en forma d'aiguats més o menys importants. La resta de l'any, els rius porten l'aigua que reben dels aqüífers. Cal, doncs, esperar que el cabal de base dels rius es redueixi molt significativament.

La quantificació precisa és difícil, i molt sensible a l'escenari, a la conca i al model. A l'estació d'aforament del Llobregat de la Muga se simulen les reduccions més petites (0,5% amb el model SMHI) així com de les més grans (33% amb UCM) de tots els punts estudiats. Aquestes i d'altres incerteses es discuteixen a l'apartat següent. L'única cosa en la qual coincideixen tots els models és en una reducció de la recàrrega (i del cabal). Cal esperar que la reducció se situï entre el 10% i el 30%, amb els valors més probables entorn del 20%, per a l'horitzó temporal 2071-2100.



Incerteses i oportunitats

El coneixement precís dels mecanismes que regeixen la recàrrega actual dels aqüífers és essencial per a la realització d'estudis d'impacte com a conseqüència del canvi climàtic. El mètode de càlcul de la recàrrega mitjançant el balanç hidrometeorològic d'aigua al sòl proporciona una estimació raonablement encertada de la recàrrega amb les dades disponibles habitualment. No obstant això, el càlcul del balanç també és incert en condicions àrides i semiàrides. Les incerteses en el càlcul de la recàrrega estan associades al càlcul tant de la pluja eficaç (total de pluja menys l'escorrentia superficial) com de l'evapotranspiració, ja que ambdues tenen magnituds similars.

L'avenç en el coneixement dels processos implicats en el balanç hídric, i la possibilitat de disposar de dades d'estacions meteorològiques completes amb una cobertura molt ampla a Catalunya, ha de permetre en un futur proper afinar la metodologia de càlcul de la recàrrega que es presenta aquí. La possibilitat d'incorporar també al balanç hídric el consum d'aigua de la vegetació en funció del contingut de CO₂ de l'atmosfera, millorarà el càlcul del balanç.

Per a fer càlculs de la recàrrega mitjançant el balanç hidrometeorològic es calibren els paràmetres que defineixen les propietats del sòl i de l'aqüífer amb dades que normalment són nivells piezomètrics. El problema en aquest cas és que són necessàries sèries de dades que responguin únicament als fenòmens naturals associats a la recàrrega. Les dades disponibles de pous i piezòmetres d'aqüífers estan gairebé sempre influïdes per extraccions d'aigua subterrània, i a Catalunya, a excepció dels punts de control considerats en aquest estudi, no existeixen sèries llargues de piezòmetres en règims no influïts. El fet de disposar de sèries piezomètriques curtes i poc representatives augmenta la incertesa d'extrapolar els valors de calibratge a llargs períodes. També és una font d'incertesa el fet de suposar que tota la recàrrega es produeix per infiltració al sòl. Com s'ha comentat a la introducció, una part important de la recàrrega es produeix per entrades laterals, on els paràmetres del sòl són ben diferents dels de les planes. Cal esperar, doncs, que la seva reacció als canvis climàtics també sigui diferent. Reduir aquestes incerteses requereix millorar el coneixement dels aqüífers de Catalunya i posar en marxa models numèrics del funcionament dels aqüífers (per exemple, Vázquez-Suñé *et al.*, 2007). Fer això representa un repte, però també una oportunitat perquè facilitarà una gestió millor dels recursos hídrics.

L'estudi dels efectes del canvi climàtic és una bona oportunitat per a establir noves xarxes piezomètriques i de qualitat de l'aigua en règims no influïts a Catalunya. L'anàlisi de sèries de dades piezomètriques que responguin únicament a fenòmens naturals permetria aprofundir en l'impacte del canvi del clima en els aqüífers. Estudis de la recàrrega en les capçaleres dels rius a Catalunya, habitualment sense controls de l'aigua subterrània, aportarien molta més informació amb relació als efectes del canvi climàtic sobre els recursos hídrics.

Amb relació a la metodologia d'adquisició i tractament de dades climàtiques, cal recordar que actualment els models climàtics regionals (MCR) es basen en models climàtics de circulació general (MCG) de menys resolució espacial (300 km) i extensió global. Els models regionals simulen els processos de dinàmica atmosfèrica en malles amb una resolució espacial més fina (50 km) i una extensió limitada a una zona específica del planeta. Les dades meteorològiques mesurades s'utilitzen en els MCG per a «forçar» la solució d'aquests models en les observacions. No obstant això, aquestes simulacions només són capaces de reproduir les tendències regionals observades, atès el grau de discretització espacial que es fa servir en els MCG. Les dades calculades en les simulacions dels models globals serveixen de condicions de contorn i inicials per als models regionals. Aquest és el motiu principal pel qual les sèries de control calculades pels MCR no reproduïen de manera ajustada les observacions meteorològiques. La falta de detall en la reproducció de sèries històriques és una font d'incertesa que es propaga amb posterioritat a les simulacions de processos hidrològics, els quals al seu torn tenen associades les seves pròpies incerteses (vegeu també els capítols 6 i 7 d'aquest document).

Tenint en compte que cada vegada es coneixen millor els processos implicats en la dinàmica atmosfèrica, i que el rendiment dels microprocessadors millora contínuament (Moore, 1965; Tuomi, 2002), serà possible que en un

curt període de temps la resolució espacial dels models globals sigui prou refinada perquè sigui ser comparable o inferior a la resolució actual dels MCR. Això aportarà dades climàtiques més fiables, i disminuirà les incerteses en les projeccions climàtiques futures, la qual cosa es traduirà en avaluacions hidrològiques més precises.

Referències bibliogràfiques

LENDERINK, G.; BUISSAND, A.; VAN DEURSEN, W. (2007). «Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach». *Hydrology and Earth System Sciences*, núm. 11(3), pàg. 1145-1159.

MOORE, G. I. (1965). «Cramming habiti components onto integrated circuits». *Electronics*, vol. 38 (8).

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B. [et al.] (2000). Nebojsa Nakicenovic, Rob Swart (eds.). *Special Report on Emissions Scenarios*. IPCC (Intergovernmental Panell for Climate Change). ISBN: 92-9169-113-5.

SAMPER, J.; HUGUET, LL.; ARES, J.; GARCÍA VERA, M. A. (1999). *Modelos interactivos de Balance Hidrológico (Visual Balan v2)*. *Estudios de la zona no saturada del suelo*. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA). Tenerife.

TUOMI, I. (2002). «The Lives and Death of Moore's Law». *First Monday*, vol. 7(11).

URL: http://firstmonday.org/issues/issue7_11/tuomi/index.html

VÀZQUEZ-SUÑÉ, E.; ABARCA, E.; CARRERA, J.; CAPINO, B. [et al.] (2006). «Groundwater modelling as a tool for the European Water Framework Directive (WFD) application: The Llobregat case». *Physics and Chemistry of the Earth*, núm. 31(17), pàg. 1015-1029.



12. Efectes sobre la variabilitat hidrològica i els fenòmens extrems; exemples de la modelització hidrològica d'aiguats i sequeres en escenaris futurs

Andreu Manzano
Agència Catalana de l'Aigua

Introducció, objectiu i abast

En capítols anteriors s'han tractat aspectes associats fonamentalment a l'impacte del canvi climàtic sobre el règim hidrològic dels rius catalans en termes de valors mitjans, en tant que en aquest s'aprofundirà en la variabilitat d'aquest règim mitjà i en l'evolució dels fenòmens extrems i les seves conseqüències, baixant, en definitiva, a una escala temporal de més detall. Cal tenir present la complexitat d'aquests processos, en partir ja d'un clima mediterrani caracteritzat per la seva gran variabilitat, a escala intraanual i interanual, i amb l'existència de fenòmens extrems típics en forma d'aiguats i sequeres, sovint imprevisibles i sorprenentment alternats, en ocasions consecutivament, i sense cap patró climàtic prefixat. A escala global, s'estima que una de les tendències futures a les quals conduiran les condicions de l'escalfament global és precisament l'increment de la variabilitat meteorològica i una extremització del clima, que podria ser especialment acusada en el nostre entorn mediterrani.

Les singularitats d'aquest clima ja són avui complexes d'analitzar en detall, pels esdeveniments passats i pel pronòstic dels futurs. L'origen de les seves causes o la magnitud dels seus efectes és habitual que s'emmaskin o s'amplifiquin, a més, per factors antropogènics que dificulten les valoracions comparatives al llarg dels anys i poden fer confondre una determinada tendència a l'increment dels riscos associats a aquests fenòmens extrems, intrínsecs a causes climàtiques o meteorològiques, amb l'augment de la vulnerabilitat als seus efectes, de caràcter conjuntural i determinada en bona part per aspectes no meteorològics, sinó lligats a ocupació del territori més gran i indiscriminada, a la gestió insostenible dels recursos hídrics, etc. Per exemple, la inundabilitat que pot produir un mateix xàfec avui o fa 50 anys en certs àmbits urbans del Maresme ha canviat profundament, de la mateixa manera que la manca de pluges i la gravetat de la consegüent sequera no és la mateixa en estudiar les afeccions sobre uns conreus de secà o de regadiu. El risc climàtic pot ser el mateix, però la vulnerabilitat, en aquests casos, canvia considerablement.

No es coneixen gaires treballs específics sobre l'anàlisi detallat dels impactes del canvi climàtic sobre les aportacions fluvials i sobre el cicle hidrològic en general, més enllà dels referits als valors de règim mitjà recollits en capítols anteriors. L'anàlisi de canvis en la variabilitat hidrològica o, fins i tot, de fenòmens extrems com sequeres i aiguats, s'ha fet, fins ara, fonamentalment prenent com a base l'anàlisi de les variables climàtiques. Es parla d'una tendència a la sequera més elevada, per exemple, per reduccions en la pluviometria o per un increment en les temperatures, però el cert és que la hidrologia integra totes aquestes variables i processos i pot oferir, de vegades, resultats i matisos diferents dels merament climàtics per mitjà del pes que poden tenir en els balanços d'aigua els components d'evapotranspiració i/o d'infiltracions o de recàrrega de les aigües subterrànies. A més, per la gran varietat climàtica i hidrogeològica que hi ha al nostre àmbit, cal recordar que la complexitat d'aquest tipus d'anàlisi s'incrementa de manera destacada a Catalunya, amb un panorama hidrològic certament heterogeni. De fet, el principal factor en la generació d'aquests esdeveniments extrems serà la precipitació (per manca o per

torrencialitat), però, per exemple en el cas de les sequeres, tindrà un paper molt gran també la temperatura i la consegüent evapotranspiració. Pel fet que sigui la pluja el desencadenant principal i que aquesta sigui una variable molt difícil de determinar quant a la seva evolució futura amb els models climàtics actualment disponibles, ja es pot intuir que aquests esdeveniments seran difícilment caracteritzables, amb unes incerteses importants en estimacions com les que es presenten en aquest document, que només es poden considerar com a orientatives d'unes possibles tendències futures, a nivell preliminar. Es pot dir que les valoracions actuals no responen tant a una quantificació dels impactes probables, com a la determinació d'uns escenaris plausibles de tendències quant a màxims i mínims hidrològics. Aquests escenaris encara no són suficientment delimitats per a plantejar elements per a la gestió, però sí que poden ser adequats per al planejament preliminar d'estratègies, a mitjà termini, sempre sota el criteri de precaució o cautela i tenint present la necessitat d'iniciar un seguiment que permeti valorar, confirmar o revisar les prediccions a partir de les observacions que es vagin acumulant els propers anys.

Dades, resultats i conclusions principals

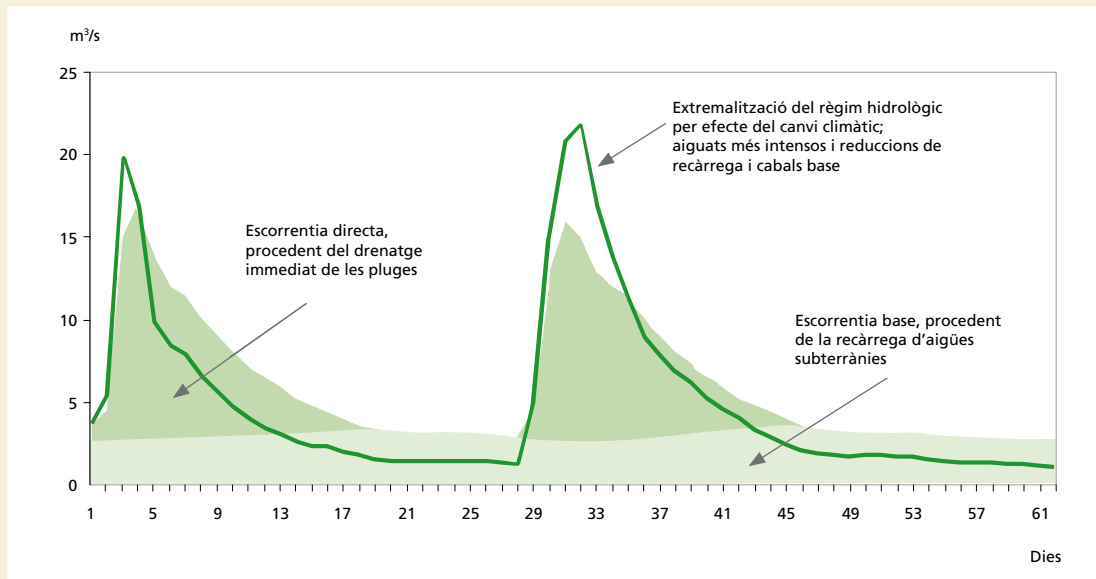
Als apartats següents s'analitzaran els resultats recollits en diferents treballs previs sobre els efectes de l'escalfament global en el règim hidrològic a Catalunya al llarg del segle XXI. L'objectiu és baixar des d'una perspectiva general o regional fins al màxim detall disponible avui dia, amb estudis a escala de conca, i aprofundint en resultats que investiguen la variabilitat interanual i intraanual, i l'evolució de les sequeres i la dels aiguats.

Variabilitat interanual i intraanual

Tot i que no va ser el primer, un dels treballs pioners que va intentar quantificar la previsible variabilitat més gran futura del clima europeu i mediterrani va ser el projecte europeu Mice (*Modelling the Impacts of Climate Extremes*, 2005), que ho va fer mitjançant la caracterització climàtica, sense entrar en aspectes pròpiament hidrològics. En els seus resultats s'oferia una imatge prou significativa d'aquest increment de variabilitat intraanual, i es mostrava com arreu d'Europa creixeria de manera destacada la mitjana del nombre de dies secs i càlids (temperatures màximes > 30 °C i precipitacions < 0,1 mm). Per a l'àmbit de Catalunya, i per a l'àmbit mediterrani en general, aquest increment s'estimava superior a la mitjana, uns 30 dies més a l'any, la qual cosa suposaria de l'ordre del 10 % d'increment respecte al clima mitjà actual. A priori, aquests resultats coincideixen amb algunes observacions i constatacions actuals i, atès que els models climàtics no ofereixen una reducció clara de la pluviometria mitjana futura en el nostre àmbit, això es pot interpretar com una concentració dels episodis de precipitació i un increment de la seva intensitat. Cal ser prudent, però, en la interpretació d'aquest fenomen, ja que el cicle hidrològic respon a processos complexos on intervenen moltes variables. Malgrat això, i independentment del fet que es produeixi una reducció mitjana de les pluges o no, es podria pensar inicialment que l'efecte d'una variabilitat general més alta pot conduir a situacions aparentment contradictòries en què l'escorrentia directa arribi a créixer respecte a la situació actual, ja que per efecte de xàfeces més violents es reduiria la infiltració i, per tant, els cabals circulants superficialment en aquests episodis s'incrementarien (figura 1). Com es veurà més endavant, aquest fenomen té un efecte directe sobre els aiguats i les inundacions. En conjunt, però, és previst que les aportacions totals dels rius baixin, com ja s'ha indicat en capítols anteriors, fruit en bona part de l'efecte combinat de temperatures i evapotranspiracions més elevades, especialment a l'estiu, i de precipitacions més reduïdes, amb una disminució important de la recàrrega efectiva (vegeu el capítol 11), que comportarà reduccions destacades dels cabals base dels rius i, amb els cabals, de les aportacions mitjanes.



Figura 1. Comparativa entre les aportacions d'escorrentia directa i base en la situació actual i davant d'un escenari climàtic amb pluges de més variabilitat i amb un increment previsible d'intensitat.



La distribució de cabals al llarg de les estacions de l'any o entre uns anys i uns altres és previsible que també s'extremitzi, però mentre que la segona tendència és ben mostrada per la majoria de models climàtics, la variabilitat estacional encara presenta certes divergències entre unes simulacions i les altres.

Amb alguns dels primers treballs de detall fets amb models hidrològics a Catalunya, en aquest cas amb el model Gotilwa+ a la conca de la Tordera a la Llavina (2007) a partir de les simulacions climàtiques globals del HadCM3, no es van poder confirmar tendències clares en un sentit o en l'altre. En aquest treball no s'observen comportaments tendencials clars quant a canvis de variabilitat interanuals i/o intraanuals, tot i que sí que es posa de manifest que els coeficients de variabilitat dels valors mensuals, dins d'un mateix any, són considerablement superiors als de les aportacions anuals entre anys, i que podrien anar lleugerament a l'alça al llarg del segle XXI. Aquest fet coincideix amb altres observacions sobre canvis estacionals, com les realitzades per Fernández (2002), amb les simulacions mensuals amb Simpa a partir de les dades climàtiques del model regional Promes, en versions anteriors a la que actualment està disponible. Aquests treballs mostraven reduccions importants d'aportacions en els mesos de tardor (de fins al -40%), que es compensaven amb un increment important de pluges i de cabals d'hivern (que arribarien a doblar els del règim mitjà actual). Al capítol 10 s'han indicat algunes característiques més d'aquestes anàlisis, que coincideixen amb altres resultats de caràcter més general, a escala regional o continental.

Més recentment, i tal com s'ha indicat també en capítols anteriors, a partir dels diferents escenaris climàtics regionals o locals del projecte Prudence (per a l'horitzó 2070-2100) i de les simulacions de detall amb el model hidrològic Sacramento, els resultats indiquen que, a la conca del riu Muga fins a l'embassament de Boadella (2008), l'aportació mitjana (percentil 50), que avui és de l'ordre de 61,5 hm³ anuals, pot baixar fins a 50 hm³, amb una reducció del 20%. Però en mirar les aportacions d'anys secs, com ara l'aportació associada al percentil 25 (la que té lloc de mitjana una vegada cada 4 anys), els actuals 36,7 hm³/any es poden reduir a menys de 30, la qual cosa significa que l'aportació en aquests anys secs disminuiria encara més, entre el 15% i el 30% respecte al règim actual. Aquest fet d'accentuació dels règims baixos tindria una repercussió enorme en la gravetat i la intensitat dels períodes de sequera quant a la variabilitat interanual. Pel que fa a l'evolució de la distribució

estacional de cabals, s'observa que la reducció s'accentuaria en els mesos d'estiu de manera molt acusada (superior a -30%), mentre que en època hivernal els descensos serien relativament lleus (de l'ordre del -10%). A les primaveres s'acumularien de manera destacada aportacions bastant inferiors a les actuals, en la línia d'una extremització del règim hidrològic, tot i que no hi ha consens segons el model climàtic considerat. De fet, en incrementar-se lleugerament la pluja precisament en els mesos de temperatures més baixes, el que passa és que l'evapotranspiració real i la potencial tendiran a coincidir i, per tant, l'escorrentia podria fins i tot tendir a créixer en els mesos més freds, com insinuen parcialment aquests models hidrològics, compensant, de manera anual, reduccions molt més importants en els mesos primaverals i, sobretot, estivals.

En el cas de la capçalera del riu Francolí, en el mateix treball, tot i que es detecta una dispersió més elevada en els resultats dels diferents models climàtics i escenaris considerats (i fins i tot s'arriben a observar resultats a priori contradictoris entre els escenaris A2 i B2), també se'n poden extreure conclusions i ordres de magnitud similars als del cas de la Muga. L'aportació mitjana, avui de l'ordre de 12,5 hm³ anuals, baixarà fins a uns valors de 9 a 12 hm³, amb una reducció del 25% al 0% (depenent del model climàtic de referència que s'hagi considerat). Estudiant les aportacions dels anys secs, com l'associada al percentil 25 o la que té lloc de mitjana una vegada cada 4 anys, els actuals 5,3 hm³/any es podrien reduir a uns 3-4,8 hm³, quantitat que és del 50% al 10% inferior a la del règim actual. Per tant, les sequeres relativament habituals associades a aquesta freqüència (cada 4 anys) podran donar lloc a unes aportacions fins a 4 vegades inferiors a les mitjanes, de manera que la gestió d'aquests recursos passarà per períodes de precarietat extrema, i relativament freqüent, que poden fer col·lapsar fàcilment els sistemes actuals de gestió. De fet, al Francolí s'observa la tendència estacional a acumular el gruix de les aportacions en els mesos menys càlids i de menys demanda d'aigua, la qual cosa contribuirà, precisament, a dificultar-ne també la gestió si no hi ha possibilitats de regular el règim anual de les aportacions. Mentre que les aportacions estivals es podran reduir entre el -30% i el -40%, les hivernals, tot i la gran dispersió de resultats entre els models, podrien arribar a créixer el 20%.

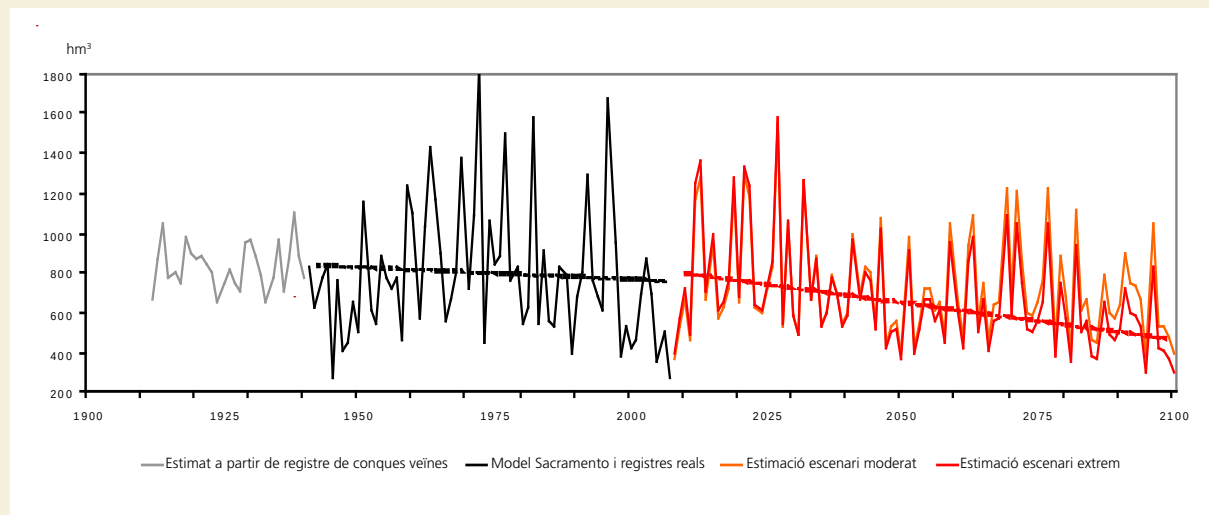
A més, en els rius amb un pes important de les aportacions nivals, els màxims anuals associats al desglaç és previsible que s'avancin entre unes quantes setmanes i fins a un parell de mesos (Rasilla, 2006), amb les consegüents complicacions per poder-lo aprofitar en període estival.

És molt important apuntar aquests efectes i aquests riscos, però també cal recordar que l'horitzó temporal d'aquests escenaris se situa, en principi, més enllà de l'any 2070, atès que el projecte Prudence, que defineix les projeccions climàtiques, no observa tendències significatives en horitzons més pròxims. Sembla que hi ha d'haver temps suficient per a preveure mesures d'adaptació, potser també de mitigació, i serà molt important fer un seguiment acurat en el futur a curt i mitjà termini.

Amb caràcter orientatiu, a la figura 2 es mostra una evolució probable de les aportacions anuals al conjunt d'embassaments dels rius Ter i Llobregat, que abasten la Regió Metropolitana de Barcelona, al llarg del segle XXI i comparades amb les que s'han observat durant el segle XX. S'observa la tendència a la baixa, de forma lleugerament més acusada per a l'escenari considerat extrem (A2), especialment a partir de meitat de segle. Evidentment, això no vol dir que les aportacions anuals se situïn ja sempre per sota de les actuals, o que els mínims més extrems es redueixin de manera més acusada del que ho han fet fins ara, sinó que el que cal esperar és més freqüència de períodes o cicles secs que, en conjunt, donaran lloc a la tendència i la reducció mitjana que s'observa, tot i que es continuïn donant anys de bonança hidrològica. D'altra banda, aquesta figura també posa de manifest que la variabilitat pròpia interanual dels rius mediterranis és tan destacada, sovint superior a la tendència associada al canvi climàtic, que pensem que situacions extremes que vivim actualment ja són manifestacions, més o menys clares, del canvi climàtic, quan en realitat poden entrar dintre de «la normalitat» del nostre clima i no hi ha arguments sòlids (encara) per a fer aquestes associacions.



Figura 2. Evolució històrica de les aportacions anuals conjuntes als embassaments dels rius Ter i Llobregat i possible evolució futura al llarg del segle XXI a partir dels resultats de les simulacions amb models climàtics i hidrològics acoblats, per a escenaris de canvi climàtic moderat i extrem.



Sequeres

Associades a aquest efecte d'increment de la variabilitat, especialment interanual, o com a cas particular d'aquesta anàlisi, les sequeres constitueixen un dels fenòmens de més influència sobre la gestió dels recursos hídrics. Un element important de dificultat en la seva anàlisi resideix en la mateixa definició del concepte de sequera i del consegüent dèficit hídric. No hi ha consens per a determinar de manera tangible i general l'inici d'un episodi de sequera o la seva intensitat, i a més hi pot haver diferències importants entre situacions de sequeres meteorològiques (manca de precipitacions) i hidrològiques (manca de recursos hídrics). Sovint es confon un any sec, o un període encara més curt sec, amb una sequera, quan de fet aquells entren dins de la normalitat en l'alternança hidrològica mediterrània i, en canvi, una sequera ja correspondria a un episodi més extens que li dona el caràcter d'extraordinari. Hi ha moltes valoracions qualitatives entorn de l'evolució possible de les sequeres amb el canvi climàtic, però la disponibilitat de treballs detallats que delimitin aquests efectes és molt escassa. Potser això és degut, en part, al fet que aquest fenomen que afecta la major part de regions del Mediterrani encara no s'assumeix com un risc, ja que les seves conseqüències no són immediates, però cal tenir present que la sequera és l'extrem climàtic considerat més probable i de risc més elevat dins dels escenaris futurs de canvi climàtic a bona part del món. En molts estudis s'ha analitzat juntament amb el fenomen d'onades de calor, i en principi sembla que es detecta un consens en molts treballs sobre l'augment de sequeres d'estiu, de manera que, amb caràcter general, cap al final del segle XXI la conca mediterrània s'enfrontarà a un augment d'intensitat, duració i extensió de les sequeres a causa de la migració dels fronts polars al nord (Llasat *et al.*, 2008).

Amb aquesta àmplia perspectiva, els treballs amb el model hidrològic WaterGAP (2005), comentats ja en capítols anteriors, van incloure també, a més de l'anàlisi dels recursos mitjans, la valoració d'altres canvis associats a la variabilitat hidrològica arreu d'Europa. Així, entre els seus resultats, destaquen les estimacions sobre el possible increment en la freqüència de sequeres. Per a l'àmbit de Catalunya, a mitjà termini (horitzó 2020), els diferents models climàtics globals en què es basa WaterGAP (HadCM3 i ECHAM4 amb escenaris TAR) no ofereixen una tendència clara, més aviat divergeixen, de manera que aquest increment eventual de la freqüència de sequeres

extremes es mostra relativament lleu i difícilment es podria considerar significatiu. Però per a horitzons a més llarg termini (2070), les simulacions tendeixen a coincidir i mostren més clarament aquesta variabilitat creixent del clima i de la hidrologia, que accentuaria el caràcter mediterrani dels nostres rius i que podria arribar a significar doblar, com a mínim, la freqüència de sequeres extremes.

En tot cas, cal insistir en el fet que aquests canvis, com d'altres, no es manifestaran de manera uniforme o homogènia, sinó que cal interpretar aquestes tendències com una evolució cap a un clima amb estacions humides més curtes i onades de calor cada vegada més freqüents, llargues i intenses.

Com s'ha indicat anteriorment, en l'actualitat es disposa, també, dels primers treballs de caràcter local fets a partir de les sortides climàtiques regionals del projecte Prudence, i de la simulació amb un model hidrològic a escala de conca com és el Sacramento, en aquest cas als rius Muga, fins a l'embassament de Boadella, i Francolí, fins a Montblanc. Ja s'ha indicat (vegeu el capítol 10) que segons aquests models sembla factible que en els anys secs es produeixi una reducció de les aportacions del 15% al 25% respecte als règims actuals, però, analitzant les sequeres encara més extremes amb períodes de retorn de 25 a 100 anys, s'observa que el dèficit hidrològic associat (calculat com el dèficit acumulat en 4 mesos, com a període representatiu en el nostre àmbit, dels dèficits d'aportacions quan aquestes se situen per sota del 20% dels valors de mitjana) es podrà doblar i fins i tot triplicar, amb conseqüències importants sobre la gran majoria de sistemes d'abastament, que serien incapaços d'assumir reduccions de recursos tan destacades. Aquest efecte és més acusat a la Muga i més lleu al Francolí, on el dèficit hidrològic creixeria «només» del 30% al 100%, ja que, en partir d'un clima actual més sec i irregular, les possibilitats de reducció de les aportacions mínimes són a priori menors, si bé és cert que també es detecta una dispersió més alta en els resultats dels diferents models (i fins i tot es tornen a observar resultats en principi contradictoris entre els escenaris A2 i B2, com succeïa en analitzar la variabilitat estacional o interanual). De fet, com mostra la figura 2 anterior, la intensitat de les sequeres més extremes serà difícil que s'accentui (no així el dèficit acumulat que poden ocasionar!), ja que els mínims viscuts segons el registre històric del segle passat ja s'han manifestat com a excepcionals i els models hidrològics, és clar que amb les seves limitacions, especialment per a simular les situacions més extremes, no mostren extrems encara més accentuats, tot i que sí més freqüents.

En tot cas, cal recordar que el que s'avalua aquí és l'increment del dèficit hidrològic tal com s'ha definit, i que, per tant, les reduccions del 15% al 25% de les aportacions mitjanes no signifiquen un increment del dèficit lineal, del 15% al 25%, sinó que poden arribar a suposar doblar els dèficits actuals durant els períodes més secs a causa la seva freqüència més elevada i extensió més gran.

Aiguats

Tal com s'ha indicat altres vegades al llarg d'aquest treball, molts models climàtics ja fa uns quants anys que indiquen una tendència a la disminució del nombre de dies de pluja, la qual cosa es pot interpretar, a igualtat de pluja final, com una tendència a la concentració temporal de les precipitacions. Van ser, però, els grans aiguats d'aquests últims anys a l'Europa central els que van suposar el definitiu toc d'atenció i alerta sobre la problemàtica de les inundacions i l'escalfament global. Darrere d'aquests casos a les grans conques del Rin o el Danubi, sovint hi trobem el pes destacat de condicionants d'origen antròpic, que han fet créixer la vulnerabilitat dels espais urbanitzats o humanitzats molt més enllà del que hagi pogut créixer intrínsecament el risc per causes purament climàtiques o hidrològiques. El que ha passat, fonamentalment, és que un episodi greu s'ha agreujat encara més per les afeccions creixents que ocasiona i per la velocitat de propagació a la qual s'ha produït, tots dos efectes de la transformació i pèrdua de les planes d'inundació tradicionals a conseqüència d'actuacions humanes. D'altra banda, aquest tipus d'avingudes, en aquest cas als Alps, estan molt relacionades amb l'acceleració de la fusió



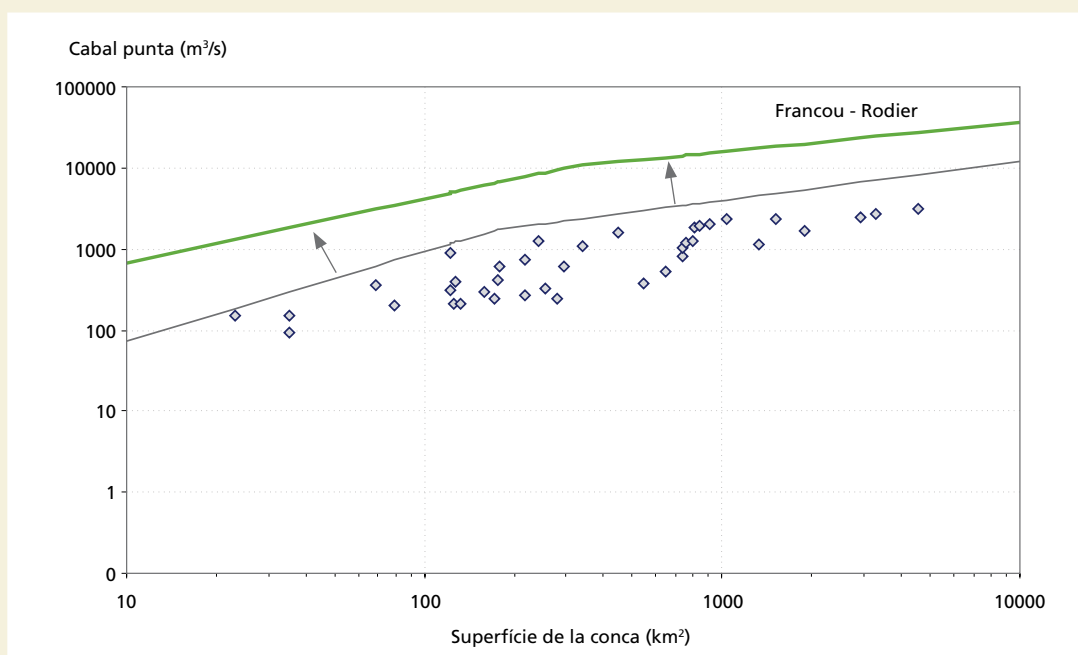
nival al final de la primavera, i ocasionalment fins a l'estiu, i a pluges extenses territorialment i temporalment, tot i que no especialment intenses, raó per la qual no són equiparables al cas de Catalunya. En altres regions del planeta l'alerta també ha saltat a causa dels grans impactes (absolutament reals, però també amb una repercussió mediàtica creixent, que incrementa la percepció que tenim del seu caràcter excepcional) de tifons i huracans els últims anys. Aquí, a Catalunya, el risc d'aiguats està associat majoritàriament a pluges torrencials, habitualment de caràcter local, de gran intensitat i violència, típicament mediterrànies, i el pes de la neu i la seva fusió és relativament petit, tot i que no negligible, i queda molt limitat a algunes àrees de l'Alt Pirineu i als grans eixos fluvials que en baixen.

De nou, els treballs amb el model hidrològic WaterGAP (2005) van incloure també l'anàlisi preliminar de l'increment de freqüència de determinats xàfec i aiguats, i constitueixen una bona perspectiva o una primera aproximació a escala europea, tot i que, per les característiques del model i tal com s'ha comentat abans, molt difícilment aquest model pot mostrar el detall dels episodis típicament mediterranis, de caràcter convectiu i marcats per l'orografia local, que caracteritzen les nostres pluges i riuades. Les estimacions d'aquests treballs, baixant al detall de l'àmbit de Catalunya, estimaven que un aiguat extrem que avui pugui tenir una freqüència o període de retorn de l'ordre de 100 anys, en el futur (horitzons aproximadament del 2070) pot doblar la freqüència o, equivalentment, baixar el període de retorn a uns 50 anys o menys. De fet, altres treballs també de caràcter general o continental realitzats al Hadley Center britànic indicaven un increment de l'ordre del 20% en els cabals punta d'aiguats extraordinaris, probablement superior en àmbits de caràcter mediterrani i que seria coherent o equivalent amb els resultats del WaterGAP. Com a possible referència o comparació, a Melbourne, amb un clima considerat també de caràcter mediterrani tot i que probablement més àrid, el model climàtic Csiro suggereix una estimació preliminar de l'ordre del 5% d'increment de la pluja total en episodis de tempestes per cada grau centígrad d'increment tèrmic, la qual cosa pot arribar a significar més del 15% d'aquí a 50 anys. També hi ha coincidència sobre aquesta tendència a incrementar aproximadament el doble la freqüència de fenòmens extrems (almenys per a períodes de retorn iguals o superiors a 100 anys).

Més enllà d'aquesta visió global o regional basada, fonamentalment, en l'anàlisi de la pluviometria o models hidrològics generals, a l'hora d'aprofundir en l'estudi d'aiguats i inundacions es poden establir dues grans categories: els de caràcter absolutament sobtat i violent, de tipus torrencial en conques relativament petites, molt habituals en el nostre àmbit muntanyós i mediterrani a partir de fenòmens de pluja convectiva i sovint denominats *flash floods*, i els d'afecció més generalitzada, en àmbits més grans i amb una concentració més diferida en el temps al llarg dels eixos fluvials principals, generalment fruit de fronts de pluja amplis i amb patrons més «europeus» al llarg d'uns quants dies de precipitació. Hi ha estudis que mostren una certa envoltant d'episodis extrems a escala mundial, inclòs l'entorn mediterrani, amb valors coincidents de cabals màxims. És a dir, els cabals específics (per unitat de conca) més extrems arreu del món tendeixen a uns llindars, probablement determinats per limitacions de les condicions atmosfèriques en la generació de la màxima capacitat de pluja, amb un límit superior més o menys homogeni arreu del món per efecte d'un límit en el contingut d'humitat d'aire sobre la conca, en la velocitat a què el vent transporta aquest aire humit i en la taxa de vapor d'aigua que es transforma en precipitació. De fet, aquestes referències, com ara l'envoltant de Francou i Rodier, mostren que a partir d'una determinada grandària de conca, d'uns 300 km² aproximadament (potser uns 200 a 250 km² en el cas dels rius catalans), es poden observar dos comportaments lleugerament diferenciats, amb dos llindars màxims que equivaldrien a aiguats de tipus *flash flood*, d'una banda, o de propagació més diferida al llarg d'eixos fluvials de més entitat, d'una altra. Si comparem els registres de cabals màxims estudiats a Catalunya al llarg del segle xx amb els de les referències mundials (figura 3) es pot observar que el marge de creixement fins a assolir aquestes magnituds encara és ampli. Si bé podem pensar que, especialment en àmbits petits, els episodis més extrems que ja s'han observat en alguna ocasió (de més de 400 o 500 mm/dia), ja mostren un sostre o llindar i que difícilment el canvi climàtic l'ampliarà, el cert és que canvis, en principi acusats, en les condicions atmosfèriques i el règim de

tempestes al nostre territori podrien donar lloc a increments molt significatius dels aiguats màxims, d'acord amb climes que avui ja s'observen en altres llocs del món, sense que això signifiqui haver de parlar de l'arribada de fenòmens extrems com ara tifons o huracans, típics de màxims mundials en entorns tropicals.

Figura 3. Aiguats màxims enregistrats a Catalunya amb l'envolupant i el possible desplaçament cap a l'envolupant de cabals màxims mundial de Francou i Rodier.



D'altra banda, sense considerar aquests possibles canvis tan profunds en les condicions pluviomètriques, el que sí que es podria observar amb relativa probabilitat seran aiguats menors, menys extraordinaris que els màxims abans comentats, amb més freqüència o amb creixements en l'àmbit de distribució geogràfica o territorial, fruit de l'extensió de processos convectius més energètics. De fet, si es produeixen dos episodis de pluges fortes en dies més o menys consecutius o pròxims, el seu efecte pot ser més important que el d'un sol episodi aïllat, de magnitud més gran, per efecte de la saturació del sòl de cara a les segones pluges. Per tant, la freqüència dels xàfecs i la seva distribució tindran un paper fonamental, potser igual d'important o més que la capacitat de xàfecs més grans.

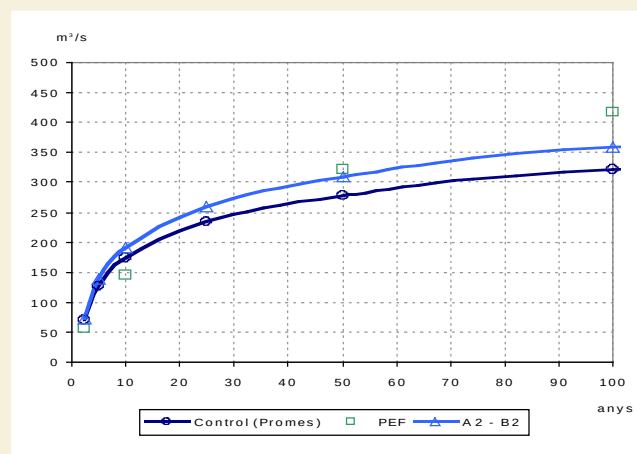
Per a avaluar i limitar aquests fenòmens i l'evolució al llarg de la concentració de pluges i cabals en eixos fluvials d'una certa magnitud, a Catalunya s'han fet les primeres anàlisis detallades a partir de la simulació, amb pas diari, mitjançant el model hidrològic Sacramento a escala de conca. A partir de les sortides climàtiques regionals del projecte Prudence, la simulació s'ha centrat en els rius Muga, fins a l'embassament de Boadella, i Francolí, fins a Montblanc (vegeu el capítol 10 sobre la descripció d'aquests treballs). Dels diferents models climàtics disponibles, el Promes és el que ofereix uns valors de control (període 1961-1990) més pròxims a referències reals pel que fa a cabals associats a aiguats. En el cas de la Muga a Boadella es poden consultar els resultats a la taula 1 i la figura 4, contrastats amb anàlisis de detall d'aquests cabals màxims (en aquest cas puntes instantànies, no mitjanes diàries) com els de la planificació dels espais fluvials (PEF). Es pot observar, també, que les diferències entre els escenaris d'emissions A2 i B2 són relativament petites en aquests resultats. Altres models regionals del projecte Prudence, per contra, en baixar a l'òptica dels fenòmens torrencials, de caràcter tan ràpid, ofereixen



resultats difícils d'interpretar, de vegades contradictoris entre escenaris, i amb tendència a infravalorar els aiguats extrems.

Taula 1 i Figura 4. Comparativa dels cabals màxims diaris de la Muga a Boadella, per a diferents períodes de retorn (T, anys), entre els resultats del model hidrològic Sacramento per a la sèrie de control (1961-1990) del model regional Promes, i les sèries dels escenaris futurs A2 i B2 (2071-2100) respecte a l'ajust als cabals reals (en aquest cas de màxims instantanis) segons el treball de planificació dels espais fluvials (PEF).

T (anys)	Cabals màxims diaris (m ³ /s)		
	Control (Promes)	Ref. PEF (cabals instantanis)	A2 - B2
2,33	70	56	72 a 74
5	128		134 a 142
10	175	145	185 a 198
25	234		250 a 269
50	278	321	298 a 321
100	321	417	345 a 373
500	422	675	455 a 493
1.000	465		502 a 544



En general, d'aquest treball, i tenint present que cal salvar les diferències entre l'anàlisi de cabals màxims diaris i de cabals màxims instantanis, i que aquests resultats no es poden considerar generalitzables tot i que coincideixen amb altres resultats obtinguts en altres àmbits i amb altres dades i metodologies, es pot concloure que per a fenòmens relativament freqüents, amb períodes de retorn inferiors a uns 10 anys, els increments de cabal corresponent podrien ser de l'ordre del 12%. Per a fenòmens més extrems, de 50 a 100 anys de període de retorn, els aiguats podrien incrementar els seus cabals punta fins al 16%. Per a fenòmens encara superiors la incertesa és massa gran. Si en lloc de mirar-ho en termes d'increment de cabal, es valora en termes d'increment de freqüència o de reducció del període de retorn per a un fenomen o un cabal donat, podem considerar que

fenòmens relativament petits, amb períodes de retorn inferiors a uns 10 anys, incrementaran la freqüència el 20% aproximadament, mentre que els aiguats avui compresos entre 50 i 100 anys de període de retorn seran un 30% més freqüents i, en alguns casos, fins i tot podrien arribar a duplicar la freqüència actual. Aquest efecte tindria unes repercussions enormes sobre el disseny de moltes infraestructures hidràuliques, ja que vol dir que si van ser calculades per a evacuar, per exemple, l'aiguat de 100 anys de període de retorn, amb el canvi climàtic podrien assolir la seva capacitat màxima per a aiguats molt menors, potser de només 50 anys de període de retorn, i per tant no complirien les condicions per a les quals van ser dissenyades. Aquesta infravaloració en els dissenys pot tenir conseqüències destacades especialment en infraestructures relativament modestes, que podrien tenir problemes o quedar fora de servei de manera pràcticament habitual. En el cas dels embassaments, caldrà revisar els resguardos enfront d'avingudes, de manera que la disponibilitat dels volums de regulació es depreveure que es reduirà, amb les corresponents conseqüències sobre la gestió (capítol 15).

En el cas del Francolí, amb una dispersió més gran en els resultats dels diferents models climàtics considerats, i pel que fa als grans aiguats amb períodes de retorn de 50 a 100 anys, pels quals la disparitat dels models s'aguditza, s'observa que els cabals màxims associats es podran incrementar entorn del 30% al 50%. En termes de freqüència d'aquests fenòmens, s'observaria un increment d'aquestes freqüències o riscos des del 0% al 70%, i el període de retorn associat es reduiria a la meitat o un terç.

Afegit a aquest efecte de més intensitat de les precipitacions màximes, la inundabilitat de molts rius i la consegüent vulnerabilitat de molts espais fluvials també serà incrementada per la dificultat de desguàs al mar a causa de la pujada del seu nivell mitjà. En les observacions històriques als ports de Marsella i Gènova, amb sèries suficientment llargues (de 50 a 100 anys), s'ha observat ja una tendència a l'alça de 1,0 a 1,3 mm/any del nivell mitjà del mar. A l'Estartit aquest creixement s'ha valorat en uns 4,0 mm/any, però les referències només són disponibles de manera rigorosa des del 1990, mentre que l'IPCC en l'AR4 arriba a xifrar aquesta tendència en 3,1 mm/any per al conjunt del planeta. Escenaris globals de l'AR4 estimen com a més probable una pujada general que oscil·laria entre 20 i 60 cm per a la meitat del segle XXI (vegeu el capítol 7), ocasionat en bona part per l'expansió tèrmica dels oceans i encara amb grans dubtes sobre el paper d'alguns efectes de retroalimentació entorn de l'hipotètic desglaç de les grans glaceres de Groenlàndia. A la Mediterrània, a aquestes incerteses s'afegeix la de la influència oceànica sobre els nivells regionals en aquesta conca tancada, però a priori es pot pensar que no seran gaire diferents dels valors mitjans mundials.

Algunes de les zones més vulnerables a aquests efectes seran les terres litorals més baixes: el delta de l'Ebre i les planes empordaneses. En el cas del delta, l'Oficina del Canvi Climàtic té l'objectiu de desenvolupar pròximament un estudi de detall per a valorar aquests efectes, així com d'altres relacionats, i analitzar propostes d'adaptació. En el cas de les planes empordaneses, i a partir de les valoracions comentades anteriorment sobre els canvis als cabals màxims estudiats per al riu Muga, també s'han realitzat una sèrie de proves preliminars mitjançant la simulació, en aquest cas amb un model hidràulic, de les afeccions per inundació en aquest àmbit. D'aquestes anàlisis es pot concloure que un increment de l'ordre del 20% en els cabals d'avinguda per a períodes de retorn d'uns 10 anys donaria lloc a un increment de la superfície inundada a la plana de la Muga d'aproximadament el 58% (increment de 2.200 ha, de les quals unes 2.100 corresponen a sòl agrícola i la resta a sòl urbà i industrial). Des d'un punt de vista d'usos del sòl, l'indicador associat al risc a les zones urbanes afectades per les inundacions (considerant el risc mitjà dels punts singulars analitzats prenent com a base l'avaluació dels danys esperats) s'incrementa aproximadament el 45%, a les zones rurals el 49% i a les zones agrícoles i d'instal·lacions ramaderes el 32%. Pel que fa a l'efecte de l'increment del nivell del mar, cal tenir en compte que el funcionament hidràulic d'aquest àmbit, amb un pendent molt baix i en el qual la inundació és condicionada fonamentalment per les infraestructures (motes), la influència d'una pujada del mar de l'ordre de 0,50 m només seria significativa, des d'un punt de vista d'inundabilitat, en la zona dels aiguamolls.



Per a períodes de retorn més grans els impactes que s'esperen són comparativament menors, però el que cal tenir present en aquests resultats, precisament, és que les repercussions importants tindran lloc per a freqüències relativament baixes o habituals.

Evidentment, aquests resultats, de caràcter preliminar i específics d'aquest àmbit, no són extrapolables a situacions generals d'inundabilitat creixent per causa del canvi climàtic (i canvi global), però es poden considerar simptomàtics i una primera referència vàlida per al cas de grans planes deltaïques d'ocupació mitjana.

A més d'aquest efecte de rabeig sobre els trams fluvials finals de rius i rieres, la pujada del nivell del mar també pot tenir una repercussió important sobre la pèrdua de capacitat de desguàs de molts claveguerams. Aquesta situació ha estat valorada en detall per part de Clavegueram de Barcelona (CLABSA) a la xarxa de la ciutat i ha conclòs que el risc en aquest cas és mínim. L'actual criteri de disseny (Pla integral del 2006) situa el nivell mitjà del mar en la conservadora cota +0,95 m, considerant ja un hipotètic increment d'uns 18 cm per efecte del canvi climàtic, segons els estudis de fa uns quants anys per a l'horitzó 2030. Com a referència, cal tenir present que només el 3% dels dies s'observen nivells superiors a +0,50 m. Tot i que l'AR4 ha donat valors generals màxims d'aquest increment lleugerament superiors (però per a horitzons més allunyats i amb incerteses sobre la repercussió al Mediterrani), el risc continua sent mínim, ja que les sortides de la major part de col·lectors, més els seus calats crítics associats que determinen el flux en el tram final del desguàs, estan situades per sobre de la cota +1,10 m. Només en alguns casos de la zona del Port Vell, i en un grau més baix a Can Tunis i la Ribera, el resguard és menor, tot i que el risc continua sent mínim.

Finalment, l'eventual avançament del desglaç a les capçaleres nivals (capítol 10), també podria constituir un factor més d'increment del risc d'aiguats, més enllà de la intensitat de les precipitacions i/o la pujada del nivell del mar. Aquest efecte, però, només s'observaria als grans afluents pirinencs de l'Ebre i al seu eix principal, quan les primeres pluges primaverals coincideixen i acceleren el desglaç, en un procés que podria ser més freqüent i intens en el futur del que ho és actualment.

Incerteses i oportunitats

Com ja s'ha indicat al llarg del capítol, són nombroses les incerteses que envolten els escenaris futurs de canvi climàtic en baixar al detall geogràfic i temporal objecte d'aquest treball. Entre aquests elements d'incertesa destacarien, amb caràcter general:

- La complexitat del nostre clima mediterrani i de la projecció dels fenòmens meteorològics particulars, sovint de caràcter local, que determinen la variabilitat i els fenòmens extrems a Catalunya. Aquest gran pes de l'orografia sobre els patrons territorials del clima encara no està ben simulat als models climàtics disponibles i, per tant, és molt difícil interpretar els resultats parcials de què es disposa per a determinar diferències realment significatives entre àmbits (zones muntanyoses versus zones litorals, o nord del país versus sud). Sovint aquestes interpretacions es realitzen basant-se en les tendències actuals, no respecte a resultats com a tals de projeccions climàtiques.
- La manca de registres històrics suficientment llargs (més limitant fins i tot en termes hidrològics que climàtics) per a tenir una perspectiva adequada de la magnitud dels fenòmens extrems i de l'autèntica variabilitat dels nostres rius.
- Les limitacions dels mateixos models hidrològics, per exemple en la simulació de canvis futurs en els usos del sòl (habitualment no considerats, tot i el seu gran pes en espais amb forta pressió humanitzadora o que pateixen processos d'abandonament, o amb grans incògnites sobre la seva evolució futura), o en reduccions i simplificacions dels processos simulats. Per exemple, són freqüents els càlculs d'evapotranspiració potencial a

partir de formulacions com la de Thornwaite gràcies a la seva simplicitat i fàcil aplicació, tot i que és sabut que, especialment en les èpoques més càlides com ara l'estiu, ofereixen sobreestimacions i per tant poden donar lloc a una imatge més seca del que ho pugui ser la realitat.

Al capítol 12 s'amplien algunes d'aquestes qüestions que són comunes als impactes estimats sobre els règims mitjans, alhora que també s'insisteix sobre el fet que probablement la principal limitació d'aquestes anàlisis prové de les incerteses en els escenaris d'emissions i dels models climàtics que determinen les projeccions futures de referència.

La magnitud dels canvis esperats encara no està ben definida, atès que aquests són molt particulars de cada zona i no són fàcilment interpretables amb la informació dels models climàtics disponibles, i requereixen, per tant, més investigació en els anys propers. L'afecció general, malgrat això, sembla clara atenent les tendències esperades i, per tant, caldrà començar a plantejar aquests elements a la planificació hidrològica, primer de manera qualitativa i més endavant, a mesura que es vagin perfeccionant les projeccions, de manera quantitativa. Els plans de gestió de sequeres, les normes d'explotació dels embassaments o les metodologies de càlcul d'avingudes s'hauran de revisar en els propers anys per a considerar els canvis previstos en l'adequació de normatives i d'infraestructures, en un procés d'adaptació que cal engegar de seguida.

Conclusions

Tots els pronòstics sobre els efectes del canvi climàtic coincideixen en el fet que al llarg del segle XXI es produirà una tendència a l'increment d'onades de calor i a una concentració més gran de les pluges, amb caràcter general arreu del món i probablement de manera més acusada a la regió de la Mediterrània.

Els estudis de detall a partir de models climàtics regionals i models hidrològics a escala de conca comencen a delimitar aquestes tendències, tot i que encara ho fan de manera molt preliminar i amb una dispersió important entre els escenaris plausibles.

A Catalunya, molt probablement s'aguditzarà el règim hidrològic estacional, amb una marcada reducció d'aportacions a l'estiu (fins al -40%), que, en alguns casos, es podria compensar parcialment amb certs increments a l'hivern (+10%). El pes de la neu encara serà més dèbil del que és avui, tant pel que fa a la quantitat que en cau com al seu efecte regulador en avançar-se la fusió. Aquesta extremització intraanual del règim també serà acusada en l'àmbit interanual. Les aportacions mínimes anuals difícilment baixaran més de les que ja s'han observat en el registre històric, però sí que s'incrementarà la freqüència del que avui considerem anys secs, amb reduccions de les aportacions mitjanes entre el 15% i el 25%, que donarien lloc a situacions en què les sequeres més extremes podrien doblar tant la freqüència com els dèficits hídrics associats.

De la mateixa manera, també és molt probable que es dupli la freqüència d'aiguats extrems, amb cabals màxims fins a un 20 % superiors als de les actuals estimacions per a períodes de retorn de 10 a 100 anys. Aquesta situació comprometrà el disseny de moltes infraestructures (inclosos els rescuards i la gestió corresponent dels embassaments) i produirà afeccions destacades en zones inundables, especialment en el litoral a causa de la suma d'efectes amb la pujada del nivell del mar.

En tot cas, cal subratllar de nou el caràcter orientatiu d'aquests resultats, perquè el detall dels models climàtics i hidrològics actuals no es pot considerar encara suficient i parteixen, a més, d'uns escenaris futurs d'emissions que mostren un ventall ampli de futurs plausibles. Cal interpretar aquests resultats en termes de tendències, no de situacions concretes, i cal recordar, i insistir-hi, que, en l'agreujament de moltes de les condicions futures probablement, hi tindrà un pes relatiu més gran, que avui ja s'observa, l'increment de vulnerabilitat per causes humanes o antropogèniques, més que no pas per causes del mer risc climàtic.



Referències bibliogràfiques

- AYALA-CARCEDO, F. (2001). *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad del Plan Hidrológico Nacional 2000*. En Arrojo ed. *El Plan Hidrológico Nacional a debate*, Bakeaz, Fundación Nueva Cultura del Agua, 51-66.
- CLABSA (CLAVEGUERAM DE BARCELONA) i AJUNTAMENT DE BARCELONA (2006). *Pla Integral de Clavegueram de Barcelona. Document núm. 2: Anàlisi de xarxa*. Barcelona.
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY) (2004). *Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment*. (http://reports.eea.europa.eu/climate_report_2_2004/en)
- FERNÁNDEZ, P. (2002). *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Aplicación en 19 cuencas en España*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (ETSICCPM), Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid.
- GRACIA, C.; SABATÉ, S.; PLA, E.; VAYREDA, J. (2007). *Aplicació del model Gotilwa+ a la conca pilot de la capçalera de la Tordera*. Agència Catalana de l'Aigua (ACA). Barcelona.
- HENRICH, T.; ALCAMO, J. (2002). *Europe's water stress today and in the future*. (http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente/kwws/5/ew_5_waterstress_low.pdf).
- HOWE, C.; JONES, R. N.; MAHEEPALA, S.; RHODES, B. (2005). *Implications of Potential Climate Change for Melbourne's Water Resources*. (http://www.melbournewater.com.au/content/library/news/whats_new/Climate_Change_Study.pdf).
- IGLESIAS, A.; ESTRELA, T.; GALLART, F. (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Capítulo 7: Impactos sobre los recursos hídricos*. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Madrid. Pàg. 303-353.
- IPCC (GRUP INTERGOVERNAMENTAL D'EXPERTS SOBRE EL CANVI CLIMÀTIC) (2007). *IV Informe d'avaluació de l'IPCC. Base científica, impactes, adaptació i mitigació*. Traducció del Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS) i del Departament de Medi Ambient i Habitatge.
- MARTÍNEZ, E. (2008). *Avaluació de l'impacte produït pel canvi climàtic sobre els recursos hídrics a les conques de capçalera de la Muga i el Francolí*. Agència Catalana de l'Aigua (ACA).
- MAS-PLA, J. (2005). *B 8. Recursos hídrics, dinàmica hidrològica i canvi climàtic. Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS). Barcelona.
- MICE TEAM (2005). *MICE Summary of Final Report (Modelling the Impacts on Climate Extremes's Project)*. (www-mice.cs.ucl.ac.uk/multimedia/projects/mice/publications.html).
- MIMAM-CEDEX (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE-CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS) (1998). *Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y demandas de riego en determinadas regiones de España*.
- LLASAT, C.; CUEVAS, G.; MIRALLES, R. (2008). *Impacte del canvi climàtic sobre els riscos naturals*. Grup d'Anàlisi de situacions Meteorològiques Adverses-Departament d'Astronomia i Meteorologia-Universitat de Barcelona (GAMA-DAM-UB).
- RASILLA, D. (2006). *El agua en el siglo XXI. Los recursos hídricos en la cuenca del Ebro bajo la hipótesis de un calentamiento global*. Ed. Institución Fernando el Católico. Zaragoza.



13. Canvi climàtic i qualitat química del medi ambient

Joan Grimalt, Departament de Química Ambiental, IDAEA-CSIC
Antoni Ginebreda, Agència Catalana de l'Aigua

Introducció

La disponibilitat d'aigua en els continents és, evidentment, extremadament important per a la salut humana, l'activitat econòmica, el funcionament dels ecosistemes i els processos geofísics. Com que la saturació de la pressió de vapor de l'aigua en l'aire depèn fortament de la temperatura, s'espera que hi hagi perturbacions del cicle de l'aigua amb el canvi climàtic. Usualment, en parlar d'alteracions del cicle hidrològic, el problema se sol centrar en la disponibilitat quantitativa del recurs. La transcendència d'aquest aspecte és inqüestionable. Ara bé, la qualitat de l'aigua no es pot deixar de banda, tant per la seva importància per als ecosistemes com per la necessitat de disposar d'un recurs adequat a la salut humana. En aquest sentit, qualsevol disminució de la seva qualitat comporta un esforç tècnic i econòmic superior per a la seva restauració.

És ben sabut que hi ha una estreta relació entre *quantitat* i *qualitat* i s'ha descrit que el canvi climàtic pot introduir perturbacions importants en els aspectes hidromorfològics, biològics (ecològics) i fisicoquímics del medi aquàtic (Cristensen *et al.*, 2007). Sense perdre de vista la mútua interdependència entre tots ells, en aquest treball es considera aquest darrer aspecte. Es revisarà, per tant, la influència eventual que el canvi climàtic pot exercir sobre el medi aquàtic, entenent-lo com un conjunt de «compartiments» connectats, constituïts per aigua, aire, sòl, sediments i biota.

Dintre del complex fenomen del canvi climàtic, l'augment de temperatura i la variació de les precipitacions són dos aspectes fonamentals amb relació a la qualitat de l'aigua (Forster *et al.*, 2007). A més d'aquests dos, altres efectes poden contribuir igualment a l'alteració de la qualitat química del medi aquàtic, com per exemple l'augment en la freqüència de producció de fenòmens extrems (per exemple, riuades amb remoció de sediments contaminats), increment de la salinització d'aqüífers i planes litorals causada per una pujada del nivell del mar, etc, que s'han descrit en capítols anteriors.

Finalment, la qualitat fisicoquímica dels recursos hídrics pot ser afectada per la gestió desenvolupada davant d'una situació d'escassetat, per exemple, en el cas de la reutilització de les aigües o canvis d'usos del sòl.

A continuació es comenta el possible efecte que poden exercir aquests factors esmentats sobre la qualitat química del medi aquàtic. Se'n presentaran alguns exemples, malgrat el nombre limitat de treballs disponibles sobre el tema.

Efectes dels increments de temperatura

De manera general, cal recordar que la temperatura, com a variable d'estat, influeix sobre la major part de propietats fisicoquímiques i de processos que determinen la dinàmica ambiental dels compostos químics, tant els que comprenen els aspectes termodinàmics (constants d'equilibri, coeficients de partició, isoterms d'adsorció, pressions de vapor, solubilitats, etc.), com els cinètics (transport, velocitats de reacció, etc.). Així doncs, la variació en la temperatura tindrà efectes sobre la dinàmica, el transport i l'evolució dels contaminants en el medi ambient, i en el medi hídric en particular.

La multiplicitat de processos fisicoquímics que poden ser afectats per una variació de temperatura és, doncs, notable. Tanmateix, la seva modelització i avaluació quantitativa no és una qüestió senzilla, per les complexitats de la seva interacció i la incertesa de molts dels paràmetres implicats.

Els compostos organohalogenats i la temperatura

Entre els contaminants orgànics hi ha el grup dels persistents (POP), que reben aquest nom per la seva gran estabilitat química. Aquesta estabilitat els ve dels substituents halogenats, fonamentalment clor, però darrerament també brom i altres halògens. Alguns d'aquests compostos, com els policlorobifenils (PCB), són tan estables que no es coneix un procés del medi ambient que els destrueixi de manera significativa. Així, aquests compostos es reciclen un cop i un altre quan passen del medi ambient a un organisme i hi tornen, sigui per la mort de l'organisme o pels processos metabòlics d'aquest. La gran estabilitat d'aquests compostos també els permet ser transportats a llargues distàncies i sobreviure als processos d'oxidació o fotòlisi que poden patir tots els compostos en l'atmosfera, especialment quan es troben en les capes altes de la troposfera.

Aquests compostos es començaren a utilitzar en la dècada del 1940. La majoria foren sintetitzats per a ser utilitzats com a pesticides. Aquest és el cas dels insecticides DDT, lindà (γ -hexaclorociclohexà, γ -HCH), aldrín, toxafens, clordà, mirex, dieldrin i endrina. L'hexaclorobenzè (HCB) fou utilitzat com a fungicida i encara es produeix com a subproducte en la fabricació de molts dissolvents orgànics clorats. En canvi, els PCB es fabricaren per a ser utilitzats com a dielèctrics en transformadors, retardants de flama, olis d'alta estabilitat tèrmica, etc. Alguns d'aquests compostos se sintetitzaren com a productes purs, però sovint la producció i la utilització es féu en forma de barreges, per exemple els PCB, els HCH i els toxafens. Així el nombre de compostos introduïts al medi ambient fou superior. En altres casos aquests compostos han donat lloc a transformacions en altres productes, per exemple DDT en DDE i DDD, i això també augmentà el nombre total de contaminants orgànics persistents en els ecosistemes.

També s'han d'esmentar les dioxines i els dibenzofurans. Aquests no es fabriquen expressament, sinó que es generen a partir d'altres processos, com per exemple la combustió de materials orgànics que tinguin àtoms de clor (qualsevol barreja de materials en té en petites quantitats), o també a partir de processos industrials com certs tipus de blanquejat de pasta de paper. En els anys noranta del segle xx ha entrat una altra generació de contaminants d'aquest tipus en el medi ambient, els polibromodifenil èters (PBDE), emprats com a retardants de flama, així com d'altres compostos bromats i fluorats.

Els compostos orgànics persistents són, a més a més, liposolubles, semivolàtils i tòxics. Per aquesta raó, l'ús de la majoria n'és prohibit avui en dia. Els països de la Unió Europea firmaren el conveni d'Estocolm (22-23 de maig de 2001) pel qual es comprometen a reduir o eliminar-ne les emissions, eliminar-ne l'ús en la majoria dels casos, i investigar sobre la seva incidència en el medi ambient i la salut humana. Menys de 60 anys després de l'inici del seu desenvolupament, s'han hagut de prendre mesures totalment restrictives per a eliminar-los.

Molts dels POP tenen una pressió de vapor que permet un cert grau de volatilització. Per tant, poden passar a l'atmosfera en les zones calentes o temperades del planeta, i condensar-se o acumular-se en sòlids o líquids en les zones fredes. Aquest fenomen s'anomena "*efecte de destil·lació global*" i depèn fonamentalment de la temperatura. La variació de temperatura derivada del canvi climàtic pot tenir una influència considerable sobre la dinàmica d'aquests contaminants, amb efectes sobre el seu transport a llarga distància, bioacumulació, biodisponibilitat, biodegradació i, en definitiva, persistència ambiental i incorporació a les cadenes tròfiques.

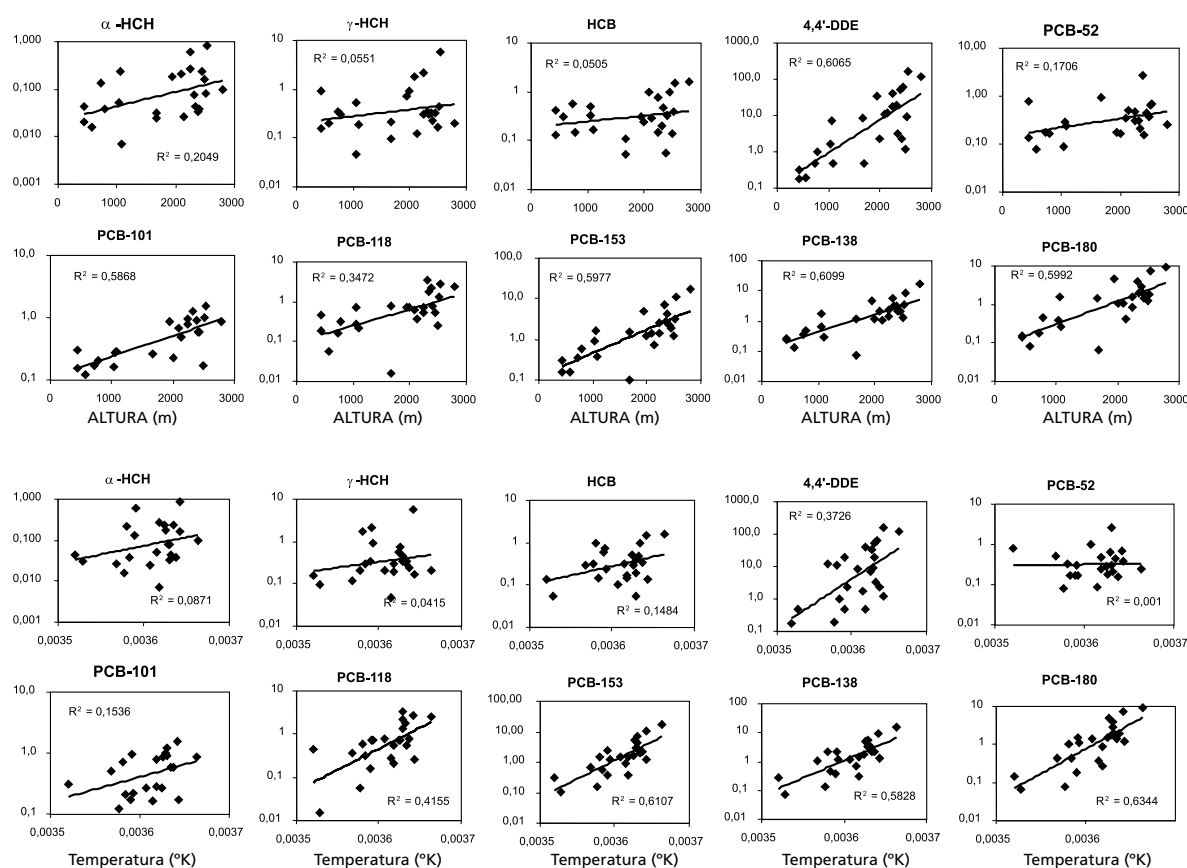
Per exemple, la quantitat global de PCB produïda en el món ha estat d'1,3 milions de tones, el 97% d'aquesta quantitat a l'hemisferi nord. La major part d'aquests compostos han quedat retinguts en els sòls de les zones on s'utilitzaren o es produïren, és a dir, a zones temperades. Malgrat això, una part d'aquests ha passat a l'atmosfera i s'ha acumulat a zones fredes, per exemple a les zones àrtiques. Darrerament s'ha vist, emperò, que aquest procés d'acumulació per



efecte de condensació no només afecta aquestes zones llunyanes, sinó també les zones d'alta muntanya (Grimalt *et al.*, 2001; Vives *et al.*, 2004a). És a dir, que els països industrialitzats hem exportat una part de la nostra contaminació enfora, però també l'hem transferit a les zones més ben preservades del nostre espai continental.

A la figura 1 es mostra la distribució de diversos compostos organoclorats en peixos de llacs d'Europa. Els llacs situats a més altura, els més llunyans dels focus de contaminació, siguin ciutats o indústries, són els més contaminats.

Figura 1. Dependència entre l'altura i la temperatura de les concentracions de diversos compostos organoclorats en peixos de llacs d'alta muntanya d'Europa.



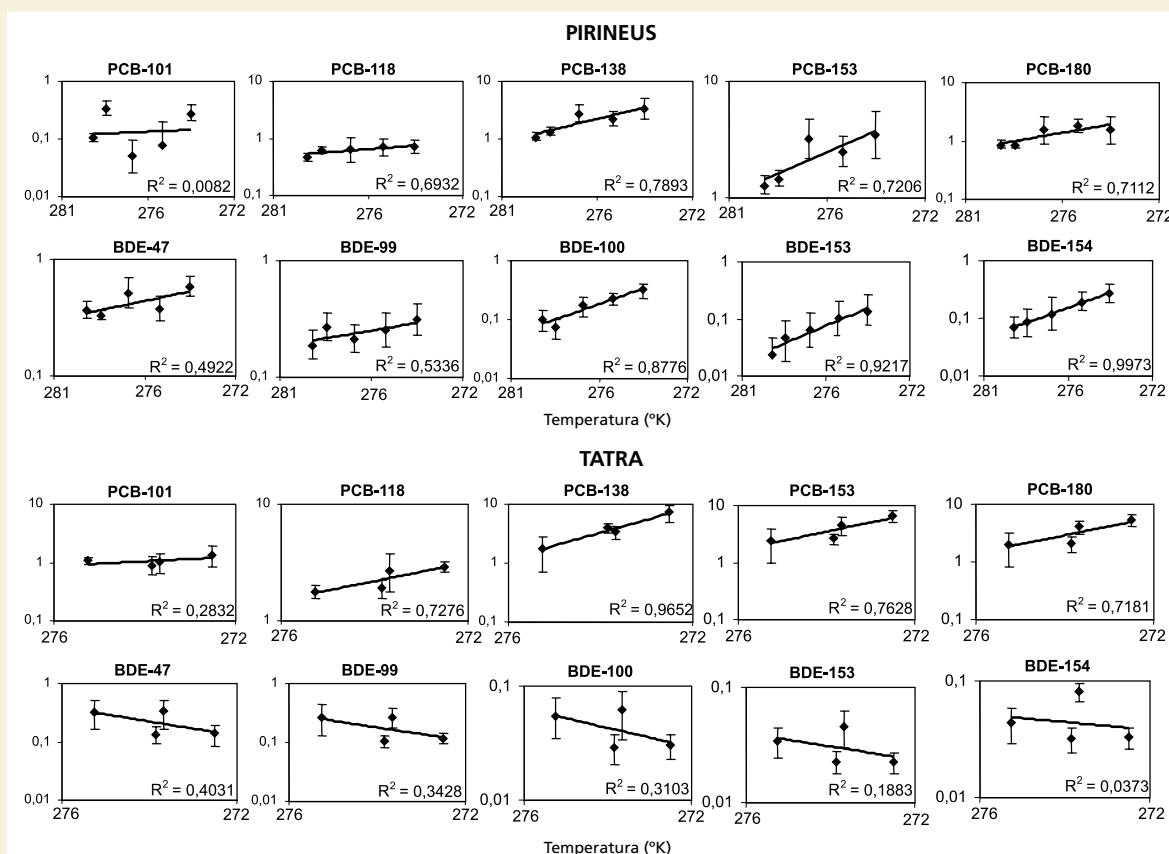
Cada punt correspon a la mitjana dels peixos estudiats en cada un dels llacs inclosos en l'estudi. S'observa una correspondència entre les concentracions dels compostos de massa molecular més elevada (4,4'-DDE, PCB 118, 153, 138 i 180) i altura o temperatura. Aquesta dependència significa una contaminació més gran a les zones més altes i més remotes. Aquesta correspondència no s'observa en els compostos més volàtils (a partir de Vives *et al.*, 2004a).

L'observació pot semblar una paradoxa. Normalment es considera que tot procés d'abocament a zones llunyanes comporta paral·lelament un fenomen de dilució que en disminueix els efectes. En aquest cas, el que s'observa és una transferència neta de contaminants a ecosistemes de zones llunyanes a causa d'un procés d'evaporació (dilució) i de condensació posterior (concentració). Per tant, l'efecte dels POP sobre els ecosistemes no es dilueix, sinó que passa d'un lloc a altre.

Fixem-nos, a més a més, que observem el mateix tipus de fenomen per a compostos que han tingut usos molt diferents. Els DDE estan en el medi ambient perquè s'utilitzaren com a insecticides. Els PCB eren olis dielèctrics d'alta

estabilitat tèrmica usats en transformadors o com a additius en altres materials. Ara s'observa que els congèneres menys volàtils d'aquestes mescles (#101, #118, #153, #138 i #180) mostren la mateixa tendència que els DDE, que es comporten de manera diferent a la dels PCB més volàtils (#28 i #52) (figura 1). L'aspecte que determina el mateix comportament ambiental d'aquests compostos és la volatilitat. Aquells que tenen pressions de vapor inferiors a $10^{-2.5}$ Pa són els que mostren aquesta tendència comuna a l'acumulació en zones d'alta muntanya d'Europa.

Figura 2. Dependència entre la temperatura de les concentracions de diversos congèneres de policlorobifenils i polibromodifenil èters en peixos de llacs d'alta muntanya dels Pirineus i les Tatra.



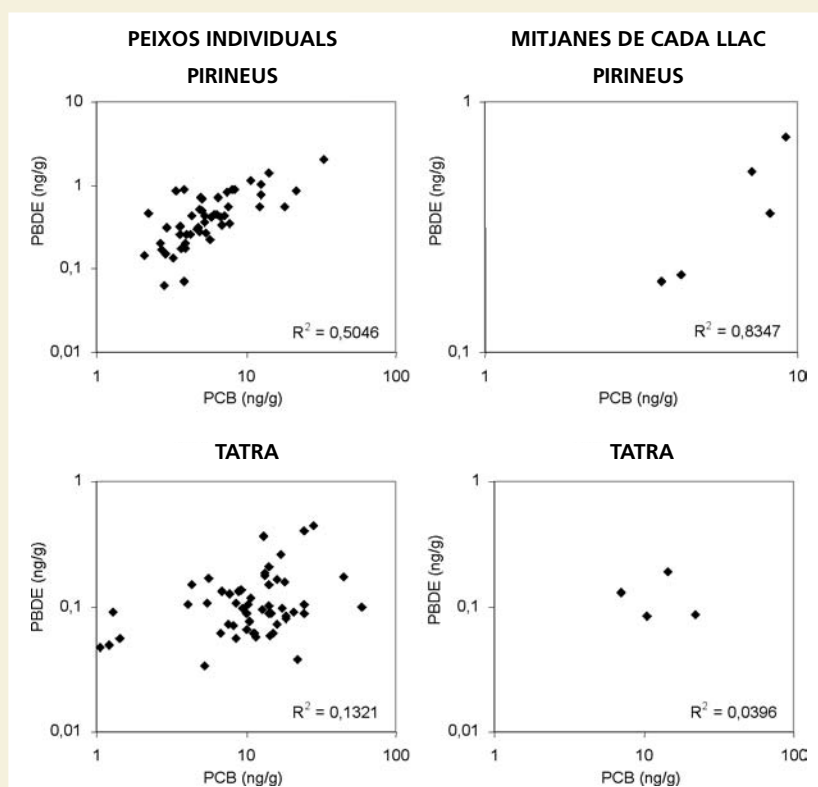
Cada punt correspon a la mitjana dels peixos estudiats en cada un dels llacs inclosos en l'estudi. S'observa una correspondència entre l'acumulació dels PCB de massa molecular més elevada i la temperatura en tots dos casos. S'observa la mateixa tendència per als PBDE als Pirineus, però no a les Tatra. Aquesta correspondència comporta que les zones més altes i més remotes siguin les més contaminades (a partir de Gallego *et al.*, 2007).

La temperatura també és un factor clau per a la redistribució de compostos organoclorats que s'han fabricat i utilitzat darrerament. Aquest és el cas dels PBDE, que es van començar a utilitzar després de la prohibició dels PCB, a finals de la dècada del 1980. L'estudi dels dos tipus de compostos en un transsecte de llacs d'alta muntanya dels Pirineus (Redon, Llebreia, Cavallers, Llong, Xic de Colomina, Vidal d'Amunt) i de les muntanyes Tatra (entre Eslovàquia i Polònia; figura 2) mostra que en el primer cas, on s'utilitzaren abans (Andorra, Espanya, França), ja han arribat a una distribució consistent amb la dependència de la temperatura que també s'observa entre els PCB (Gallego *et al.*, 2007). En canvi, on s'han utilitzat més tard (Eslovàquia, Polònia) encara no s'hi ha arribat (Tatra).



Aquest aspecte es veu encara més marcat quan es comparen directament les distribucions d'aquests dos grups de compostos en aquestes dues zones de muntanya (figura 3). En els Pirineus, les concentracions observades de PCB i PBDE en els llacs estudiats mostren una distribució paral·lela, malgrat la diferència de temps (més de 40 anys) en la introducció en el medi ambient entre l'una i l'altra (Gallego *et al.*, 2007). A les Tatra aquest paral·lelisme (correlació) no s'observa.

Figura 3. Concentracions de diversos congèneres de policlorobifenils i polibromodifenil èters en peixos de llacs d'alta muntanya dels Pirineus i les Tatra.



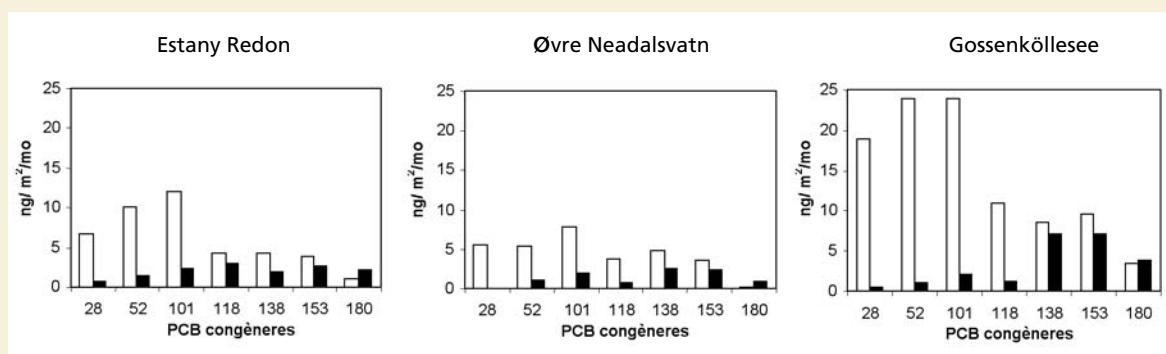
Als Pirineus s'observa una correlació estadísticament significativa en l'acumulació de PCB i PBDE, malgrat que els segons es començaren a introduir al medi ambient més de 40 anys més tard que els primers. Aquesta correlació no s'observa a les Tatra. En els Pirineus la distribució d'aquests compostos halogenats ja ha arribat a un cert «estat estacionari» (a partir de Gallego *et al.*, 2007).

Aquesta dependència de la temperatura també s'observa quan s'examinen altres tipus de matrius ambientals. Per exemple, sediments lacustres (Europa; Grimalt *et al.*, 2001), neu (Europa; Carrera *et al.*, 2001; Canadà; Blais *et al.*, 1998), sòls (Teide; Ribes *et al.*, 2002) i molses (Andes; Grimalt *et al.*, 2004). La temperatura és, per tant, un element determinant de la distribució d'aquests compostos en el medi ambient un cop hi han estat introduïts. Els canvis climàtics signifiquen un canvi de temperatura, fonamentalment en els continents. Dins dels continents, les zones de muntanya són les que experimenten un escalfament més elevat. Per tant, la variació de la temperatura de les muntanyes ha de comportar una redistribució dels contaminants que s'hi han acumulat.

Les zones d'alta muntanya són importants per si mateixes. A Europa i Catalunya representen els ecosistemes més remots. No obstant això, aquestes zones també són les capçaleres de formació dels recursos hídrics que després utilitza la població. El manteniment d'aquestes zones en unes bones condicions de salut ambiental és necessari per a disposar de recursos d'aigua amb nivells de contaminació baixos.

Un dels aspectes importants per a conèixer millor els processos associats a la dependència amb la temperatura és l'estudi dels patrons de precipitació atmosfèrica d'aquests compostos. Això s'ha estudiat a Izaña (Teide, illes Canàries) (Van Drooge *et al.*, 2001), estany Redon (Vall d'Aran, Pirineus), Gossenköllesee (Alps) i Øvre Neadalsvatn (Noruega). En tots els llocs, s'observa una deposició més elevada en els períodes càlids. Això reflecteix una taxa més alta de volatilització des dels diferents compartiments ambientals on estan emmagatzemats en aquests períodes (Carrera *et al.*, 2002). Ara bé, la capacitat de retenció dels diferents compostos és més gran en els llocs més freds, i els compostos més retinguts són els menys volàtils (figura 4).

Figura 4. Comparació entre deposició atmosfèrica (barres de punts) i fluxos de sedimentació (barres negres) dels congèneres dels PCB en llacs d'alta muntanya.



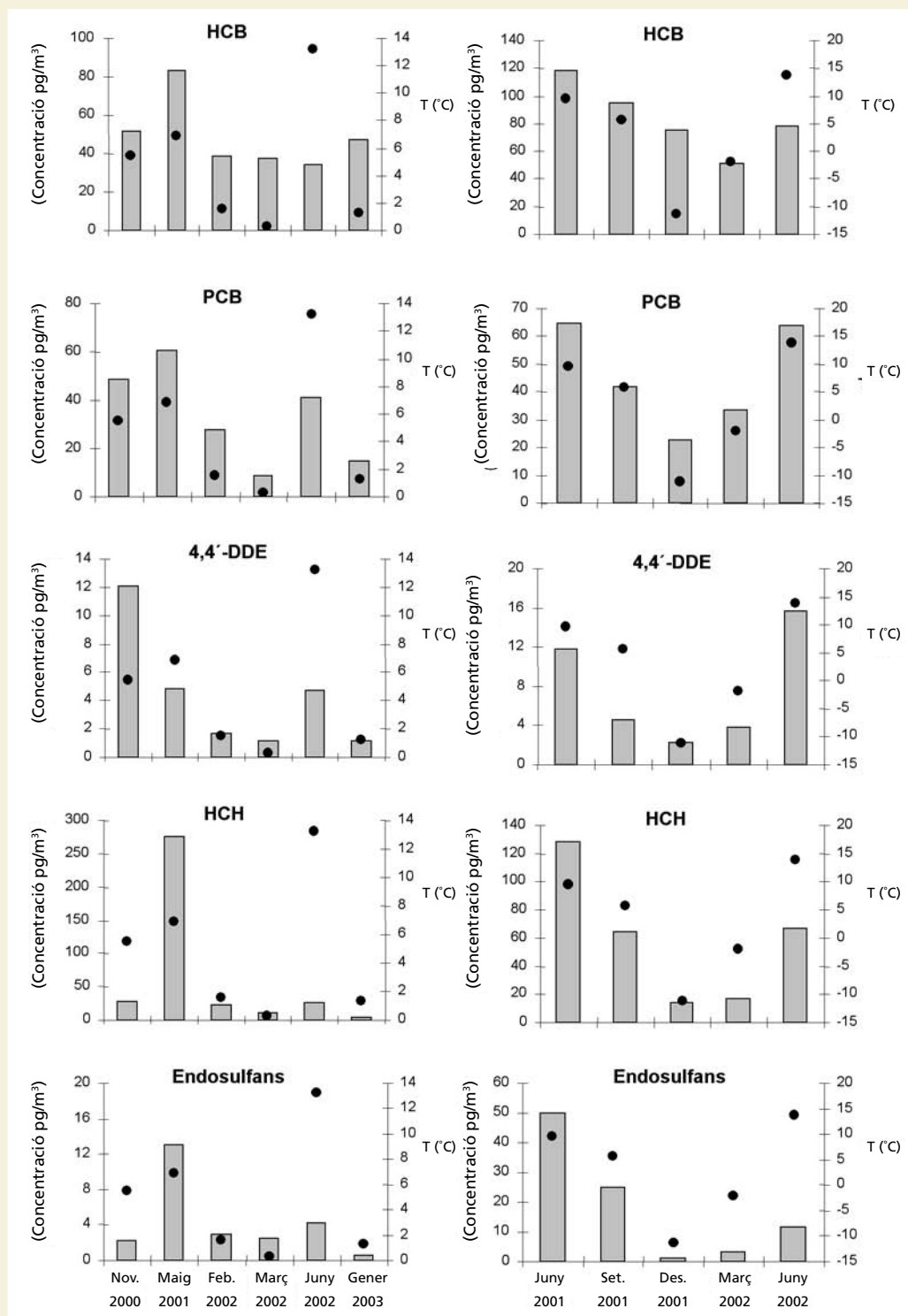
S'observen fluxos més grans de precipitació atmosfèrica per via atmosfèrica dels compostos amb menys massa molecular (més volàtils), però la retenció en els sediments afecta fonamentalment els que tenen més massa molecular (menys volàtils). Aquest fenomen és més marcat al llac més fred (Gossenköllesee) (a partir de Carrera *et al.*, 2002).

L'altre aspecte que cal esbrinar és la concentració general d'aquests compostos a l'atmosfera, perquè aquesta és la que en darrer terme determina la capacitat de transport a llargues distàncies i on es produeixen, en primer lloc, els canvis de temperatura associats al canvi climàtic. Les concentracions d'aquests compostos amb l'estacionalitat s'han estudiat a l'estany Redon (Pirineus), Skalnaté Pleso (Tatra) (Van Drooge *et al.*, 2004) i Izaña (Teide, illes Canàries; Van Drooge *et al.*, 2002). S'observa que els períodes càlids en reflecteixen una volatilització més elevada (figura 5). Aquesta tendència és més clara entre els compostos menys volàtils i en el punt de temperatures més baixes (Skalnaté Pleso). Les diferències de concentracions entre estacions de l'any són coherents amb les observacions de la deposició atmosfèrica, i indiquen que una conseqüència directa del canvi climàtic representarà un augment de les concentracions a l'atmosfera d'aquests compostos i, per tant, una contaminació més gran dels organismes, inclosos els humans.

La contaminació per via atmosfèrica per aquests compostos s'ha observat en zones on hi ha focus puntuals, com Flix (Grimalt *et al.*, 1994). Com a conseqüència d'aquesta exposició s'han trobat diversos efectes en la salut humana relacionats amb la tiroide (Grimalt *et al.*, 1994; Sala *et al.*, 2001). L'impacte d'aquests compostos sobre la salut no és un tema específic d'un poble o una regió, sinó que és un fenomen general en l'àmbit de tot el planeta. En aquest sentit, s'ha descrit que l'exposició a aquests compostos, sigui per via atmosfèrica o per altres vies, genera problemes diversos de salut ja des de les primeres etapes de la vida. Així, s'han descrit disminucions en capacitats cognitives per exposició a DDT en l'etapa intrauterina (Ribas-Fitó *et al.*, 2006), xiulets respiratoris a l'edat de 6 anys com a conseqüència de més exposició prenatal a DDE (Sunyer *et al.*, 2005, 2006) i increments del dèficit d'atenció i desordres d'hiperactivitat a l'etapa preescolar davant de més exposició a HCB dels nounats (Ribas-Fitó *et al.*, 2007).



Figura 5. Mitjanes geomètriques de les concentracions en fase gas de diversos compostos organoclorats en diferents èpoques de l'any (barres) comparades amb la temperatura ambiental mitjana (punts).



S'observa que, en general, a les èpoques més calentes hi ha una concentració més alta de compostos a la fase gas. Aquesta tendència és més clara entre els compostos menys volàtils i en el punt de temperatures més baixes (Skalnate Pleso) (a partir de Van Drooge *et al.*, 2004).

Aquests compostos aparegueren en el medi ambient fa uns 70 anys però, a causa de la seva estabilitat química, han vingut per a no marxar. Estan acumulats en diversos compartiments ambientals com els sòls, la vegetació, etc. Per tant, els canvis de condicions ambientals n'afecten la distribució.

Així, aquests compostos plantegen un paradigma nou de toxicitat. Els humans hi estem exposats a dosis petites des que ens formem en el ventre de la mare, mentre creixem i al llarg de tota la vida. Aquesta situació és nova. Cal saber quines seran les conseqüències dels efectes acumulats d'aquesta situació. També és possible que una exposició en l'època formativa comporti un efecte quan l'individu ja hagi arribat a una edat molt més avançada. En qualsevol cas, és clar que un augment de temperatura general donarà lloc a una volatilització més elevada i a una presència més gran d'aquests compostos en l'atmosfera i els sistemes aquàtics.

Els hidrocarburs aromàtics policíclics i la temperatura

Els hidrocarburs aromàtics policíclics (HAP) no tenen àtoms de clor, sinó que estan formats per anells aromàtics (benzènics) fusionats. L'alta estabilitat química que es guanya com a resultat d'aquesta fusió també els dona propietats de contaminants orgànics persistents, encara que són força més sensibles als processos de fotòlisi i d'oxidació ambiental. Aquests compostos es produeixen majoritàriament en els processos de combustió (cotxes, centrals tèrmiques, incendis forestals, etc.) i també són en el petroli. Per tant, els HAP, a diferència dels compostos organoclorats, han estat sempre a la natura, perquè almenys des que tenim una atmosfera òxica, sempre hi ha hagut incendis i processos naturals que els produïen en petita proporció. Els éssers vius hi han estat exposats al llarg de l'evolució i, almenys els superiors, han desenvolupat mecanismes en el seu sistema metabòlic que en permetin l'eliminació de manera eficient. Els HAP no s'hi bioacumulen.

Això no vol dir que no puguin afectar negativament la salut dels humans. És prou conegut que tot un grup d'aquests compostos són cancerígens potents. La diferència principal, en comparar-los amb els compostos organoclorats, és que els HAP tenen una influència molt més relacionada amb l'exposició directa al contaminant, en lloc d'exercir una influència a llarg termini. Malgrat això, com a conseqüència de l'ús extensiu de combustibles fòssils per a produir energia, que es va iniciar a meitat del segle XIX, el nivell d'aquests compostos en els ecosistemes ha augmentat uns quants ordres de magnitud (Fernández *et al.*, 2000). D'altra banda, els humans vivim en entorns que els emetem constantment, per exemple els urbans.

L'estudi de les concentracions d'HAP en els fetges dels mateixos peixos dels llacs d'alta muntanya esmentats anteriorment no mostra cap dependència de la temperatura (Vives *et al.*, 2004b). Aquest resultat és conseqüència de la manca de bioacumulació d'aquests compostos en els peixos abans esmentada, i dels mecanismes de transport global d'aquests contaminants, que són diferents dels mecanismes dels contaminants organoclorats. S'ha observat que els HAP, tant a zones remotes (Fernández *et al.*, 2002) com a les urbanes (Aceves i Grimalt, 1993), es distribueixen associats a partícules, especialment sutja. D'altra banda, les concentracions d'aquests compostos reflecteixen més els *inputs* locals que en el cas dels compostos organoclorats. En aquest sentit, les concentracions atmosfèriques a l'hivern solen ser superiors a les de l'estiu (Aceves i Grimalt, 1993; Fernández *et al.*, 2002) a causa de la utilització més gran de calefaccions. En el futur, és possible que la utilització més intensa d'aires condicionats inverteixi la tendència i tinguem més concentracions d'aquests compostos a l'estiu. Això significaria una proporció més alta d'HAP a la fase gas que a la fase de partícules (Aceves i Grimalt, 1993).

En qualsevol cas, l'ús progressiu d'energia i el fet que el 85% de l'energia s'obtingui a partir de la crema de combustibles fòssils, fa preveure que les concentracions d'aquests compostos augmentaran en el futur. Cal esmentar, en l'aspecte positiu d'aquest tema, que les concentracions d'HAP en llacs d'alta muntanya globalment disminueixen des dels nivells dels anys setanta del segle XX fins als nivells actuals devers el 30% (Fernández *et al.*, 2000). Aquest canvi fou degut a la millora en la producció d'energia en els processos de combustió,

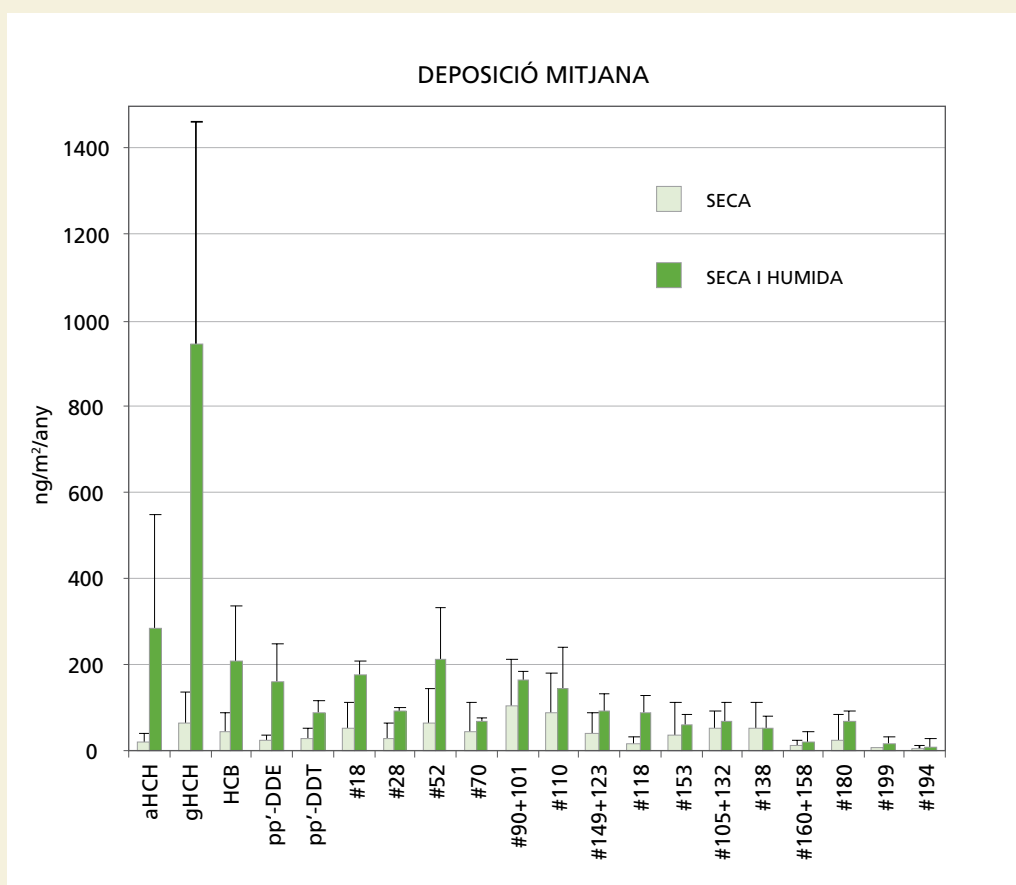


fonamentalment centrals tèrmiques, que fan servir mètodes menys contaminants. L'increment en la generació d'aquests hidrocarburs cancerígens podria disminuir encara més si milloren els processos de combustió i s'utilitza una proporció més gran d'energia solar i eòlica. Emperò, ara com ara, aquest tema és incert, i no és difícil que millores en aquest sentit no tinguin cap efecte important sobre el balanç total de la generació d'HAP, tenint present que aquestes millores probablement seran contrarestades per un augment del consum energètic.

Efectes dels canvis de precipitació

Les precipitacions poden tenir diversos efectes sobre l'estat químic del medi hídric. En primer lloc, la pluja pot arrossegar els contaminants atmosfèrics, ja sigui els que estan en fase vapor o els adsorbits sobre la fase particulada. El fenomen de la pluja àcida seria, en aquest sentit, un exemple ben conegut i estudiat.

Figura 6. Composició mitjana de la deposició seca i seca + humida de compostos organoclorats en la precipitació atmosfèrica recollida al llarg d'un any. Els intervals es refereixen a la desviació estàndard. S'observa una deposició més elevada dels compostos més volàtils associada a la precipitació humida (a partir de Van Drooge *et al.*, 2001).



L'informe de l'IPCC prediu una disminució de les precipitacions de l'ordre del 10-20% a les zones mediterrànies com a conseqüència del canvi climàtic i una irregularitat més accentuada en la seva distribució temporal (Cristensen

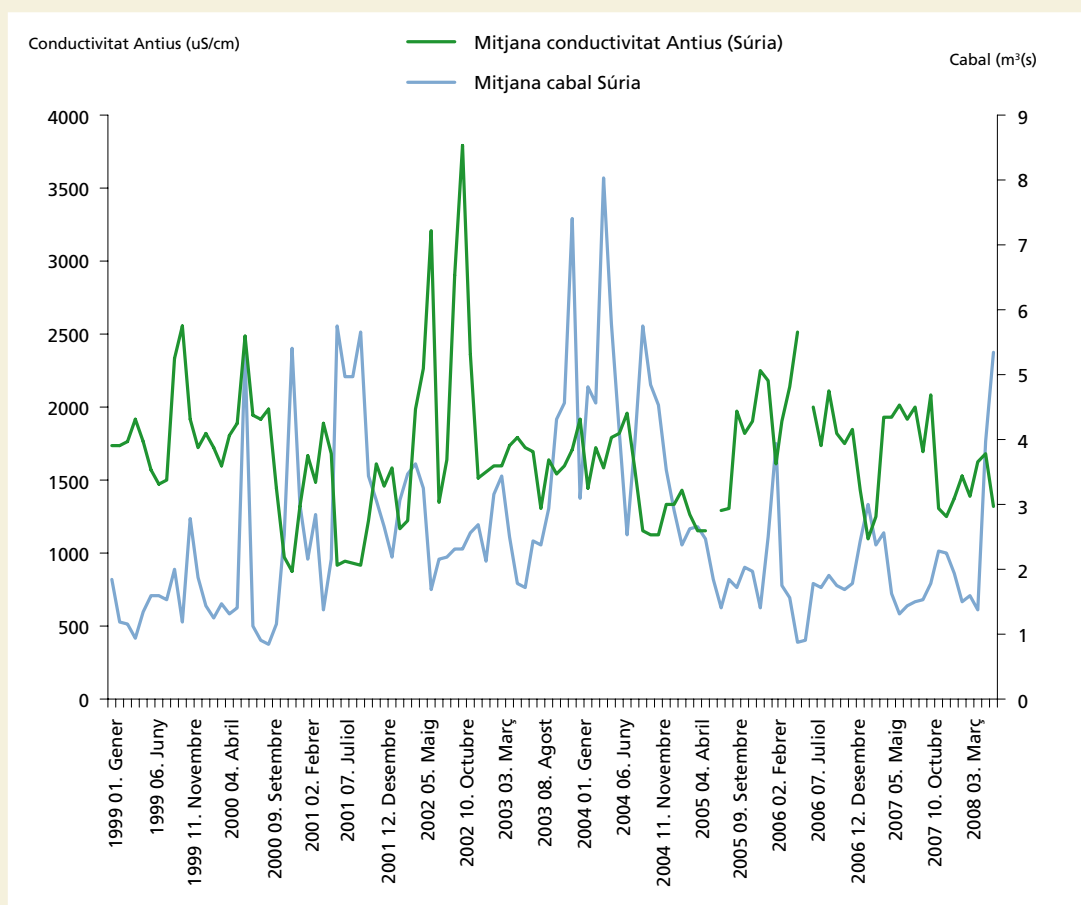
et al., 2007 i capítols 6 i 7 d'aquest informe). En altres paraules, un augment en la freqüència de fenòmens hidrològics extrems, com ara grans sequeres iavingudes. Els canvis en els patrons de precipitació influiran en els processos de transport i distribució de contaminants i en el seu impacte a les zones aquàtiques.

Pel que fa als compostos organoclorats, s'observa més deposició dels contaminants volàtils, fonamentalment HCH, HCB, els congèneres més volàtils dels PCB, DDE i DDT, com més deposició humida hi ha (figura 6) (Van Drooge *et al.*, 2001). Per tant, una reducció futura de precipitació hauria de comportar una disminució de l'entrada d'aquests contaminants a les masses d'aigua.

Quant a l'HAP, la seva deposició és controlada, en primer lloc, per la deposició de partícules en segon lloc, per la precipitació humida i, en tercer lloc, per la temperatura de l'aire. Els dos primers aspectes són fonamentalment importants per als hidrocarburs de massa molecular més elevada i la temperatura és la més rellevant per als de massa més petita (Fernández *et al.*, 2003).

D'altra banda, tenint en compte que la precipitació és el factor determinant del cabal circulant de les aigües superficials, cal esperar que, en els rius, un increment o decrement del cabal circulant influeixi en la concentració de qualsevol espècie química dissolta, fonamentalment si és d'aportació antropogènica. Així doncs, una disminució de cabal circulant, a igualtat de càrrega, ha de comportar, per força, un augment de concentració.

Figura 7. Variació del cabal i la conductivitat al riu Cardener a Antius, Súria, entre els anys 1999 i 2008.





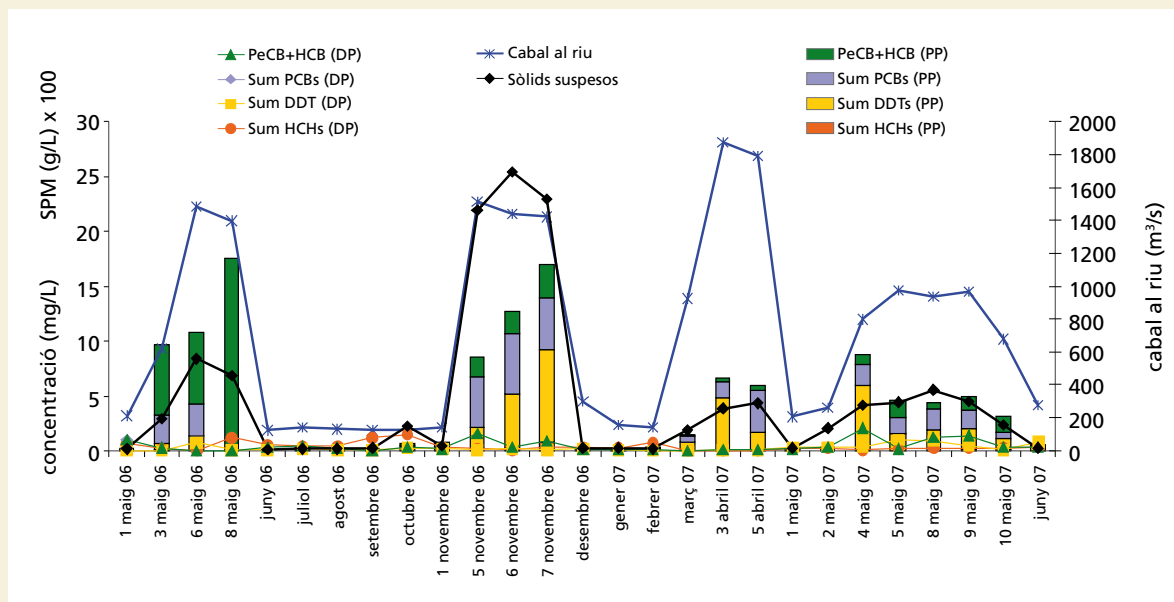
A títol il·lustratiu, es pot comentar el problema de la salinitat a la conca del Llobregat. Com és ben sabut, la salinitat d'aquesta conca, si bé és d'origen natural, està fortament afectada per les explotacions mineres presents o passades. La figura 7 mostra l'evolució de la salinitat (conductivitat) al riu Llobregat, a l'alçada de Súria, on s'observa, en general, una correlació inversa amb el cabal.

Malgrat aquesta relació entre cabal i concentració, la qüestió no s'acaba aquí, ja que les grans avingudes, entre d'altres efectes, produeixen una resuspensió i transport de sediments important. Quan es tracta de sediments contaminats, una riuada pot significar una posada en circulació dels contaminants remoguts. Aquest fenomen és perceptible igualment al Llobregat (figura 7), on es pot comprovar que la correlació inversa habitual conductivitat-cabal queda alterada quan es produeixen avingudes puntuals més importants (per exemple, la de l'any 2004), situació en la qual la dissolució de sals causada per l'escolament de l'aigua de pluja compensa en part el cabal de dilució.

A la figura 8 es mostra un altre exemple d'aquest fenomen relacionat amb el riu Ebre, a l'embassament de Flix, on hi ha una massa d'unes 500.000 tones de sediments contaminats per compostos organoclorats, mercuri, cadmi i altres metalls, així com material radioactiu, tots procedents de l'activitat industrial portada a terme durant més de cent anys per la indústria cloroalcalina instal·lada allà. Al llarg dels diversos estudis realitzats els darrers anys, s'ha pogut constatar que durant les crescudes del riu Ebre es produeix l'arrossegament de sediments, que porta aparellada la dels contaminants que contenen.

Aquests arrossegaments seran més importants a mesura que desapareguin les capes de neu per causa del canvi climàtic, perquè l'erosió del sòl és més important i, per tant, la dels POP i els metalls que hi estan dipositats.

Figura 8. Concentracions de matèria particulada en suspensió i de PeCB, HCB, PCB, HCH i DDT en el riu Ebre a l'alçada de Móra d'Ebre amb relació al cabal del riu.



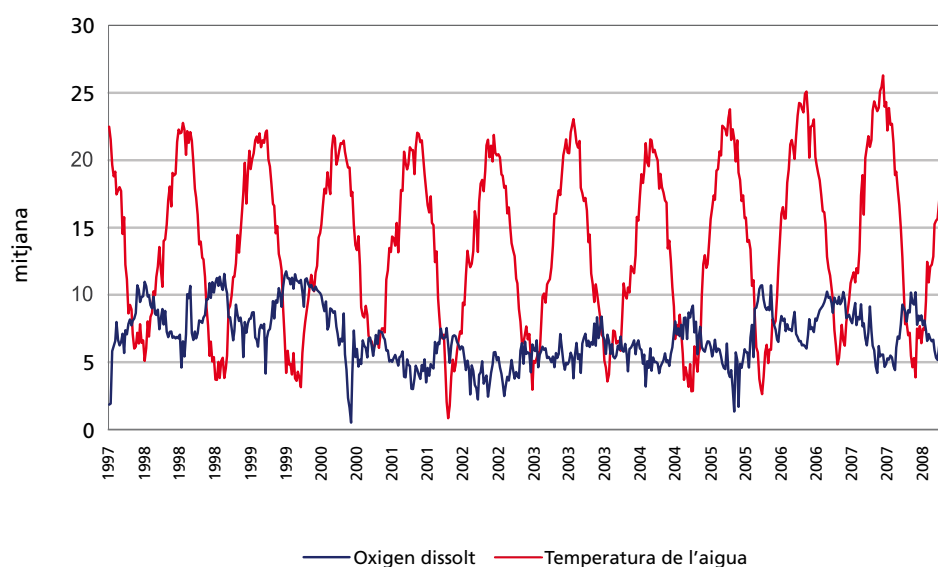
S'observen increments en la concentració d'aquests compostos en augmentar el cabal i les partícules en suspensió de l'aigua. Aquesta tendència reflecteix un arrossegament de part del material contaminant dipositat a l'embassament de Flix quan augmenta el cabal del riu.

Efectes de solubilitat

En general, la solubilitat dels compostos químics sol ser directament proporcional a la temperatura, per la qual cosa d'un increment de temperatura cal esperar un augment dels sòlids dissolts a l'aigua i, per tant, de la salinització, especialment si es té present que el fenomen aniria acoblat a un augment de l'evaporació i a una disminució general dels cabals de dilució.

Tanmateix, no tots els compostos químics segueixen la mateixa llei. Un cas singular i digne de consideració és el de l'oxigen. En efecte, la seva solubilitat en aigua constitueix una excepció a la regla anterior, ja que és inversament proporcional a la temperatura (figura 9), de manera que un augment d'aquesta pot contribuir a la producció d'episodis d'anòxia, que si bé no són excepcionals en les latituds mediterrànies durant els períodes d'estiu, es podrien allargar i agreujar substancialment, amb el consegüent impacte sobre els ecosistemes que això pot comportar, especialment si van associats a situacions d'eutrofització.

Figura 9. Variació de l'oxigen dissolt i de la temperatura a l'estació automàtica XACQA de Castellbell i el Vilar (riu Llobregat), entre 1997 i 2008.



Altres efectes d'origen antropogènic vinculats a la gestió

A banda dels efectes més directament vinculats al canvi climàtic, hi ha un segon grup de factors que poden influir en la qualitat del medi hídric, que hom podria definir com a efectes col·laterals negatius derivats de les noves formes de gestió adoptades pels humans per a fer front a l'escassetat dels recursos. Estaríem parlant, doncs, d'una sèrie de causes de tipus «indirecte», la influència de les quals és molt més difícil d'avaluar.

Per exemple, ja és un fet perceptible que la modificació del clima pot introduir canvis en l'ús del sòl i obligar a variar el tipus de pràctica agrícola (conreus nous, ampliació de l'estacionalitat de la producció, distribució secà-regadiu, noves plagues etc.). Això pot tenir una influència indubtable en el tipus de plaguicides que és necessari



emprar, que eventualment poden afectar la qualitat de les aigües que arribin als rius i al freàtic. En aquest sentit, també cal fer esment de les activitats ramaderes, especialment les relacionades amb el porcí, que han causat problemes seriosos de contaminació de les aigües freàtiques per nitrats en algunes comarques. Independentment de l'evolució futura d'aquests sectors, la minimització dels impactes contaminants en les aigües demanarà un esforç més gran en la gestió de pesticides, nutrients i residus.

Un altre exemple, encara més complicat de calibrar, es podria relacionar amb la reutilització de l'aigua. Com és sabut, una de les mesures ambientalment més positives amb relació al cicle de l'aigua és potenciar l'ús de l'aigua regenerada, com a via més evident d'estalvi de recurs.

A títol orientatiu, es pot indicar que a Catalunya actualment es reutilitzen 28 hm³/any, és a dir, prop del 4% de l'aigua tractada a les depuradores, i el Programa de reutilització preveu per al futur proper arribar fins a 190 hm³/any (28%), per a usos ambientals, industrial, agrícola, recreatiu i municipal. Es tracta, doncs, d'una quantitat gens menyspreable.

Sense qüestionar en absolut la mesura, cal anticipar-se a problemes eventuais lligats a la qualitat. Per exemple, els tractaments de depuració convencionals, inclosos els terciaris, no eliminen salinitat de l'aigua, i la conductivitat típica d'un efluent de depuradora convencional és de 2.000 a 4.000 µS/cm. Són necessaris, per tant, tractaments més sofisticats (osmosi inversa, electrodiàlisi, etc.) i més cars, per a disminuir substancialment aquest contingut de sals solubles. Resulta, doncs, imprescindible dur a terme qualsevol procés de reutilització sota un curós control de qualitat.

Conclusions

El canvi climàtic a les zones mediterrànies, com la catalana, comportarà un augment de temperatura i una davallada de precipitacions. L'increment de temperatura no serà uniforme, sinó que serà més alt a les zones de muntanya que a la costa. També significarà un augment de la freqüència dels fenòmens hidrològics extrems, amb fortes sequeres i riuades. Aquests canvis seran especialment importants per a contaminants que tenen una forta dependència de la temperatura pel que fa a la distribució ambiental.

Els compostos organohalogenats són un grup molt clar d'aquests contaminants. Els increments de temperatura suposaran una concentració més alta d'aquests compostos en l'atmosfera, perquè n'afavorirà la desorció dels sòls. També significarà una retenció més baixa d'aquests compostos a les zones de muntanya i una presència més elevada en l'aire d'aquestes zones. La disminució de la precipitació també reduirà les taxes d'incorporació d'aquests compostos en les aigües i els ecosistemes terrestres. La presència més alta d'aquests compostos a l'atmosfera significa un impacte directe més gran d'aquests compostos sobre la població i la seva salut.

Un altre grup de compostos que trobarem amb més concentració en el medi ambient serà el dels HAP. Aquest grup resulta de la combustió, i cal preveure que un consum més gran d'energia els generi en més quantitat, atès que actualment el 85% de l'energia s'obté per processos de combustió. És possible que, en el futur, els increments màxims de generació d'aquests compostos els tinguem a l'estiu en lloc de l'hivern. Això en suposaria una presència més gran a la fase gas que a la de partícules.

Al marge dels canvis deguts a la producció humana de més quantitat d'aquests compostos, el descens previst de precipitació reduiria la taxa d'incorporació d'aquests compostos als sistemes aquàtics, que es quedaria en una proporció més gran en l'aire.

La disminució de precipitació suposarà una reducció dels cabals dels rius que comportarà menys capacitat de dilució de certs contaminants. Aquest problema exigirà uns procediments més eficients de gestió de tot tipus d'aportacions contaminants al medi aquàtic, siguin d'origen puntual o difús.

D'altra banda, les gran avingudes permeten una dilució més elevada dels contaminants. Malgrat això, en segons quins indrets, per exemple l'embassament de Flix, generen arrossegaments parcials de fangs contaminats tot mobilitzant-los riu avall. Aquests indrets, i potser d'altres, hauran de rebre mesures específiques de remediació.

Independentment del canvi climàtic, factors com ara els canvis en les pràctiques ramaderes, com a conseqüència de la introducció de cultius nous, l'ampliació de les zones de reg, l'ús més elevat de pesticides, etc., també poden afectar la qualitat de les aigües que arribin als rius i al freàtic (és sabuda la contaminació per nitrats). Tot això demanarà un esforç més gran en la gestió de pesticides, nutrients i residus per a minimitzar l'impacte dels contaminants sobre les aigües.

Referències bibliogràfiques

ACEVES, M.; GRIMALT, J. O. (1993). «Seasonally dependent size distributions of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban aerosols from densely populated areas». *Environmental Science and Technology*, núm. 27, pàg. 2896-2908.

BLAIS, J. M.; SCHINDLER, D. W.; MUIR, D. C. G.; KIMPE, L. E. [et al.] (1998). «Accumulation of persistent organochlorine compounds in mountains of Western Canada». *Nature*, núm. 395, pàg. 585-588.

CARRERA, G.; FERNÁNDEZ, P.; VILANOVA, R. M.; GRIMALT, J. O. (2001). «Persistent organic pollutants in snow from European high mountain areas». *Atmospheric Environment*, núm. 35, pàg. 245-254.

CARRERA, G.; FERNÁNDEZ, P.; GRIMALT, J. O.; VENTURA, M. [et al.] (2002). «Atmospheric deposition of organochlorine compounds to remote high mountain lakes of Europe». *Environmental Science and Technology*, núm. 36, pàg. 2581-2588.

CHRISTENSEN, J. H.; HEWITSON, B.; BUSUIOC, A.; CHEN, A. [et al.] (2007). «Regional Climate Projections». A: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen [et al.] (eds.). *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).

FERNÁNDEZ, P.; VILANOVA, R. M.; MARTÍNEZ, C.; APPLEBY, P.; GRIMALT, J. O. (2000). «The historical record of atmospheric pyrolytic pollution over Europe registered in the sedimentary PAH from remote mountain lakes». *Environmental Science and Technology*, núm. 34, pàg. 1906-1913.

FERNÁNDEZ, P.; GRIMALT, J. O.; VILANOVA, R. M. (2002). «Atmospheric Gas-Particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in High Mountain Regions of Europe». *Environmental Science and Technology*, núm. 36, pàg. 1162-1168.

FERNÁNDEZ, P.; CARRERA, G.; GRIMALT, J. O.; VENTURA, M. [et al.] (2003). «Factors governing the atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons to remote areas». *Environmental Science and Technology*, núm. 37, pàg. 3261-3267.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, V.; BERNTSEN, T. [et al.] (2007). «Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing». A: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen [et al.] (eds.). *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).

GALLEGO, E.; GRIMALT, J. O.; BARTRONS, M.; LÓPEZ, J. F. [et al.] (2007). «Altitudinal Gradients of PBDEs and PCBs in Fish from European High Mountain Lakes». *Environmental Science and Technology*, núm. 41, pàg. 2196-2202.



- GRIMALT, J. O.; SUNYER, J.; MORENO, V.; AMARAL, O. C. [et al.] (1994). «Risk excess of soft-tissue sarcoma and thyroid cancer in a community exposed to airborne organochlorinated compound mixtures with a high hexachlorobenzene content». *International Journal of Cancer*, núm. 56, pàg. 200-203.
- GRIMALT, J. O.; FERNÁNDEZ, P.; BERDIÉ, L.; VILANOVA, R. M. (2001). «Selective trapping of organochlorine compounds in mountain lakes of temperate areas». *Environmental Science and Technology*, núm. 35, pàg. 2690-2697.
- GRIMALT, J. O.; BORGHINI, F.; SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ, J. C.; BARRA, R. [et al.]. (2004). «Temperature dependence of the distribution of organochlorine compounds in the mosses of the Andean mountains». *Environmental Science and Technology*, núm. 38, pàg. 5386-5392.
- RIBAS-FITÓ, N.; TORRENT, M.; CARRIZO, D.; MUÑOZ-ORTIZ, L. [et al.] (2006). «In Utero Exposure to Background Concentrations of DDT and Cognitive Functioning among Preschoolers». *American Journal of Epidemiology*, núm. 164, pàg. 955-962.
- RIBAS-FITÓ, N.; JÚLVEZ, J.; TORRENT, M.; GRIMALT, J. O.; SUNYER, J. (2007). «Beneficial effects of breastfeeding on cognition regardless of DDT concentrations at birth». *American Journal of Epidemiology*, pàg. 166, núm. 1198-1202.
- RIBES, A.; GRIMALT, J. O.; TORRES-GARCÍA, C. J.; CUEVAS, E. (2002). «Temperature and organic matter dependence of the distribution of organochlorine compounds in mountain soils from the subtropical Atlantic (Teide, Tenerife Island)». *Environmental Science and Technology*, núm. 36, pàg. 1879-1885.
- SALA, M.; SUNYER, J.; HERRERO, C.; TO-FIGUERAS, J.; GRIMALT, J. O. (2001). «Association between serum concentration of hexachlorobenzene and polychlorobiphenyls with thyroid hormone and liver enzymes in a sample of the general population». *Occupational and Environmental Medicine*, núm. 58, pàg. 172-177.
- SUNYER, J.; TORRENT, M.; MUÑOZ-ORTIZ, L.; RIBAS-FITÓ, N. [et al.] (2005). «Prenatal Dichlorodiphenyldichloroethylene (DDE) and Asthma in Children». *Environmental Health Perspectives*, núm. 113, pàg. 1787-1790.
- SUNYER, J.; TORRENT, M.; GARCIA-ESTEBAN, R.; RIBAS-FITÓ, N. [et al.] (2006). «Early exposure to dichlorodiphenyldichloroethylene, breastfeeding and asthma at age six». *Clinical and Experimental Allergy*, núm. 36, pàg. 1236-1241.
- VAN DROOGE, B. L.; GRIMALT, J. O.; TORRES-GARCÍA, C. J.; CUEVAS, E. (2001). «Deposition of semi-volatile organochlorine compounds in the free troposphere of the Eastern North Atlantic Ocean». *Marine Pollution Bulletin*, núm. 42, pàg. 628-634.
- VAN DROOGE, B. L.; GRIMALT, J. O.; TORRES-GARCÍA, C. J.; CUEVAS, E. (2002). «Semivolatile organochlorine compounds in the free troposphere of the northeastern Atlantic». *Environmental Science and Technology*, núm. 36, pàg. 1155-1161.
- VAN DROOGE, B. L.; GRIMALT, J. O.; CAMARERO, L.; CATALAN, J. [et al.] (2004). «Atmospheric semivolatile organochlorine compounds in European high-mountain areas (Central Pyrenees and High Tatras)». *Environmental Science and Technology*, núm. 38, pàg. 3525-3532.
- VIVES, I.; GRIMALT, J. O.; CATALAN, J.; ROSSELAND, B. O.; BATTARBEE, R. W. (2004a). «Influence of altitude and age in the accumulation of organochlorine compounds in fish from high mountain lakes». *Environmental Science and Technology*, núm. 38, pàg. 690-698.
- VIVES, I.; GRIMALT, J. O.; FERNÁNDEZ, P.; ROSSELAND, B. O. (2004b). «Polycyclic aromatic hydrocarbons in fish from remote and high mountain lakes in Europe and Greenland». *Science of the total Environment*, núm. 324, pàg. 67-77.



14. Anàlisi territorial de la vulnerabilitat dels recursos hídrics davant del canvi climàtic

Josep Mas-Pla, Universitat de Girona
Felip Ortuño, Agència Catalana de l'Aigua

Introducció

La resposta del medi hidrològic al canvi climàtic és, com es mostra en els capítols precedents, molt complexa i afecta tots els components del cicle hidrològic. Des de la perspectiva de valorar-ne els efectes, l'anàlisi de la vulnerabilitat regional permet valorar l'abast d'aquesta resposta. Així, en aquest context, el concepte de vulnerabilitat fa referència a la propietat intrínseca del sistema hidrològic que depèn de la seva susceptibilitat (és a dir, la capacitat de resistir l'acció d'agents externs) per a adaptar-se als efectes adversos, en aquest cas del canvi climàtic. En el camp de la hidrologia, la vulnerabilitat mesura la intensitat en què una pressió afectarà un o diversos components/dinàmiques del sistema, inclosos els episodis extrems com ara sequeres i inundacions.

Davant de les pressions que exercirà el canvi climàtic en els sistemes hidrològics, és obligatori qüestionar-se quins canvis hi produirà i, a més, diagnosticar, concretament, com variaran les propietats del medi i, cosa més important, les funcions que realitza un sistema hidrològic. A grans trets, un sistema hidrològic porta a terme dos tipus de funcions: 1) les estrictament associades al seu estat natural de caràcter geodinàmic i ecològic, i 2) les derivades de considerar l'aigua com a recurs per a l'abastament de les distintes necessitats humanes. L'actual perspectiva de la gestió hidrològica cerca una explotació sostenible dels recursos i la preservació dels valors hidrològics, ecològics i socioeconòmics lligats a l'aigua. Aquesta idea és el fonament dels objectius de la Directiva marc de l'aigua (DMA, Directiva 2000/60/CE).

La constatació d'un canvi de tendència en les variables que controlen el balanç hídic a través dels models climàtics globals, especialment l'augment de la temperatura al planeta i la variació regional de la precipitació, implica modificacions en el balanç hídic a escala de conca. Per tant, els recursos hidrològics disponibles, el cabal superficial i la recàrrega dels aquífers variaran; i les funcions que porten a terme seran modificades segons la susceptibilitat dels sistemes hidrològics.

Ja s'ha reconegut en els informes de l'IPCC (2001, 2007) que l'alteració dels règims hidrològics en un futur proper estaran tan influïdes per les variacions climàtiques *per se* com per les pressions antròpiques, associades a canvis d'usos del territori o a la mateixa adaptació al canvi climàtic. Aquesta alteració generarà un estrès més elevat en els sistemes hidrològics per a mantenir una demanda creixent en una situació de menys disponibilitat natural de recursos. Aquesta doble pressió, climàtica i antròpica, sobre el medi hidrològic coneguda amb el nom genèric de *canvi global*, s'ha de considerar en l'avaluació de la vulnerabilitat dels sistemes hidrològics al canvi climàtic, especialment si es vol considerar l'efecte sobre les reserves i les funcions del recurs (Holman, 2006).

En aquest text es descriuen els mecanismes que determinen la resposta dels sistemes hidrològics al canvi climàtic en el context de Catalunya i propostes per a determinar-ne la vulnerabilitat. La forma i la intensitat en què modifiquin la seva capacitat per a desenvolupar les funcions esmentades serà, doncs, la mesura de la seva vulnerabilitat i indicarà, per tant, el seu risc d'alteració.

Previsions climàtiques i pressions sobre els recursos hidrològics

Catalunya presenta situacions hidrològiques molt diverses arreu del seu territori, tant pel que fa a la disponibilitat d'aigua com a la distribució de la demanda, sigui en la quantitat, en els tipus, en les pressions i en les formes d'abastament i gestió. El canvi climàtic afegeix una nova pressió als recursos hídrics i n'augmenta la vulnerabilitat.

Els estudis realitzats pel darrer informe de l'IPCC (2007) i pel projecte Prudence presenten un horitzó d'augment de la temperatura entre 3 i 5 °C i una disminució de la precipitació prop del 15%, aproximadament al llarg del segle XXI (vegeu capítols 6 i 7). Òbviament, totes dues variacions tenen influència en el cicle hidrològic, tant en el cabal dels rius com en la recàrrega dels aqüífers i, en tots dos casos, en la qualitat dels seus recursos. En conseqüència, el fet més preocupant pel que fa a l'alteració del cicle hidrològic i a la disponibilitat de recursos hídrics està en la vulnerabilitat a la sequera, acompanyada de diferents tipus de pressions sobre el medi hidrològic.

Aquestes pressions s'han d'analitzar tant des de la banda de l'oferta (disponibilitat d'aigua) com de la demanda (antròpica o ambiental) (EEA, 2006). De la banda de l'oferta, cal considerar: 1) la disminució de la precipitació (malgrat que hi ha algunes desavinences entre models climàtics) augmenta el risc de sequera; 2) l'augment de l'evapotranspiració implica una disminució de l'aigua disponible, amb el risc addicional de deteriorament de la qualitat dels recursos superficials i, consegüentment, d'una sobreexplotació dels recursos subterranis si la demanda no es modifica, i 3) la disminució de la recàrrega dels aqüífers i del cabal dels rius. Tots aquests temes han estat tractats i acotats als capítols anteriors.

De la banda de la demanda, cal enumerar: 1) el canvi dels usos del sòl i la capacitat d'emmagatzematge d'aigua en el medi vinculada a la desertització; 2) l'escassetat de recursos davant d'un augment de la demanda domèstica, agrícola i industrial, i 3) el creixement demogràfic i socioeconòmic del país.

Els recursos hidrològics i el canvi climàtic. Conceptes

Els recursos hidrològics, siguin superficials o subterranis, cal considerar-los dins d'un mateix cicle en l'anàlisi de la vulnerabilitat davant del canvi climàtic (Alley *et al.*, 2002), atès que el bescanvi de massa entre superfície i subsòl és una de les conseqüències més importants tant de l'explotació humana dels recursos, com d'una alteració natural del cicle hidrològic (Sophocleous, 2002).

Amb relació a l'aigua superficial, les variables que governen totes dues funcions són el cabal i la seva qualitat hidroquímica. Les previsions climàtiques a la Mediterrània apunten a una disminució dels cabals, la qual és atribuïble majoritàriament a un augment de l'evapotranspiració relacionat amb la temperatura i, tanmateix, al canvi d'usos del sòl que afavoreix l'increment de massa forestal i les pèrdues d'aigua efectiva en el terreny per transpiració a l'atmosfera (Gallart, 2008; Sabaté, 2008). Les extraccions d'aigua per a satisfer la demanda antròpica constitueixen una pressió directa sobre el medi, sigui per l'existència de séquies de reg, derivacions a minicentrals o embassaments que regulen el cabal. En aquest sistema, la funció d'abastament humà preval damunt de la funció ecològica i són nombrosos els trams de riu –masses d'aigua– que per aquest motiu tenen el risc de no assolir els objectius de la DMA.

Amb relació a la qualitat de l'aigua dels rius, entre altres afeccions de caràcter més global (Grimalt i Ginebreda, 2008), l'abocament procedent de les EDAR pot donar lloc a una eutrofització i toxicitat de les aigües superficials, si no té una dilució adequada pels cabals naturals.

El cas de les aigües subterrànies té una complexitat més gran, basada en l'heterogeneïtat del medi geològic, la incertesa en la quantificació del balanç d'aigua en els aqüífers i l'efecte de les extraccions, les quals actuen alterant els fluxos naturals i la capacitat d'emmagatzematge i, òbviament, capten recursos i disminueixen les



reserves d'aigua en els anys secs. D'altra banda, la resposta dels aqüífers no està lligada només a la recàrrega per precipitació, sinó també als fluxos des d'altres unitats hidrogeològiques, els quals poden estar més o menys deslligats de les variacions del cicle hidrològic en superfície. Com a resultat, el règim d'explotació es podrà mantenir per un període més perllongat, amb el benentès que s'estarà forçant la descàrrega d'altres aqüífers limítrofs.

Les alteracions de la qualitat de les aigües subterrànies poden estar associades a un pol natural o al pol artificial. Si bé els règims de flux naturals poden preservar la qualitat d'un determinat aqüífer de la contaminació dels aqüífers propers, el règim de captacions alterarà aquest sistema dinàmic i produirà una dispersió del contaminant segons el sentit del flux modificat pels cons de depressió. Aquesta modificació del flux explica la presència de nitrats en aqüífers profunds, lixivats dels aqüífers lliures a través dels nivells d'aqüítards, o bé de fluor o arsènic d'origen natural, que s'incorpora en determinats nivells a causa de l'alteració per bombeig.

Un cas especial dels efectes sobre la qualitat de les aigües és el de les zones litorals, on l'equilibri hidrològic de la falca marina és molt fràgil i, per tant, també ho és la salinització dels aqüífers costaners. Les derivacions dels rius a les planes fluviodeltaiques i les extraccions d'aigua subterrània afavoreixen la penetració de la falca marina i la pèrdua de recursos de bona qualitat. Tanmateix, les zones litorals són les que presenten una alta demanda, tant domèstica com agrícola, fet que agreuja la vulnerabilitat dels recursos en aquestes zones.

En un altre context, la distribució de les zones humides, tant en àrees continentals com litorals, correspon a un balanç entre les condicions climàtiques i la resiliència d'aquests sistemes a adaptar-se a variacions de temperatura i precipitació. D'aquesta manera, els canvis climatològics donen lloc a variacions latitudinals i altitudinals dels hàbitats, si bé, a escala més local, els canvis en el balanç hídric en una conca poden tenir efectes tangibles en la qualitat dels ecosistemes i afectar-ne les relacions ecohidrològiques.

Ahora, els ecosistemes associats a aigües continentals són un component essencial en el cicle hidrològic. D'una banda, ja s'ha comentat la seva influència a través de l'evapotranspiració. És especialment rellevant la que té lloc a la capçalera de la conca per la disponibilitat d'aigua als trams mitjà i baix del riu. I de l'altra, el desenvolupament dels ecosistemes depèn de la quantitat i qualitat de l'aigua superficial a les zones de ribera, i de l'aigua subterrània a les zones humides continentals i, més delicadament, a les litorals. Concretament, les zones humides litorals són les que, segons els informes internacionals, presenten més vulnerabilitat al canvi climàtic. No obstant això, les pressions antròpiques sobre rius i aqüífers al nostre país fan que aquest grau de vulnerabilitat pugui, a priori, fer-se extensiu a la majoria d'ecosistemes associats al medi fluvial (zones de ribera, llacunes...).

L'impacte de l'ascens del nivell del mar sobre els aqüífers costaners

Els aqüífers costaners tindran una vulnerabilitat més alta com a conseqüència dels efectes del canvi climàtic relacionats amb l'ascens del nivell del mar. De manera natural, i sense estar modificats per l'acció de l'home, els aqüífers costaners descarreguen aigua dolça al mar. El cabal de descàrrega depèn de les propietats de l'aqüífer i de les seves condicions hidrogeològiques, de manera que s'estableix un gradient del nivell piezomètric de l'aigua subterrània del punt de recàrrega a l'aqüífer cap al mar, i s'evita, així, la penetració d'aigua marina terra endins. Aquest equilibri el trenca sovint l'home en explotar els recursos d'aquests aqüífers prop del mar, amb la qual cosa disminueixen els nivells de l'aigua i s'afavoreix la intrusió, de manera que llavors se sala ràpidament l'aigua dels pous d'extracció.

El nivell de base per a la descàrrega de l'aigua subterrània als aqüífers costaners és el nivell del mar. El canvi climàtic preveu una pujada del mar en l'àrea de la Mediterrània occidental que es pot estimar de 0,20 a 0,60 m per a finals d'aquest segle. En pujar el nivell de base, el gradient d'aigua dolça cap al mar serà menor. Si a això li afegim la reducció de la recàrrega, provocada per la reducció de les precipitacions en aquesta àrea, per l'augment

de la seva variabilitat i per l'augment de l'evapotranspiració i de l'escorrentia directa, podem concloure que els aqüífers costaners tenen un risc més elevat de salinització i d'intrusió marina en disminuir el flux d'aigua cap al mar, i per tant són més vulnerables.

La quantificació d'aquests impactes es pot realitzar utilitzant models numèrics; els quals permeten analitzar els efectes futurs sobre els nivells piezomètrics i la qualitat de l'aigua subterrània que es produiran quan es canvien determinades condicions. En aquest cas, es considera l'ascens del nivell del mar i, addicionalment, una disminució de la recàrrega.

Un cas d'estudi ha estat l'aqüífer de la Vall Baixa i Delta del Llobregat. Aquest aqüífer és ben conegut, atès que és una reserva estratègica per a l'abastament a la ciutat de Barcelona. Els estudis d'anàlisi específics de la recàrrega a Catalunya per efecte del canvi climàtic preveuen escenaris amb un augment de nivell del mar de 0,20 i de 0,60 m, i reduccions de la recàrrega directa del 8% i del 24% (taula 1, i vegeu també capítol 11). Aplicant aquests valors, s'han calculat els nivells piezomètrics corresponents i les concentracions de clorurs en tot l'aqüífer mitjançant un model de flux de gran detall, i es comparen amb els valors actuals.

Taula 1. Escenaris d'augment del nivell del mar i de disminució de la recàrrega directa considerats en l'estudi de l'aqüífer de la Vall Baixa i Delta del Llobregat.

	Escenari 1 (lleu)	Escenari 2 (sever)
Augment previst del nivell del mar a la Mediterrània	+0,20 m	+0,60 m
Reducció de la recàrrega directa per pluja	-8%	-24%

Els resultats obtinguts per a aquest aqüífer costaner indiquen que la concentració de clorurs augmentarà com a conseqüència de la pujada del nivell del mar. En l'aqüífer principal del Llobregat cal esperar un augment de fins a 500 mg/l a les zones ja afectades actualment per la intrusió marina, associat a un ascens del nivell del mar de 0,2 m, el qual s'incrementarà tant en extensió com en concentració per a un ascens de 0,6 m (figura 1).

L'empitjorament en la qualitat de l'aigua subterrània per l'ascens del nivell del mar serà més accentuat si considerem la disminució de la recàrrega prevista. Un escenari que combini els dos efectes també mostrarà increments superiors de concentracions de clorurs en l'aqüífer. Així, un ascens del nivell del mar de 0,6 m combinat amb una disminució de la recàrrega del 24% provocarà un augment important de la concentració de clorurs a més de la meitat de la superfície del Delta (figura 2).



Figura 1. Increment de la concentració de clorurs a l'aquífer principal del Llobregat per a finals d'aquest segle com a conseqüència de la pujada del nivell del mar per l'impacte del canvi climàtic.

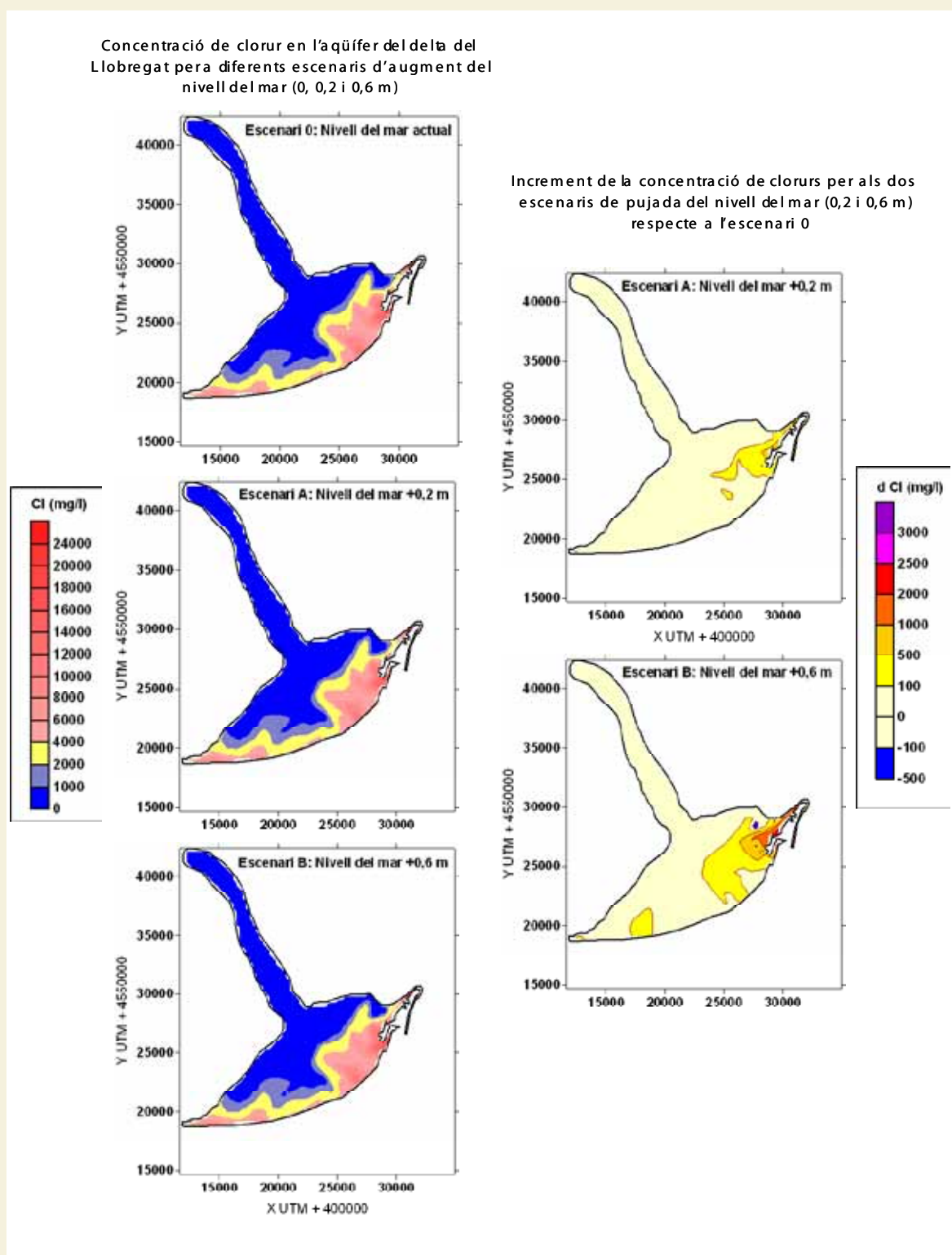
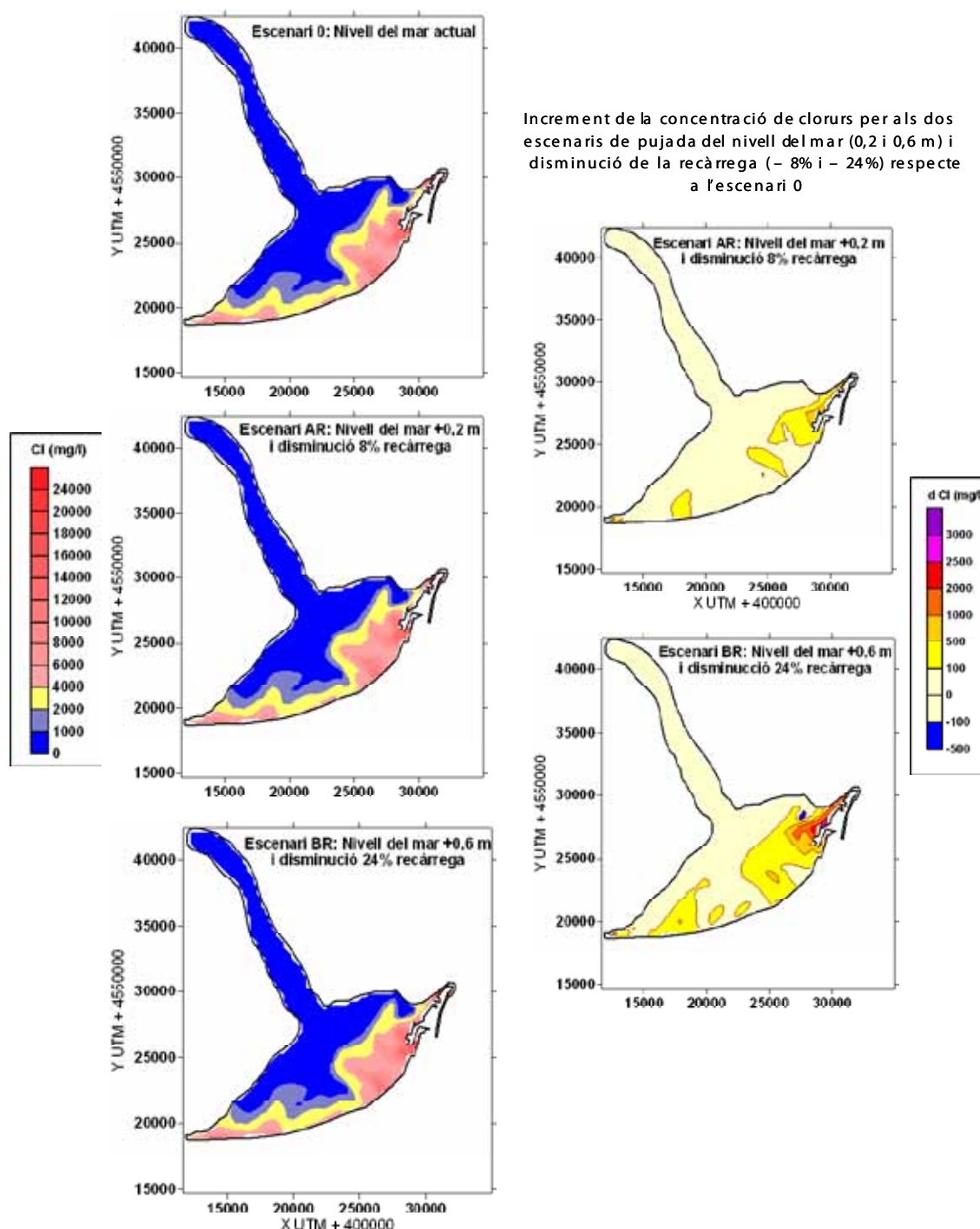


Figura 2. Increment de la concentració de clorurs a l'aquífer principal del Llobregat per a finals d'aquest segle com a conseqüència de la pujada del nivell del mar i de la disminució de la recàrrega a l'aquífer.

Concentració de clorur en l'aquífer del delta del Llobregat per a diferents escenaris d'augment del nivell del mar (0, 0,2 i 0,6 m) i disminució de la recàrrega (0, - 8% i - 24%)





Anàlisi territorial de la vulnerabilitat

En l'anàlisi territorial de la vulnerabilitat dels recursos hídrics al canvi climàtic, la diagnosi dels efectes cal cercar-la en la resposta de les diferents conques a les variacions del cicle hidrològic. Aquesta resposta ha d'incloure (Vörösmarty *et al.*, 2004): l'aigua en totes les seves formes com a part física del cicle hidrològic, els sistemes biològics com a modificadors de fluxos d'aigua, i l'home com a agent alterador i responsable de la gestió del recurs.

L'anàlisi territorial es proposa a tres escales independents i, alhora, complementaris per a assolir una valoració real de la vulnerabilitat del medi hidrològic i proposar estratègies d'actuació:

a) A escala de pla de gestió de conca en el context de la DMA

Els plans de gestió de conca han d'aportar el còmput dels recursos existents i dels diferents tipus de demanda, de com cal abastar-la i, si cal, aportar-hi recursos externs. Atès que ens trobem davant de sistemes hidrològics amb un alt grau d'aprofitament dels recursos, la forma en què es gestionen, actualment i en el futur immediat, són fonamentals a l'hora de determinar-ne la vulnerabilitat, tant pel que fa a la quantitat com a la qualitat del recurs. Plans de creixement urbanístic, desenvolupament industrial i agrari, i decisions polítiques determinen les pressions sobre el sistema i, amb elles, la seva vulnerabilitat i les possibilitats d'exercir les funcions pròpies del recurs de l'aigua amb garantia davant els escenaris hidrològics derivats del canvi climàtic.

En aquest sentit, els plans de gestió de conca han de ser el motiu per a generar un coneixement nou sobre el sistema, i proposar accions fonamentades per a garantir les funcions dels sistemes hidrològics i disminuir-ne la vulnerabilitat (Molist i Manzano, 2008).

b) A escala de modelització dels sistemes hidrològics, com a eina per al càlcul dels balanços hídrics en condicions de canvi climàtic

La modelització dels sistemes hidrològics, superficials i subterranis, és una eina bàsica per a conèixer-ne el funcionament i, cosa més important, poder-lo simular en condicions adverses; per exemple, de més evapotranspiració i menys precipitació. La disponibilitat d'aigua en forma de cabal als rius i de nivell en els aqüífers, així com els fluxos entre aigües superficials i subterrànies en zones al·luvials i costaneres, defineixen l'impacte d'aquestes noves condicions ambientals en la dinàmica hidrològica.

La modelització hidrològica ha d'anar associada amb la modelització de la gestió, de manera que s'equiparin els recursos a la demanda i s'incloguin els diferents actors i les condicions econòmiques que regeixen l'assignació dels volums a les distintes tipologies de demanda.

D'una banda, la modelització de les aigües superficials permet calcular la resposta de l'escorriment superficial sota diferents condicions de precipitació i evapotranspiració, en la qual l'evolució dels usos del sòl és un factor capital. Els models d'aigües subterrànies estan destinats a reproduir el transport d'aigua en els aqüífers en funció de les seves distintes geometries, paràmetres hidrogeològics, relacions laterals o verticals i de les condicions d'entorn establertes: límits de nivell o flux definit (entre els quals els límits no permeables) representats per infiltracions, rius, canals..., i la mateixa línia de costa. Les conseqüències del canvi climàtic seran definides per condicions d'entorn transitòries. Aquest tipus de model són indispensables per a determinar la sostenibilitat d'un sistema hidrogeològic en explotació (Kalf i Wolley, 2005) i, per tant, molt adequats per a avaluar la resposta dels sistemes en unes condicions d'entorn canviants.

L'estat actual de la diagnosi de l'efecte del canvi climàtic en aigües superficials i subterrànies a Catalunya ha estat discutit per Manzano (2008) i per Ortuño *et al.* (2008) en aquest informe (capítols 10, 11 i 12).

No obstant això, el coneixement actual dels sistemes hidrològics és insuficient per a abordar aquesta avaluació de la vulnerabilitat arreu del territori català. Només els aqüífers del delta del Llobregat, del delta Besòs i del pla de

Barcelona disposen ara per ara d'un coneixement de la seva hidrogeologia que permeti realitzar simulacions sota condicions canviants que es puguin considerar representatives, com s'ha exposat anteriorment en la simulació dels efectes de l'ascens del nivell del mar. En una segona línia de precisió i detall en el coneixement hidrogeològic, hi hauria l'aqüífer de la baixa Tordera. També s'han aplicat models quantitius a les zones del baix Ter, del Fluvià i de la Muga, i al massís de les Guilleries, però amb una representativitat i una extrapolació dels resultats inferiors, que potser no els fa del tot apropiats per a una simulació que representi el canvi climàtic.

Tanmateix, la majoria d'aquests models només simulen el règim de flux subterrani i no la qualitat de l'aigua. Per a aplicar aquesta metodologia, caldrà una inversió en coneixement considerable per a generalitzar-ho a totes les conques que subministren aigua a la població per als diferents usos. Aquest coneixement seria més difícil i costós per a les aigües subterrànies que per a les aigües superficials. Ens cal, doncs, pensar en una avaluació qualitativa basada en un mostreig i un control representatiu que, malgrat reduccions simplistes dels escenaris i de la realitat hidrològica, permetin aportar conclusions.

Una altra metodologia interessant de modelització la constitueixen els sistemes de suport de decisions basats en variables hidrològiques, econòmiques i que considerin els condicionants de la gestió. El model Aquatool (Andreu *et al.*, 1996) permet fer aquest tipus de simulació que faria possible investigar les alteracions que significaria el canvi climàtic amb la finalitat d'assolir una gestió sostenible ambientalment i econòmicament. Un dels exemples més coneguts és l'aplicació a Califòrnia del model d'optimització Calvin (Tanaka *et al.*, 2006).

c) A escala d'indicadors que aportin una visió integrada de la vulnerabilitat en funció de distintes variables, a semblança del Climate Vulnerability Index

Amb la finalitat de reduir la complexitat dels sistemes hidrològics, l'ús d'indicadors no dimensionals en funció de distintes variables és una alternativa per a l'anàlisi territorial de la vulnerabilitat.

L'ús del *Climate Vulnerability Index* (CVI; Sullivan i Meigh, 2005) permetria fer una avaluació utilitzant com a variables els recursos hídrics disponibles i els factors de rang ambiental, social i econòmic de l'entorn de la conca hidrogràfica o de l'escala d'unitat hidrològica emprada en l'anàlisi. Els components principals del CVI fan referència a: 1) els recursos o la disponibilitat física de l'aigua, considerant la quantitat, la qualitat i les seves variabilitats; 2) accés al recurs per a les funcions (principalment les d'abastament humà); 3) capacitat per a gestionar el recurs en condicions habituals i adverses; 4) ús de l'aigua; 5) factors ambientals relacionats amb la integritat ecohidrològica dels sistemes, i 6) factors geoespacionals diversos relacionats amb el context geogràfic local.

El desenvolupament d'aquest índex per a Catalunya requerirà el coneixement del medi físic i de l'origen de l'abastament tant en nuclis metropolitans com en àrees agrícoles o industrials, sense oblidar les necessitats domèstiques de nuclis rurals en àrees deficitàries en recursos hídrics. Tanmateix, el CVI és un índex que, temptativament, hauria de contrastar el creixement previst per a les diferents conques amb les garanties existents de proveir-ne els recursos necessaris, i com les conques variarien amb el canvi de les condicions climàtiques. L'aplicació del CVI és, doncs, un exercici d'integració d'informació diversa que, amb l'adequada representació cartogràfica de la vulnerabilitat, pot ser valuós per a considerar els efectes del canvi climàtic en la planificació hidrològica, atès que actualment és obligat incloure els impactes del canvi climàtic en el cicle hidrològic com una variable més en els models de gestió (Molist i Manzano, 2008; Galbiati, 2008).

Conclusions, incerteses i oportunitats

Conclusions

- Les prediccions climàtiques indiquen condicions adverses en la disponibilitat de recursos hídrics a l'entorn de la Mediterrània occidental i, per tant, a Catalunya.



- L'avaluació de la vulnerabilitat, definida com la capacitat d'adaptar-se a situacions adverses en funció de les quals augmenta el risc de sofrir danys, ha de combinar la dinàmica dels sistemes hidrològics amb la consideració de les funcions ambientals i humanes del recurs de l'aigua.
- L'estat actual del coneixement dels sistemes hidrològics de Catalunya posa de manifest la necessitat d'una inversió en coneixement destinada a quantificar les alteracions que el canvi climàtic tindrà en els recursos disponibles en condicions d'explotació creixent.
- Per a l'anàlisi territorial de la vulnerabilitat s'opina que els plans de gestió de conca han de proveir el context de demanda, i pressions sobre els recursos hídrics necessaris per a contrastar fins a quin punt una situació hidrològica adversa genera un risc. L'ús de models matemàtics que permetin simulacions de cabals, de flux subterrani, hidroeconòmiques, etc., ha de proporcionar el context quantitatiu per a valorar la magnitud del risc.
- Paral·lelament al desenvolupament de models hidrològics regionals que permetin simular les condicions climàtiques predites, l'ús d'indicadors com el *Climate Vulnerability Index* són una opció complementària per a valorar qualitativament la vulnerabilitat territorial davant del canvi climàtic, comparar diferents conques, masses d'aigua, etc., i prendre decisions de prioritat en les estratègies adaptatives.

Incerteses

En tots els estudis de canvi climàtic, les prediccions de variabilitat de temperatura i precipitació són la principal causa d'incerteses en la presa de decisions, que al seu torn són incertes per les incerteses sobre l'evolució dels escenaris socioeconòmics globals. No obstant això, en l'anàlisi de la vulnerabilitat hi ha altres factors igualment importants que han de permetre comparar el risc que comportaria la pèrdua potencial de recursos hídrics

En aquest sentit, els factors socioeconòmics, com la demografia, els canvis d'usos del territori, el desenvolupament econòmic, les decisions polítiques en matèria hidrològica, etc., són clau per a valorar la pressió futura sobre els recursos. D'altra banda, l'aprofundiment en el coneixement dels factors locals de caire geològic, hidrològic, químic, etc., és fonamental per a assolir la representació de la resposta dels sistemes davant el canvi climàtic.

Oportunitats

L'avaluació de la vulnerabilitat dels recursos hídrics davant del canvi climàtic indica la necessitat d'aprofundir en el coneixement dels sistemes hidrològics, tant a nivell conceptual com d'adquisició de dades. Si bé aquesta necessitat és ja ben coneguda i ha estat reiteradament expressada per tècnics i investigadors, la urgència que sorgeix del canvi climàtic en reforça la indispensabilitat i justifica una inversió/esforç més gran en aquests temes.

A grans trets, les oportunitats d'aquesta anàlisi es concreten a:

- Insistir en el coneixement dels sistemes hidrològics, amb responsabilitats compartides entre l'Administració i el sector privat responsable de la gestió de l'aigua, orientats a valorar els factors hidrològics i socioeconòmics que determinaran la vulnerabilitat futura dels sistemes hidrològics.
- Desenvolupar, en un primer estadi, indicadors de vulnerabilitat, com el *Climate Vulnerability Index* esmentat, que presentin una anàlisi territorial inicial i es puguin emprar com un criteri de prioritització en l'aplicació de mesures adaptatives a mesura que es vagin desenvolupant. En els sistemes, conques, masses d'aigua, etc., on es puguin desenvolupar models de simulació, caldrà considerar els resultats numèrics de la resposta del sistema amb relació a les necessitats de les funcions ambientals i d'abastament humà. Això en permetrà determinar el nivell d'impacte i valorar-ne amb més precisió el grau de vulnerabilitat.

Referències bibliogràfiques

- ALLEY, W. M.; HEALY, R. W.; LABAUGH, J. W.; REILLY, T. E. (2002). «Flow and Storage in Groundwater Systems». *Science*, núm. 296, pàg. 1985-1990.
- ANDREU, J.; CAPILLA, J.; SANCHÍS, E. (1996). «AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management». *Journal of Hydrology*, núm. 177 (3-4), pàg. 269-291.
- CALBÓ, J. (2005). «Projeccions futures sobre el clima a Catalunya». A: J. E. Llebot. *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible de Catalunya, Generalitat de Catalunya. Pàg. 193-226.
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY) (2006). *Vulnerability and adaptation to climate change in Europe*. EEA Technical report, núm. 7/2005. 79pàg.
- GALBIATI, L. (2008). «La Directiva Marc de l'Aigua i el canvi climàtic». 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.)
- GALLART, F. (2008). «Canvis temporals observats en les sèries de cabals». 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.)
- GRIMALT, J.; GINEBREDÀ, A. (2008). «Canvi climàtic i qualitat química del medi aquàtic». 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.)
- HOLMAN, I. P. (2006). «Climate change impacts on groundwater recharge - uncertainty, shortcomings, and the way forward?». *Hydrogeology Journal*, núm. 14, pàg. 637-647.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANNEL FOR CLIMATE CHANGE) (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability*. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm> IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANNEL FOR CLIMATE CHANGE) (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Working Group II Report «Impacts, Adaptation and Vulnerability»*. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>
- KALF, F. R. P.; WOLLEY, D. R. (2005). «Applicability and methodology of determining sustainable yield in ground water systems». *Hydrogeology Journal*, núm. 13, pàg. 295-312.
- MANZANO, A. (2008). «Exemples de modelització hidrològica del règim mig dels rius catalans en escenaris futurs». 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.)
- MOLIST, J.; MANZANO, A. (2008). «Riscos sobre la gestió dels recursos hídrics». 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.)
- ORTUÑO, F.; JÓDAR, J.; CARRERA, J. (2008). «Canvi climàtic i recàrrega d'aqüífers a Catalunya». A: Agència Catalana de l'Aigua (ACA) - Nova Cultura de l'Aigua (FNCA). *Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona. (Aquest volum.)
- SABATÉ, S. (2008). «Balanç hídric, els boscos i l'evapotranspiració». A: Agència Catalana de l'Aigua (ACA) - Nova Cultura de l'Aigua (FNCA). *Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona. (Aquest volum.)



- SOPHOCLEOS, M. (2002). «Interactions between groundwater and surface water: the state of science». *Hydrogeology Journal*, núm. 10, pàg. 52-76.
- SULLIVAN, C. A.; MEIGH, J. R. (2005). «Targeting attention on local vulnerabilities using an integrated indicator approach: The example of the Climate Vulnerability Index». *Water Science and Technology, Special Issue on Climate Change*, núm. 51(5), pàg. 69-78.
- TANAKA, S. K.; ZHU, T.; LUND, J. R.; HOWITT, R. E. [et al.] (2006). «Climate Warming and Water Management Adaptation for California». *Climatic Change*, núm. 76 (3-4), 367-381.
- VÖRÖSMARTY, C. J.; LETTENMAIER, D.; LEVEQUE, C.; MEYBECK, M. [et al.] (2004). «Humans transforming the global water system». *AGU Eos Transactions*, núm. 85, pàg. 509-514.



15. Riscos sobre la gestió dels recursos hídrics

Jordi Molist i Andreu Manzano
Agència Catalana de l'Aigua

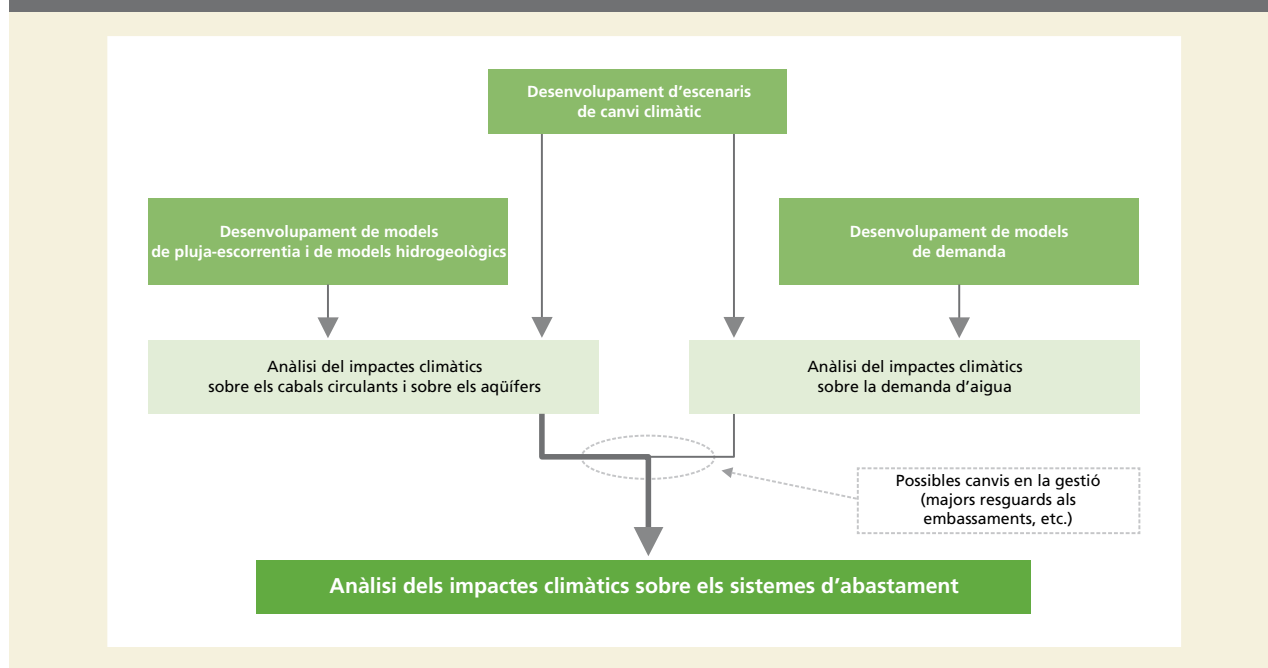
Introducció

En capítols anteriors s'ha tractat sobre els impactes climàtics esperables en el règim de pluges i de la seva repercussió sobre els cabals circulants pels rius o la recàrrega d'aqüífers. S'ha vist com, a grans trets, els models climàtics apunten a un canvi en una doble direcció: menys aportacions mitjanes i més irregularitat. També ens podem preguntar, però, sobre els efectes que tindran aquests canvis amb relació a la seguretat dels nostres abastaments: hi haurà episodis de sequera més sovint? Augmentarà el risc de patir restriccions?

L'anàlisi d'aquests efectes pot semblar senzill si parlem només de reduccions mitjanes, però no ho és tant quan tractem també d'increments en la irregularitat. Els efectes d'aquesta irregularitat més elevada dependran, lògicament, de les característiques concretes de cada sistema de gestió. Així, per exemple, els sistemes que disposin de grans embassaments o aqüífers (en proporció a la seva demanda) podran afrontar els canvis amb més seguretat, mentre que els sistemes que disposin de menys regulació (o que, simplement, depenguin de rius no regulats) estaran més exposats als canvis. Cal, per tant, una darrera fase d'anàlisi que permeti traduir els canvis climàtics en la hidrologia a canvis en la gestió i satisfacció de les demandes. Aquesta fase s'aborda, com veurem, per mitjà dels models de gestió de recursos, que simulen el funcionament real d'un sistema d'abastament al llarg d'una sèrie climàtica llarga, tenint en compte totes les seves característiques físiques (embassaments, conduccions, demandes,...) i regles de gestió.

Però encara cal tenir en compte alguns factors addicionals, relatius al que s'ha anomenat «canvi global». Se sap, per exemple, que la demanda d'aigua està influïda per la temperatura. Aquesta relació es dona tant en els usos agraris (les plantes poden necessitar més reg si els estius són més càlids) com en els usos urbans (els hàbits domèstics també es veuen afectats per les temperatures). Així doncs, la relació pot ser triple: menys recursos, més irregularitat i més demanda. La figura 1 mostra gràficament aquest procés d'anàlisi, des dels models climàtics fins a la gestió dels recursos.

Figura 1. Procés de modelització dels efectes del canvi climàtic sobre els sistemes d'abastament (adaptat de Howe *et al.*, 2005). Es destaca la fase del procés que s'aborda en aquest article.



En aquest document s'aborda exclusivament la relació entre els impactes hidrològics (modificació del règim de cabals circulants) i la seguretat dels sistemes de gestió. Aquesta anàlisi es presenta sobre el cas del sistema Ter-Llobregat, que és la font d'abastament de 5,5 milions de persones. Val a dir que els resultats que s'exposen s'han de considerar preliminars, en tant que les fases anteriors del procés també estan encara en desenvolupament. També és important remarcar que, malgrat que en aquest article ens cenyirem fonamentalment als resultats dels rius Ter i Llobregat, en l'actualitat les mateixes anàlisis s'estan desenvolupant per a la resta de sistemes hidrogràfics catalans.

Impactes climàtics i hidrològics considerats en aquesta anàlisi

Hem vist en capítols anteriors que els estudis disponibles sobre els efectes del canvi climàtic en el cicle hidrològic mostren canvis tant en el règim de pluges com en els processos d'evapotranspiració, que podrien experimentar increments de l'ordre del 10 al 20% fruit de temperatures de 2 a 4 °C més elevades de mitjana a partir de meitat segle XXI. Alhora, s'ha mostrat que el procés hidrològic de generació de cabals és altament sensible a aquests processos d'evapotranspiració, amb una gran influència de la massa foliar de les plantes.

Per al cas de Catalunya, algunes simulacions apunten que un increment de la temperatura mitjana d'uns 2 °C (que es podria ajustar a l'horitzó temporal 2030-2040) podria donar lloc a disminucions de la pluviometria mitjana del 10% i a reduccions de les aportacions del 15%. No obstant això, altres simulacions menys sensibles a canvis en la pluja (-5%) gairebé no mostren canvis sobre les aportacions. On sembla que coincideixen tots els pronòstics és en el fet que al llarg del segle XXI es produirà una tendència a l'increment d'onades de calor i a una concentració més gran de les pluges, amb caràcter general arreu del món i probablement de manera més acusada a la regió de la Mediterrània.

Hi ha, en conjunt, una gran incertesa sobre els impactes esperables a escala local, que probablement s'anirà reduint a mesura que progressin els treballs de diagnosi. En conseqüència, les previsions dels seus efectes sobre



els sistemes d'abastament també són molt incertes, i s'han de considerar només com a simples indicacions de l'ordre de magnitud del que es pot esdevenir.

Per a les simulacions que es desenvolupen en aquest document s'han utilitzat les sèries històriques d'aportacions del període 1940-2002, modificant-les de manera artificial per a intentar reproduir els canvis esperats. Així, s'ha comparat el funcionament del sistema per a quatre escenaris climàtics-hidrològics diferents, que es mostren a la taula 1.

Taula 1. Escenaris climàtics considerats a Catalunya per a l'anàlisi de vulnerabilitat que es desenvolupa en aquest article.

Escenari	Descripció
Esc. 0 Sèrie històrica	Sèrie històrica observada, sense canvi climàtic.
Esc. 1 Menys aportacions	Reducció de les aportacions mitjanes del 5%, mantenint els patrons de variabilitat de la sèrie històrica.
Esc. 2 Més variabilitat	Modificació dels patrons històrics, exagerant els episodis secs i humits per incrementar la desviació estàndard de les aportacions mensuals en un 10%. Es mantenen les aportacions mitjanes de la sèrie històrica.
Esc. 3 Menys aportacions i més variabilitat	Combinació dels escenaris anteriors, incorporant tant una reducció de les aportacions mitjanes (5%) com un increment de la variabilitat (10%).

Es tracta, evidentment, de patrons de canvi teòrics, elaborats amb l'objectiu de poder fer una primera quantificació d'uns fenòmens que, de moment, tot just es comencen a conèixer de manera qualitativa. Amb tot, l'escenari 3 es podria considerar com una primera aproximació als canvis que es podrien produir entorn dels anys 2030-2040, tot tenint en compte les grans incerteses que encara envolten aquestes prediccions. Els escenaris 1 i 2 s'introdueixen únicament per a discernir l'impacte dels diferents components del canvi.

No es consideren en aquestes anàlisis ni l'efecte d'eventuals volums de regulació menors als actuals als embassaments, per a preveure majors resguardos davant d'aiguats més violents (capítol 12), ni l'empitjorament de la qualitat de l'aigua (capítol 13), que pot comportar una menor disponibilitat (tot i que cada vegada hi ha tractaments més avançats per compensar aquest efecte) i un sobrecost de tractament. Es considera que per als horitzons relativament propers dels anys 2030-2040 es tractarà d'efectes de segon ordre, per la caracterització dels quals encara no hi ha informació suficient i per tant caldrà anar acotant-los de forma més precisa els pròxims anys.

Alguns estudis anteriors sobre la vulnerabilitat dels sistemes de gestió

Abans d'entrar en l'anàlisi del sistema Ter-Llobregat pot ser interessant fer un breu recorregut per estudis similars que s'han desenvolupat arreu. Entre les experiències internacionals, Austràlia ocupa un lloc destacat. En aquest país, l'anàlisi dels efectes del canvi climàtic sobre els recursos hídrics ja té un recorregut important, i les conclusions d'aquests estudis ara es comencen a incorporar a la planificació hidrològica. Un exemple interessant és el de Melbourne. Els treballs desenvolupats per Melbourne Water, que es resumeixen en la taula 2, apunten a reduccions dels recursos disponibles per a la satisfacció de les demandes del 8% (2020) i el 20% (2050). Al mateix temps, les demandes s'incrementarien, per efectes climàtics, l'1% i el 3%, respectivament.

Taula 2. Exemple d'anàlisi dels impactes climàtics en altres països. Resultats de l'estudi «Implications of potential climate change for Melbourne Water's resources» (Howe et al., 2005).

	2020	2050
Reducció mitjana de la pluja	-2%	-4%
Reducció mitjana de les entrades als embassaments	-7%	-18%
Reducció de la disponibilitat d'aigua	-8%	-20%
Increment de la demanda a causa del canvi climàtic	+1%	+3%

Treballs similars desenvolupats als Estats Units posen de manifest, especialment per a les regions de l'Oest, la importància que podria tenir en el futur lleugeres reduccions i canvis de règim en les aportacions nivals i el seu desglaç (California Department of Water Resources, 2006). En concret, al riu Colorado les anàlisis apunten a l'aparició de dèficits hídrics importants, superiors a la reducció esperable dels recursos bruts, en sistemes estratègics que actualment ja estan en una situació precària, d'estrès hídric elevat. A Califòrnia els escenaris futurs són similars; s'estima que les aportacions mitjanes als embassaments del sistema de la Vall Central (conques dels rius Sacramento i San Joaquin) es podrien reduir entre el 4% i el 10% respecte als valors històrics. Els canvis, però, podrien ser molt més importants si es consideren estacionalment, de manera que el risc d'inundacions i sobreiximents dels embassaments al final de l'hivern s'incrementarà significativament. Aquestes reduccions de les aportacions mitjanes es podrien traduir en reduccions de l'ordre de l'11 al 13% dels volums anuals i hiperanuals regulats, indicatius dels volums lliurables i, per tant, de la demanda garantida.

També s'han desenvolupat treballs genèrics sobre l'increment d'estrès hídric com els del WaterGAP a escala mundial i europea, en què el model hidrològic del cicle terrestre (vegeu els capítols 10 i 12) és completat amb un model d'usos de l'aigua i amb el balanç entre ells. Amb vista al futur, els usos urbans s'incrementen d'acord amb els escenaris demogràfics previstos pels organismes internacionals. Els resultats d'aquestes anàlisis (Henrichs i Alcamo, 2005) només es poden considerar orientatius a causa del seu caràcter regional, però mostren que en el nostre àmbit l'increment de l'estrès hídric (fruit del creixement de la demanda i de la disminució de la disponibilitat) serà molt important al llarg del segle XXI.

A escala estatal, Fernández (2002) i Garrote et al. (1999) han calculat els impactes esperables en els principals sistemes d'explotació de l'Espanya peninsular, així com els increments de la capacitat d'embassament que serien necessaris per a mantenir el mateix nivell de disponibilitat actual. Rodríguez Medina (2003) també ha estudiat la sensibilitat dels sistemes d'explotació espanyols per mitjà d'un indicador del recurs disponible. Per a aquests treballs les hipòtesis de reducció considerades són les establertes en el Llibre Blanc de l'Aigua (augment de temperatura mitjana anual entre 1 i 4 °C i descensos generals dels valors de la precipitació mitjana anual del 5% al 15%), completades amb alguns escenaris de models climàtics més actuals. S'han utilitzat models hidrològics com el de Budyko i el Simpa, i el Simges d'Aquatoool com a model de gestió dels recursos. En l'escenari de canvi climàtic moderat, la reducció mitjana de les aportacions a l'Espanya peninsular se situa entorn del 5%, mentre que en l'escenari de canvi més sever, la reducció conjunta de les aportacions arribaria al 14%, amb diferències regionals importants. La traducció en termes d'aportacions anuals disponibles (volum anual regulat), una vegada considerada la regulació dels embassaments a les conques internes de Catalunya, apunta a destacades reduccions que podrien arribar al 30%. Dit d'una altra manera: per a mantenir la mateixa garantia actual sota condicions de canvi climàtic, es va estimar que l'increment necessari de la capacitat d'embassament a les conques internes hauria de ser d'uns 14 hm³ (respecte uns 700 hm³ actuals).



En conjunt, i salvant les diferències entre els múltiples estudis, els resultats més generals indiquen reduccions dels recursos disponibles de prop del 5 a 10% en escenaris de canvi moderat (o en horitzons més propers), i fins i tot per sobre del 20% en escenaris més severos (o més allunyats en el temps). Aquests supòsits encara no incorporen els canvis significatius que es puguin donar en l'evaporació als embassaments (probables creixements del 5%), que tot i tractar-se d'un factor de segon ordre, també seran un element més afegit a escenaris futurs de més escassetat hídrica.

Finalment, una última referència la trobem en els percentatges de reducció de les aportacions mitjanes proposats en la recent Instrucció de planificació hidrològica, per a les conques intercomunitàries:

Taula 3. Percentatge de disminució de les aportacions naturals com a conseqüència d'incorporar l'efecte del canvi climàtic (Instrucció de Planificació Hidrològica, 2008).

Demarcació hidrogràfica	Percentatge de disminució
Miño - Sil	3
Cantàbric	2
Duero	6
Tajo	7
Guadiana	11
Guadalquivir	8
Segura	11
Xúquer	9
Ebre	5

Característiques i descripció de la gestió actual a Catalunya

La vulnerabilitat d'un sistema d'explotació envers els canvis climàtics dependrà en gran part de la relació entre els seus recursos disponibles, les demandes que han de satisfer i la capacitat de regulació de què disposen. A continuació exposarem breument la situació actual d'aquestes variables en el sistema Ter-Llobregat.

Dels 695 hm³ de capacitat de regulació existents a les conques internes de Catalunya, uns 611 hm³ corresponen als cinc grans embassaments dels quals depèn l'abastament del sistema Ter-Llobregat. Aquests embassaments són els de Sau (165 hm³) i Susqueda (233 hm³) al riu Ter, el de la Baells (109 hm³) a la capçalera del riu Llobregat, i els de la Llosa del Cavall (80 hm³) i Sant Ponç (24 hm³) al riu Cardener, afluent del Llobregat. La xarxa regional d'abastament gestionada per l'empresa pública Aigües Ter Llobregat (ATLL), que fa l'abastament metropolità en alta, és el nexa que lliga la gestió de les dues conques.

Els embassaments de Sau i Susqueda al Ter, situats en sèrie a la part mitjana de la conca, reben unes aportacions mitjanes totals d'uns 592 hm³/any, amb valors màxims que han superat 1.400 hm³/any i mínims de l'ordre de 257 hm³/any al llarg dels darrers 67 anys. A més de l'abastament de la regió metropolitana de Barcelona i el seu entorn (195 hm³/any), des d'aquests embassaments també se subministren els abastaments de la zona centre de la Costa Brava (9 hm³/any) i de Girona capital i part del seu entorn (10 hm³/any), a més dels regs del Baix Ter (80 a 100 hm³/any, dels quals més d'un 60% prové dels embassaments).

Figura 2. Imatges dels embassaments de Sau (18%), la Baells (23%) i la Llosa del Cavall (15 %) al febrer del 2008, durant els pitjors moments de la sequera.



La Llei que va permetre el transvasament cap a Barcelona l'any 1959 també preveu la satisfacció d'un cabal ecològic des dels embassaments (expressat sovint com un mínim de 3 m³/s al pas del riu Ter per Girona), tot i que aquesta referència s'ha de substituir pels nous valors i pel nou règim que s'han d'implantar amb el Pla sectorial de cabals de manteniment i els seus plans zonals.

Quant a la gestió hidroelèctrica, cal indicar que aquest ús està supeditat des de fa uns anys al règim de subministrament dels usos consumptius, de manera que només es turbinen els cabals alliberats per a servir les altres demandes. Un altre element destacable en la gestió d'aquests embassaments és el paper important que tenen en la laminació d'avingudes. Des que es van construir, la ciutat de Girona no ha patit grans estralls provinents del Ter, com s'havia esdevingut anteriorment.

Com es pot observar, la capacitat de regulació, les aportacions mitjanes i el conjunt de les demandes que en depenen tenen magnituds sensiblement similars, de manera que es pot dir que, de mitjana, aquests embassaments farien una regulació de caràcter anual. Malgrat tot, aquestes aportacions mitjanes no han d'amagar l'elevada variabilitat d'aquest riu. Molts anys els recursos se situen ben per sota d'aquests valors (i es compensen esporàdicament amb anys de grans aiguats) i possibiliten que es faci una gestió parcialment hiperanual, i que es reservin recursos d'un any més generós per a un altre de més sec (sense que les reserves permetin arribar a satisfer completament, però, les demandes de dos anys consecutius). Aquest marge de regulació en anys normals-secs serà aprofitat i optimitzat en el futur amb vista a aprofitar com a reserves una part dels volums que, substituïts per la dessalinització en altres zones del sistema, no hauran de ser desembassats.

A la conca del riu Llobregat els tres grans embassaments reguladors se situen a la part alta de la conca, de manera que les aportacions mitjanes que reben són, amb relació a la totalitat de la conca, petites: a la Baells uns 208 hm³/any de mitjana (que oscil·len entre un màxim històric d'uns 459 hm³/any i un mínim de 44 hm³/any) i a la Llosa del Cavall i Sant Ponç (situats en sèrie al Cardener) uns 101 hm³/any de mitjana (que oscil·len entre un màxim per sobre dels 200 hm³/any i un mínim de 32 hm³/any). En el cas de la Baells cal tenir present que uns 55 hm³/any no entren a l'embassament, sinó que es deriven abans mitjançant el Canal Industrial de Berga, i per tant no són regulats. D'altra banda, l'embassament de Sant Ponç rep els cabals de la Llosa del Cavall, i com que la interconca entre ells és petita, avui es pot considerar que actua com un contraembassament.



Figura 3. Localització dels embassaments de Catalunya. En gris es destaquen les conques d'aportació als embassaments dels rius Ter i Llobregat i en taronja l'àmbit de subministrament d'ATLL.



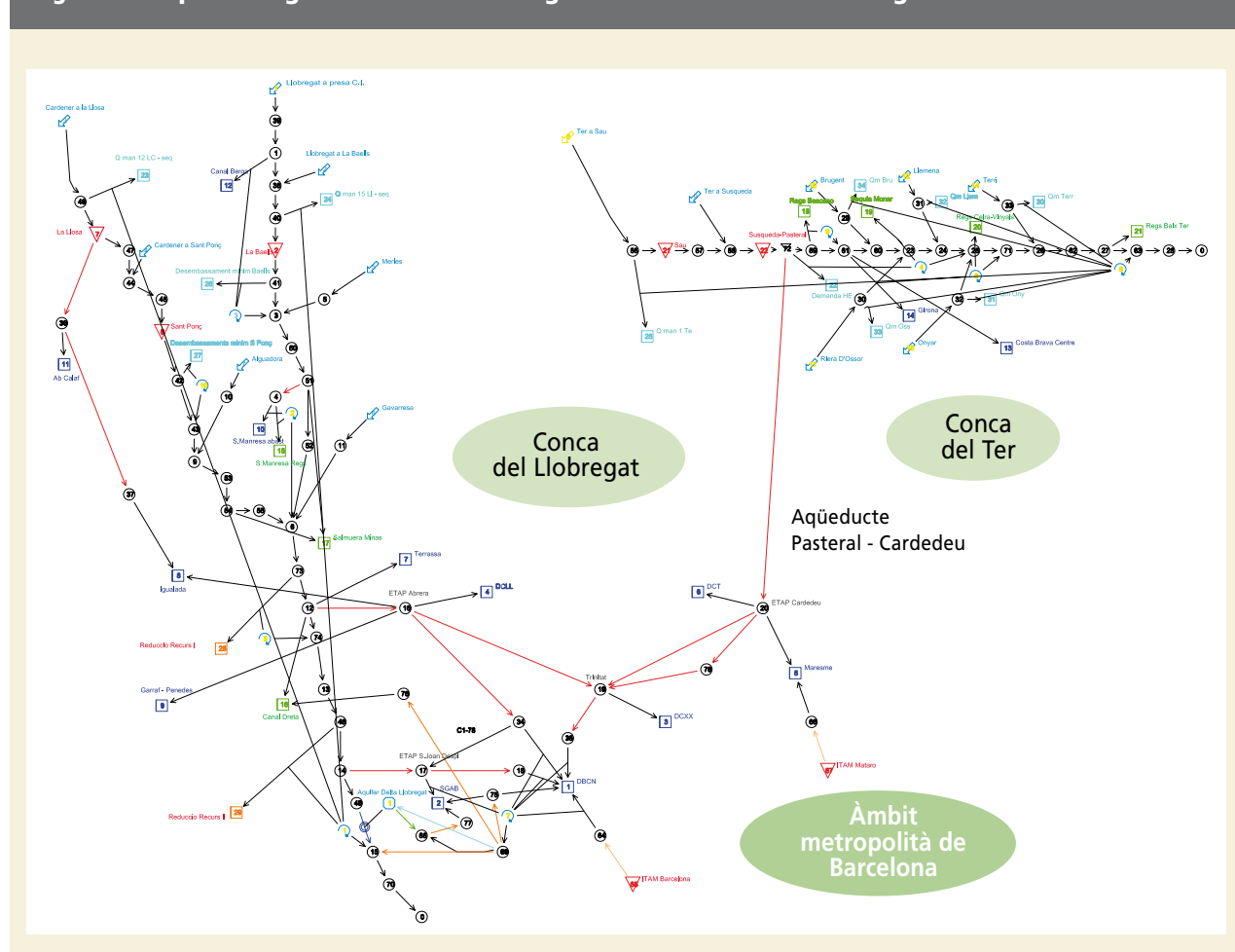
Es pot observar la irregularitat (diferència entre anys secs i humits, i també de manera intraanual o estacional) més gran de la hidrologia del riu Llobregat respecte a la del Ter. Aquesta diferència és parcialment deguda al fet que el pes de les aportacions nivals és més alt al Ter, i al fet que al Ter la conca regulada és més gran (uns 1.500 km² respecte a uns 800 km²). Un element que també incorpora més complexitat en l'explotació dels embassaments del Llobregat és la localització que tenen, tan allunyada dels punts principals de captació principal per a l'abastament, majoritàriament de la Regió Metropolitana de Barcelona (180 hm³/any), que fa que hi hagi temps de trànsit elevats (de 2 a 4 dies) i una gran interconca que aporta cabals no regulats amb un règim més aviat intermitent, la qual cosa de vegades ocasiona desajustos entre l'oferta del recurs i la demanda.

De nou, s'aprecia que també al Llobregat les aportacions mitjanes, els volums de les reserves i el volum dels usos que en depenen són sensiblement similars. Com en el cas del Ter, però, cal tenir present que la regulació a priori aproximadament anual sovint pren un caràcter parcialment hiperanual, i això permet garantir l'abastament dels anys més secs (tot i que de manera molt justa) amb reserves dels anys humits. També en aquesta conca, aquest marge de maniobra permetrà aprofitar els volums reservats gràcies a l'aportació des de les noves dessalinitzadores previstes.

Finalment, el sistema té un suport procedent d'aigües subterrànies, de les quals destaquen les procedents de l'aquífer de la Vall Baixa i Delta del Llobregat. En condicions normals, les aigües subterrànies aporten prop del 25% dels cabals consumits a la Regió Metropolitana de Barcelona (tot i que menys d'un 10 % al que es considera

xarxa regional en condicions normals), però més enllà d'aquesta xifra cal destacar la seva importància estratègica en moments de sequera. Durant el recent episodi d'enguany, per exemple, l'aqüífer del Llobregat ha arribat a subministrar, en els moments de màxima extracció, uns 4 hm³/mes a la xarxa regional, la qual cosa ha arribat a representar, de manera puntual, fins al 15 % de la demanda, doblant l'aportació mitjana al sistema d'ATLL.

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts en les diferents simulacions realitzades sobre el sistema Ter-Llobregat, en les quals s'ha analitzat la capacitat de satisfacció de la demanda per a cada una de les hipòtesis climàtiques que s'han descrit a la taula 1. Aquestes simulacions es fan amb el model SimGes, d'Aquatoool. La figura 4 mostra el graf del model utilitzat, en què es pot apreciar la complexitat del sistema, reflectida en la gran quantitat de nodes i connexions que s'hi representen.



A fi de comparar la vulnerabilitat del sistema enfront de les diferents hipòtesis de canvi climàtic en les aportacions, és necessari escollir algun paràmetre que indiqui el grau de satisfacció de les demandes que es pot assolir en cada cas. Les opcions són moltes: nombre de fallades al llarg de la sèrie per a una demanda determinada, dèficits màxims assolits, etc. En aquest informe hem escollit com a indicador un paràmetre que anomenarem *estimació de la capacitat de servei*. Es defineix com la màxima demanda anual que, d'acord amb la sèrie d'aportacions, el sistema pot servir de manera constant, sense fallar mai i de manera compatible amb els requeriments ambientals (és

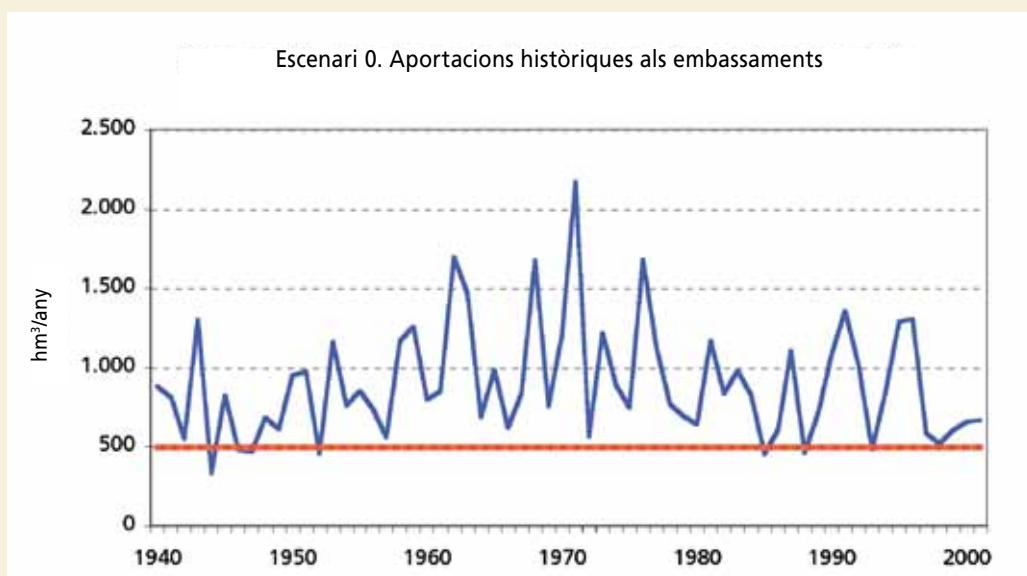


a dir, respectant els cabals de manteniment en els rius i no superant les extraccions sostenibles en els aqüífers).

Com s'ha explicat més amunt, la sèrie utilitzada en aquestes simulacions abasta des de l'any 1940 fins a l'any 2002. Cal tenir en compte, però, que el valor d'aquesta *capacitat de servei* depèn de l'extensió de la sèrie disponible. Així, si estenem la sèrie cap endarrere o cap endavant, és possible que apareguin episodis pitjors que els coneguts fins aleshores, i que el càlcul de la *capacitat de servei* resulti amb un valor inferior. És per això que molts opinen que l'expressió utilitzada en el món anglosaxó per a aquest concepte (*safe yield*) és equívoca i pot generar una falsa sensació de seguretat.

Per al sistema Ter-Llobregat, s'ha determinat que en l'Escenari 0 (és a dir, amb les aportacions històriques reals) la *capacitat de servei* del sistema s'estima en 495 hm³/any. La figura 5 mostra una comparació entre aquest valor i les entrades anuals als embassaments del Ter i el Llobregat. Evidentment, aquesta *capacitat de servei* no ha de coincidir amb l'aportació anual mínima enregistrada, ja que hi ha diversos factors que diferencien aquests dos valors: en sentit positiu, el sistema disposa, com hem vist, d'una certa capacitat de regulació hiperanual, i disposa del suport dels aqüífers de la regió metropolitana i d'alguns recursos no regulats; en sentit negatiu, una part de les aportacions s'ha de destinar als cabals de manteniment aigües avall dels embassaments. Tampoc ha de sorprendre que aquesta capacitat de servei estigui per sota de la demanda actual del sistema Ter-Llobregat (de la qual se simulen al model 434 hm³ d'abastament i 141 hm³ de regs), ja que com se sap la situació actual d'aquest sistema és propera a la fallida i no permet una satisfacció adequada de les necessitats ambientals.

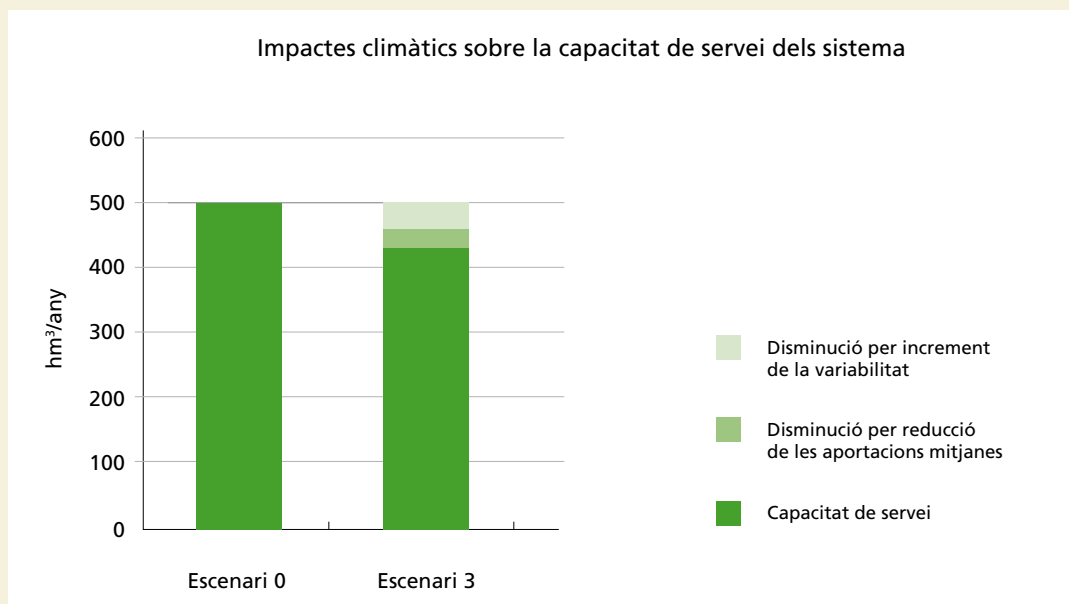
Figura 5. Simulació de les entrades als embassaments del sistema Ter-Llobregat durant la sèrie històrica 1940-2002 (en blau) i indicació de la capacitat de servei del sistema d'acord amb aquesta sèrie (en vermell).



A fi d'avaluar els impactes climàtics sobre aquesta *capacitat de servei* del sistema, s'han repetit les simulacions modificant les aportacions de la sèrie, d'acord amb les condicions de la taula 1. Els resultats es mostren a la taula 4.

Taula 4. Resultats de les anàlisis preliminars sobre els impactes del canvi climàtic en el sistema Ter-Llobregat, per als escenaris de modificació de les aportacions descrits a la taula 1.

Escenari	Capacitat de servei (hm³/any)	Reducció de la capacitat de servei
Esc. 0. Sèrie històrica	495	–
Esc. 1. Menys aportacions (–5%)	462	7%
Esc. 2. Més variabilitat (+10%)	453	8%
Esc. 3. Menys aportacions (–5%) i més variabilitat (+10%)	420	15%



Aquests resultats indiquen que un canvi en les aportacions com el que s'ha simulat en l'escenari combinat (Esc. 3) podria reduir notablement la capacitat de servei del sistema, entorn del 15%. Si es volgués desglossar aquesta reducció (a nivell teòric) entre els dos fenòmens considerats, obtindríem una distribució similar entre la part que es deu a unes aportacions mitjanes inferiors (7%) i la que prové de l'increment de variabilitat del règim hidrològic (8%). Aquest segon component, per tant, semblaria que té un impacte important en sistemes de regulació ajustada com el nostre. Com s'ha anat mostrant en apartats anteriors, aquests resultats estan en consonància amb d'altres similars estimats pels gestors de sistemes d'abastament a Austràlia o Califòrnia.

És important destacar que aquestes reduccions fan referència a episodis pèssims (que són els que condicionen la capacitat de servei del sistema) i per tant no requeririen, per a mitigar-les, una aportació alternativa de recursos hídrics de la mateixa magnitud amb caràcter constant, sinó un suport puntual adreçat a solucionar uns episodis molt poc freqüents. D'altra banda, en aquestes anàlisis no s'han considerat els futurs creixements de demanda o de noves infraestructures previstes, com s'indica a continuació.



Actuacions planificades en el sistema Ter-Llobregat

En apartats anteriors hem vist com el sistema Ter-Llobregat es troba actualment al límit de la seva disponibilitat, amb una demanda ja molt propera als recursos mitjans del sistema, i superior al que hem anomenat la seva *capacitat de servei*. Aquesta situació es manté des de fa molt de temps. Cal recordar que, d'ençà de l'entrada en servei de la presa de la Llosa del Cavall, a finals del 1998, no s'han produït ampliacions substantives en la capacitat d'aquest sistema. Aquesta situació de precarietat s'ha manifestat clarament durant els nombrosos episodis de sequera viscuts en els darrers vint anys. Durant aquests episodis s'ha pogut mantenir el subministrament urbà sense restriccions gràcies als esforços notables de gestió i de contenció de la demanda dels diferents usuaris, però, de manera temporal, ha estat impossible mantenir una adequada dotació per als usos agrícoles i ambientals. Es tracta, en definitiva, d'un dèficit estructural que cal resoldre amb un esforç conjunt, en el doble vessant de la gestió de la demanda i l'aportació de nous recursos.

D'altra banda, Catalunya ha experimentat un creixement demogràfic notable, que probablement es mantindrà durant els propers anys. Les previsions demogràfiques apunten a un creixement d'un milió d'habitants per al període 2006-2026. Tot i que les polítiques d'estalvi d'aigua ens estan ajudant a reduir de manera significativa la necessitat de nous recursos (i s'espera que assoleixin la xifra de 59 hm³/any d'estalvis en l'horitzó 2025 respecte als escenaris tendencials), el cert és que aquests increments de població comportaran un augment de les necessitats d'aigua en els abastaments urbans. Per a l'any 2025 s'estima que la demanda de les xarxes urbanes, que actualment és d'uns 750 hm³/any en el conjunt de Catalunya (incloent-hi consums domèstics, industrials i de serveis), s'incrementarà en uns 160 hm³/any. Una part important d'aquests increments, entorn dels 110 hm³/any, es produiran en zones servides pel sistema Ter-Llobregat.

La solució a aquesta situació de dèficit ha d'incloure, com hem dit, un increment de les aportacions disponibles. La necessitat de noves aportacions s'ha estimat en 300 hm³/any, dels quals 250 hm³/any correspondrien al sistema Ter-Llobregat. Aquestes aportacions provindran d'una solució combinada entre reutilització d'aigua depurada, recuperació d'aqüífers contaminats i dessalinització d'aigua de mar. Pel que fa a aquest darrer component, ja s'està ampliant la dessalinitzadora de Tordera I (fins a 20 hm³/any) i s'està acabant de construir la planta del Llobregat (60 hm³/any). A curt termini, s'iniciarà la construcció d'una segona planta a la Tordera (Tordera II) i d'una altra instal·lació al Foix.

Totes aquestes dessalinitzadores estaran connectades als punts neuràlgics del sistema Ter-Llobregat. Aquestes connexions es completaran amb l'execució de noves infraestructures de transport destinades a flexibilitzar el sistema i millorar-ne la connectivitat entre els costats Ter i Llobregat de la Regió Metropolitana. D'aquesta manera, les aportacions de les dessalinitzadores es podran repartir en el conjunt de l'àmbit i permetran disminuir els desembassaments i incrementar les reserves embassades. En conjunt, els recursos aportats permetran disposar d'un marge de seguretat suficient per a la satisfacció actual i futura de les demandes (almenys, fins a l'any 2025), i per a la compatibilitat adequada amb els cabals ambientals necessaris, especialment en el riu Ter.

Els efectes del canvi climàtic són un altre element que ja s'està incorporant a la planificació vigent i que tindrà una important repercussió sobre la gestió dels embassaments. De fet, un element de discussió entorn del canvi climàtic és que, si el canvi ja s'està constatant, posa en dubte la representativitat dels registres i els règims històrics (més recents) en els quals es basa la planificació, de manera que les garanties valorades fins ara, respecte a les sèries històriques d'aportacions, podrien haver estat sobrevalorades, havent-se'n subestimat els dèficits. Cal dir, però, que encara hi ha grans incerteses a l'hora de quantificar els impactes climàtics sobre els recursos hídrics a escala local, especialment en el nostre àmbit mediterrani, i cal recordar que els seus efectes més significatius es plantegen, d'acord amb el consens més general de la comunitat científica, a terminis temporals habitualment més enllà del 2030 o 2040. Tot i això, un plantejament prudent i preliminar, que es delimitarà millor amb treballs que encara estan en fase de desenvolupament, recomanaria considerar als treballs de Planificació Hidrològica

una reducció d'aportacions superficials i de recàrrega als aqüífers de l'ordre del 5 % per a l'horitzó 2025-2030 respecte als registres de les sèries històriques, d'acord amb les simulacions que es mostren en aquest document.

Conclusions

El clima no és estàtic i les assumpcions que s'han fet sobre el futur, basades en el clima del passat recent, poden ser inapropiades per manca de representativitat. Els gestors de l'aigua hauran de considerar les condicions futures potencials sota el canvi climàtic en el disseny de les noves grans infraestructures, i les assumpcions sobre la probabilitat, la freqüència o la magnitud d'esdeveniments extrems s'hauran de revisar amb cura.

D'altra banda, actualment ja hi ha un estrès hídric important en bastants sistemes de gestió, en absència del canvi climàtic. Els creixements previsibles de demanda futura fruit de la dinàmica demogràfica i dels usos del sòl mostren, a més, una tendència a l'increment important d'aquest estrès. Tot i les millores que es vagin desenvolupant (estalvi i eficiència en l'ús de l'aigua, reutilització i altres recursos nous o recuperats), el canvi climàtic pot representar l'increment d'estrès hídric addicional que avanci o anticipi la superació, generalitzada, de la màxima capacitat de servei de molts sistemes. Avui, el sistema Ter-Llobregat té una capacitat màxima de servei de l'ordre de 495 hm³/any, que tot i que és inferior a la demanda anual (d'uns 575 hm³), encara es pot considerar suficient per a una bona part dels anys i només és crítica en els anys més secs. La freqüència més gran i la intensitat més accentuada de les sequeres futures per efecte del canvi climàtic poden reduir aquesta capacitat de servei entre el 7% i el 15%, de manera que aquests períodes crítics poden créixer quant a gravetat i freqüència de manera molt destacada, fins a assolir situacions gairebé continuades, amb un dèficit crònic.

La planificació prevista considera el desenvolupament de noves infraestructures hidràuliques, fonamentalment per a l'aportació de nous recursos que compensaran el creixement de demanda previst (atenuat per les polítiques, ja en marxa, de gestió i estalvi de la demanda). L'horitzó temporal per a aquests escenaris és relativament proper (entorn del 2015-2025), mentre que una bona part dels horitzons en els treballs de canvi climàtic s'han orientat més enllà del 2030 o el 2040. Malgrat això, cal incorporar aquests plantejaments en la planificació actual, per a desenvolupar mesures d'adaptació. Ateses les incerteses que encara envolten els pronòstics a escala local sobre els recursos hídrics, caldrà preveure l'adequació continuada de les mesures d'adaptació, segons les observacions en l'evolució dels efectes del canvi climàtic a partir del seguiment acurat que cal fer des d'ara.

Referències bibliogràfiques

AYALA-CARCEDO, F. (2001). *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad del Plan Hidrológico Nacional 2000*. En Arrojo ed. *El Plan Hidrológico Nacional a debate*, Bakeaz, Fundación Nueva Cultura del Agua, 51-66.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES (2006). *Progress on Incorporating Climate Change into Planning and Management of California's Water Resources*. Sacramento, Estats Units.

EEA (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY) (2004). *Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment*. (http://reports.eea.europa.eu/climate_report_2_2004/en)

FERNÁNDEZ, P. (2002). *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Aplicación en 19 cuencas en España*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (ETSICCPM), Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid.

GARROTE, L.; RODRÍGUEZ, I. C.; ESTRADA, F. (1999). *Una evaluación de la capacidad de regulación de las cuencas de la España peninsular*. VI Jornades Espanyoles de Preses. Vol.2, 645-656. Málaga.



HENRICH, T.; ALCAMO, J. (2002). Europe's water stress today and in the future.

(http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente/kwws/5/ew_5_waterstress_low.pdf)

HOWE, C.; JONES, R. N.; MAHEEPALA, S.; RHODES, B. (2005). *Implications of Potential Climate Change for Melbourne's Water Resources*.

(http://www.melbournewater.com.au/content/library/news/whats_new/Climate_Change_Study.pdf)

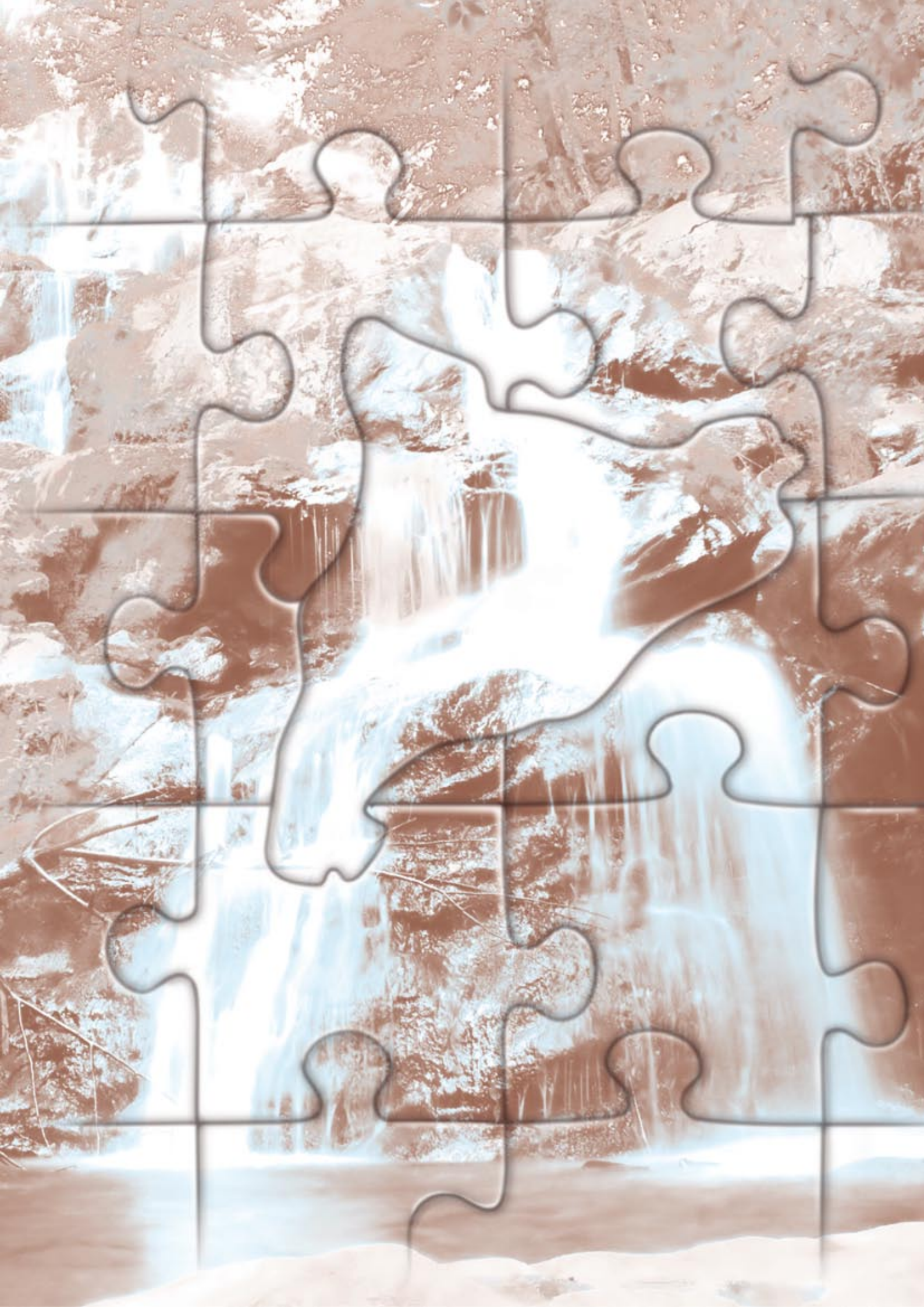
IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANNEL FOR CLIMATE CHANGE) (2007). *IV Informe d'avaluació de l'IPCC. Base científica, impactes, adaptació i mitigació*. Traducció del Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS) i del Departament de Medi Ambient i Habitatge.

MAS-PLA, J. (2005). *B 8. Recursos hídrics, dinàmica hidrològica i canvi climàtic. Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS). Barcelona

MIMAM-CEDEX (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE-CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS) (1998). *Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y demandas de riego en determinadas regiones de España*. Madrid.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO (200). *Instrucción de planificación hidrológica*. Orden ARM/2656/2008, de 10 de setembre.

RODRÍGUEZ MEDINA, I. (2003). *Sensibilidad de los sistemas de explotación de recursos hídricos frente al cambio climático en España*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (ETSICCPM), Uiversidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid.





Impactes sobre els ecosistemes aquàtics

Resum

Narcís Prat, Universitat de Barcelona

Antoni Munné, Agència Catalana de l'Aigua

Els escenaris climàtics previstos a Catalunya per als propers anys dibuixen, a causa de l'increment en les emissions de gasos d'efecte hivernacle i del canvi global en general, una situació d'increment de les temperatures i també de canvis en el règim de les precipitacions, amb més irregularitat i més intensitat de fenòmens extrems (vegeu els capítols 5, 6 i 7). Això pot tenir conseqüències en la quantitat i, alhora, en la qualitat de l'aigua que circula pels rius, estanys, embassaments, zones humides, etc., i una incidència directa i indirecta sobre l'estructura i el funcionament dels ecosistemes associats (Allan *et al.*, 2005), tal com s'explica i es concreta en capítols posteriors d'aquest treball.

En resum, i d'una manera simplificada, els pronòstics indiquen menys innivació a les parts altes de les muntanyes, amb una fusió més precoç de la neu i un retard en la congelació de l'aigua, cosa que, lògicament, ha d'afectar les capçaleres dels rius i els estanys d'alta muntanya. L'escolament més escàs des de les capçaleres pot provocar, també, que les reserves d'aigua embassada siguin menors, i que, juntament amb la pèrdua d'energia en l'entrada als embassaments de l'aigua del desglaç, pugui augmentar el temps de retenció de l'aigua en els embassaments i la persistència de la termoclina (capítol 17). Alhora, també, es pronostica una reducció en el cabal circulant pels rius per l'evapotranspiració més elevada, fins a arribar a assecar alguns trams de caràcter lleument temporal, com ha passat en altres països (Bond *et al.*, 2008). A la vora del mar, de les llacunes litorals i dels ecosistemes talasohalins, els canvis ja són importants a causa de l'augment, fins ara moderat, del nivell del mar, que modifica el règim hidrològic i la dinàmica salina dels sistemes costaners, però en el futur poden ser dramàtics (capítol 21), com en el cas del deltes, que poden arribar, en part, a desaparèixer (capítol 20). Les comunitats d'organismes que patiran més aquests canvis seran, probablement, els peixos dels ecosistemes aquàtics continentals, que ja estan molt malmesos en l'actualitat per la contaminació de les aigües, però sobretot per la manca de cabals mínims (o ecològics) circulants i per la desaparició del seu hàbitat (capítol 19). Aquesta situació afavoreix l'entrada i establiment d'espècies invasores, les quals aprofiten els canvis en el règim de cabals, la modificació de l'hàbitat i l'increment de les temperatures per a competir amb avantatge sobre les comunitats pròpies dels sistemes locals (Alcaraz i García-Berthou, 2007; Ribeiro *et al.*, 2008).

Tots aquests aspectes s'analitzen en aquest treball, amb estudis realitzats per diferents especialistes en cada un dels temes més rellevants, en els quals es mostren tant les certeses i possibles escenaris de futur, com les seves incerteses.

Efectes en l'estructura i la funció dels ecosistemes aquàtics deguts als canvis climàtics

Els canvis que es produeixen en els ecosistemes aquàtics per l'increment de temperatura i per la variació del règim pluviomètric originen modificacions en la seva estructura i la seva funció. Si l'increment de gasos d'efecte d'hivernacle farà pujar la temperatura de l'aire, com a conseqüència pujarà la temperatura de l'aigua, i això afectarà el cicle biològic de moltes espècies. Si l'evapotranspiració més elevada i el canvi en el règim de pluges fa que circuli menys aigua pels rius i amb més irregularitat, aquesta situació provocarà, o pot provocar, que circuli

menys aigua pels estanys i els embassaments, en general una reducció en les taxes de renovació de l'aigua, la modificació de l'hàbitat, i el decreixement dels fluxos turbulents que contribueixen a l'autodepuració i a la dinàmica de nutrients dels rius. Un resum dels efectes dels possibles canvis que es poden produir en els nostres ecosistemes es mostra a la taula 1 i s'esquemmatitza a la figura 1. Per a una visió global del tema a Espanya, és interessant consultar Álvarez-Cobelas *et al.* (2005).

Taula 1. Possibles canvis i efectes produïts en els ecosistemes aquàtics per l'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle.

	Rius	Aiguamolls	Estanys i embassaments	Aigües costaneres i aiguamolls litorals
Canvis				
Increment de temperatura	++	++	++	++
Durada de l'estratificació tèrmica			+++	+++
Duració del gel			---	
Cabals (entrada a estanys i aiguamolls)	--	--	--	
Règim de cabals alterat	++	+	+	
Taxa de residència de l'aigua		++	++	
Assecament	++	++		
Taxa de residència incrementada		+	++	
Eutrofització	++	++	++	++
Efectes				
Increment d'espècies invasores	++	++	++	++
Canvis del cicle de vida	++	++	++	++
Rang altitudinal de les espècies	++		++	
Producció primària	+/-	+/-	+/-	+/-
Ràtio C/N a les fulles	--			

Als ambients lenfítics, a conseqüència de les possibles reduccions del cabal, que afecten sobretot el temps de retenció de l'aigua en la massa d'aigua, la formació i la permanència de la termoclina pot canviar de manera rellevant, i aquest és un procés clau que pot modificar de manera important la qualitat de les aigües, que en molts d'aquests sistemes (per exemple, els embassaments) és usada per a l'abastament urbà a Catalunya. L'increment de l'eutrofització i l'increment en la presència d'algunes espècies d'algues, especialment les que poden ser tòxiques, en poden ser la conseqüència. Els efectes actuals i futurs d'aquests canvis sobre els estanys i els embassaments catalans s'expliquen en dos capítols d'aquest informe de manera detallada.

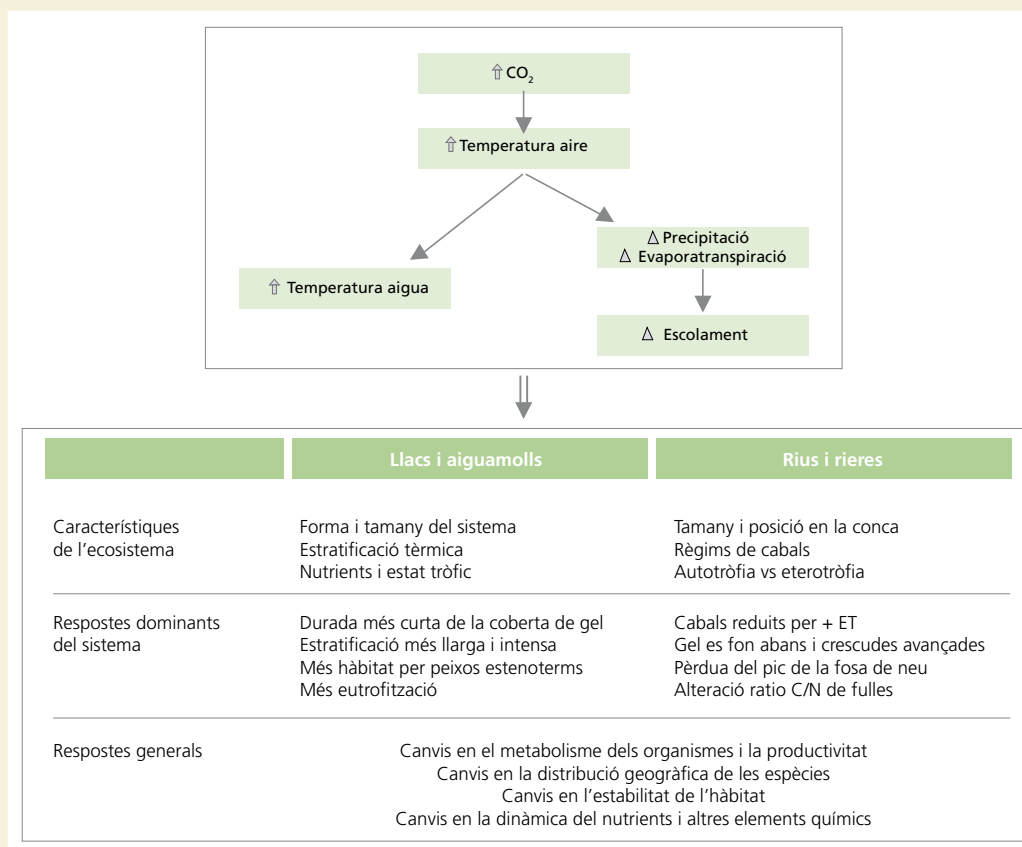
En el cas dels rius, l'increment de temperatura també produirà canvis en el cicle vital d'algunes espècies, però l'efecte més important es produirà en termes de descens dels cabals circulants i de la irregularitat que tindran. En un país mediterrani com el nostre, el perill de transformar molts dels nostres rius amb cabals menors de 100 L/s en rius intermitents (que s'eixuguen normalment a l'estiu), i de transformar els rius temporals (que només flueixen a la primavera) en lleres de trams totalment secs, és elevat. Aquests canvis poden produir modificacions en les comunitats que habiten aquests sistemes, amb possibles entrades d'espècies oportunistes i, en alguns casos, invasores, i l'increment de la contaminació per la capacitat més



baixa de dilució d'aquests sistemes. Aquests aspectes també es tracten en un capítol específic d'aquest informe.

El mateix perill (increment de dessecació i augment de l'eutrofització i la contaminació) és el que afectarà els nostres aiguamolls, amb el perill evident de desaparició d'uns ecosistemes que són clau per al manteniment de la considerable biodiversitat de Catalunya. Perill de desaparició que també plana sobre molts dels aiguamolls i ecosistemes costaners amenaçats, a més de la dessecació i la contaminació, per la pujada del nivell del mar. Això afectarà sistemes tan importants com el delta de l'Ebre. També dediquem un capítol (el 20) a aquest ecosistema tan singular, les conclusions del qual es poden aplicar de manera general a altres ecosistemes costaners de Catalunya.

Figura 1. Efectes principals sobre llacs, embassaments, aiguamolls i rius i rieres dels canvis previsibles que es produiran com a conseqüència de l'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle. (Taula modificada d'Allan et al., 2005).



Finalment, en aquest informe es presenta un treball sobre els canvis que ja s'han produït en els ecosistemes marins propers a la costa de Catalunya, on ja és palès el canvi ambiental degut a l'increment de temperatures (capítol 21). Aquí, com en molts altres ecosistemes aquàtics, els canvis mostren l'arribada de moltes espècies foranes que actuen, en molts casos, desplaçant les espècies autòctones, molt ajudades pels canvis que l'home ha produït en tots els ecosistemes aquàtics. Aquest capítol es pot comparar amb el que es presenta en una altra part d'aquest informe sobre comunitats terrestres (capítol 2).

Efectes sobre els béns i serveis del cicle de l'aigua

Els canvis en l'estructura i el funcionament dels ecosistemes aquàtics impliquen una modificació important en els béns i serveis que ens proporcionen els ecosistemes. A la taula 2 hi ha la llista dels principals béns i serveis dels ecosistemes aquàtics que seran modificats pel canvi climàtic (taula modificada d'Allan *et al.*, 2005). Molts dels aspectes que s'esmenten a la taula ja es tracten en altres capítols d'aquest informe; aquí ens centrem sobretot en els canvis en la biodiversitat, que, com veiem a la taula, serà (o ja ha estat) alterada pels canvis climàtics, o canvis globals, ja que s'han produït o que es preveu que tindran lloc en el futur. En els capítols que segueixen d'aquesta part dedicada als ecosistemes es comenten moltes d'aquestes afectacions. També es pot trobar una revisió de com les alteracions en el cicle global de l'aigua afecten l'estructura, la funció i els serveis dels rius a Sabater (2008), treball que permet fer-se una idea de quins serveis seran afectats pel canvi climàtic.

Taula 2. Possibles efectes del canvi climàtic en les funcions ambientals i socioeconòmiques de l'aigua.

	Rius	Estanys	Embas-saments	Aiguamolls	Deltas	Aigües costaneres i aiguamolls litorals
Quantitat i qualitat de l'aigua						
Usos urbans	x		x			
Usos agrícoles	x		x	x	x	
Refrigeració de centrals	x		x			x
Qualitat de l'aigua (eutrofització, dilució de la contaminació)	x	x	x	x	x	x
Altres serveis						
Pesca comercial	x	x	x	x	x	x
Aqüicultura	x				x	x
Marisqueig					x	x
Protecció de la costa i les dunes					x	x
Hidroelectricitat	x	x	x			
Control de crescudes	x		x			
Transport de sediments	x		x		x	
Turisme i oci	x	x	x	x	x	x
Alteracions de la biodiversitat	x	x	x	x	x	x

Impactes actuals i futurs sobre els ecosistemes aquàtics catalans

Pel que fa a l'impacte del canvi climàtic sobre les característiques i les comunitats d'organismes a Catalunya i la previsió que es pot fer amb vista al futur, la informació que tenim és molt limitada, tal i com s'explica als capítols següents. A continuació realitzem una síntesi del que s'explica en ells.

D'una banda, tenim algunes constatacions del fet que ja s'han produït alguns efectes sobre els organismes o el funcionament dels ecosistemes degut a l'augment de temperatura. Entre elles assenyallem els canvis de comunitats planctòniques que s'han detectat en els sediments dels llacs de muntanya o en l'abundància de cists de crisòfides, l'augment de l'estratificació tèrmica i els seus efectes (anòxia) en l'embassament de Sau, l'increment



de les espècies més termòfiles de peixos dels rius i els canvis altitudinals d'algunes espècies (com la bagra), canvis en l'emergència (més primerenca) d'alguns insectes aquàtics al riu Ebre, o canvis en les pautes de distribució de diferents organismes marins i augment de les mortalitats en massa que s'esdevenen a la Mediterrània. Podem dir que l'evidència del canvi, al menys a petita escala, ja és palesa entre nosaltres, tot i la incertesa de la seva persistència o evolució.

D'altra banda, les previsions per al futur són en tots els casos preocupants i ultra l'agreujament de tots els efectes suara esmentats, en podem preveure d'altres. A la muntanya els estanys petits corren el risc de desaparèixer, i el funcionament dels més grans corre el risc de canviar notablement en disminuir l'extensió i la durada de la capa de gel. Això pot influir en un canvi de les comunitats i en la proliferació d'espècies invasores. Aquesta situació de canvi de comunitats i de proliferació d'altres espècies es produirà en tots els ecosistemes i comunitats, des de l'alta muntanya fins al fons del mar. En el cas dels peixos, per exemple, cal esperar una reducció de les poblacions de peixos autòctons i alhora més proliferació dels termòfils (habitualment espècies al·lòctones), així com una reducció de l'àrea de distribució dels peixos d'aigües més fredes, com ara la truita.

En els rius, tant l'increment de les sequeres com de les riuades poden repercutir de manera important en les comunitats i afavorir alguns grups enfront dels altres; per exemple, en el cas dels insectes aquàtics, els propis d'aigües tranquil·les, com els odonats, els heteròpters i els coleòpters, poden incrementar la seva presència enfront als més típicament reòfils, com els efimeròpters, els tricòpters i els plecòpters, tal com s'ha vist en estudis recents en petits rius poc pertorbats per part de l'home en anys de sequera. La sequera, evidentment, també tindrà un reflex en les comunitats de peixos que poden arribar a desaparèixer, especialment en les endèmiques lligades a petits cursos d'aigua. En aquest treball no s'ha estudiat l'efecte del canvi climàtic sobre les zones humides continentals, però també cal esperar una reducció de la seva àrea i un augment de la contaminació que hi haurà, que evidentment farà desaparèixer unes espècies i en farà aparèixer unes altres, sobretot (altra vegada) les invasores més termòfiles.

Al mar i a la zona litoral, els efectes sobre les comunitats també seran rellevants. En el cas de les llacunes litorals, l'increment del nivell del mar és la pitjor amenaça, que pot arribar a fer desaparèixer fins a la meitat del delta de l'Ebre. Pel que fa als ecosistemes marins, l'expansió de les espècies exòtiques també és la principal amenaça.

Cal fer un esment especial de l'afectació dels serveis ambientals que els ecosistemes aquàtics ens proveeixen. En el cas dels embassaments, no només es tracta d'una disminució de recursos, sinó que per efecte de la taxa de residència més elevada en disminuirà la qualitat, amb l'encariment consegüent dels tractaments necessaris per a potabilitzar l'aigua. Podem dir el mateix de les aigües dels rius que es fan servir per a abastament, que encara seran pitjors pel que fa a la seva qualitat prepotable pels canvis produïts en les comunitats. Per exemple, un nombre més alt d'algues potencialment tòxiques causat per una contaminació més elevada deguda a uns cabals menors en el Llobregat, pot fer molt car el tractament de les aigües a la part baixa del curs. Evidentment, la pesca en quedarà afectada, tot i la poca importància que actualment té des del punt de vista econòmic; però pensem en la pesca recreativa, que practiquen milers d'aficionats i que minvarà (cosa que, de fet, empitjorarà la qüestió de la preponderància de les espècies que han estat introduïdes, que són les més buscades i pescades pels aficionats). Tots els serveis ambientals dels deltes i de les zones costaneres seran considerablement afectats, sigui la pesca o el bany.

És evident que en el camp de la gestió i la diagnosi de l'estat de les masses d'aigua (rius, estanys, zones humides, etc.), els canvis en el règim de cabals induïts a través del canvi global i el canvi climàtic hauran de fer replantejar els valors de referència avui dia usats, i relativitzar els possibles programes de mesures dimensionats per a cada cas. Els objectius de qualitat es poden veure greument afectats i probablement hauran de ser revisats per ajustar-los al nou context ambiental. Existeixen diversos anàlisis que demostren que en períodes de sequera són diversos els indicadors biològics i estàndards de referència avui usats que pateixen significatius canvis.

En síntesi, per als ecosistemes aquàtics en general les perspectives són d'una reducció accelerada de la biodiversitat, amb una simplificació de les comunitats, que passaran a dominar en primera instància les espècies vingudes d'altres llocs o les espècies que s'adaptin a les condicions més termòfiles i més inestables. De l'abast i l'extensió de les mesures de mitigació i adaptació que es prenguin, en dependrà, també, el grau de pèrdua d'identitat dels nostres ecosistemes aquàtics.

Referències bibliogràfiques

- ALCARAZ, C.; GARCÍA-BERTHO, E. (2007). «Life history variation of invasive mosquitofish (*Gambusia holbrooki*) along a salinity gradient». *Biological Conservation*, núm. 139, pàg. 83-92.
- ALLAN, J. D.; PALMER, M. A.; POFF, N. L. (2005). «Climate change and freshwater ecosystems». A: T. E. Lovejoy, L. Hannah (eds). *Climate Change and Biodiversity*. Yale University Press. New Haven CT (Estats Units). Pàg. 272-290.
- ÁLVAREZ-COBELAS, M.; CATALAN, J.; GARCÍA DE JALÓN, D. (2005). «Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales». A: J. M. Moreno (ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha. Pàg. 113-146.
- BOND, N. R.; LAKE, P. S.; ARTHINGTON, A. H. (2008). «The impacts of drought on freshwater ecosystems: an Australian perspective». *Hydrobiologia*, núm. 600, pàg. 3-16.
- RIBEIRO, F.; ELVIRA, B.; COLLARES-PEREIRA, M. J. (2008). «Life-history traits of non-native fishes in Iberian watersheds across several invasion stages: a first approach». *Biological Invasions*, núm. 10, pàg. 89-102.
- SABATER, S. (2008). «Alterations of the global water cycle and their effects on river structure, function and services». *Freshwater Reviews*, núm. 1, pàg. 75-88.



16. Els estanys d'alta muntanya com a sensors del canvi climàtic

Marc Ventura

Centre d'Estudis Avançats de Blanes, CSIC

Els estanys d'alta muntanya com a sensors del canvi climàtic

La situació particular dels estanys d'alta muntanya fa que els organismes que hi viuen estiguin adaptats a unes condicions que tradicionalment es consideren extremes per a la vida. La majoria tenen aigües molt poc mineralitzades i amb molt pocs nutrients pel fet que es troben sobre roques granítiques i en els sòls poc desenvolupats de les seves conques hidrològiques. Com a conseqüència d'això, els organismes tenen les dificultats associades a viure en condicions de dilució extrema. D'altra banda, l'altitud és un factor amb conseqüències múltiples. A causa d'una atmosfera més prima, la radiació i en especial la fracció ultraviolada (UV-B) augmenten, i consegüentment els organismes estan subjectes a radiacions nocives durant el període lliure de gel. D'altra banda, la temperatura disminueix progressivament amb l'altitud i, per tant, la formació i la durada de la coberta de gel i de neu varia linealment amb l'altitud (figura 1). Finalment, l'altitud també és sinònim de localització remota i limita l'accessibilitat dels organismes que colonitzen aquests estanys. A causa de les dimensions relativament petites dels estanys d'alta muntanya, la importància de la conca és cabdal en l'entrada de nutrients i matèria orgànica i, en general, en la dinàmica d'aquests ecosistemes. Les conques dels estanys d'alta muntanya són relativament petites comparades amb els estanys de les zones baixes, i com a conseqüència les entrades atmosfèriques també tenen una forta influència en les aigües que hi drenen i també en les característiques de l'aigua dels estanys. Per tant, si combinem la sensibilitat dels ecosistemes lacustres d'alta muntanya a forces externes, amb la seva situació remota i, per tant, llunyana a les àrees amb una forta activitat antròpica, ens trobem que els ecosistemes lacustres d'alta muntanya són uns sensors excel·lents i uns bons enregistradors dels canvis ambientals passats i presents (Catalan *et al.* 2006).

Figura 1. (a) Durada de la coberta de gel en funció de l'altitud a estanys del Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici; i (b) Sensibilitat de la durada de la coberta de gel en funció de l'altitud i augment o disminució de la temperatura (simulació extreta de Thompson *et al.*, 2005).

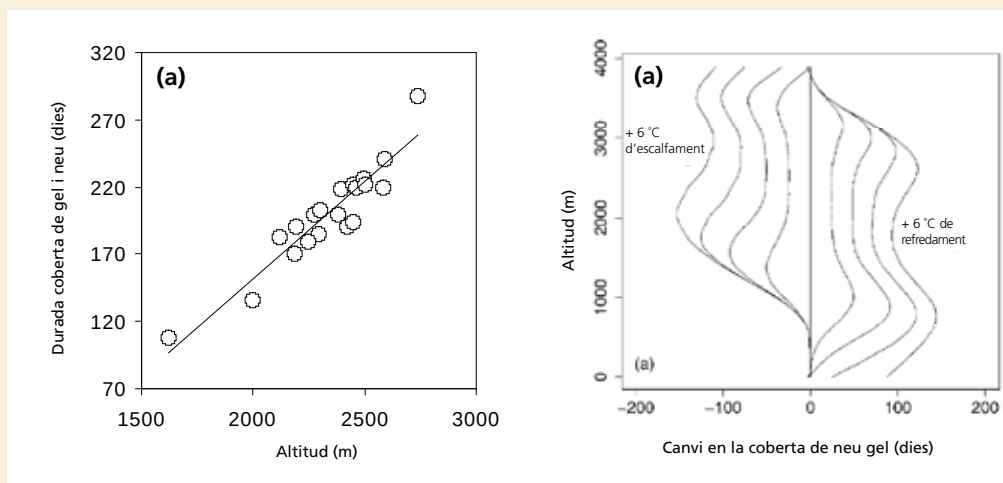
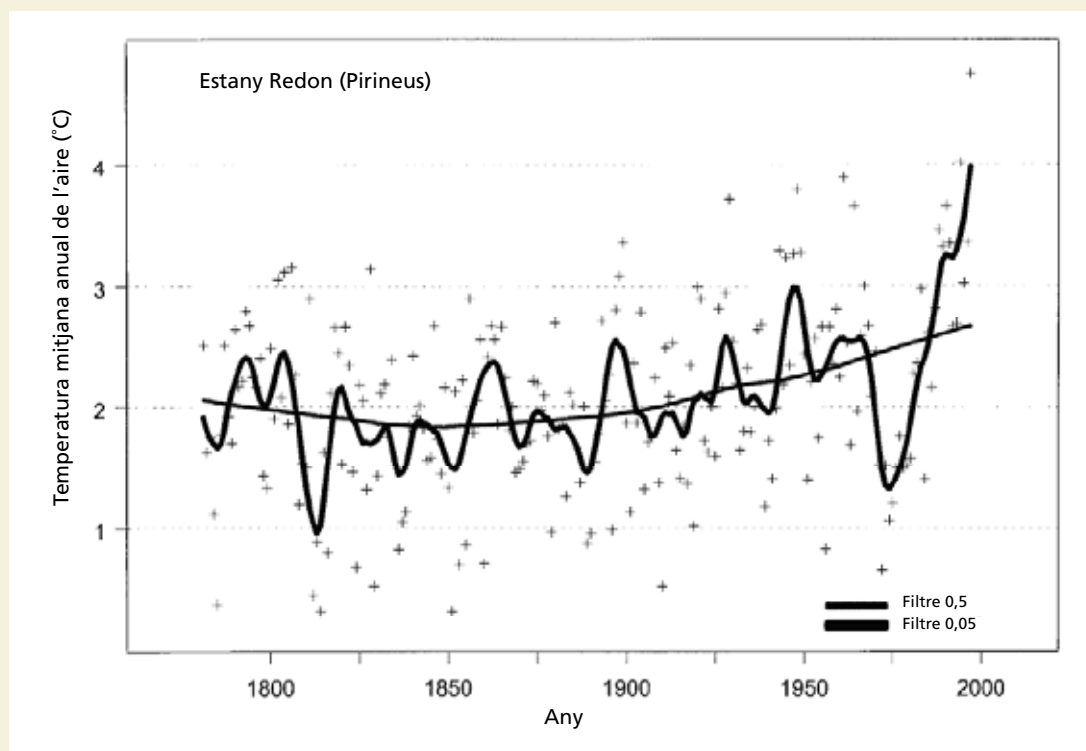


Figura 2. Temperatura mitjana anual a l'estany Redon (Val d'Aran) al llarg dels darrers dos segles (Catalan et al., 2002).

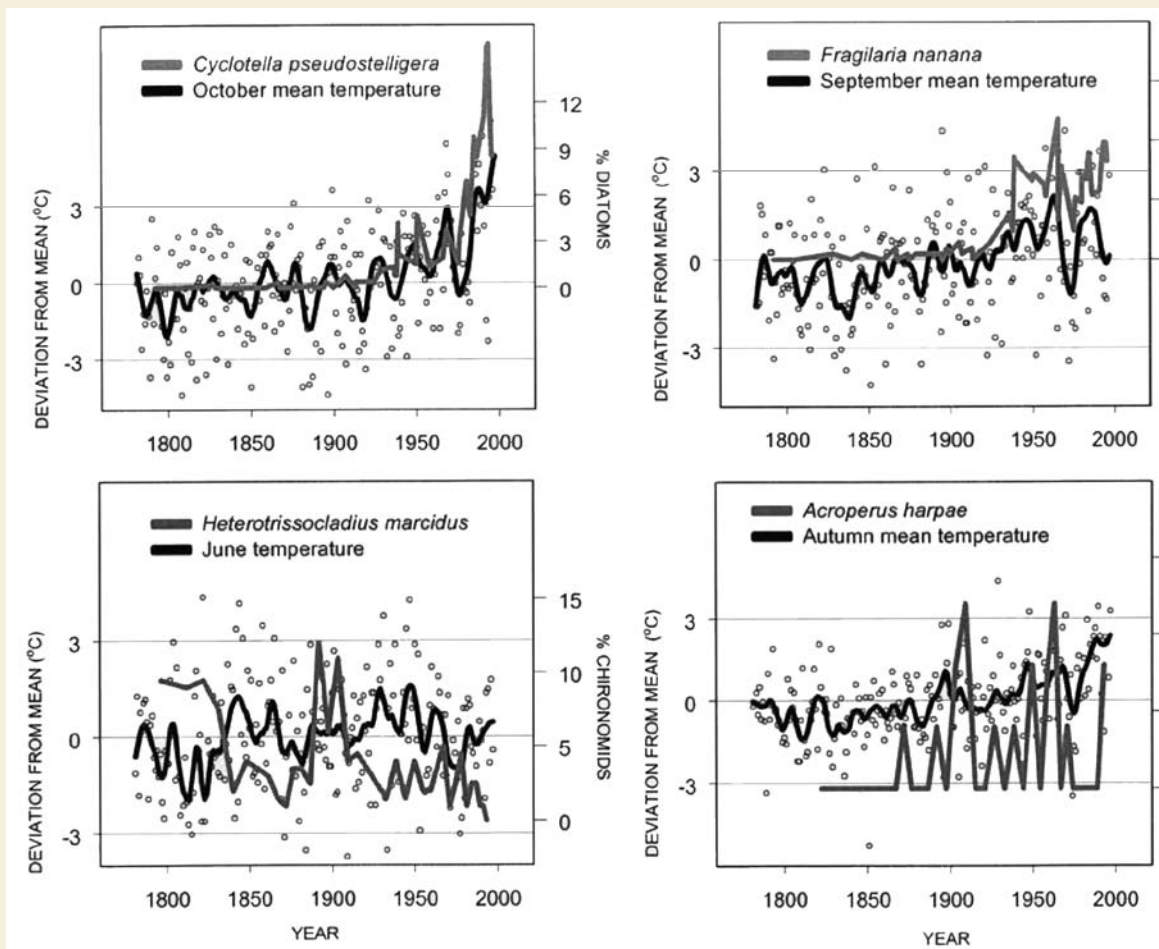


Paleolimnologia, una mirada al passat per a entendre el futur

Entendre els efectes del canvi climàtic, i en especial distingir la influència antròpica de les oscil·lacions naturals, requereix registres a llarg termini de canvis en els ecosistemes. En general, mesures instrumentals a llarg termini són escasses i com a màxim arriben a pocs segles d'antiguitat (figura 2). La necessitat de disposar de sèries més llargues ha afavorit el desenvolupament de noves tècniques per a reconstruir les fluctuacions climàtiques del passat utilitzant diferents aproximacions com ara testimonis de gel, estalactites, anells dels arbres, paleolimnologia, pol·len, etc. Entre aquestes aproximacions, la paleolimnologia s'ha utilitzat durant les darreres dècades per a reconstruir els efectes de l'acidificació i l'eutrofització d'una manera quantitativa. Els mètodes desenvolupats amb aquesta aproximació s'apliquen ara a reconstruir les condicions climàtiques del passat, que complementen aproximacions més tradicionals (Battarbee, 2000). Els canvis en els conjunts d'espècies algals canvien d'una manera relativament directa amb algunes condicions limnològiques com el pH o el fòsfor. Això fa que sigui relativament senzill reconstruir aquests paràmetres a partir de canvis en les comunitats algals que queden preservades al sediment (per exemple, diatomees, cists de crisofícies, etc.). La paleolimnologia es basa en l'aplicació d'aquesta aproximació espai per temps. En canvi, la reconstrucció directa de components climàtics no és tan evident pel fet que els organismes no necessàriament responen directament a canvis en la temperatura. Entre els diferents organismes que s'ha vist que responen a canvis en la temperatura hi ha els cists de crisofícies (Pla i Catalan, 2005), algunes diatomees planctòniques, els quironòmids i alguns cladòcers (figura 3) (Catalan et al., 2002; Heegaard et al., 2006). Cadascun d'aquests organismes respon a diferents paràmetres climàtics o èpoques de l'any, a causa de la interacció amb els seus cicles de vida particulars. Per tant, per a poder fer reconstruccions climàtiques fiables, s'utilitza una combinació de paràmetres i grups d'organismes tan àmplia com sigui possible.



Figura 3. Comparació entre la desviació de la temperatura de l'aire en diferents mesos de l'any i el registre sedimentari per a les espècies de diatomees (*Cyclotella pseudostelligera* i *Fragilaria nana*), el quironòmide *Heterotrissocladius marcidus* i el cladòcer *Acroperus harpae* (Catalan et al., 2002).



Efectes sobre els estanys d'alta muntanya

Tot i que falten més estudis concrets per a determinar amb més precisió quins seran els efectes sobre els estanys d'alta muntanya, el coneixement actual permet fer una primera avaluació. La precipitació, la temperatura i la nuvolositat poden tenir un efecte en diferents aspectes dels estanys:

Efectes dels canvis en la precipitació i disponibilitat hídrica. S'espera una disminució de la precipitació, del 12% de mitjana anual, que serà més marcada a l'estiu (24%) que no pas a l'hivern (6%) (Calbó, 2008a i 2008b). Aquest aspecte afectarà de manera més important els estanys de dimensions més petites i, sobretot, les llacunes i les basses temporals, que es poden assecar abans que els diferents grups d'organismes compleixin els seus cicles de vida (Álvarez Cobelas et al., 2008), tal com ja passa a diferents zones àrtiques (Smoli Douglas, 2007).

Efectes de l'escalfament global. Segons l'AR4, per a la regió mediterrània i per a finals de segle, cal esperar un augment de temperatura mitjana de 3,5 °C, augment que serà més marcat a l'estiu (4,1 °C) que no pas a l'hivern

(2,6 °C) (Calbó, 2008a i 2008b). Als Pirineus aquest augment pot ser encara més acusat (Thompson *et al.*, 2009). S'espera que la durada de la capa de neu i la de la coberta de gel sigui més curta (Thompson *et al.*, 2005), i que s'avanci el període de primavera (Peeters *et al.*, 2007). A més a més, és probable que la durada de l'estratificació dels estanys s'allargui i aquests canvis poden afectar el funcionament dels estanys d'alta muntanya durant tot el període lliure de gel (Wilhelm i Adrian, 2008).

Efectes de la reducció dels núvols. Una reducció de la coberta de núvols durant la part més càlida de l'estiu podria portar a un increment de la quantitat de radiació ultraviolada (UV), que arribaria als estanys, amb els possibles efectes de fotoinhibició de la fotosíntesi, alteracions metabòliques en les plantes i els animals i amb un increment de la fotooxidació de les substàncies orgàniques dissoltes (Williamson i Zagarese, 1994). Utilitzant la paleolimnologia s'ha vist que hi havia canvis importants en la matèria orgànica dissolta de llacs de zones temperades a causa dels canvis que van lligats al clima, i que això tenia repercussions en la producció primària d'aquests sistemes (Leavitt *et al.*, 2003). Aquests possibles efectes poden quedar emmascarats per les adaptacions a altes radiacions de la major part de la flora i fauna que habita als estanys d'alta muntanya (Álvarez Cobelas *et al.*, 2008).

Escalfament global i les espècies invasores

Entre els vertebrats que habiten als estanys d'alta muntanya, els peixos com la truita comuna (*Salmo trutta*), la truita de rierol (*Salvelinus fontinalis*), la truita irisada (*Oncorhynchus mykiss*) o el barb roig són espècies que podrien estendre la seva distribució per l'augment de les temperatures a les zones altes (García-Berthou, 2008). Pel fet que totes aquestes espècies de peixos han estat introduïdes als estanys pirinencs, un augment en la distribució dels peixos podria perjudicar les espècies sensibles a la introducció de les truites, com ara els amfibis i els invertebrats associats al plàncton i al bentos (Knapp *et al.*, 2001).

La distribució dels amfibis ha estat afectada per la interacció d'espècies depredadores (com ara els peixos) (Knapp i Matthews, 2000) i per la proliferació de fongs patògens *Chytrids*, que provoquen desaparicions catastròfiques de poblacions d'amfibis (Màrquez *et al.*, 1995). El canvi climàtic, juntament amb un augment de les fonts de dispersió antròpiques, sembla que pot accelerar la dispersió d'aquests fongs patògens i, per tant, contribuir a augmentar la desaparició de poblacions d'amfibis (Pounds *et al.*, 2006).

L'efecte de l'escalfament sobre altres grups d'organismes, com per exemple diferents grups d'invertebrats, s'ha estudiat menys, tot i que estudis experimentals en altres zones alpines mostren una disminució de la presència de les espècies adaptades als sistemes alpins i un augment del potencial d'invasió d'espècies pròpies d'ambients més càlids, com les que viuen a les zones subalpines (Holzapfel i Vinebrooke, 2005).

Referències bibliogràfiques

- ÁLVAREZ COBELAS, M.; CATALAN, J., GARCÍA DE JALÓN, D. (2008). «Impacts on inland aquatic ecosystems». A: J. M. Moreno. *A Preliminary Assessment of the Impacts in Spain due to the Effect of Climate Change*. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha.. Pàg. 109-142.
- BATTARBEE, R. W. (2000). «Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record». *Quaternary Science Reviews*, núm. 19, pàg. 107-124.
- CATALAN, J.; PLA, S.; RIERADEVALL, M.; FELIP, M. [et al.] (2002). «Lake Redo ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century». *Journal of Paleolimnology*, núm. 28, pàg. 129-145.
- CATALAN, J.; CAMARERO, L.; FELIP, M.; PLA, S. [et al.] (2006). «High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes». *Limnetica*, núm. 25, pàg. 551-584.



- CALBÓ, J. (2008a). «Proyecciones globales; el 4t informe de l'IPCC». 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.)
- CALBÓ, J. (2008b). «Proyecciones regionales; d'Europa a la península Ibèrica». 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.)
- GARCÍA-BERTHOU, E. (2008). «Impacte sobre els peixos continentals». 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.)
- HEEGAARD, E.; LOTTER, A. F.; BIRKS, H. J. B. (2006). «Aquatic biota and the detection of climate change: Are there consistent aquatic ecotones?». *Journal of Paleolimnology*, núm. 35, pàg. 507-518.
- HOLZAPFEL, A. M.; VINEBROOKE, R. D. (2005). «Environmental warming increases invasion potential of alpine lake communities by imported species». *Global Change Biology*, núm. 11, pàg. 2009-2015.
- KNAPP, R. A.; MATTHEWS, K. R. (2000). «Non-native fish introductions and the decline of the mountain yellow-legged frog from within protected areas». *Conservation Biology*, núm. 14, pàg. 428-438.
- KNAPP, R. A.; MATTHEWS, K. R.; SARNELLE, O. (2001). «Resistance and resilience of alpine lake fauna to fish introductions». *Ecological Monographs*, núm. 71, pàg. 401-421.
- LEAVITT, P. R.; CUMMING, B. F.; SMOL, J. P.; REASONER, M. [et al.] (2003). «Climatic control of ultraviolet radiation effects on lakes». *Limnology and Oceanography*, núm. 48, pàg. 2062-2069.
- MÀRQUEZ, R.; OLMO, J. L.; BOSCH, J. (1995). «Recurrent mass mortality of larval midwife toads *Alytes obstetricans* in a lake in the Pyrenean mountains». *Herpetology Journal*, núm. 5, pàg. 287-289.
- PEETERS, F.; STRAILE, D.; LORKE, A.; LIVINGSTONE, D. M. (2007). «Earlier onset of the spring phytoplankton bloom in lakes of the temperate zone in a warmer climate». *Global Change Biology*, núm. 13, pàg. 1898-1909.
- PLA, S.; CATALAN, J. (2005). «Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene». *Climate Dynamics*, núm. 24, pàg. 263-278.
- POUNDS, J. A.; BUSTAMANTE, M. R.; COLOMA, L. A.; CONSUEGRA, J. A. [et al.] (2006). «Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming». *Nature*, núm. 439, pàg. 161-167.
- SMOL, J. P.; DOUGLAS, M. S. V. (2007). «Crossing the final ecological threshold in high Arctic ponds». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, núm. 104, pàg. 12395-12397.
- THOMPSON, R.; PRICE, D.; CAMERON, N.; JONES, V. [et al.] (2005). «Quantitative calibration of remote mountain-lake sediments as climatic recorders of air temperature and ice-cover duration». *Arctic Antarctic and Alpine Research*, núm. 37, pàg. 626-635.
- THOMPSON, R.; VENTURA, M.; CAMARERO, L. (2009). On the climate and weather at the mountain and sub-arctic lakes of Europe. *Submitted*.
- WILHELM, S.; ADRIAN, R. (2008). «Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton». *Freshwater Biology*, núm. 53, pàg. 226-237.
- WILLIAMSON, C.E.; ZAGARESE, H.E. (1994). «Impact of UV-B radiation on pelagic freshwater ecosystems». *Archiv für Hydrobiologie - Advances in Limnology*, Stuttgart.



17. Els efectes als embassaments i la seva rellevància en la quantitat i la qualitat de l'aigua per a la garantia del recurs

Rafael Marcé i Joan Armengol, FLUMEN-Universitat de Barcelona
Josep Dolz, FLUMEN-Universitat Politècnica de Catalunya

Introducció

Malgrat la nodrida literatura existent entorn dels possibles efectes del futur canvi climàtic sobre els ecosistemes aquàtics continentals (per a posar exemples pròxims, vegeu Sabater [2008] o Álvarez Cobelas *et al.* [2005]), tenim molt poca informació contrastada sobre efectes ja observats en aquests sistemes, especialment quan parlem de variacions en la qualitat de l'aigua en sistemes lenítics. Això té un reflex molt clar al Quart informe d'avaluació de l'IPCC: el capítol dedicat als efectes sobre la qualitat de l'aigua observats als ecosistemes aquàtics continentals és una col·lecció d'asseveracions més o menys fonamentades, però amb molt poca base empírica (Kundzewicz *et al.*, 2007). S'esmenten alguns casos ben documentats, la major part en rius i en alguns llacs amb llargues sèries de dades, per exemple el llac Tanganyika (Verburg *et al.*, 2003) i Washington (Winder i Schindler, 2004). És obvi que la manca generalitzada de sèries llargues de paràmetres relacionables amb la qualitat de l'aigua és un impediment molt fort a l'hora d'establir lligams amb el canvi climàtic d'una manera rigorosa. Això fa que la prognosi a partir d'escenaris futurs sigui, així mateix, molt incerta.

En el cas particular dels embassaments la situació és preocupant. La relativa joventut d'aquests sistemes fa que en la gran majoria de casos siguin inaplicables les aproximacions paleolimnològiques que tan bon resultat donen en el cas dels llacs (vegeu Catalan *et al.*, 2002); així doncs, els estudis depenen gairebé exclusivament de les dades recollides en costosos programes de mostreig mantinguts a llarg termini. No cal dir que aquests programes de mostreig en embassaments són una raresa, no només a Catalunya. Álvarez Cobelas *et al.* (2005) diuen respecte dels embassaments que «qualsevol predicció resultat summament arriscada» a causa de la complexitat afegida per la gestió hidràulica humana pròpia d'aquests sistemes. Considerant la importància dels embassaments per a la gestió dels recursos hídrics a la zona mediterrània, aquesta manca de coneixement és greu.

Qualsevol predicció dels efectes del futur canvi climàtic en un ecosistema s'ha de basar, si és possible, en estudis empírics dels efectes observats instrumentalment durant les darreres dècades. Les prediccions basades en models, siguin conceptuals o dinàmics, poden ser d'una gran ajuda a l'hora d'extrapolar cap al futur les relacions clima-sistema observades instrumentalment. Però cal no oblidar que els models són només eines heurístiques que no poden provar hipòtesis (Oreskes *et al.*, 1994). Per tant, la detecció instrumental de tendències en la qualitat de l'aigua provocades per variacions en el clima és la forma més poderosa de demostrar la vulnerabilitat d'un sistema enfront de futurs canvis climàtics.

En aquest capítol es discuteix com les tendències projectades de la temperatura de l'aire i de l'aigua que arribarà als embassaments catalans des dels rius afectaran la qualitat de l'aigua en aquests sistemes. Ho farem principalment a partir d'observacions instrumentals a l'embassament de Sau, que per a algunes variables van des de l'any 1964 fins a l'actualitat.

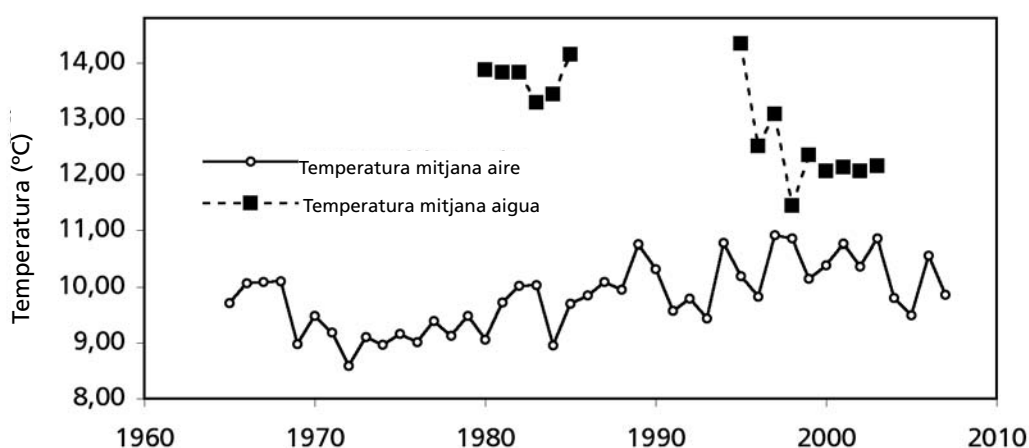
L'augment de les temperatures augmentarà l'estabilitat tèrmica? Als embassaments, no sempre...

Una de les prediccions més repetides quan es parla dels efectes del canvi climàtic sobre els sistemes lenítics és l'augment de l'estabilitat tèrmica provocada per l'augment de la temperatura de l'aire. Això es basa en el fet que les capes superficials dels llacs i els embassaments s'escalfaran més que les capes fondes i augmentarà, així, el gradient tèrmic i l'estabilitat de la columna, cosa que hauria d'afavorir l'extensió de l'anòxia a les capes profundes. Això ja s'ha observat experimentalment en alguns llacs (Jankowski *et al.*, 2006). Fins i tot es prediu que els cianobacteris se'n poden veure beneficiats, ja que una estabilitat més gran i l'allargament del període d'estratificació van a favor de les seves estratègies fenològiques (Jöhnk *et al.*, 2008).

Les prediccions anteriors es basen en el fet que els balanços de calor en llacs depenen gairebé exclusivament dels intercanvis d'energia amb l'atmosfera. I és precisament per això que aquestes prediccions s'han d'extrapol·lar amb molta cura als embassaments: els balanços de calor i, per extensió, la posició i l'estabilitat de la termoclina depenen en gran mesura de la gestió de l'aigua, amb la qual es dilueixen els efectes del clima sobre la dinàmica física del sistema.

El cas de Sau és paradigmàtic, ja que està molt ben documentat. Sabent l'evolució de la temperatura mitjana a la conca del Ter, que ha pujat gairebé 1 °C des de l'any 1964, podríem suposar que la temperatura mitjana de l'embassament també haurà pujat. Res més lluny de la realitat. A la figura 1 podem observar com, malgrat que la temperatura de l'aire ha pujat, la temperatura mitjana de l'embassament ha patit una baixada molt pronunciada durant el darrer decenni.

Figura 1. Evolució de la temperatura mitjana de l'aire a la conca del riu Ter i de la temperatura mitjana a l'embassament de Sau. Es pot comprovar que la temperatura de l'aire ha augmentat pel cap baix 1 °C, mentre que la temperatura de l'aigua a l'embassament ha disminuït vora 1,5 °C.

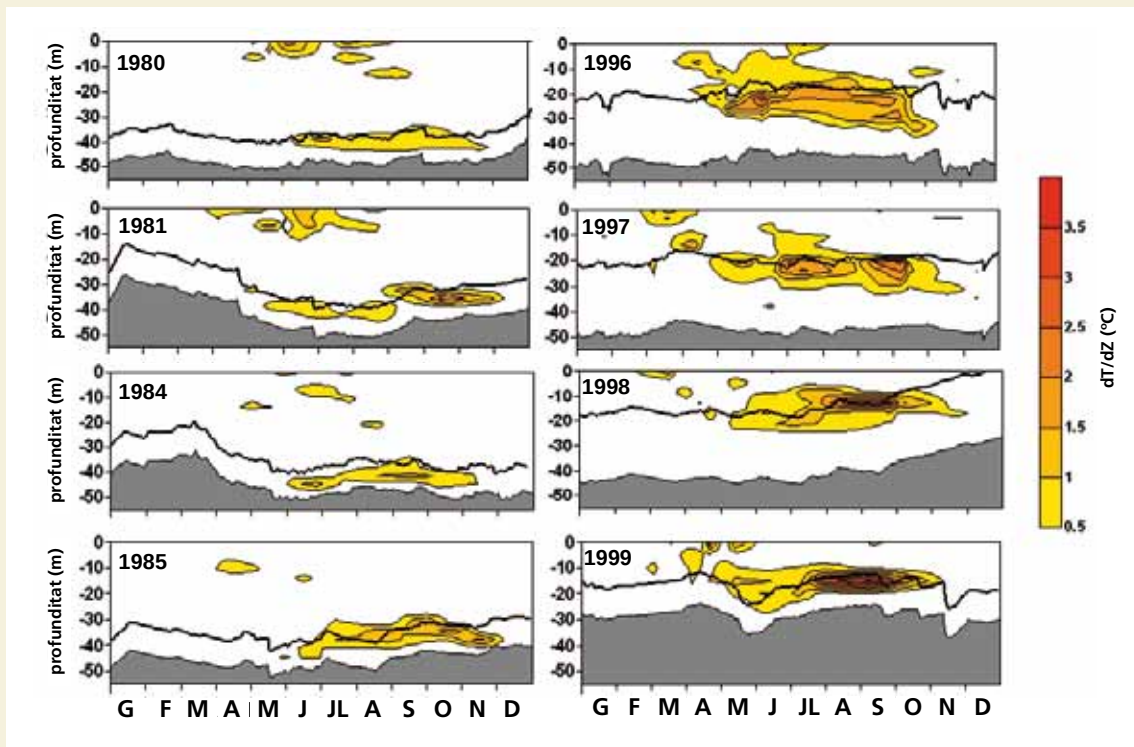


L'explicació d'aquesta aparent contradicció la trobem en el fet que l'any 1996 es va decidir variar la gestió hidrològica de l'embassament: es va passar de treure l'aigua per la comporta més profunda, a fer-ho per la més superficial disponible en cada moment. Això va tenir conseqüències molt importants en l'estructura tèrmica de l'embassament (figura 2). Com que l'estratificació provocada per la sortida forçada de l'aigua (anomenada



estratificació hidràulica) és la que determina la posició de la termoclina, aquesta es va situar molt més a prop de la superfície. Això, a més, va afectar l'estabilitat de la columna, ja que és ben sabut que la sortida d'aigua profunda debilita els gradients de densitat, perquè facilita l'arribada de energia cinètica turbulenta a les capes fondes. La sortida d'aigua més superficial també ha promogut, llavors, una termoclina més estable (figura 2; Moreno-Ostos *et al.*, 2008).

Figura 2. Evolució estacional de la termoclina (expressada com a gradients de temperatura) per a una selecció d'anys amb sortida d'aigua profunda a l'embassament de Sau.



(A l'esquerra) i amb sortida d'aigua més superficial (a la dreta). La línia sòlida representa la fondària d'extracció d'aigua per les comportes, i l'àrea gris és el fons de l'embassament (de Moreno-Ostos *et al.*, 2008). Es pot observar la correspondència entre la fondària d'extracció d'aigua i la termoclina al llarg de tot el període, i com als anys de la dècada del 1990 la termoclina és molt més superficial i estable.

Per tant, l'efecte de l'augment de les temperatures als embassaments és molt incert. D'una banda, si tots els altres factors es mantenen inalterats, la temperatura mitjana pujaria, l'estabilitat tèrmica hauria d'augmentar i, amb això, també l'anòxia hipolimnètica. Però aquest efecte pot ser totalment emmascarat per la gestió hidrològica de l'aigua emmagatzemada, com en el cas de Sau. Això pot ser especialment intens en els grans embassaments, que pateixen variacions de nivell molt acusades i grans extraccions d'aigua. Això fa que la profunditat d'extracció de l'aigua sigui molt variable, així com la intensitat de l'estratificació hidràulica, i aquesta variabilitat pot emmascarar els efectes climàtics.

On els efectes de l'augment de la temperatura poden ser més importants és en els petits embassaments de les conques internes (Foix, Gaià, Riudecanyes, etc.), que tenen un temps de residència de l'aigua més llarg i on

l'estratificació hidràulica provocada per la sortida profunda de l'aigua és menys intensa. Es podria dir que són sistemes amb una hidrodinàmica més semblant als llacs. En aquests embassaments és més probable que es deixin sentir els efectes de l'augment de la temperatura en l'estabilitat de la columna de l'aigua. A més, donades les condicions tròfiques d'aquests petits embassaments (eutròfics o hipereutròfics en la seva majoria) la probabilitat que l'augment de l'estabilitat afavoreixi l'aparició de cianobacteris i l'extensió de l'anòxia és elevada.

El veritable problema: la futura migradesa dels cabals i l'augment de l'anòxia hipolimnètica

Que l'augment de la temperatura de l'aire no hagi de tenir un reflex clar en la qualitat de l'aigua dels embassaments no vol dir que aquests sistemes siguin insensibles al canvi climàtic. Ni de bon tros. El fet que els embassaments siguin sistemes amb temps de residència relativament curt fa que responguin de manera molt ràpida a les variacions de cabal. Això, com veurem, els converteix en sistemes que patiran variacions en la qualitat de l'aigua molt acusades si les prediccions de l'IPCC sobre precipitació i evapotranspiració a la Península es compleixen (vegeu els capítols 7 i 8).

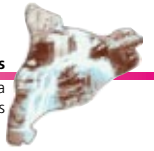
La clau de volta que relaciona directament les prediccions de canvi climàtic amb la qualitat de l'aigua als embassaments és el control exercit pel cabal que entra al sistema sobre l'extensió de l'anòxia a l'hipolimnion (Marcé *et al.*, 2008). En resum, hi ha una relació lineal entre l'extensió de l'anòxia a l'hipolimnion amb el cabal del riu que entra a l'embassament i la concentració de materials orgànics al riu. Val a dir que encara que la dependència de l'anòxia en la concentració de matèria orgànica al riu varia d'un embassament a l'altre, la dependència de l'anòxia respecte el cabal sembla una constant en gairebé tots els embassaments (Marcé *et al.*, 2008).

Per exemple, a Sau es pot relacionar el factor d'anòxia estacional (AF, una mesura normalitzada de l'extensió de l'anòxia en un llac o embassament) amb el cabal del riu i la concentració de carboni orgànic dissolt (DOC) que conté:

$$AF = 52,22 - 57,37 \cdot \text{cabal} + 0,18 \cdot \text{DOC} \quad (n = 11, r^2 = 0,85, p = 0,002)$$

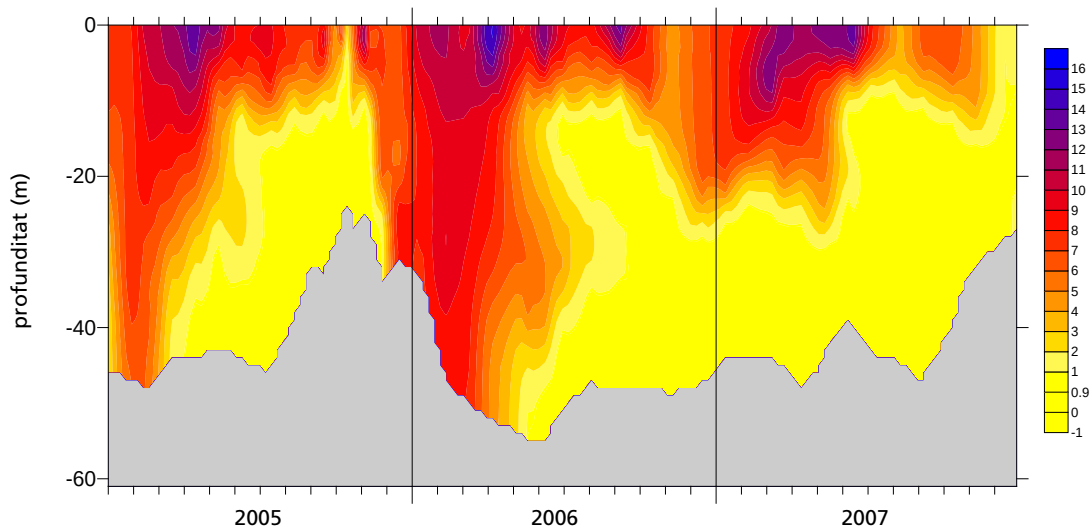
En aquesta regressió el cabal presenta una r^2 parcial de 0,82, és a dir, que el seu pes en l'explicació de la variància de l'AF és molt important. Per tant, i a l'espera dels experiments que confirmaran els mecanismes concrets de la dependència de l'anòxia respecte al cabal, tenim una relació empírica que ens relaciona un dels principals paràmetres que defineixen la qualitat de l'aigua en embassaments amb la quantitat d'aigua que entra en aquests sistemes.

A partir d'aquests resultats el vincle entre el canvi climàtic i la qualitat de l'aigua als embassaments catalans és directe. Si es compleixen les prediccions de l'IPCC, a Catalunya podem patir una reducció de precipitacions de fins al 12% en el període 2080-2099, valor molt similar al que s'ha predit per a Catalunya al capítol 7. Això, combinat amb l'augment de l'evapotranspiració provocat per la pujada de les temperatures, podria arribar a donar una reducció dels cabals als rius d'entre el 20% i el 40%, que se sumaria a les reduccions ja detectades durant les darreres dècades. Assumint que les relacions lineals que s'han presentat més amunt es poguessin mantenir, això implicaria un augment del factor anòxic d'entre el 12% i el 25%. En termes més intuïtius, ara mateix el 59% del volum emmagatzemat durant un estiu mitjà a Sau roman anòxic. En el nou escenari tindríem una mitjana del 66% al 74% d'aigua anòxica a l'embassament durant l'estiu. Si pensem que la disminució de cabal comportarà, així mateix, una pressió més gran dels abocaments urbans i industrials sobre el riu Ter, el DOC és molt probable que augmenti si no es prenen mesures, amb la qual cosa els percentatges anteriors es podrien considerar una estimació conservadora. Amb un augment d'un modest 15% en les concentracions de DOC al riu Ter, el volum anòxic a l'estiu es podria situar entre el 75% i el 82%. Això significaria tornar a les situacions viscudes durant els anys vuitanta del segle xx, quan la pèssima qualitat de l'aigua a l'embassament es va portar a molts diaris.



Un efecte afegit a l'esmentat, però també íntimament lligat a períodes amb poca entrada de cabal a l'embassament, és la desaparició de la barreja hivernal. Durant tardors i hiverns secs i amb temperatures suaus, l'embassament de Sau no es barreja de manera efectiva fins al fons, establint-se una situació meromíctica que es pot allargar fins a l'establiment de la nova termoclina durant la primavera/estiu següent. Això, evidentment, implica una acumulació d'aigua anòxica durant períodes molt llargs que pot donar molts problemes quan finalment es barregi amb l'aigua superficial. Un exemple extrem ha estat l'evolució de l'embassament de Sau des de la tardor del 2006. Aquella tardor no es va produir la barreja, així que la capa profunda anòxica es va mantenir fins a l'estiu següent. Com que a la tardor del 2007 tampoc es va produir la barreja, l'embassament ha mantingut una capa anòxica durant pràcticament dos anys sencers (figura 3).

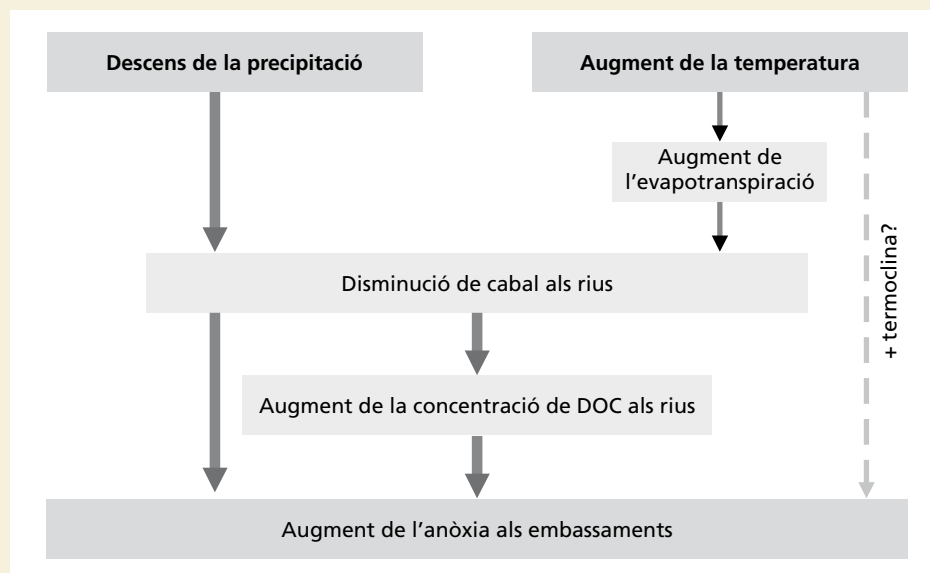
Figura 3. Evolució en fondària de l'oxigen a l'embassament de Sau des de l'any 2005.



La gamma de colors representa la concentració d'oxigen en mg/L (vegeu l'escala a la dreta), mentre que l'àrea grisa delimita el fons de l'embassament, variable al llarg del temps. Es pot observar que a la tardor del 2006 i del 2007 l'embassament no s'ha barrejat totalment, amb una capa anòxica (<1 mg/L) profunda que s'ha mantingut durant dos anys.

Per tant, en el futur la combinació de menys pluja i evapotranspiració elevada (vegeu el capítol 10) farà que els rius catalans arrosseguin un cabal migrat, que, alhora, impedirà la dilució dels abocaments urbans i industrials als rius, amb el previsible augment de les concentracions de carboni orgànic als rius. Tot això afectarà de manera molt apreciable el contingut d'oxigen als embassaments (figura 4), en especial si no s'anticipen mesures apropiades per a pal·liar la pèrdua de capacitat de dilució dels abocaments d'origen humà als rius.

Figura 4. Esquema de la cascada d'efectes provocada per un probable augment de la temperatura i descens de la precipitació sobre la qualitat de l'aigua als embassaments.



El descens de la precipitació i l'augment de la temperatura provocaran un descens dels cabals als rius. Això, per la seva banda, pot suposar l'augment de les concentracions de DOC als rius per manca de dilució dels abocaments humans als cursos fluvials. Està empíricament demostrat que la disminució de cabals i l'augment de la concentració de DOC significaria més volum d'aigua anòxica als embassaments (fletxes gruixudes). D'altra banda, l'augment de la temperatura pot contribuir directament a l'augment de l'anòxia a causa de la intensificació de l'estratificació als embassaments, encara que com s'assenyala al text la importància d'aquest efecte és incert i més probable en embassaments petits.

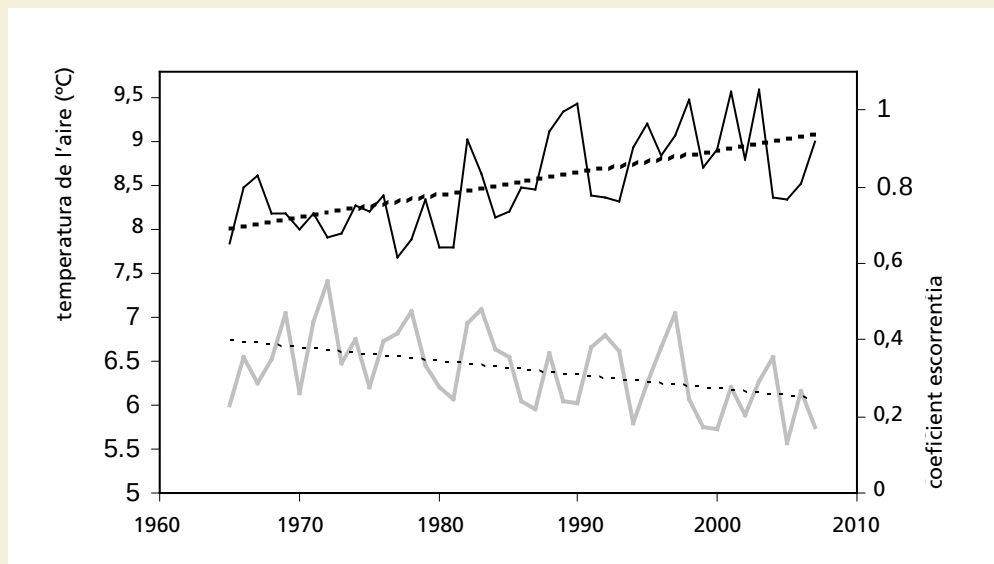
Els efectes del canvi global ja són quantificables a Sau

Com a d'altres indrets de Catalunya, el canvi climàtic és un fet incontrovertible a la conca del Ter; així doncs, ja es pot quantificar quin ha estat l'efecte de les variacions de la temperatura i hidrològiques en la qualitat de l'aigua de l'embassament de Sau durant les darreres dècades.

La temperatura mitjana anual de l'aire a la conca del riu Ter (fent servir dades d'un nombre important d'estacions climàtiques repartides per la conca) mostra un augment de prop d'1 °C des del 1964 (data del primer emplenament de Sau). En el mateix període, el coeficient d'escorrentia (és a dir, la fracció d'aigua de pluja que acaba circulant de manera efectiva als rius de la conca) ha disminuït significativament (figura 5). Atès que la precipitació a la conca no ha mostrat cap tendència significativa durant els darrers cinquanta anys i que les captacions dels abastaments d'aigua estan molt equilibrades amb els corresponents abocaments d'aigües residuals, la important reducció del coeficient d'escorrentia (que, preliminarment, passa d'una mitjana de valors entre el 30 i el 40% a valors inferiors al 25%) ha de ser deguda a un augment important de l'evapotranspiració a la conca.



Figura 5. Tendències de la temperatura de l'aire mitjana anual a la conca del Ter i del coeficient d'escorrentia anual (és a dir, la proporció de precipitació que acaba fluïnt de manera efectiva al riu Ter) des del 1964 fins a l'actualitat. Les línies puntejades són regressions lineals afegides com a referència.



Amb les dades disponibles actualment és molt difícil escatir si l'augment de l'evapotranspiració ha estat degut a un augment de les taxes d'evapotranspiració provocat per la pujada de les temperatures, o si la causa ha estat una proliferació de masses boscoses motivada per l'abandonament de terrenys agrícoles i d'activitats tradicionals com el carboneig (capítol 8). El més probable és que els dos factors hi hagin contribuït significativament, conjuntament amb increments de certs consums (creixement de regadius, sense retorn de cabals al sistema), possibles canvis en el règim de les aportacions nivals, etc.

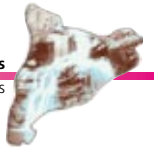
A banda de la disminució de la quantitat d'aigua disponible com a recurs, ja hem vist que el cabal controla en gran part l'estat d'oxidació de l'embassament. A partir de les relacions lineals presentades abans, es pot quantificar quin ha estat l'efecte de la disminució de cabal sobre la quantitat d'oxigen estival a l'embassament. Això, per tant, no és una predicció dels efectes futurs del canvi climàtic, sinó la caracterització empírica dels efectes del canvi global ja esdevinguts sobre la qualitat de l'aigua a l'embassament. Mentre que el volum mitjà d'aigua anòxica durant la darrera dècada ha estat del 59%, si el cabal del riu Ter hagués estat el dels valors de referència a la dècada del 1960, el volum mitjà d'aigua anòxica se situaria entorn del 41%. És a dir, un terç menys de volum anòxic si es comptés amb les aportacions mitjanes de fa uns 30 o 40 anys. Si pensem que la concentració de DOC al riu segurament seria més baixa a causa de la dilució, aquest disminució es pot considerar una estimació conservadora.

La conclusió és que el canvi climàtic des de la dècada del 1960 ha empitjorat la qualitat de l'aigua a l'embassament de Sau (mesurada com el volum d'aigua anòxica) com a mínim el 40%. Un altra forma de veure-ho: els beneficis de l'establiment dels plans de sanejament a la conca del Ter han estat contrarestats en gran part pel canvi global. Això marca una prioritat clara per al futur: el control dels abocaments de matèria orgànica als rius. Atès que no podem influir directament en la quantitat d'aigua que entra als embassaments (excepte si considerem la disminució de la massa boscosa, actuació amb resultats incerts i que requeriria una avaluació acurada cas per cas), només podem intentar pal·liar els efectes del canvi climàtic sobre la qualitat de l'aigua als embassaments amb un

control estricte dels abocaments urbans i industrials. Això probablement implicaria un canvi en la legislació sobre les concentracions màximes permeses als abocaments i la necessitat de redimensionar o redissenyar moltes EDAR al nostre país.

Referències bibliogràfiques

- ÁLVAREZ COBELAS, M.; CATALAN, J.; GARCÍA DE JALÓN, D. (2005). «Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales». A: J. M. Moreno (ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha. Pàg. 113-146.
- CATALAN, J.; PLA, S.; RIERADEVALL, M.; FELIP, M. [et al.] (2002). «Lake Redó ecosystem response to an increasing warming in the Pyrennees during the twentieth century». *Journal of Paleolimnology*, núm. 28, pàg. 129-145.
- JANKOWSKI, T.; LIVINGSTONE, D. M.; BÜHRER, H.; FORSTER, R.; NIEDERHAUSER, P. (2006). «Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world». *Limnology and Oceanography*, núm. 51, pàg. 815-819.
- JÖHNK, K. D.; HUISMAN, J.; SHARPLES, J.; SOMMEIJER, B. [et al.] (2008). «Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria». *Global Change Biology*, núm. 14, pàg. 495-512.
- Kundzewicz, Z. W.; Mata, L. J.; Arnell, N. W.; Döll, P. [et al.] (2007). «Freshwater resources and their management». A: M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson (eds.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit). Pàg. 173-210.
- MARCÉ, R.; MORENO-OSTOS, E.; ARMENGOL, J. (2008). «The role of allochthonous organic carbon on the hypolimnetic oxygen content of reservoirs». *Ecosystems* (in review).
- MORENO-OSTOS, E.; MARCÉ, R.; ORDOÑEZ, J.; DOLZ, J.; ARMENGOL, J. (2008). «Hydraulic management drives heat budgets and temperature trends in a Mediterranean reservoir». *International Review of Hydrobiology*, núm. 93, pàg. 131-147.
- ORESKE, N.; SHRADER-FRECHETTE, K.; BELITZ, K. (1994). «Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth Sciences». *Science*, núm. 263, pàg. 641-646.
- SABATER, S. (2008). «Alterations of the global water cycle and their effects on river structure, function and services». *Freshwater Reviews*, núm. 1, pàg. 75-88.
- VERBURG, P.; HECKY, R. E.; KLING, H. (2003). «Ecological consequences of a century of warming in Lake Tanganyika». *Science*, núm. 301, pàg. 505-507.
- WINDER, M.; SCHINDLER, D. E. (2004). «Climatic effects on the phenology of lake processes». *Global Change Biology*, núm. 10, pàg. 1844-1856.



18. Impacte sobre els peixos continentals

Emili Garcia-Berthou

Institut d'Ecologia Aquàtica, Universitat de Girona

Com afecta el canvi climàtic els peixos continentals?

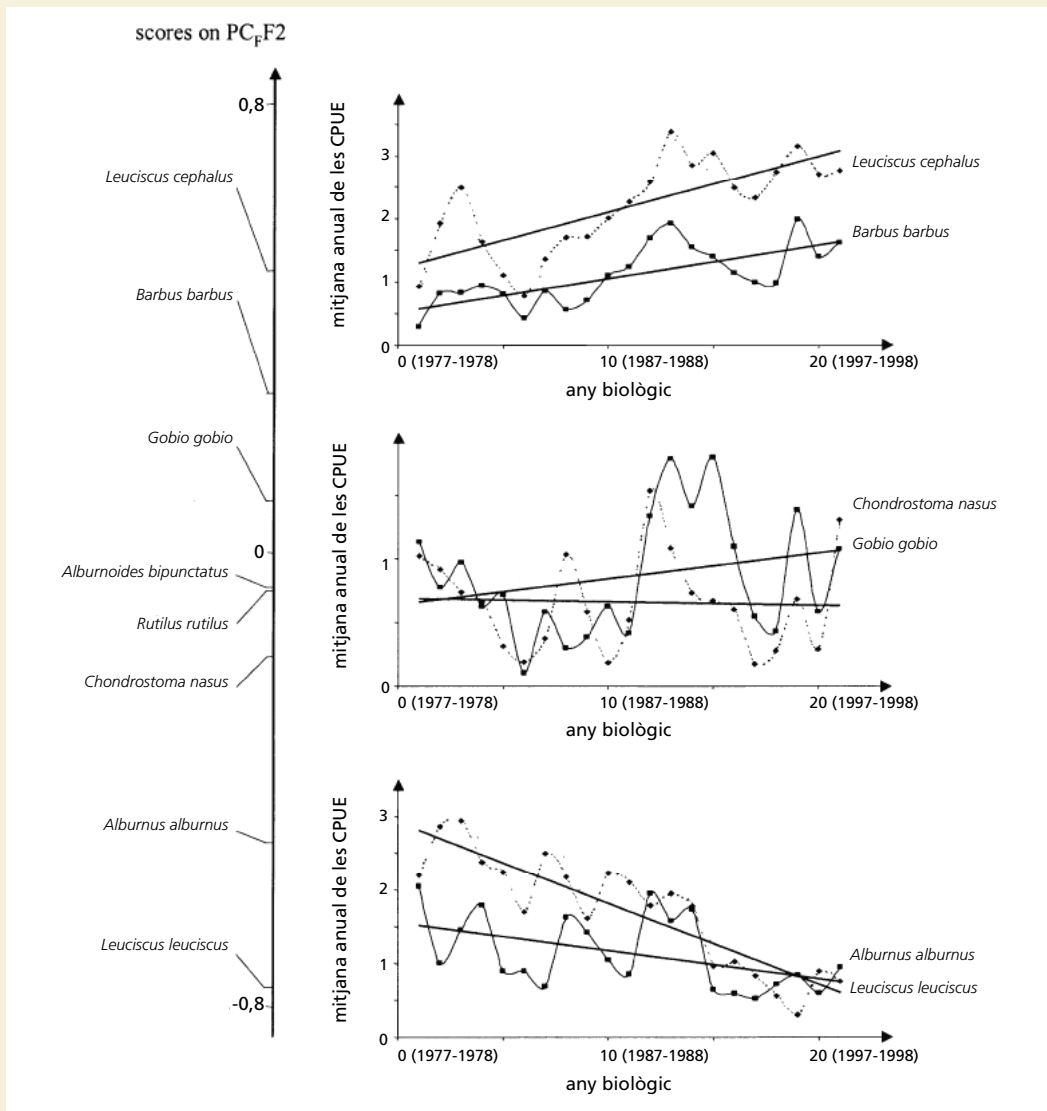
Respecte d'altres grups taxonòmics, els peixos tenen avantatges i desavantatges com a indicadors ecològics (Simon i Lyons, 1995). Un dels avantatges principals és que, pel fet de ser organismes més grans que viuen en una escala temporal i espacial més gran, integren molt les pertorbacions i per tant poden ser especialment sensibles (encara que menys específics) al canvi climàtic. L'altre avantatge principal és que són molt visibles per a la societat i, per tant, són una eina excel·lent perquè aquesta entengui la problemàtica del canvi climàtic i la necessitat de mitigar-ne els efectes.

Les treballs científics que revisen o modelen l'impacte del canvi climàtic en peixos continentals són relativament pocs, bàsicament d'Amèrica del Nord i especialment de salmònids, de manera que els resultats no són gaire extrapolables a les nostres latituds (on tenim menys riquesa de peixos i espècies diferents) i al cabal dels rius mediterranis. Les excepcions principals són els treballs al Roine (Daufresne *et al.*, 2003; Daufresne i Boët, 2007) i la modelització de Xenopoulos *et al.* (2005), que inclou dades de del Duero i el Guadiana. Els treballs que consideren rius mediterranis més petits són molt escassos i les úniques revisions generals sobre l'efecte del canvi climàtic a la Península que consideren els peixos són Moreno *et al.* (2005) i Elvira (2007).

Les conclusions d'aquests treballs es poden resumir en els punts següents:

- 1) La temperatura és un factor determinant en la coneguda distribució altitudinal dels peixos i afecta de moltes maneres els peixos i molts altres animals poiquiloterms (de sang freda), des del metabolisme, l'activitat, la taxa d'ingestió d'aliment i la digestió, fins a la selecció de microhàbitat i la competència entre espècies (Ficke *et al.*, 2007; Rahel i Olden, 2008).
- 2) Lògicament, les espècies de peixos d'aigües fredes com les truites i altres salmònids seran les més perjudicades, mentre que altres espècies que són més d'aigües calentes seran afavorides per l'augment de temperatura. Al Roine, per exemple, s'ha demostrat un augment d'abundància del barb comú (*Barbus barbus*) i la bagra (*Squalius cephalus*) i una disminució de dues espècies de ciprínids que són més d'aigües fredes (l'alburn *Alburnus alburnus* i *Leuciscus leuciscus*) (Daufresne *et al.*, 2003), relacionades amb l'augment de la temperatura (figura 1).

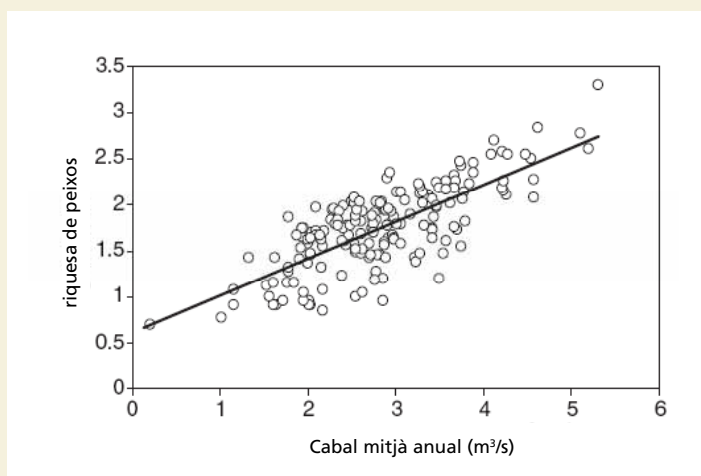
Figura 1. Tendència durant 20 anys de l'abundància (CPUE: captures per unitat d'esforç) al Roine. A dalt, espècies més termòfiles com la bagra (*Squalius cephalus* = *Leuciscus cephalus*) o el barb comú (*Barbus barbus*) han augmentat en abundància, mentre altres que són més d'aigües fredes (com l'alburn, *Alburnus alburnus*) han disminuït (extret de Daufresne et al., 2003).



- 3) Als Estats Units s'ha estimat que l'hàbitat per a les espècies d'aigües fredes o fresques (per exemple, salmònids) es podria reduir fins al 50% pel canvi climàtic (Eaton i Scheller, 1996).
- 4) Com que la riquesa de peixos depèn de la mida de la conca, però encara més del seu cabal mitjà (figura 2), el model de Xenopoulos et al. (2005) preveu l'extinció local de moltes espècies de peixos en rius de latituds entre 42° N i 42° S, on el cabal es preveu que es redueixi.



Figura 2. Relació entre la riquesa (nombre d'espècies) de peixos i el cabal mitjà per a 237 conques entre 42° N i 42° S, latituds entre les quals es preveu una reducció significativa del cabal (> 10% el 2070) (extret de Xenopoulos et al., 2005).



- 5) En algunes regions, aquestes extincions locals augmenten a causa dels escenaris de més ús humà de l'aigua. Per exemple, al Duero i al Guadiana, Xenopoulos et al. (2005) prediuen l'extinció del 0-8% de les espècies natives de peixos considerant només l'augment de temperatura i del 4-18% considerant també les majors detraccions d'aigua (taula 1).

Taula 1. Predicció d'extinció d'espècies a les conques del Duero i el Guadiana, segons dos escenaris de l'IPCC 2001 (A2 i B2) per al 2070, incloent-hi l'efecte del canvi climàtic només i també amb el consum futur d'aigua (extret de Xenopoulos et al., 2005).

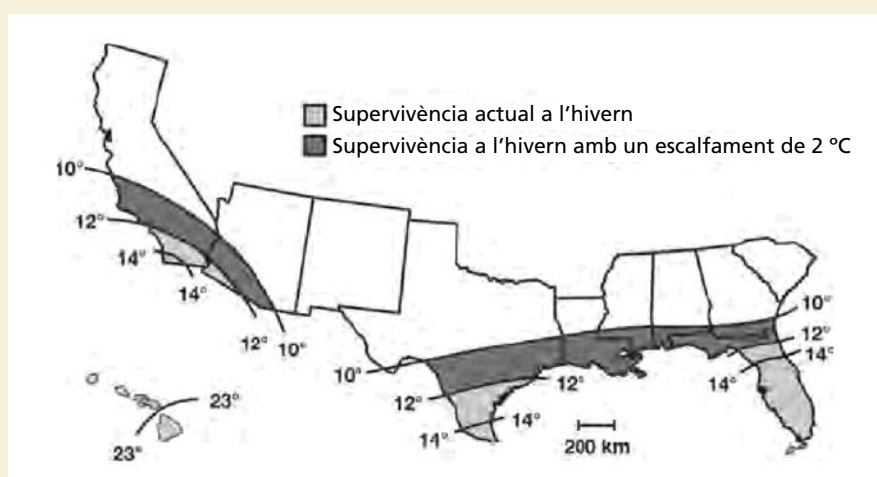
Riu (n = riquesa actual de peixos)	A2		B2	
	Canvi climàtic	Canvi climàtic i consum d'aigua	Canvi climàtic	Canvi climàtic i consum d'aigua
Ave-Duero (n = 16)	-5% (7)	-14% (7)	0% (7)	-4% (7)
Guadiana (n = 16)	-8% (10)	-18% (10)	-3% (10)	-13% (10)

Es mostra el percentatge (%) d'espècies extingides (i l'interval de confiança del 95%, entre parèntesis) i el nombre aproximat d'espècies natives actuals (n).

- 6) En alguns punts del Roine on es tenen sèries temporals llargues (Daufresne et al., 2003; Daufresne i Boët, 2007), s'ha observat un augment de l'abundància total de peixos, però especialment de les espècies termòfiles, i una disminució de l'equitativitat (és a dir, un augment de la dominància d'unes quantes espècies).
- 7) Com que les diferents espècies respondran de manera diferent al canvi climàtic, i alteraran la seva abundància i distribució, això afectarà les seves interaccions biòtiques, i es produiran noves associacions d'espècies (Ficke et al., 2007) i ecosistemes «novells» o «emergents» (Hobbs et al., 2006).

- 8) Moltes de les espècies que s'introdueixen són més aviat termòfiles i limnòfiles (de zones amb poc corrent), de manera que el canvi climàtic en general afavorirà les espècies invasores (Zambrano *et al.*, 2006; Sharma *et al.*, 2007; Rahel i Olden, 2008; Sharma i Jackson, 2008), i possibilitarà l'establiment de noves espècies (per exemple tropicals o subtropicals) i afavorirà l'ampliació de la seva distribució (Clavero i García-Berthou, 2006; García-Berthou, 2007) (figura 3).

Figura 3. Exemple de com una espècie tropical (la piranya *Pygocentrus nattereri*) introduïda al sud dels Estats Units probablement ampliarà la seva àrea envaïda (extret de Rahel i Olden, 2008).



El cas de Catalunya

En el cas de Catalunya, els efectes més versemblants d'un augment de la temperatura i d'una reducció i una irregularitat més accentuada de cabals, produïts pel canvi climàtic, en els peixos continentals són els següents:

- 1) En el cas de Catalunya, les espècies d'aigua freda més perjudicades serien la truita (*Salmo trutta*) i el cavilat (*Cottus gobio*), aquest darrer només present i autòcton a la Vall d'Aran (Garona). En un grau més petit també serien perjudicades altres espècies que es troben més avall del riu, com les madrilles (*Chondrostoma miegii*, *Chondrostoma arcasii*) i les espècies petites de barbs (*Barbus meridionalis*, *Barbus haasi*). La truita és una espècie d'aigua freda que segons Sostoa *et al.* (1990) a Catalunya es troba bàsicament a altituds superiors als 500 m, on la temperatura mitjana màxima de l'aire no sobrepassa els 22 °C (figura 4). En canvi, altres espècies com el barb de muntanya (*B. meridionalis*) i especialment el barb cua-roig (*B. haasi*) tenen una distribució delimitada tant per sobre com per sota, ja que no viuen més enllà dels 1.000 m, però tampoc si la temperatura mitjana màxima de l'aire és superior a 24 °C (Sostoa *et al.*, 1990). Per tant, en principi es pot preveure que la truita i el cavilat disminuiran la seva àrea de distribució, mentre que els barbs petits la reajustaran, amb més problemes per a *B. haasi*, que té una distribució general més àmplia a la Península, però que sembla que té un nínxol ecològic menys ampli que *B. meridionalis*.



Figura 4. Distribució als Països Catalans de les espècies de peixos més de muntanya (extret de Sostoa et al., 1990).



El límit inferior de la distribució altitudinal de la truita (*Salmo trutta*) concorda força amb la isoterma (temperatura mitjana màxima de l'aire) de 22 °C, mentre que les del barb de muntanya (*Barbus meridionalis*) i el cua-roig (*Barbus haasi*) concorden més amb la de 24 °C.

- 2) Per tant, les poblacions de truita i altres espècies reduiran la seva distribució, la fragmentaran i algunes s'extingiran localment (Hauer et al., 1997). La fragmentació ja existent de molts dels nostres rius, sense passos de fauna adequats (malgrat els que darrerament promou l'Agència Catalana de l'Aigua), farà que les possibilitats d'adaptació (per exemple, desplaçar-se més amunt) siguin limitades.
- 3) En canvi, altres espècies com la bagra (*Squalius laietanus*) (figura 5) i, sobretot, moltes espècies exòtiques invasores termòfiles com la carpa (*Cyprinus carpio*), el black-bass (*Micropterus salmoides*) o la gambúsia (*Gambusia holbrooki*), es tornaran més abundants i ampliaran la seva distribució, especialment perquè també seran afavorides per un cabal més reduït dels rius. També altres espècies subtropicals que fins ara no establien poblacions reproductores perquè hi havia temperatures massa baixes, ara es podran establir i es podran tornar invasores (figura 3). En podrien ser exemples nombroses espècies de cíclids, com ara *Australoheros*

facetum (= *Cichlasoma facetum*), que fins ara només es troba al Guadiana i a Portugal (Doadrio; 2002; Ribeiro *et al.*, 2007), però també altres espècies segurament més perjudicials, com les tilàpies (*Oreochromis niloticus* i *Oreochromis mossambicus*), amb un fort impacte ecològic ben conegut

Figura 5. Distribució als Països Catalans de les espècies natives de peixos més abundants dels trams baixos dels nostres rius (extret de Sostoa *et al.*, 1990).



El límit superior de la distribució altitudinal de la bagra (*Squalius laietanus*) sembla que concorda amb la isoterma (temperatura mitjana mínima de l'aire) de 2 °C.

- 4) Cal esperar que molts d'aquests canvis siguin més importants a la Península que en altres països europeus, tenint en compte el cabal més reduït i més alterat dels nostres rius. De fet, tal com mostren Xenopoulos *et al.* (2005), es pot esperar que l'efecte directe de l'augment de la temperatura sigui molt inferior que l'efecte d'un cabal més reduït als rius, produït per menys precipitació, més evapotranspiració i també la notable extracció d'aigua que ja pateixen i que es podria incrementar en el futur. Si es té en compte el nombre més elevat d'espècies de peixos endèmiques de la Península (Doadrio, 2002), l'impacte en termes de pèrdua de biodiversitat serà també més gran que en altres països europeus.



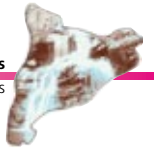
Referències bibliogràfiques

- CLAVERO, M.; GARCÍA-BERTHOU, E. (2006). «Homogenization dynamics and introduction routes of invasive freshwater fish in the Iberian Peninsula». *Ecological Applications*, núm. 16, pàg. 2313-2324.
- DAUFRESNE, M.; ROGER, M. C.; CAPRA, H.; LAMOUROUX, N. (2003). «Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors». *Global Change Biology*, núm. 10, pàg. 124-140.
- DAUFRESNE, M.; BOËT, P. (2007). «Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers». *Global Change Biology*, núm. 13, pàg. 2467-2478.
- DOADRIO, I. (ed.) (2002). *Atlas y libro rojo de los peces continentales de España*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 374 pàg.
- EATON, J. G.; SCHELLER, R. M. (1996). «Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States». *Limnology and Oceanography*, núm. 41, pàg. 1109-1115.
- ELVIRA, B.; ALMODÓVAR, A. (2007). «Los ecosistemas fluviales y sus peces ante el cambio climático». *Trofeo Pesca*, núm. 156, pàg. 116-117.
- FICKE, A. D.; MYRICK, C. A.; HANSEN, L. J. (2007). «Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries». *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, núm. 17, pàg. 581-613.
- GARCÍA-BERTHOU, E. (2007). «The characteristics of invasive fishes: what has been learned so far?». *Journal of Fish Biology*, núm. 71 (Supl. D), pàg. 33-55.
- HAUER, F. R.; BARON, J. S.; CAMPBELL, D. J.; FAUSCH, K. D. [et al.] (1997). «Assessment of climate change and freshwater ecosystems of the Rocky Mountains, USA and Canada». *Hydrological Processes*, núm. 11, pàg. 903-924.
- HOBBS, R. J.; ARICO, S.; ARONSON, J.; BARON, J. S. [et al.] (2006). «Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order». *Global Ecology and Biogeography*, núm. 15, pàg. 1-7.
- MORENO, J.; GALANTE, E.; RAMOS, M. A. (2005). «Impactos sobre la biodiversidad animal». A: J. M. Moreno Rodríguez (ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Pàg. 249-302.
- RAHEL, F. J.; OLDEN, J. D. (2008). «Assessing the Effects of Climate Change on Aquatic Invasive Species». *Conservation Biology*, núm. 22, pàg. 521-533.
- RIBEIRO, F.; ORJUELA, R. L.; MAGALHÃES, M. F.; COLLARES-PEREIRA, M. J. (2007). «Variability in feeding ecology of a South American cichlid: a reason for successful invasion in mediterranean-type rivers?». *Ecology of Freshwater Fish*, núm. 16, pàg. 559-569.
- SHARMA, S.; JACKSON, D. A.; MINNS, C. K.; SHUTER, B. J. (2007). «Will northern fish populations be in hot water because of climate change?». *Global Change Biology*, núm. 13, pàg. 2052-2064.
- SHARMA, S.; JACKSON, D. A. (2008). «Predicting smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*) occurrence across North America under climate change: a comparison of statistical approaches». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, núm. 65, pàg. 471-481.
- SIMON, T. P.; LYONS, J. (1995). «Application of the index of biotic integrity to evaluate water resource integrity in freshwater ecosystems». A: W. S. Davis, T. P. Simon (eds.). *Biological Assessment and Criteria: tools for water resources planning and decision making*. Lewis Publishers. Boca Raton (Florida, Estats Units).

SOSTOA, A. DE; CASALS, F.; FERNÁNDEZ COLOMÉ, J. V.; LOBÓN-CERVIÁ, J. [et al.] (1990). «Les comunitats de peixos continentals». A: R. Folch (ed.). *Història Natural dels Països Catalans. 11. Peixos*. Enciclopèdia Catalana, Barcelona. Pàg. 386-400.

XENOPOULOS, M. A.; LODGE, D. M.; ALCAMO, J.; MARKER, M. [et al.] (2005). «Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal». *Global Change Biology*, núm. 11, pàg. 1557-1564.

ZAMBRANO, L.; MARTÍNEZ-MEYER, E.; MENEZES, N.; PETERSON, A. T. (2006). «Invasive potential of common carp (*Cyprinus carpio*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in American freshwater systems». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, núm. 63, pàg. 1903-1910.



19. Cabals migrats i més temporalitat als rius

Narcís Prat, Universitat de Barcelona
Antoni Munné, Agència Catalana de l'Aigua

Introducció

Els components del cicle hidrològic són afectats pel canvi climàtic des de fa aproximadament 30 anys (vegeu els capítols 8, 10 i 13), i és bastant probable, si continua la tendència actual, que seguiran severament afectats al llarg del segle XXI (Milly *et al.*, 2002). Aquesta alteració dels components del cicle hidrològic no és banal, ja que la incidència sobre la disponibilitat de recursos hídrics, tant en quantitat com en qualitat, afecta de manera evident els ecosistemes aquàtics. Com s'ha vist en capítols anteriors, els canvis que es poden produir en els rius mediterranis poden ser diversos. D'una manera resumida, es pot sintetitzar que els principals efectes provocaran una reducció dels cabals circulants i l'increment de la variabilitat del seu règim, i això significa que augmentaran els episodis de sequera combinats, alhora, amb fortes crescudes (Katz, 1999; Karl i Knight, 1998; Karl i Trenberth, 2003; Ludwig *et al.*, 2004; Eisenreich, 2005). De totes maneres, aquestes alteracions afectaran de manera diferent segons el tipus de sistema fluvial. D'una banda, en els rius de muntanya, de règim nival, es podria reduir la magnitud i la duració de la crescuda de desglaç a causa de la innivació més escassa que comportarà els efectes del canvi climàtic, i fins i tot la mateixa innivació, que de manera habitual té lloc a principis i a meitat de primavera, es podria avançar a finals d'hivern i podria ser severament atenuada. En el cas dels rius que depenen sobretot de les aigües subterrànies, podrien manifestar una significativa reducció del cabal base i un increment de la temporalitat, sobretot en els períodes més eixuts, atès que els nivells freàtics podrien ser greument afectats, i per tant es reduirien els cabals de les fonts i dels brolladors (Eisenreich, 2005; Mas-Pla, 2005). L'efecte més dramàtic segurament es podrà produir als rius temporals o intermitents, habitualment de poc cabal circulant, els quals es podran arribar a assecar durant períodes de temps més llargs (Arnell *et al.*, 1996; Bonada *et al.*, 2007a).

La temporalitat és una situació que actualment ja es produeix en molts rius de règim mediterrani per causes naturals (rius petits amb poca pluja i molta evapotranspiració) (Gasith i Resh, 1999), però que ha estat agreujada a causa de l'increment de l'explotació i la captació que fa l'home de l'aigua superficial, dels aquífers, de les fonts, i de les deus. Les comunitats biològiques que habiten aquests ambients temporals tenen una certa singularitat, per la seva adaptació a les característiques d'aquests sistemes (Moreno *et al.*, 1996; Williams, 1996). La comunitat d'invertebrats està estretament relacionada amb la disponibilitat dels cabals circulants i l'hàbitat disponible (Blinn *et al.*, 1995; Gallardo-Mayenco *et al.*, 1995; Boix *et al.*, 2001). Així, hi ha comunitats adaptades a condicions de flux relativament alt en períodes de cabal continuat, en les quals són habituals les espècies d'invertebrats que emergeixen abans de la tornada a l'estiatge. En canvi, en els períodes més secs, apareixen comunitats biològiques adaptades a condicions lenítiques, amb poc oxigen dissolt, temperatures elevades, o amb estratègies que permeten resistir la sequera, sigui dispersant-se activament o adoptant formes de resistència o diverses estratègies. D'una manera sintetitzada, és possible diferenciar tres tipus d'adaptacions que les comunitats biològiques tenen per a adaptar-se als períodes secs (extret de Williams, 1996):

- **De comportament:** Alguns invertebrats amb fases adultes aquàtiques, o vertebrats, es poden dispersar cap a trams permanents a la recerca de refugi en petits pous on es protegeixen de la forta insolació. En altres casos, sobretot alguns invertebrats, es produeix un fenomen de diapausa estival, i es refugien en coves on suporten temporalment la falta de cabals a la llera. També, alguns invertebrats i petits vertebrats tenen l'habilitat

d'enterrar-se al fang o de refugiar-se entre detritus o vegetació on troben una mica d'humitat per a suportar el període de sequera, encara que en aquest últim cas alguns experts discuteixen l'èxit real d'aquesta estratègia en condicions extremes.

- **De cicle biològic:** Són estratègies relacionades amb la sincronització del cicle de vida amb la temporalitat de l'hidroperíode fluvial. Així, per exemple, la majoria d'invertebrats en rius temporals tenen un creixement ràpid inicial per a poder arribar a adults amb el temps suficient abans que comenci el període de sequera. Això permet que es puguin produir diverses generacions a l'any si la fase humida es perllonga. La dessincronització entre el cicle biològic i l'hidroperíode o la pèrdua de cabal pot condicionar la supervivència de determinades espècies i el bon estat del sistema.
- **De formes de resistència:** Alguns invertebrats i petits vertebrats són capaços de desenvolupar formes de resistència que permetran la seva supervivència durant el període de sequera, com la quiescència o la diapausa. Alguns adults poden ovopositar en lleres totalment seques i els ous romanen en diapausa fins que el cabal es restableix. Uns altres són capaços, també, de desenvolupar capes protectores durant les fases larvàries tardanes que els permetran viure en diapausa durant el període sec. Aquesta estratègia permet sobreposar-se a sequeres més o menys puntuals, encara que no ofereix garanties en períodes secs continuats o excessivament perllongats.

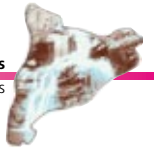
La reducció del cabal base i l'increment dels períodes secs poden afectar greument les comunitats existents i ja adaptades al clima mediterrani, fins al punt d'alterar-ne la composició i l'abundància. Mentre que la capacitat de recuperació de les comunitats davant sequeres estacionals és coneguda, la prolongació de les sequeres tenen efectes menys predictibles, molt distints segons cada cas, i poden condicionar la supervivència d'una gran proporció de la biota present actualment (Lake, 2003).

Evidentment, els efectes del canvi climàtic seran diferents en els rius regulats per embasaments respecte d'aquells que no ho estan, i dependrà també del tipus de rius de què es tracti i de la seva situació en el territori (els rius de muntanya probablement quedaran menys afectats que els més mediterranis). Els canvis que s'han de produir han de ser similars als descrits en altres països (vegeu Closs i Lake, 1994; Williams, 1996; Bond *et al.*, 2008). Segons Eisenreich (2005), en l'escala temporal dels programes de mesures previstos per la Directiva marc de l'aigua, s'esperen canvis considerables en el clima, i això afectarà també les condicions de referència, que no podran ser mitigades amb cap tipus de mesura, de manera que els valors de referència s'hauran d'ajustar en funció de la seva evolució temporal i no considerar-los, per tant, estàtics, ja que variaran com a conseqüència dels efectes que el canvi climàtic té sobre les condicions fisicoquímiques de les masses d'aigua. La revisió de la caracterització de les conques cada 6 anys, tal com requereix la Directiva marc de l'aigua, permetrà la reavaluació de les condicions de referència. En conseqüència, els objectius dels plans de mesures (per a assolir el bon estat ecològic) necessitaran una revisió de manera periòdica.

En aquest capítol s'analitzen els possibles efectes del canvi climàtic sobre els sistemes fluvials de Catalunya i les comunitats biològiques que els habiten, amb l'excepció de la comunitat de peixos, que es tracta en un capítol a part (capítol 18). La informació prèvia que tenim sobre les comunitats d'organismes dels rius de Catalunya prové tant de les dades del document IMPRESS (Agència Catalana de l'Aigua, 2005), com dels nombrosos treballs de recerca que fan referència a la qualitat ecològica dels rius i, fins i tot, alguns treballs que donen informació sobre canvis en el cicle vital d'algunes espècies.

Efectes de l'increment de la temperatura en els rius

L'increment de la temperatura de l'aire a causa de l'augment de gasos d'efecte d'hivernacle implicarà un augment directe de la temperatura de l'aigua, que variarà en funció de diversos factors (vegeu la figura 1 del resum inicial d'aquest bloc sobre ecosistemes aquàtics). En els rius amb una bona cobertura arbòria, el fet que no entri la



radiació solar directa provocarà que la temperatura s'incrementi menys, però al mateix temps, en aquests llocs, l'evapotranspiració més elevada i la pluviometria més baixa poden fer que el cabal del riu sigui més migrat, per la qual cosa l'aigua es podria escalfar més. La connexió o no del riu amb les aigües subterrànies també serà un element per tenir en compte; com més important sigui el flux d'aigua subterrània, més constant tendirà a ser la temperatura. En els rius temporals, quan el cabal del riu és reduït a un conjunt de basses desconnectades, la temperatura pot patir fluctuacions importants similars a les de l'aire (diferències importants entre dia i nit), la qual cosa afectarà l'equilibri producció/respiració en aquestes basses i, consegüentment, la possibilitat d'alternança de fases anòxiques amb episodis d'hiperoxigenació. Aquesta situació ja es produeix en molts rius on el descens de cabals és degut a l'explotació abusiva de les aigües superficials o subterrànies. Amb l'increment de la temperatura de l'aire com a possible conseqüència del canvi climàtic, el que podem esperar és que aquesta situació sigui més habitual en tot el territori.

Hi ha diverses evidències que la temperatura dels rius ha augmentat en els darrers anys. La més completa prové d'un treball recent (Prats *et al.*, 2007) i s'hi dedueix que la temperatura de l'aigua del riu Ebre a Escatrón (abans dels grans embassaments de Mequinensa i Riba-roja) s'ha incrementat 2,5 °C entre 1949 i l'any 2000. Aigües avall dels embassaments (tot i els canvis que aquests produeixen en les temperatures i malgrat la presència de la central nuclear d'Ascó), les diferències en la temperatura entre els anys vuitanta del segle passat i l'any 2005 també són clares, tot i que la falta de dades detallades abans del l'any 1995 fa més difícil detectar-ho amb precisió (Cid *et al.*, en premsa).

Un dels efectes directes de l'increment de la temperatura sobre les comunitats biològiques que habiten els rius és l'alteració del cicle de vida, que es pot accelerar i, consegüentment, la productivitat biològica es pot incrementar de manera moderada en aigües fredes, però de manera important en llocs on la temperatura mitjana ja sigui elevada (per l'increment més fort de la respiració respecte a l'assimilació). Per exemple, el cicle biològic de l'efemeròpter *Ephoron virgo* al baix Ebre, prop de Tortosa, ha resultat alterat en el poc temps que va des del 1989, quan es va estudiar per primera vegada, fins a l'actualitat. Aquest organisme té un cicle biològic molt marcat per una diapausa hivernal en l'eclosió dels ous: un cop la femella els ha dipositat en les graves del riu, les larves no apareixen fins a la primavera següent, quan la temperatura arriba prop de 14 °C. La diapausa obligada d'aquest insecte es veu clarament en el fet que es pot interrompre en el laboratori si els ous es guarden a la nevera a temperatures de prop de 4°C i, al cap d'uns dies, s'exposen a temperatures superiors: els ous s'obren. Les dades recents de Cid *et al.* (en premsa) indiquen que en aquest organisme l'eclosió dels ous al baix Ebre s'ha avançat gairebé un mes en els darrers 18 anys. Això implica que el desenvolupament és més ràpid, i podria ser una de les raons del fet que l'emergència dels adults s'hagi avançat. Tot i que hi ha altres factors que poden haver influït en els canvis en el seu cicle (com la presència de macròfits en densitats molt elevades), l'augment de la temperatura és el factor que es presenta com a més important en els canvis (Cid *et al.*, en premsa).

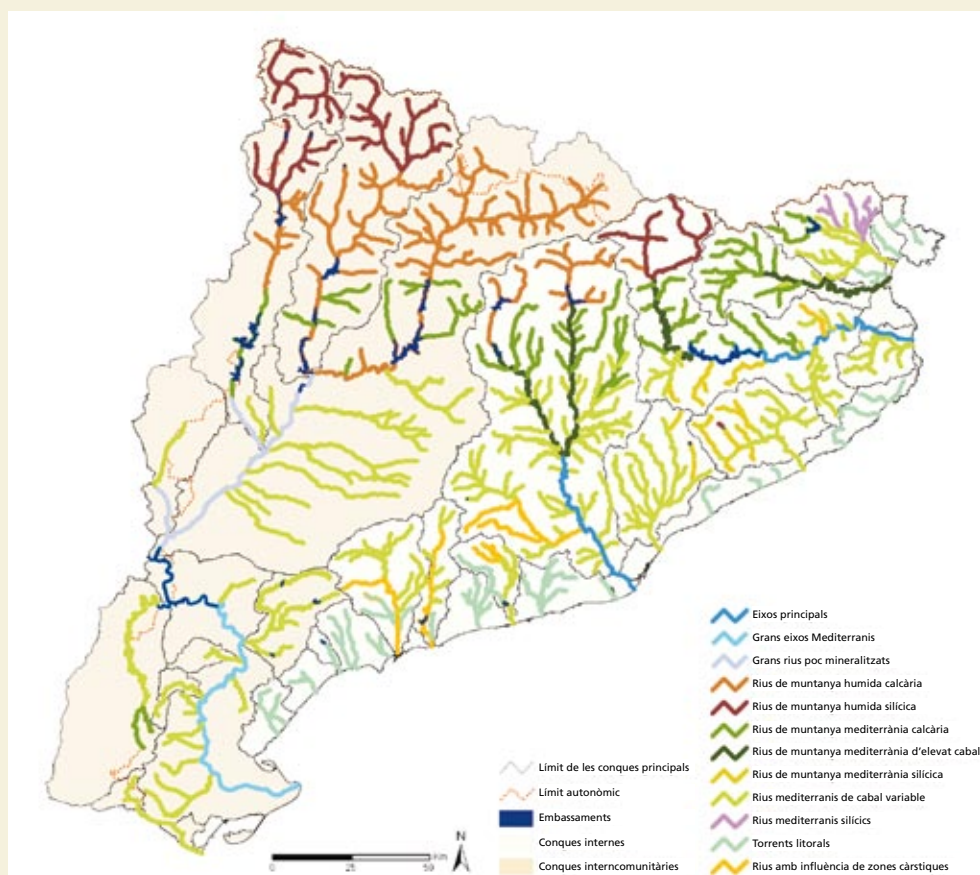
Un altre dels efectes dels increments de temperatura és el desplaçament en altitud d'algunes espècies, o l'arribada d'espècies d'ambients més càlids. No tenim constància (d'una manera detallada) que això hagi ocorregut amb els organismes aquàtics (invertebrats), especialment pel poc coneixement que es té de la seva distribució altitudinal com a espècie, però el que sí s'ha constatat és el canvi en la distribució d'espècies pròpies d'ambients estretament vinculats a condicions de temperatura especials, les quals poden veure amenaçat el seu hàbitat. Espècies avui dia distribuïdes en determinades zones d'altitud elevada (ambients freds) de Catalunya, sobretot al prelitoral o als Prepirineus, poden reduir dràsticament les seves àrees vitals, amb la possibilitat d'arribar a una situació d'aïllament i no-viabilitat per manca d'espai i de connectors adequats que possibilitin el desenvolupament normal i la viabilitat de l'espècie. Per exemple, *Baetis alpinus* (un efemeròpter) es troba sobretot a partir de 1.000 metres al Montseny i necessita rius d'aigües fredes. Si la temperatura de l'aigua puja, les poblacions segur que es refugiaran cada vegada a més altitud. Fins a quin punt això pot afectar la seva viabilitat futura per pèrdua d'hàbitat i per reducció del nombre efectiu d'individus total a la zona no ho sabem, però pel que se sap d'altres organismes, aquest pot ser un mecanisme d'extinció local de poblacions d'espècies pròpies d'aigües fredes.

Efectes dels canvis del clima en el règim de cabals en els rius

A Catalunya trobem molts tipus de rius, des de rius permanents d'aigües fredes a les muntanyes fins a rius que no porten aigua gairebé mai, o en què aquesta és present de manera intermitent. En estudis d'avaluació de les condicions ambientals i de context morfogeològic, s'han distingit 12 tipus de rius a Catalunya (Munné i Prat, 2002, 2004; Agència Catalana de l'Aigua, 2005) (figura 1). Una de les característiques principals que s'han utilitzat per a fer aquestes tipologies ha estat precisament el règim de cabals.

Un dels tipus definits han estat els rius intermitents, els que corren només una part de l'any i que, a Catalunya, corresponen a un total de 33 masses d'aigua (9%) i 489 km de lleres. Aquests rius estan situats en diferents parts del territori, tot i que una part important es concentren a prop de la costa i més aviat cap al sud (figura 1). Aquests rius, tot i quedar secs (o reduïts a simples basses) una bona part de l'any, tenen una fauna i una flora variada, i fins i tot una biodiversitat que pot ser més gran que la dels rius permanents, com ha quedat demostrat en alguns treballs (vegeu Bonada *et al.*, 2007b). La seva preservació és important, ja que si el temps en què el riu s'asseca és massa llarg, la major part d'aquesta biodiversitat pot quedar malmesa, tal com es va mostrar en l'estudi anterior al Parc Natural de Sant Llorenç del Munt i la Serra de l'Obac. Precisament, els efectes del canvi climàtic, amb la disminució de pluges i l'augment de l'evapotranspiració, apunten a una intermitència més accentuada en rius que ara ja són temporals; per tant, és important saber quins són els efectes de la falta de cabal, sobretot en els rius que ara ja són temporals i també en els rius de règim mediterrani de cabal més variable (colors blau i verd clar a la figura 1), per a arribar a saber què pot passar de manera més generalitzada en el futur en les comunitats d'organismes que hi habiten.

Figura 1. Tipus fluvials definits a les conques de Catalunya atenent a criteris fisiogràfics, hidrològics, climàtics i de context morfogeològic. (Munné i Prat, 2002, 2004; Agència Catalana de l'Aigua, 2005).





La importància de les sequeres

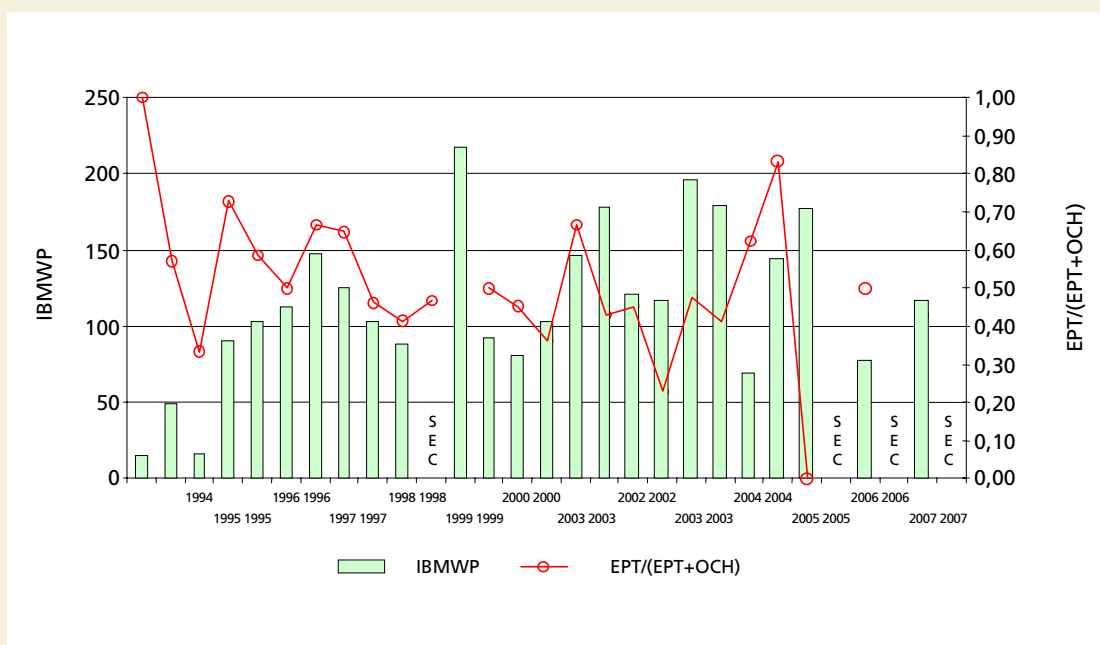
El que resulta clau per als organismes aquàtics no és només el cabal mitjà circulant, sinó especialment els canvis al llarg de l'any, i encara més els canvis extrems, és a dir, les grans riuades i les sequeres extremes, que provoquen canvis profunds en les comunitats i n'expliquen en gran part l'evolució en el temps. Aquests canvis que poden ser naturals poden ser fortament agreujats per l'acció de l'home. Un exemple dels canvis a mitjà termini que poden patir els organismes que viuen en els rius el mostra la variació al llarg dels anys del valor de l'índex biològic IBMWP (índex de valoració de la qualitat de l'aigua), calculat amb les comunitats de macroinvertebrats presents per a tres rius mediterranis de capçalera alimentats per petites fonts (figures 2, 3 i 4). En aquests gràfics hi ha dues dades per a cada any: la primera fa referència al mostreig de primavera i la segona és de l'estiu; en cas que n'hi hagi una de tercera, és del període de la tardor. En els mateixos gràfics també s'indica la relació entre $EPT/(EPT+OCH)$. Mentre que EPT és el nombre de taxa (a nivell de família) dels ordres *Plecoptera*, *Ephemeroptera* i *Trichoptera* (organismes reòfils que viuen en llocs a on hi ha corrent d'aigua), OCH ho és dels ordres *Odonata*, *Coleoptera* i *Heteroptera* (organismes propis de basses i cabal lent). L'índex tendeix a ser alt en rius permanents que sempre porten aigua i amb corrent i pedres abundants, mentre que tendeix a ser baix en llocs on dominen les basses i el riu o bé no corre gens o bé ho fa molt poc, i quan el substrat és de grava o de roca. La seva utilitat per a caracteritzar aquestes situacions fou demostrada a Bonada *et al.* (2007b).

A la figura 2 es mostra la variació dels dos paràmetres esmentats en un petit riu de capçalera (la riera de Gallifa), sense pertorbacions antropogèniques a la seva conca, i que és alimentat per una petita font que s'asseca en períodes de sequera. A la figura es pot observar com les dades de l'estiu són molt variables, i com fins i tot, en alguns anys, el riu estava totalment sec i no hi havia macroinvertebrats aquàtics (anys 1999, 2005, 2006 i 2007). Però també s'hi veu clarament com l'efecte de la sequera estival és gairebé irrellevant pel que fa a la biodiversitat i la qualitat de l'aigua de la primavera següent, i mostra la ràpida capacitat de recolonització que tenen aquests tipus d'ecosistemes en la seva resposta a la sequera.

També s'hi veu com la comunitat es recupera ràpidament del greu incendi forestal que va afectar l'estació de Gallifa l'estiu del 2003. Tot i que després de l'incendi pràcticament els macroinvertebrats van desaparèixer, les relativament abundoses pluges de la tardor del 2003, i de la primavera del 2004, van fer que al cap de pocs mesos la comunitat arribés al nombre de tàxons habituals en el riu, i el valor de l'IBMWP fos similar al que el riu tenia abans de l'incendi (Vila-Escalé *et al.*, 2007). Com es veu a la figura, les comunitats d'organismes dels rius mediterranis es recuperen força ràpidament dels incendis i les sequeres, llevat que aquests siguin recurrents a curt termini (anual o bianualment), ja que si la freqüència o la intensitat de les pertorbacions augmenta, la biodiversitat disminueix (Townsend, 1989).

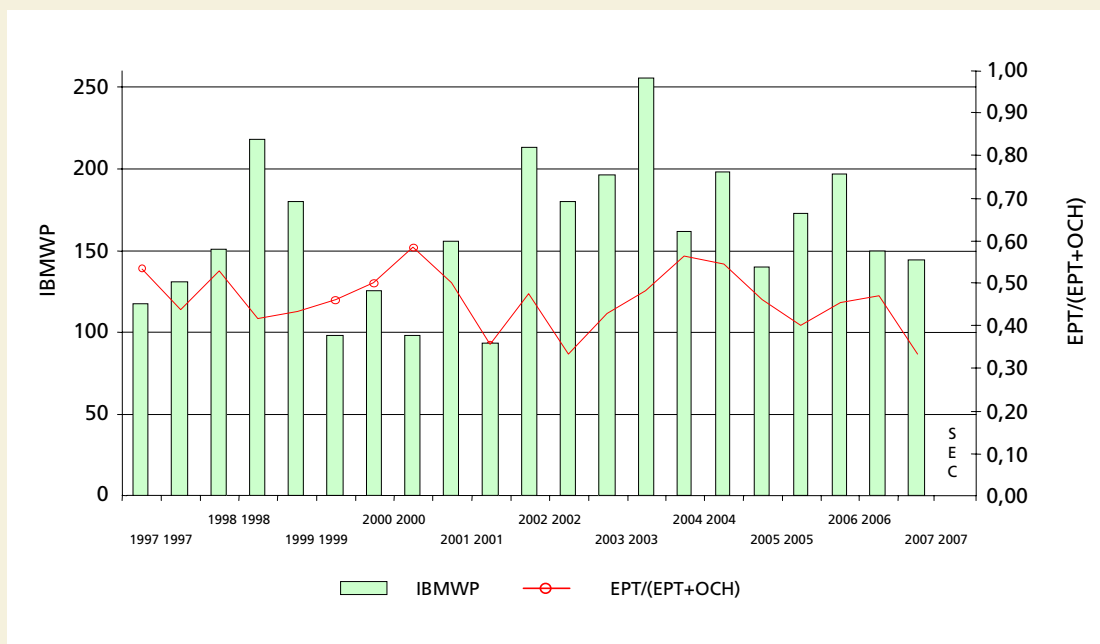
El mateix tipus d'anàlisi (variació de la comunitat de macroinvertebrats en els darrers 12 anys) el tenim per al cas de dos petits rius de la conca del Foix, també sense pertorbacions importants de qualitat de l'aigua, però un dels quals pateix una explotació de l'aigua subterrània i superficial més intensa (figures 3 i 4). Com es pot veure en els dos gràfics, mentre un dels punts no s'asseca (excepte l'any 2007), i la qualitat biològica és sempre molt bona (independentment de l'època de l'any), a l'altre les secades són més habituals, i fins i tot, en algunes primaveres, el riu està completament sec. La qualitat biològica quan el riu circula no és dolenta, però els valors absoluts són menors que al riu on el cabal és més constant. És interessant comprovar que en tots dos casos l'índex $EPT/(EPT+OCH)$ pot arribar a tenir valors molt baixos, de fins a 0,2. Per sota de valors de 0,5 els rius són més propers a una successió de basses que no pas a un riu amb aigua corrent.

Figura 2. Canvis en l'índex de qualitat IBMWP i en la relació EPT/EPT+OCH a la riera de Gallifa al llarg de diversos anys.



Per a cada any hi pot haver més d'una data. S'indiquen els anys en què el riu va estar sec a l'estiu. Dades del grup de recerca FEM (Freshwater, Ecology and Management). (www.ecostrimed.net).

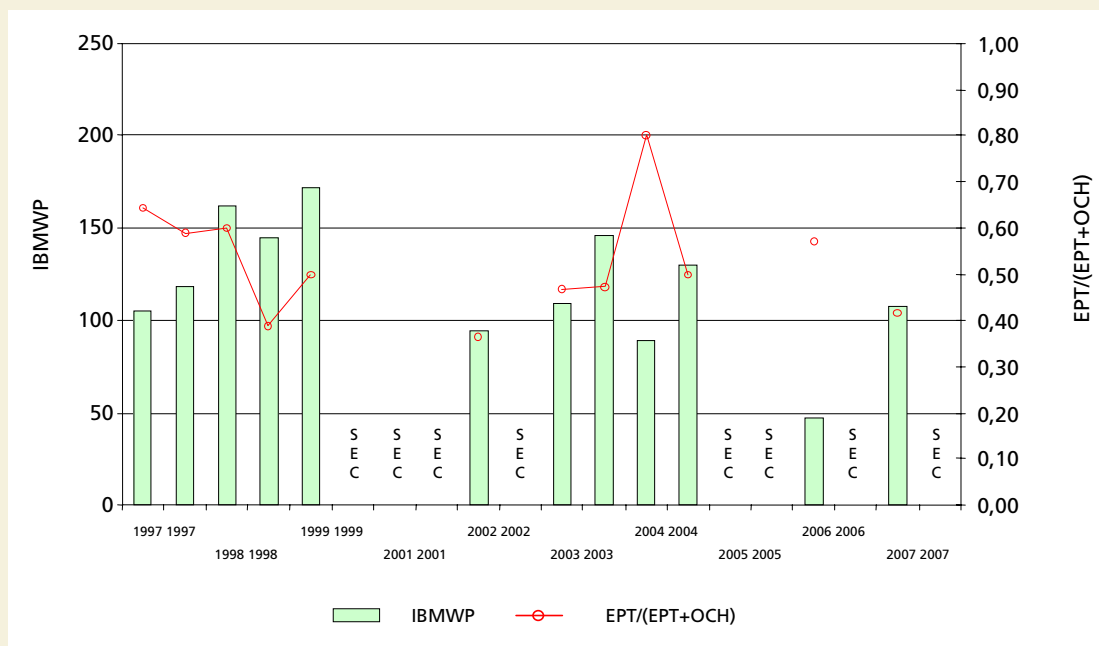
Figura 3. Evolució de la qualitat biològica i de l'índex EPT/(EPT+OCH) al torrent de l'Albereda, a la conca del Foix.



Dades del grup de recerca FEM (Freshwater, Ecology and Management). (www.ecostrimed.net).



Figura 4. Evolució de la qualitat biològica i de l'índex EPT/(EPT+OCH) a la riera de Pontons de la conca del Foix.



Dades del grup de recerca FEM (Freshwater, Ecology and Management). (www.ecostrimed.net).

La importància de les sequeres per a les comunitats de macroinvertebrats va ser analitzada per Biosca (2007). En aquest estudi es van poder analitzar en detall les comunitats de macroinvertebrats en 15 estacions de referència de diversos rius de les conques del Besòs i del Llobregat, majoritàriament de capçalera. El règim hidrològic d'aquestes estacions, i la seva qualitat fisicoquímica, no estava alterada de manera significativa per l'home. Com que hi ha dades dels mateixos punts preses dues vegades l'any al llarg de més de 10 anys, aquesta és una de les poques sèries relativament llargues de canvis en les comunitats en el temps (tot i que a nivell de família i no d'espècie) que reflecteix els canvis «naturals» en les poblacions sense que hi hagi barrejat l'efecte de l'home. En aquest estudi es va poder relacionar la pluja amb algunes mètriques indicadores de la qualitat i de les característiques dels macroinvertebrats. Dels 10 anys, només dos van ser catalogats com a humits (precipitació per damunt de la mitjana del període, el 1997 i el 2004), mentre que 4 foren clarament secs (1999, 2001, 2002 i 2005) (Biosca, 2007).

Pel que fa a les comunitats de macroinvertebrats, a l'estiu no es van detectar diferències significatives en les mètriques comparades (diversos rius s'assequen de manera natural la majoria dels anys, com hem vist anteriorment), però sí a la primavera (taula 1). És interessant veure com l'anàlisi constata que no hi ha diferències ni entre estiu ni hivern, ni entre anys secs ni humits, en el valor de l'índex biològic o el nombre de tàxons a nivell de família, però sí en canvi en la composició i en els tàxons que dominen. Això es veu clarament reflectit en les diferències significatives que hi ha en el quocient EPT/(EPT+OCH). A la taula 1 es pot observar que les mètriques sensibles a la contaminació, com els índexs IBMWP o IASPT, no són significativament diferents en els canvis de cabal del riu, tal com havíem vist a les figures 3, 4 i 5 per a les dades de la riera de Gallifa o de la capçalera del Foix (riera de Pontons).

En resum, en anys secs hi ha un canvi de comunitat important indicat per l'índex EPT/(EPT+OCH). Per tant, en el futur, si a causa del canvi climàtic els anys secs augmenten la freqüència, i en darrera instància la situació esdevé permanent i a la primavera el riu ja no flueix com a mínim diversos mesos (com ja ha passat per l'acció antròpica en molts llocs, com ara a la riera de Pontons, figura 4), això podria implicar una pèrdua de biodiversitat important, ja que desapareixerien moltes espècies pròpies dels rius amb cabals més regulars. Entre aquestes espècies hi ha la majoria de plecòpters, molts efemeròpters i també alguns dels tricòpters més particulars dels rius mediterranis, d'aquí neix la preocupació per aquests canvis futurs.

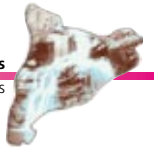
Taula 1. Canvis que es produeixen en les diferents mètriques d'avaluació de la qualitat biològica de l'aigua utilitzant macroinvertebrats en anys secs respecte d'anys més humits.

	FBILL	IBMWP	IASP	Nre. de tàxons (famílies)	EPT/(EPT+OCH))	EPT/(EPT+OCH)) abundància
Primaveres seques vs. primaveres humides						
Llobregat	Verd	Vermell	Vermell	Vermell	Taronja	Verd
Besòs	Verd	Taronja	Vermell	Taronja	Verd	Verd
Llobregat + Besòs	Verd	Vermell	Vermell	Verd	Verd	Verd
Estius secs vs. estius humits						
Llobregat	Taronja	Vermell	Vermell	Vermell	Verd	Taronja
Besòs	Taronja	Taronja	Vermell	Vermell	Taronja	Taronja
Llobregat + Besòs	Taronja	Vermell	Vermell	Vermell	Verd	Taronja

Es veu que algunes mètriques empitjoren manera significativa (color vermell), algunes canvien però no de manera significativa (color taronja) i algunes milloren de manera significativa (color verd) (extret de Biosca, 2007).

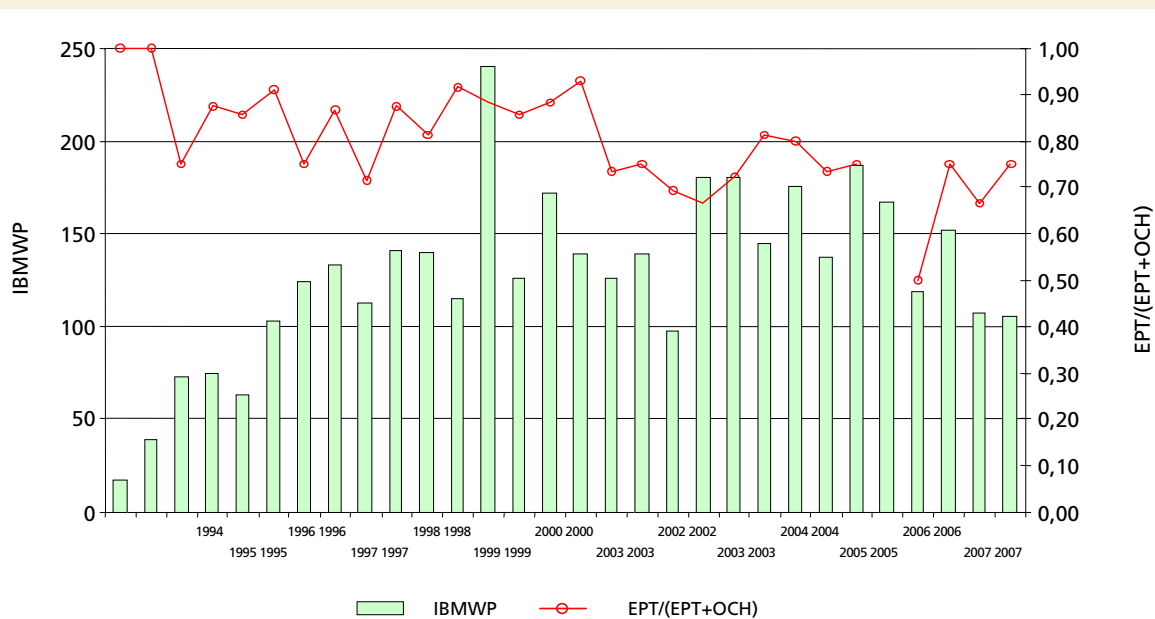
L'efecte de les riuades

Pel que fa a l'efecte d'altres perturbacions intenses com les crescudes, a la figura 5 es pot observar l'evolució dels mateixos paràmetres mesurats en petits rius mediterranis en els mateixos anys. Els resultats mostren que el valor mínim de l'índex de qualitat en un punt sota l'embassament de la Baells, no sotmès a contaminació, es dona el 1994, just després de les fortes inundacions que hi va haver en aquest període, i que no és fins al 1997 (el 1996 també hi va haver fortes inundacions) que es tornen a trobar valors propers a la mitjana del període. Observeu que en aquest cas la relació EPT/(EPT+OCH) gairebé sempre té valors superiors a 0,5, com s'escau en un riu de cabal permanent i abundant. Això també es veu en el punt de Gallifa (figura 6), on el valor mínim de l'índex biològic IBMWP també té lloc a la tardor del 1994 al llarg de la sèrie. Això fa pensar en un impacte greu de les crescudes catastròfiques, que serien més rellevants per a la recuperació de la biodiversitat que no pas les sequeres. En el cas d'un augment de la freqüència de les crescudes pel canvi climàtic podríem esperar, doncs, un impacte greu sobre les comunitats d'organismes si entre crescuda i crescuda disminuís molt el temps de recurrència.



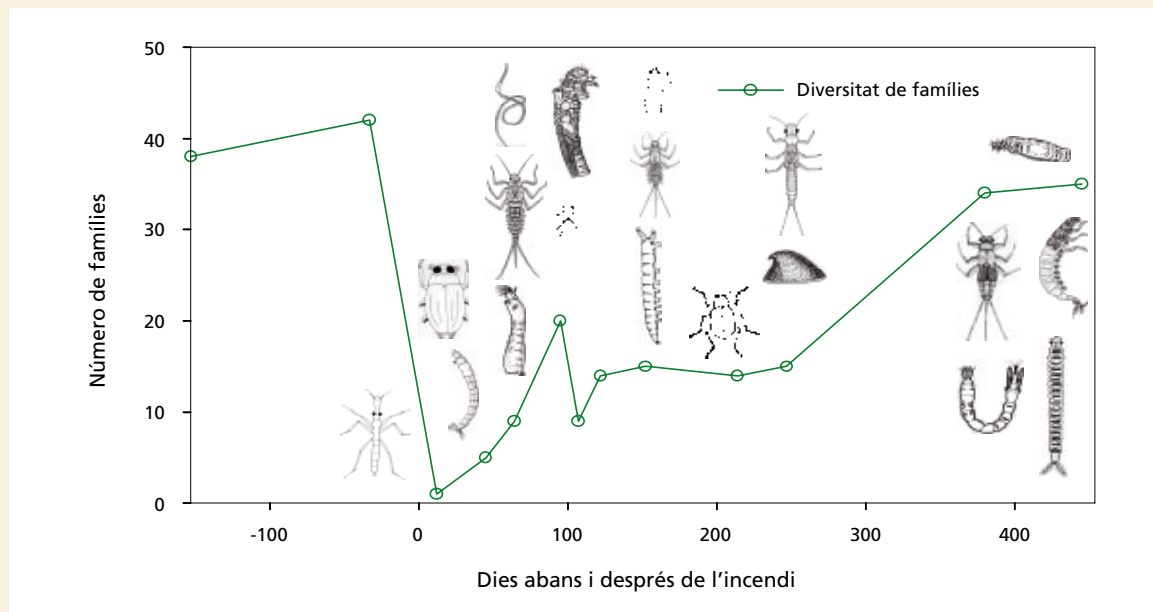
En el cas de Gallifa, si observem el que va passar entre l'agost del 2003 (quan es va cremar tota la conca) i la tardor del 2005, també es pot comprovar un patró molt interessant (figura 6). El riu, després de l'incendi i amb les primeres pluges, es queda gairebé sense fauna macroinvertebrada per l'enorme pertorbació que significa una crescuda carregada de cendres i altres materials procedents de la vegetació cremada a la conca. Però es pot observar, també, com a poc a poc es recupera la biodiversitat i, al cap de menys d'un any, la qualitat biològica és ja molt similar als valors d'abans de la pertorbació, tot i que la composició no és igual i, de fet, algunes espècies que abans del foc hi eren abundants no es van recuperar fins al cap de més anys.

Figura 5. Canvis en els valors de l'índex biològic IBMWP i de la mètrica EPT/(EPT+OCH) al llarg del temps a sota la presa de la Baells, en el riu Llobregat.



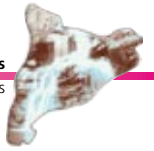
Dades del grup de recerca FEM (Freshwater, Ecology and Management).

Figura 6. Canvis en el nombre de taxa de macroinvertebrats després de l'incendi que hi va haver a la riera de Gallifa l'agost del 2003 (dades de Vila-Escalé et al., 2007).



La situació sota els embassaments

En els rius regulats la situació pot ser força diferent. En aquests rius, el règim de cabals és menys variable i les crescudes, menys habituals. Aquí, els efectes del canvi climàtic es poden derivar de la disminució dels cabals, de l'increment de la temperatura de l'aigua i d'una concentració de nutrients més elevada (capítol 17). Si amb el canvi climàtic la regulació dels rius esdevé encara més uniforme, i els cabals es controlen entorn de certs valors, el que cal esperar és que s'esdevingui el que ha ocorregut al baix Ebre o al baix Ter: d'una banda, una estabilització del nombre de tàxons, que pot ser alt si la qualitat de l'aigua és bona (vegeu, per exemple, la figura 5, en què es veu l'efecte de la regulació de la Baells sobre el riu); d'altra banda, en eliminar-se les crescudes i alliberar-se nutrients des dels embassaments, la biomassa vegetal pot augmentar (com passa al baix Ebre (Ibáñez et al., 2008), i d'aquesta manera s'incrementa la presència de macròfits. Això implica canvis en l'ecosistema (amb espècies que resulten afavorides respecte a d'altres), i pot augmentar la probabilitat d'èxit en l'aparició d'espècies exòtiques (fet sobretot molt important en el cas dels peixos). En els darrers anys l'increment de *Potamogeton pectinatus* al baix Ebre ha provocat, juntament amb altres factors, l'increment de l'abundància de la mosca negra (*Simulium erythrocephalum*), que avui en dia és una veritable plaga que es combat amb insecticides pels problemes que arriba a crear. Si augmenta la regulació dels rius i els cabals migrats (per la falta d'aportacions als rius a causa del canvi climàtic) i s'eliminen encara més les seves crescudes, aquests problemes aniran augmentant.



Referències bibliogràfiques

- AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. 2005. *Document de pressions i impactes i anàlisi del risc de no assolir els objectius de la Directiva Marc de l'Aigua* (document IMPRESS). Departament de Medi Ambient i Habitatge. 825 pàg.
- ARNELL, R.; BATES, B.; LAND, H.; MAGNUSSON, J. J.; MULHOLLAND, P. (1996). «Hydrology and freshwater ecology». A: *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation. Scientific-Technical Analysis*. Cambridge University Press, New York.
- BIOSCA, J. (2007). *Estudi dels efectes de la sequera sobre les comunitats de macroinvertebrats bentònics en estacions de referència dels rius Llobregat i Besòs*. Treball de final de carrera. Llicenciatura de Ciències Ambientals. Universitat de Barcelona.
- BLINN, D. W.; SHANNON, J. P.; STEVENS, L. E.; CARDER, J. P. (1995). «Consequences of fluctuating discharge for lotic communities». *Journal of the North American Benthological Society*, núm. 14(2), pàg. 233-248.
- BOIX, D.; SALA, J.; MORENO-AMICH, R. (2001). «Succession of the macroinvertebrate community in a temporary pond». *Verh Internat Verein Limnology*, núm. 27, pàg. 2586-2593.
- BONADA, N.; DOLÉDEC, S.; STATZNER, B. (2007a). «Taxonomic and biological trait differences of stream macroinvertebrate communities between mediterranean and temperate regions: implications for future climatic scenarios». *Global Change Biology*, núm. 13, pàg. 1658-1671.
- BONADA, N.; RIERADEVALL, M.; PRAT, N. (2007b). «Macroinvertebrate community structure and biological traits related to flow permanence in a Mediterranean river network». *Hydrobiologia*, núm. 589, pàg. 91-106.
- BOND, N. R.; LAKE, P. S.; ARTHINGTON, A. H. (2008). «The impacts of drought on freshwater ecosystems: an Australian perspective». *Hydrobiologia*, núm. 600, pàg. 3-16.
- CID, N.; IBÁÑEZ, C.; PRAT, N. (en premsa). «Life History and Production of the Burrowing Mayfly *Ephoron virgo* (Ephemeroptera: Polymitarcyidae) in the lower Ebro river (NE Spain): a comparison after 18 years». *Aquatic Insects*.
- CLOSS, G. P.; LAKE, P. S. (1994). «Spatial and temporal variation in the structure of an intermittent-stream food web». *Ecological Monographs*, núm. 64(1), pàg. 1-21.
- EISENREICH, S. J. (ed.) (2005). *Climate Change and the European Water Dimension*. EU Report No. 21553. European Commission-Joint Research Centre.
- GALLARDO-MAYENCO, A.; FRESNEDA, J.; TOJA, J. (1995). «Distribución de los coleópteros acuáticos (Insecta, Coleoptera) en dos cuencas sur de la Península Ibérica. Relaciones con algunos factores del medio». *Limnetica*, núm. 11(1), pàg. 19-28.
- GASITH, A.; RESH, V. H. (1999). «Streams in Mediterranean climate regions: Abiotic influences and biotic responses to predictable seasonal events». *Annual Reviews of Ecology Systematics*, núm. 30, pàg. 51-81.
- IBÁÑEZ, C.; PRAT, N.; DURAN, C.; PARDOS, M. [et al.] (2008). «Changes in dissolved nutrients in the lower Ebro river: Causes and consequences». *Limnetica*, núm. 27(1), pàg. 131-142.
- KARL, T. R.; KNIGHT, R. W. (1998). «SECULAR TRENDS OF PRECIPITATION AMOUNT, FREQUENCY, AND INTENSITY IN THE UNITED STATES». *Bulletin of American Meteorological Society*, núm. 78, pàg. 1107.
- KARL, T. R.; TRENBERTH, K. E. (2003). «Modern Global Climate Change». *Science*, núm. 302, pàg. 1719-1723.
- KATZ, R. W. (1999). «Extreme value theory for precipitation: Sensitivity analysis for climate change». *Advances in Water Resources*, núm. 23, pàg. 133-139.

- LAKE, P. S. (2003). Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters *Freshwater Biology*, núm. 48 (7), pàg. 1161-1172.
- LUDWIG, W.; SERRAT, P.; CESMAT, L.; GARCÍA-ESTEVE, J. (2004). «Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the Têt River (Southern France)». *Journal of Hydrology*, núm. 289, pàg. 204-221.
- MAS-PLA, J. (2005). «Recursos hídrics, dinàmica hidrològica i canvi climàtic». A: J. E. Llebot (ed.). *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible i Institut d'Estudis Catalans.
- MILLY, P. C. D.; WETHERALD, R. T.; DUNNE, K. A.; DELWORTH, T. L. (2002). «Increasing Risk Of Great Floods In A Changing Climate». *Nature*, núm. 415, pàg. 514-517.
- MORENO, J. L.; SUÁREZ, M. L.; VIDAL-ABARCA, M. R. (1996). «Valor ecológico de las ramblas como ecosistemas acuáticos singulares». *RSEHN* (volum extraordinari del 125è aniversari). Pàg. 411-415.
- MUNNÉ, A.; PRAT, N. (2002). *Regionalització del sistema fluvial a les Conques Internes de Catalunya. Aplicació de la Directiva Marc en Política d'Aigües de la Unió Europea*. Documents tècnics de l'Agència Catalana de l'Aigua. 92 pàg.
- MUNNÉ, A.; PRAT, N. (2004). «Defining river types in a Mediterranean area. A methodology for the implementation of the EU Water Framework Directive». *Environmental Management*, núm. 34 (5), pàg. 711-729.
- PRATS, J.; VAL, R.; ARMENGOL, J.; DOLÇ, J. (2007). «A methodological approach to the reconstruction of the 1949-2000 water temperature series in the Ebro River at Escatrón». *Limnetica*, núm. 26 (2), pàg. 293-306.
- TOWNSEND, C. R. (1989). «The patch dynamics concept of stream community ecology». *Journal of the North American Benthological Society*, núm. 8, pàg. 36-50.
- VILA-ESCALÉ, M.; VERKAIK, I.; VEGAS, T.; RIERADEVALL, M.; PRAT, N. (2007). «Evolució de la comunitat de macroinvertebrats en un riu mediterrani després d'un incendi forestal». *VI Trobada d'Estudiosos de Sant Llorenç del Munt i l'Obac*. Diputació de Barcelona. Pàg. 205-209.
- WILLIAMS, D. D. (1996). «Environmental constraints in temporary fresh waters and their consequences for the insect fauna». *Journal of the North American Benthological Society*, núm. 15, pàg. 634-650.



20. Ecosistemes amb risc elevat: els deltes i les llacunes litorals

Carles Ibáñez,
Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries

Introducció

Fins ara no s'ha trobat cap estudi adreçat a analitzar els impactes ambientals del canvi climàtic als deltes i les llacunes costaneres de Catalunya; per tant, el que es pugui dir actualment és encara força especulatiu i s'ha de recolzar en altres estudis realitzats en ecosistemes similars, com ara altres llacunes mediterrànies, tot i que els pocs estudis existents també són força preliminars. Amb relació als deltes, els pocs estudis que hi ha es refereixen al delta de l'Ebre, i se centren bàsicament en els efectes de la pujada del nivell del mar, un dels efectes directes més importants del canvi climàtic (Ibáñez i Canicio, 1994; Day *et al.*, 1995; Ibáñez *et al.*, 1997; Sánchez-Arcilla *et al.*, 1996, 2005, 2007, 2008).

Un estudi bibliogràfic encarregat per la Unió Europea, amb el títol *Canvi climàtic i la dimensió europea de l'aigua* (Eisenreich *et al.*, 2005), dedica un apartat a analitzar els efectes del canvi climàtic a la conca de l'Ebre i el seu delta. Les conclusions principals d'aquest estudi són les següents:

- Els models aplicats mostren que a la conca de l'Ebre la temperatura augmentarà 2-3 °C durant aquest segle (Alcamo *et al.*, 1996). Això provocarà pèrdues d'aigua per evaporació i més demanda d'aigua per als conreus i la vegetació natural, així com per altres activitats humanes.
- La precipitació disminuirà entre el 5% i el 20%, segons el Govern espanyol (PHN, 2003). Ayala-Carcedo i Iglesias (2000) estimen per al 2050 una reducció del 16% en la disponibilitat de recursos d'aigua a la conca.
- Molt probablement hi haurà una freqüència més alta d'esdeveniments extrems (sequeres, inundacions i onades de calor).
- La disminució del cabal fluvial implicarà una menor dilució de contaminants i un increment de la salinitat.
- Al delta, la pujada del nivell del mar i la subsidència causaran una pèrdua d'elevació de 0,2-0,82 m el 2100 i amenaçaran els aiguamolls i els conreus.

Amb relació al darrer informe del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (GIECC, 2007), els principals efectes previstos al sud d'Europa són els següents:

- Temperatures més altes i sequeres més intenses
- Disponibilitat reduïda d'aigua i menor generació hidroelèctrica
- Decreixement en el rendiment de conreus i efectes negatius en el turisme
- Increment de les onades de calor i freqüència més alta d'incendis forestals
- Impactes als sistemes costaners a causa de la pujada del nivell del mar

A continuació fem una anàlisi dels principals efectes del canvi climàtic als deltes i les llacunes costaneres de Catalunya: la pujada del nivell del mar i l'increment de la temperatura.

La pujada del nivell del mar

Les prediccions formulades en el darrer informe del GIECC (2007) indiquen que per a finals del segle XXI es produirà un increment mitjà del nivell del mar d'entre 18 i 59 cm, depenent dels diferents escenaris d'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle. Els efectes de l'augment del nivell del mar variaran d'un lloc a l'altre i dependran de la magnitud de l'augment relatiu del nivell del mar, de la morfologia/topografia costanera i de les modificacions humanes. Tanmateix, aquests impactes podran ser especialment greus en les regions on les variacions intermareals són petites. En general, com més petita és la zona intermareal, més gran és la susceptibilitat a una pujada del nivell del mar. En aquest sentit, les costes mediterrànies i del Bàltic tenen una baixa amplitud de les variacions mareals (< 1 m), un factor que suggereix que aquestes regions seran altament vulnerables a la pujada del nivell del mar, com és el cas del delta de l'Ebre o del Llobregat, amb un baix rang mareal (20 cm).

Als deltes, la pujada del nivell del mar és més crítica que en altres zones costaneres, per diversos motius:

- La seva baixa elevació (0-3 m), que fa que el risc d'inundació sigui alt.
- La pèrdua d'elevació dels deltes per compactació (subsidiència), que cal sumar a la pujada real del nivell del mar. La suma de totes dues variables es coneix com a pujada relativa del nivell del mar (PRNM).
- La forta dependència de les aportacions d'aigua i sediments de la conca, que en minvar a causa dels regadius, els embassaments i altres usos, accentuen la subsidiència, la regressió i la salinització de la plana deltaica.

En el cas del delta de l'Ebre, l'únic sistema costaner de Catalunya del qual es disposa d'algunes dades i estimacions (Ibáñez *et al.*, 1997), la situació és la següent:

- Les taxes de subsidiència estimades són d'1-5 mm/any, depenent de les característiques locals.
- La taxa de pujada de nivell del mar actual és d'uns 3 mm/any, i continuarà creixent durant aquest segle.
- La pujada relativa del nivell del mar prevista per al final del segle XXI cal situar-la entre 0,6 i 1 m, per la qual cosa el 50% del delta estarà sota el nivell mitjà del mar.
- La taxa de retrocés de la costa (per manca de sediments) és superior als 2-3 m/any en la majoria dels casos, però la part atribuïble a la PRNM no es coneix (tot i que s'estima un ordre de magnitud inferior).

La pujada de la temperatura

La pujada de la temperatura de l'aire a Catalunya és un fet contrastat a la majoria d'observatoris, tot i que les implicacions reals d'aquest augment sobre els ecosistemes aquàtics costaners es desconeixen.

La temperatura a la superfície del Mediterrani va augmentar 0,75 °C entre el 1993 i el 2003, la qual cosa representa cinc vegades més que la mitjana de la resta de mars i oceans del planeta, segons un estudi del Laboratori de Geodèsia Espacial de la Universitat d'Alacant en col·laboració amb la NASA (Vigo *et al.*, 2005; García *et al.*, 2006). La pujada de la temperatura també s'ha registrat a les masses d'aigua costaneres de Catalunya, tot i que les sèries de dades llargues corresponen a mar oberta (per exemple, l'Estartit). En el cas de sistemes més confinats (llacunes i badies), on cal esperar un impacte tèrmic més gran per la poca fondària que tenen, les dades són més puntuals en l'espai i el temps, de manera que no hi ha prou informació per valorar l'evolució de l'augment de temperatura de l'aigua en aquests ecosistemes. La sèrie de dades probablement més llarga en un sistema costaner parcialment confinat, que pot ser prou representatiu de la tendència a les llacunes costaneres, és la de les badies del delta de l'Ebre (els Alfacs i el Fangar).

En el cas de la badia dels Alfacs, s'ha estimat un increment de gairebé 2 °C per al període 1990-1998 a l'aigua de fons, a 6 m de fondària (De Pedro, 2007). Aquest augment és molt pronunciat, tot i que la sèrie de dades



probablement no és prou llarga per treure conclusions definitives sobre la magnitud de la tendència. Els anys 2003 i 2006 es van registrar temperatures màximes força elevades a les badies del delta de l'Ebre (figures 1 i 2), que van produir mortalitats de bivalves (Fernández-Tejedor *et al.*, 2008). L'any 2003 es va produir una mortalitat total del musclo en ambdues badies per l'augment i la persistència de les elevades temperatures a l'aigua. Als Alfacs, les temperatures van passar dels 28 °C (del 14 de juliol al 25 d'agost), amb un màxim de 30,9 °C. Al Fangar també van passar dels 28 °C (en les mateixes dates) i es va arribar a un màxim de 29,9 °C registrat en els mostrejos rutinaris del *Programa de seguiment de la qualitat de les aigües, els mol·luscs i el fitoplàncton tòxic a les zones de producció de marisc del litoral català* de la Direcció General de Pesca de la Generalitat. L'any 2006, a la badia del Alfacs es va tornar a produir una mortalitat de musclo durant l'estiu relacionada amb les elevades temperatures (Fernández *et al.*, 2008). L'any 1994 ja s'havia produït un episodi de mortalitat de bivalves per les elevades temperatures a la badia dels Alfacs. El creixement i la mortalitat de *Mytilus galloprovincialis* a la badia del Fangar està fortament afectada per les elevades temperatures de juliol i agost (Ramón *et al.*, 2007).

Figura 1. Temperatures a l'estació central de la badia dels Alfacs a les fondàries de 0,5 m i 6 m del 1992 al 2007.

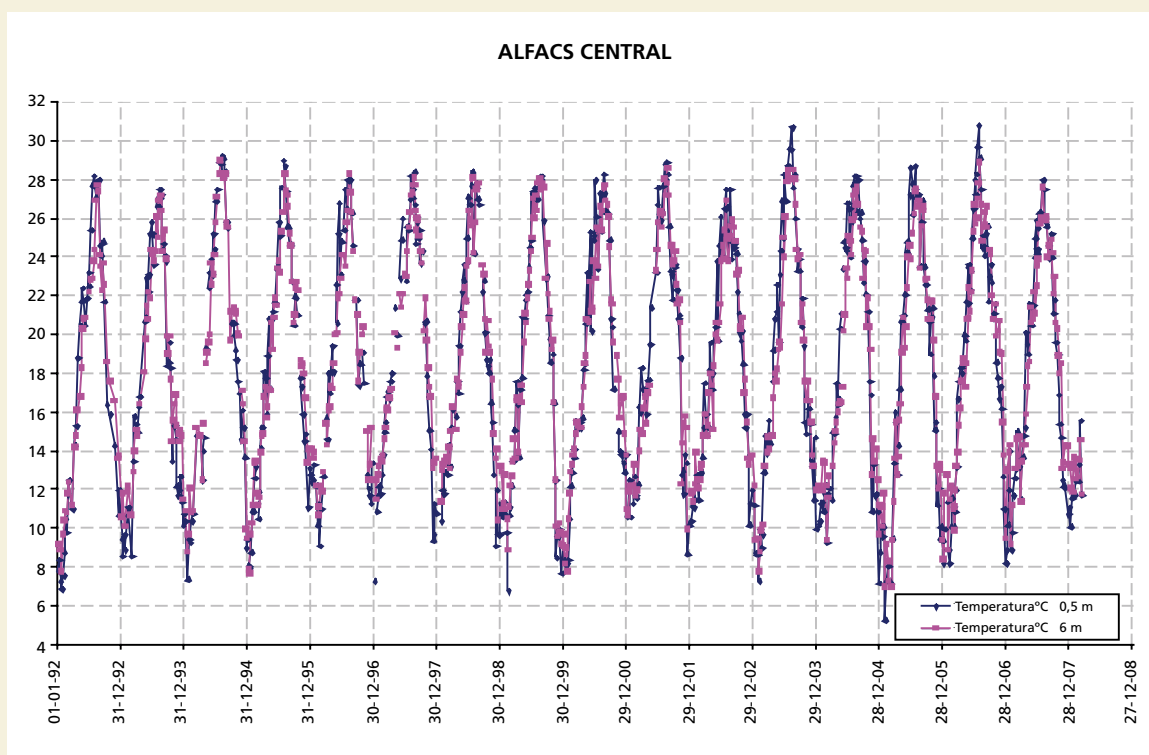
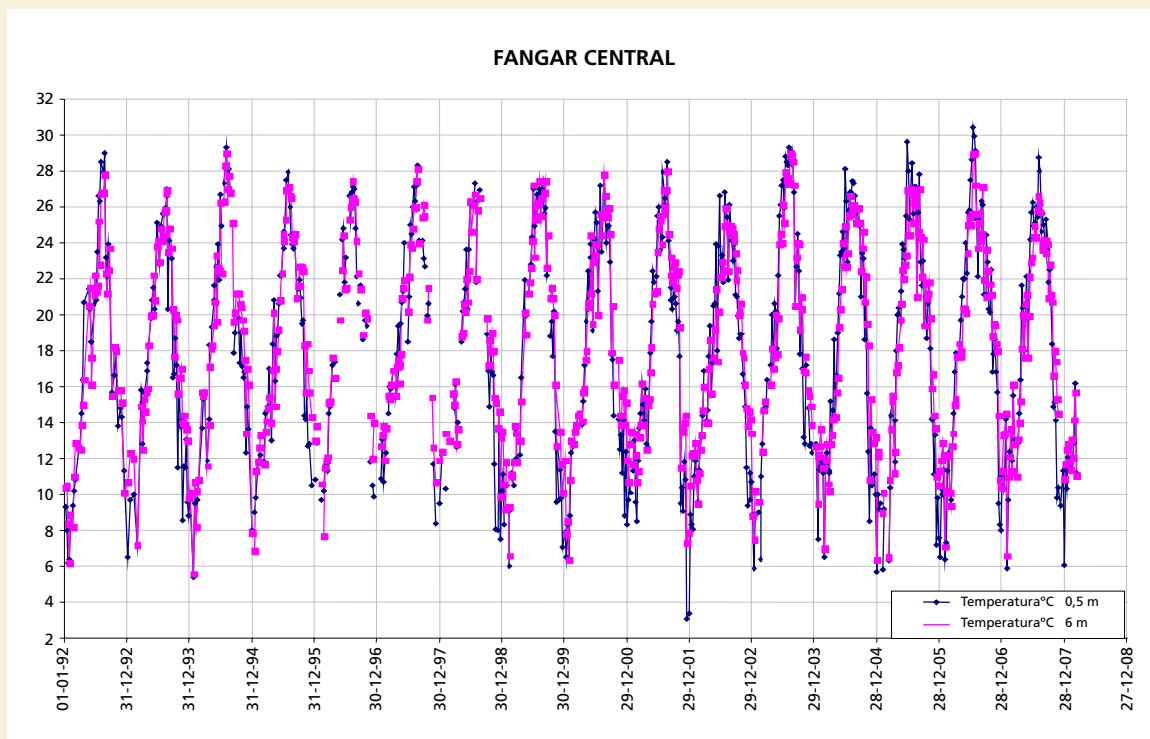


Figura 2. Temperatures a l'estació central de la badia del Fangar a les fondàries de 0,5 i 6 m del 1992 al 2007.



Efectes previsibles i possibles escenaris futurs

En aquest apartat analitzem els efectes encara no contrastats, però que són previsibles segons la seva constatació en altres ecosistemes similars o bé pel que preveu la teoria ecològica.

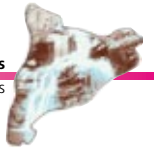
Els principals impactes previstos sobre els ecosistemes costaners de Catalunya (deltes i llacunes) són els següents:

- Canvis en el metabolisme dels ecosistemes: augment més elevat de la respiració amb relació a la fotosíntesi (augment del grau d'heterotròfia), amb la disminució consegüent de la producció primària neta
- Canvis en la composició i la diversitat de les comunitats biològiques: desenvolupament més gran de les espècies adaptades a la temperatura elevada
- Mortalitat d'espècies sensibles a temperatures extremes i més hipòxia, especialment peixos i bivalves
- Canvis en la hidrologia i la salinitat de les llacunes i les badies
- Retrocs de la costa i pèrdua d'extensió dels ecosistemes litorals

Tot seguit analitzarem més detalladament els efectes previsibles del canvi climàtic a les llacunes costaneres (Hoepffner, 2006):

a) Per augment de la temperatura:

- Canvis en el metabolisme dels organismes i en la distribució del nínxol ecològic.



- Canvis en les interaccions entre espècies i en la seva distribució.
- Canvis en l'estructura de la xarxa tròfica i els cicles biogeoquímics.
- Canvis en els processos ecològics, especialment en la producció primària i descomposició.

b) Per canvis en el règim de precipitacions:

- Alteració del balanç hídric dels ecosistemes costaners.
- Alteració del transport de nutrients dissolts des de la conca hidrogràfica fins als ecosistemes costaners.
- Canvis en el transport de sediments des de la conca hidrogràfica i des del mar.

c) Per la pujada del nivell del mar:

- Augment de la fondària de la llacuna.
- Alteració de la circulació de l'aigua.
- Canvis en el transport de sediments i en l'equilibri erosió-sedimentació.
- Increment de la inundació dels aiguamolls costaners amb aigua salada.

d) Per augment de la radiació ultraviolada:

- S'ha demostrat que la radiació ultraviolada (RUV) té efectes deleteris sobre nombrosos organismes i processos planctònics.
- En algues marines, fanerògames i fitoplàncton, la fotosíntesi es pot inhibir per la RUV.
- La RUV augmenta la mortalitat bacteriana i del fitoplàncton, particularment als primers 5 m de la columna d'aigua.
- La RUV pot canviar l'estructura i la dinàmica de la xarxa tròfica pelàgica, que deriva cap a una xarxa tròfica microbiana.

Figura 3. Síntesi dels possibles impactes del canvi climàtic a la conca de l'Ebre i el delta.

Increment de temperatura
Decrement precipitació
Increment demanda d'aigua (vegetació)

Decrement cabals fluvials i reserves d'embassaments
Decrement recursos hídrics soterranis
Estrès hídric (vegetació)
Conflictes hídrics (usos)
Pèrdua de biodiversitat
Ecosistemes terrestres com a font neta de CO₂



Pujada nivell del mar
Increment de la temperatura de l'aigua
Increment tempestes

Regressió de la costa
Pèrdua d'aiguamolls
Increment salinitat d'aigua i sòl
Danys als conreus
Danys a l'aqüicultura
Danys al turisme

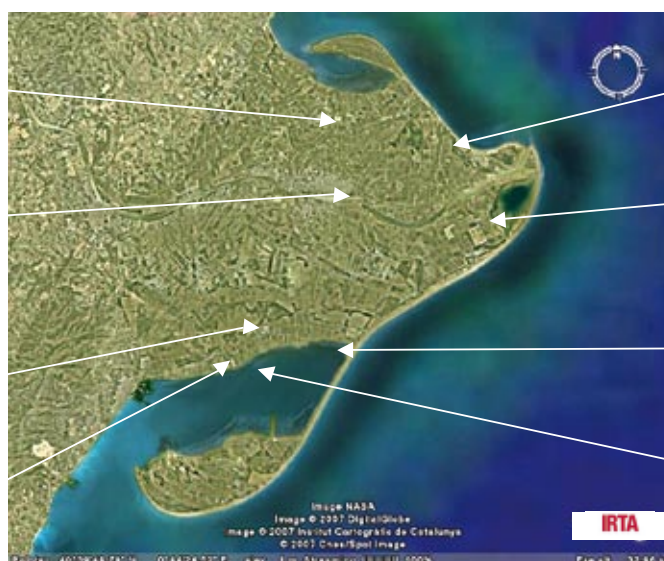
Figura 4. Síntesi dels impactes relacionats amb el canvi climàtic al delta de l'Ebre (efectes directes i efectes combinats amb altres causes).

Increment salinitat sòl que afecta conreus

Disminució cabals fluvials i sediments

Subsidència del sòl de 3 mm/any

T° estival de la badia fins a 30 °C



Zones urbanitzades en risc

Regressió costanera de 10 m/any

Pujada nivell del mar de 3 mm/any

Hipòxia estival i mortalitat de musclos



Referències bibliogràfiques

- ALCAMO, J.; KREILEMAN, G. J. J.; BOLLEN, J. C.; VAN DEN BORN, G. J.; GERLAGH, R.; KROL, M. S.; TOET, A. M. C.; DE VRIES, H. J. M. (1996). «Baseline scenarios of global environmental change». *Global Environmental Change*, núm. 6, pàg. 261-303.
- AYALA-CARCEDO, F. J.; IGLESIAS, A. (2000). «Impactos del posible cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular». A: BALAIRÓN (ed.). *El cambio climático*, pàg. 201-222. El Campo de las Ciencias y las Artes, Servicio de Estudios del BBVA. Madrid.
- BOELEN, P.; POST, A. F.; VELDHUIS, M. J. W.; AMD BUMA, A. G. J. (2002). «Diel patterns of UVBR-induced DNA damage in picoplankton size fractions from the Gulf of Aqaba, Red Sea». *Microbial Ecology*, núm. 44, pàg. 164-174.
- COMISSIÓ EUROPEA (2007). *Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius. The way ahead for 2020 and beyond. Impact assessment*. Brussel·les. 57 pàg.
- DAY, J. W.; PONT, D.; HENSEL, P.; IBÁÑEZ, C. (1995). «Impacts of sea-level rise on deltas in the Gulf of Mexico and the Mediterranean: the importance of pulsing events to sustainability». *Estuaries*, vol. 18, núm. 4, pàg. 636-647.
- DE PEDRO, X. (2007). *Situacions d'anòxia en zones estuarianes sense forçament mareal: una aproximació als balanços producció/consum d'oxigen*. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. 411 pàg.
- EISENREICH, S. J. (ed.) (2005). *Climate change and the european water dimension*. Europe. Comissió Europea – Joint Research Centre. Ispra (Itàlia). 253 pàg.
- FERNÁNDEZ, M.; DELGADO, M.; VILA, M.; SAMPEDRO, N.; CAMP, J.; FURONES, D.; DIOGENE, J. (2008). *Resultados del programa de seguimiento de fitoplancton tóxico y biotoxinas en las zonas de producción de bivalvos de Cataluña: años 2003-2006 y primer trimestre del 2007*. Actes de la IX Reunió Ibérica sobre Fitoplancton Tóxico y Biotoxinas, Cartagena, 7-10 de maig de 2007.
- FERNÁNDEZ-TEJEDOR, M.; ELANDALOUSSI, L.; MALLAT, E.; CAÑETE, E.; CAILLAUD, A.; RIOBO, P.; PAZ, B.; FRANCO, J.; IBARRA, D.; CEMBELLA, A.; BLASCO, D.; DIOGENE, J. (2008). *The Ebro Delta coastal embayments, a GEOHAB pilot site for the study of HAB population dynamics*. Proceedings of the 12th International Conference on Harmful Algae, Copenhagen (Dinamarca), setembre de 2006.
- GAMBOLATI, G.; TEATINI, P.; GONELLA, M. (2002). «GIS simulation of the inundation risk in the coastal lowlands of the Northern Adriatic Sea». *Mathematics and Computer Modelling*, núm. 35, pàg. 963-972.
- GARCÍA, D.; CHAO, B.; DEL RIO, J. et al. (2006). «On the steric and mass-induced contributions to the annual sea level variations in the Mediterranean Sea». *Journal of Geophysical Research – Oceans*, núm. 111(C9).
- HOEPFFNER, N. (ed.) (2006). *Marine and coastal dimension of climate change in Europe*. Comissió Europea – Joint Research Centre. Ispra (Itàlia). 107 pàg.
- IBÁÑEZ, C.; DAY, J. W.; PONT, D. (1999). «Primary Production and decomposition in wetlands of the Rhône Delta, France: interactive impacts of human modifications and relative sea level rise». *Journal of Coastal Research*, núm. 15(3), pàg. 717-731.
- IBÁÑEZ, C.; CANICIO, A.; DAY, J. W. (1997). «Morphologic evolution, relative sea-level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta». *Journal of Coastal Conservation*, núm. 3, pàg. 191-202.
- IBÁÑEZ, C.; CANICIO, A. (1994). *Estudi del risc de polderització del delta de l'Ebre. Causes i conseqüències de la pujada del nivell del mar*. Informe tècnic. Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya.

GIECC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Secretaria GIECC. Ginebra (Suïssa).

LLORET, J.; MARÍN, A.; MARÍN-GUIRAO, L. (en premsa). «Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change?». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

MOSTAJIR, B.; DEMERS, S.; DE MORA, S.; BELZILE, C.; CHANUT, J.-P.; GOSSELIN, M.; ROY, S.; VILLEGAS, P. Z.; FAUCHOT, J.; BOUCHARD, J. (1999). «Experimental test of the effect of ultraviolet-B radiation in a planktonic community». *Limnology and Oceanography*, núm. 44, pàg. 586-596.

PHN, Pla Hidrològic Nacional (2003). *Climate change effects*. Ministeri de Medi Ambient. Madrid.

PONT, D.; DAY, J. W.; HENSEL, P.; FRANQUET, E.; TORRE, F.; RIOUAL, P.; IBÁÑEZ, C.; COULET, E. (2002). «Response scenarios for the deltaic plain on the Rhône in the face of an acceleration in the rate of sea-level rise with special attention to *Salicornia*-type environments». *Estuaries*, núm. 25(3), pàg. 337-358.

RAMÓN, M.; FERNÁNDEZ, M.; GALIMANY, E. (2007). «Development of mussel (*Mytilus galloprovincialis*) seed from two different origins in a semi-enclosed Mediterranean Bay (N.E. Spain)». *Aquaculture*, núm. 264, pàg. 148-159.

SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; JIMÉNEZ, J. A.; VALDEMORO, H. I.; GRACIA, V. (2008). «Implications of Climatic Change on Spanish Mediterranean Low-Lying Coasts: The Ebro Delta Case». *Journal of Coastal Research*, núm. 24, pàg. 306-316.

SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; JIMÉNEZ, J. A.; VALDEMORO, H. I. (2007). «The vulnerability and sustainability of deltaic coasts: the case of the Ebro Delta, Spain». *Managing Coastal Vulnerability*, pàg. 79-95. Elsevier.

SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; JIMÉNEZ, J. A.; SIERRA, J. P. (2005). «Zones costaneres: dinàmica sedimentària». A: LLEBOT, J. E. (ed.). *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*, pàg. 609-642. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible, Generalitat de Catalunya.

SÁNCHEZ-ARCILLA, A. (ed.) (1997). *Impacts of Climate Change on Northwestern Mediterranean Deltas. MEDDELT Project. Final Report*. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; JIMÉNEZ, J.; STIVE, M. J.; IBÁÑEZ, C.; PRAT, N.; DAY, J. W.; CAPOBIANCO, M. (1996). «Impacts of sea-level rise on the Ebro Delta: a first approach». *Ocean and Coastal Management*, núm. 30, pàg. 197-216.

SCAVIA, D.; FIELD, J. C.; BOESCH, D. F. et al. (2002). «Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems». *Estuaries*, núm. 25(2), pàg. 149-164.

SHORT, F. T.; NECKLES, H. A. (1999). «The effects of climate change on seagrasses». *Aquatic Botany*, núm. 63, pàg. 169-196.

SIMAS, T.; NUNES, J. P.; FERREIRA, J. G. (2001). «Effects of global climate change on coastal salt marshes». *Ecological Modelling*, núm. 139, pàg. 1-15.

SMITH, R. C.; PREZELIN, B. B.; BAKER, K. S.; BIDIGARE, R. R.; BOUCHER, N. P.; COLEY, T.; KARENTZ, D.; MACINTYRE, S.; MATLICK, H.; MENZIES, D.; ONDRUSEK, M.; WAN, Z.; WATERS, K. J. (1992). «Ozone depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters». *Science*, núm. 255, pàg. 952-959.

TROUSSELLIER, M.; BONNEFONT, J.-L.; COURTIES, C.; DERRIEN, A.; DUPRAY, E.; GAUTHIER, M.; GOURMELON, M.; JOUX, F.; LEBARON, P.; MARTIN, Y.; POMMEPUY, M. (1998). «Responses of enteric bacteria to environmental stresses in seawater». *Oceanologica Acta*, núm. 21, pàg. 965-981.

VIAROLI, P.; AZZONI, R.; BARTOLI, M.; GIORDANI, G.; TAJÉ, L. (2001). «Evolution of the trophic conditions and dystrophic outbreaks in the Sacca di Goro lagoon (Northern Adriatic Sea)». A: FARANDA, F. M.; GUGLIELMO, L.;



SPEZIE, G. (ed.). *Structure and processes in the Mediterranean Ecosystems*, cap. 56, pàg. 443-451. Springer-Verlag. Milà (Itàlia).

VIGO, I.; GARCÍA, D.; CHAO, B. F. (2005). «Change of sea level trend in the Mediterranean and Black seas». *Journal of Marine Research*, núm. 63(6), pàg. 1085-1100.

WORREST, R. C. (1989). «What are the effects of UV-B radiation on marine organisms?». A: SCHNEIDER, T. et al. (ed.). *Atmospheric Ozone Research and its Policy Implications*, pàg. 269-278. Elsevier. Amsterdam (Països Baixos).



21. El mar i les costes catalanes ja noten l'efecte del canvi climàtic

Joandomènec Ros,
Universitat de Barcelona

Introducció

A les incerteses associades de manera general als efectes del canvi climàtic sobre els ecosistemes, al mar se n'hi afegeixen altres, relacionades amb les característiques dels oceans respecte de les masses continentals. Efectivament, l'impacte del canvi climàtic en el medi marí és difícil d'establir perquè, per començar, l'ambient marí ens és encara molt menys conegut que el terrestre; pel que fa a les sèries temporals de temperatures, per exemple, rarament es remunten a més de tres dècades i en general estan limitades a aigües costaneres.

A això cal sumar-hi que les característiques físiques, els equilibris químics i les respostes biològiques dels oceans estan subjectes a dinàmiques que s'estenen per bona part de l'oceà mundial (cal recordar aquí la «cinta transportadora oceànica»; Broecker, 1991), des de la superfície fins al fons i per un medi que té una inèrcia (tèrmica, per exemple) notable. Al mateix temps, amb prou feines comencem a conèixer la dinàmica de fenòmens a macroescala oceànica, com és el cas d'*El Niño*, o el funcionament d'àrees no prou estudiades fins ara, com ara l'oceà Austral i l'Antàrtida. Per acabar-ho d'adobar, s'hi afegeixen sinèrgicament els efectes d'altres impactes antròpics que poden emascarar o potenciar alguns d'aquests efectes, des de la contaminació fins a la sobrepesca.

Tot i així, ja comencem a tenir prou indicis, i en alguns casos certes (Levitus *et al.*, 2000; Duarte i Tintoré, 2001; Cicerone *et al.*, 2004; Harley *et al.*, 2006), que l'impacte del canvi climàtic es deixa sentir al mar i que els efectes són encara més variats, impactants i preocupants del que es preveia fa tres lustres (Fields *et al.*, 1993). Hom passarà una breu revista a aquests efectes, tant a escala oceànica global com pel que fa al Mediterrani, tot distingint separatament aquells que afecten bàsicament el medi físic i el paisatge d'aquells que generen impactes sobre els organismes i les comunitats que aquests organismes formen; essent, però, de naturalesa física el mateix canvi climàtic, ambdós grups d'efectes es reforcen mútuament o es confonen: un augment del nivell del mar no tan sols causa canvis en la línia de costa, sinó que també ho fa en les espècies i les comunitats litorals, i els canvis en la distribució i l'abundància relativa de determinades espècies es traslladen per tota la xarxa tròfica i incideixen immediatament en l'aspecte del paisatge litoral i marí.

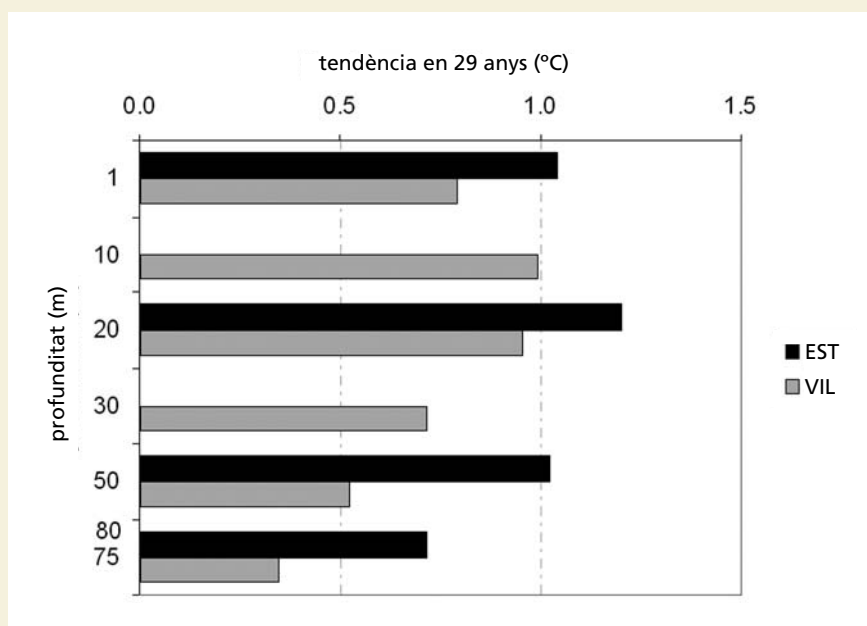
Alteracions sobre el medi físic i el paisatge

Temperatura

Malgrat la manca de sèries llargues de temperatures en gairebé tots els mars, s'ha pogut establir que en el darrer mig segle les aigües oceàniques superficials (entre 0 i 300 m de profunditat) han experimentat un augment mitjà de 0,31 °C (Parrilla *et al.*, 1994; Gouretski i Koltermann, 2007; MacKenzie i Schiedek, 2007). Al nord del Mediterrani occidental, tres sèries de dades (de l'Estartit, l'illa del Levant, a les illes de Ieras, i Vilafranca de Mar, aquestes dues darreres a la costa francesa) es remunten a una mica més de trenta anys, i són les més extenses que hi ha (Francour *et al.*, 1994; Romano *et al.*, 2000; Salat i Pascual, 2006). El resum del que indiquen és clar: en aquest terç de segle, la temperatura de les aigües superficials del Mediterrani occidental septentrional ha augmentat al voltant d'1 °C de mitjana; l'augment més gran s'ha donat cap als 20 m de fondària (1,2 °C), i àdhuc a les aigües situades a 80 m la temperatura ha augmentat uns 0,7 °C (figura 1). En vista de la gran inèrcia

tèrmica del mar, en especial en aigües profundes, l'efecte de l'escalfament és notable i els seus impactes poden ser molt importants, tant pel que fa a l'augment de volum de la massa d'aigua i a la disminució de la densitat de l'aigua del mar (i al seu paper en la circulació geostrofica), com pel que fa a la fisiologia, la fenologia, l'ecologia i la distribució dels organismes marins (vegeu l'apartat 2).

Figura 1. Augment de la temperatura de l'aigua a diferents profunditats en dues localitats del Mediterrani nord-occidental, l'Estartit (EST) i Vilafranca de Mar (VIL, Alps Marítims), al llarg de gairebé un terç de segle (Font: Salat i Pascual, 2006).



pH

Al mar, el pH és lleugerament alcalí i força constant, entre 8 i 8,3, i només hi ha desviacions d'aquest rang depenent de la variació de la concentració de diòxid de carboni i d'oxigen: en aigües superficials ben il·luminades, quan hi ha poc CO_2 (perquè és usat per les algues com a matèria primera per a la fotosíntesi) i molt O_2 (produït per aquestes plantes), el pH pot pujar lleugerament, fins a 9, i alcalinitzar l'aigua de mar. En aigües pregones, on la matèria orgànica produïda en superfície es va descomponent, i en fer-ho consumeix oxigen, el pH pot baixar fins a 7,6. Aquesta gama no és tan extensa com en les aigües continentals.

El pH depèn de la quantitat de CO_2 de l'aigua, en equilibri amb la de l'atmosfera. El diòxid de carboni es dissol bé en aigua (on la seva concentració és unes mil vegades més gran que a l'atmosfera), formant-hi àcid carbònic, que es dissocia ràpidament en ió bicarbonat i, si les condicions són alcalines, en carbonat, alliberant hidrogenions en cada cas; el carbonat, en condicions més àcides, retorna a bicarbonat; és el sistema carbònic-carbonats, responsable de l'equilibri dinàmic del carboni dissolt. Si, assolit un determinat equilibri, la quantitat de CO_2 augmenta en l'aigua, creix l'acidesa (la concentració d'hidrogenions) i immediatament s'afavoreix que els hidrogenions es combinin amb els carbonats i hi hagi pas de carbonat a bicarbonat, i de bicarbonat a àcid carbònic. Si la quantitat de diòxid de carboni disminueix, el sistema ho compensa descomponent bicarbonat a carbonat més hidrogenions i mantenint l'equilibri.



L'alcalinitat o acidesa de les aigües naturals té importància perquè en depèn l'equilibri entre precipitació i dissolució d'alguns compostos, i la capacitat de la mateixa aigua per mantenir l'equilibri pel que fa a la dissociació iònica, la capacitat també. Quan el carbonat de calci precipitat (en forma de calcita o aragonita) en la closca d'un mol·lusc o d'un crustaci, o en l'esquelet d'una madrepòra coral·lina, passa a bicarbonat, l'estructura es dissol. La capacitat de mantenir en les aigües estructures esqueletiques a base de carbonat depèn, doncs, del pH. En certes condicions naturals (aigües fredes, polars o pregones), és difícil formar closques o esquelets calcaris: no hi ha coralls polars o abissals, els mol·luscs no tenen conquilla o la tenen prima (o tova), etc. La situació és exactament la contrària per als esquelets formats per silici: en aquests casos, les aigües fredes afavoreixen la precipitació de silicats, i les càlides, la dissolució.

Com a conseqüència de l'increment antròpic de la concentració de CO_2 a l'atmosfera, també ha augmentat l'entrada d'aquest gas al mar, i l'ha començat a acidificar, entre 0,1 i 0,3 de pH (Caldeira i Wickett, 2003; Sabine *et al.*, 2004; Orr *et al.*, 2005; Blackford i Gilbert, 2007; Gazeau *et al.*, 2007). Si no es fa res per reduir l'entrada de CO_2 als oceans, el pH de l'aigua de mar es pot reduir en 0,5 unitats en acabar el segle XXI (Royal Society, 2005). (El mateix escalfament de l'aigua de mar està alentint l'entrada de més CO_2 als oceans, ja que la solubilitat d'aquest gas i altres és funció inversa de la temperatura; Lefèvre *et al.*, 2004.)

L'acidificació de l'aigua del mar pot comportar un trasbalsament enorme per a molts organismes d'una gran importància ecològica i econòmica. Entre els planctònics, cal assenyalar les cocolitoforals, els foraminífers i els pteròpodes (unes de les manges preferides de les balenes; Riebesell *et al.*, 2004). Molts organismes bentònics, mol·luscs, crustacis i equinoderms, entre altres, tenen esquelets calcaris (Bibby *et al.*, 2007; Gazeau *et al.*, 2007; Miles *et al.*, 2007). Però potser els més afectats seran els coralls formadors d'esculls, en especial els d'aigües superficials i càlides (Hughes *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2004; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007; Turley *et al.*, 2007; Fine i Tchernov, 2007; NOAA, 2008). Els seus esquelets, que les algues simbiotes que tenen ajuden a construir, tindran dificultats per mantenir-se intactes en aigües més àcides, i la gran biodiversitat que hostatgen els esculls coral·lins també en sortirà força malmesa.

Alguns d'aquests efectes ja s'han començat a notar en alta mar, per bé que amb resultats contradictoris (darrerament hi ha indicacions que les aigües més àcides afavoreixen la proliferació de cocolitoforals; Iglesias-Rodríguez *et al.*, 2008), i tant els experiments de laboratori com l'estudi de forts gradients de pH naturals (al voltant de surgències de gasos en fons de regions volcàniques del Mediterrani; Hall-Spencer *et al.*, 2008) indiquen un impacte evident sobre algues calcàries, madreporaris i equinoderms, entre altres.

Determinades comunitats mediterrànies dependents d'organismes calcificats (el *trottoir* mediolitoral de *Lithophyllum byssoides* i, molt especialment, la comunitat circalitoral del coral·ligen; Ros *et al.*, 1985; Ballesteros, 2006) poden resultar molt afectades. Hom no creu que la capacitat també de l'oceà pugui quedar afectada a mitjà termini.

Nutrients

El canvi climàtic no ha d'implicar per si mateix variacions en la quantitat de nutrients al mar i al litoral, però alguns processos generats o afavorits per aquest canvi poden comportar modificacions en el règim habitual d'aportació de nutrients i, per tant, en la producció primària; el mateix descens del pH pot mobilitzar determinades formes iòniques rares a l'alcalinitat normal de l'oceà. En els escenaris d'augment del nivell del mar (vegeu l'apartat 1.6), hom pot imaginar que força comunitats litorals, tant submergides (herbeis de fanerògames, etc.) com emergides (vegetació de maresmes, etc.), patiran reducció de la radiació incident (en el límit inferior de les primeres) i/o immersió continuada (les segones), la qual cosa haurà d'afavorir la mort de les plantes constituents i la descomposició de la matèria orgànica, amb l'alliberament consegüent de nutrients.

El ritme a què això succeirà, però, serà prou lent perquè no comporti cap impacte notable, i el mateix es pot dir dels episodis de pluges torrencials, que podran implicar revingudes més freqüents i aportació de sediments i nutrients al litoral. Un altre aspecte, encara poc estudiat, és el paper que poden tenir els organismes fixadors de nitrogen atmosfèric en un oceà més ric en diòxid de carboni; les primeres indicacions apunten un augment de l'entrada de nitrogen al mar (Barcelos e Ramos *et al.*, 2007; Levitan *et al.*, 2007). De la mateixa manera que s'ha pogut establir en comunitats terrestres, per al bacterioplàncton i el fitoplàncton marins l'augment de temperatura implica un consum més gran de diòxid de carboni i d'oxigen (Vázquez-Domínguez *et al.*, 2007), de manera que no és clar que la producció primària total dels oceans i del Mediterrani en concret es pugui beneficiar d'aquest increment de CO₂, de nitrogen fixat i (si és cert que augmentaran els episodis de vents del sud, amb càrrega de pols sahariana; vegeu l'apartat 1.4) de fòsfor i de ferro.

És segur que un augment del ritme de desglaç dels casquets de glaç polar i una freqüència més elevada de despreniment d'icebergs augmentarà l'entrada de sediments i nutrients als mars de latituds altes (Smith *et al.*, 2007), però ignorem quin impacte pot tenir això més enllà dels mars regionals afectats.

Règims de vents

S'ha suggerit que un dels canvis associats al canvi climàtic global serà l'augment d'episodis catastròfics de circulació atmosfèrica, des dels ciclons i els huracans tropicals fins als vents regionals associats al temps meteorològic. Encara hi ha moltes incerteses sobre aquest punt, però cal recordar aquí almenys tres aspectes de la biologia marina en els quals els vents tenen un paper destacat.

En primer lloc, els afloraments induïts o reforçats per vents litorals (com ara el del golf de Lleó, per indicar-ne el més proper) poden resultar afectats en certa manera per canvis eventuais en el règim de vents (i per l'escalfament concomitant de l'aigua). Segon, i amb independència de quina sigui la causa de la sobreabundància de meduses i sifonòfors que darrerament es registra prop del litoral (Mills, 2001; Attrill *et al.*, 2007; Ros, 2007), els organismes del macroplàncton i en especial del nèuston són molt dependents dels corrents i dels vents pels seus moviments poblacionals passius. En ocasió de vents de llevant, el litoral català rep més d'aquests visitants d'alta mar que en altres règims de vents, amb els problemes associats que es coneixen (Gili i Pagès, 2005).

Tercerament, els vents procedents del nord d'Àfrica aporten al Mediterrani (i a altres àrees estudiades, com ara les Canàries) pols sahariana, amb una càrrega notable de materials susceptibles d'actuar com a nutrients per als productors planctònics (fòsfor, ferro) o, alternativament, de gèrmens (vegeu l'apartat 2.4).

Règims de corrents

Més preocupant que el possible efecte sobre el règim de vents resulta l'impacte del canvi climàtic sobre els corrents marins. Aquests corrents són més el resultat de l'equilibri dinàmic entre masses d'aigua segons la seva densitat (circulació geostrofica) que no pas l'efecte dels vents sobre l'oceà, i és clar que l'escalfament global provoca que la densitat de l'aigua de mar canviï regionalment, en unes àrees amb una aportació més gran d'aigua dolça (per fusió del glaç terrestre; Holland *et al.*, 2007; Howatt *et al.*, 2007) i en altres per una reducció d'aquestes entrades (augment de l'evaporació i reducció de la precipitació). Això ha provocat que l'èmfasi de l'impacte més notable del canvi climàtic sobre el mar s'hagi fet en la possible disrupció del sistema de corrents, tal com el coneixem ara (Broecker, 1991; Alley, 2007), amb efectes bruscos i catastròfics.

Efectivament, l'escenari que planteja esquemàticament el film *The Day After Tomorrow* (2004) d'una alteració sobtada del sistema de circulació superficial i profunda de l'Atlàntic nord, amb efectes immediats sobre el clima regional i la desviació de corrents (entre els quals, el del golf, que escalfa Europa), no sembla impossible, i més



si es té en compte els episodis de canvis climàtics ocorreguts en alguna època històrica (la petita edat del glaç). Hom pot modelar aquestes i altres modificacions (per exemple, dels corrents del Mediterrani), però el marge d'incertesa és massa gran per dir-ne res de concret. Moltes espècies aprofiten els corrents per als seus moviments migratoris, que, en conseqüència, es poden alterar.

Pujada del nivell del mar

Segurament, un dels efectes més coneguts del canvi climàtic és la pujada del nivell del mar com a conseqüència de, com a mínim, dos efectes: la dilatació de la massa d'aigua per efecte de l'escalfament (vegeu l'apartat 1.1) i l'aportació diferencial de l'aigua continental per fusió incrementada del glaç de geleres, casquets polars i glaç terrestre en general (la del glaç marí no fa variar el nivell del mar). Segons les diferents projeccions, i la seva revisió constant, en els escenaris més negatius la pujada estimada del nivell del mar és de prop d'un metre al llarg del segle XXI, equivalent al total de la que hi ha hagut a les costes europees i nord-americanes, allà on els registres són fiables, durant els darrers dos o tres segles (Rahmstorf, 2007).

Encara que aquest augment pugui semblar moderat, moltes regions de costes baixes (àrees deltaïques, estuarianes, illes oceàniques coral·lines, etc.) estan amenaçades tant per la pujada del nivell del mar com per la incidència d'episodis de tempestes i altres maltempsades que també es pronostiquen en augment. A casa nostra, els deltes (especialment el de l'Ebre) i les àrees d'aiguamolls i maresmes, a més de les urbanitzades prop de la línia de costa, perillan en cas que es compleixi o s'agreugi aquest escenari. Malgrat que s'han preparat simulacions prou realistes de l'efecte que aquesta pujada del nivell del mar pot tenir en les àrees litorals més poblades i urbanitzades (com ara la que va fer Greenpeace el 2007, que pot portar aquesta ONG als tribunals per, suposadament, atemptar contra el futur econòmic de la regió de Múrcia), que destaquen els danys als béns urbans (McGranahan *et al.*, 2007; Bosello *et al.*, 2007; etc.; vegeu l'apartat 2.9), l'impacte més gran serà segurament ecològic.

Efectivament, la pujada del nivell del mar colgarà àrees naturals que avui dia (per bé que malmeses en part per les activitats humanes) proporcionen serveis ecosistèmics prou notables: la filtració de les aigües fluvials contaminades per part dels aiguamolls; la producció primària elevada dels poblaments d'algues fotòfiles i de les praderies de fanerògames marines (especialment, al Mediterrani, de *Posidonia oceanica*); i el paper d'àrees de cria i alimentació per a ocells, peixos i invertebrats en general d'aquestes comunitats, que, si queden cobertes per les aigües en ascens, difícilment es podran restablir en àrees ara ja molt alterades o urbanitzades.

Canvis en la biota i les comunitats

De manera gairebé insensible, hom ha anat passant dels efectes sobre l'entorn físic als efectes sobre les espècies d'organismes i les comunitats que formen. Ara cal comentar d'una manera més concreta aquests efectes més clarament ecològics, i les conseqüències per a la biodiversitat i per a la nostra espècie.

Canvis en les pautes de distribució geogràfica i batimètrica

El primer efecte que se'ns acut a l'hora de plantejar el futur dels poblaments bacterians, vegetals i animals en un mar més càlid és que algunes espècies es podran adaptar més o menys bé als canvis (bàsicament, l'augment de la temperatura de les aigües) i mantindran o expandiran la seva distribució actual, mentre que altres no ho faran, i reduiran aquesta distribució i àdhuc desapareixeran, a ritmes que només s'han pogut establir per a molt poques espècies (Barnes *et al.*, 2001; Sabatés *et al.*, 2006; Mackas *et al.*, 2007; Lima *et al.*, 2007; Mackenzie *et al.*, 2007; Mieszkowska *et al.*, 2007; Jagtap i Nagle, 2007; Simmonds i Isaac, 2007; etc.).

De manera general (Hughes, 2000), les espècies monotípiques i adaptades rigidament a determinades condicions tèrmiques seran les més afectades, mentre que les monotípiques amb més facilitat d'adaptació i, especialment, les politípiques, dividides en diferents poblacions adaptades a règims tèrmics també diferents, seran les que es podran adaptar amb menys dificultats a l'escalfament generalitzat del seu hàbitat, gràcies a la resistència i l'expansió de les seves poblacions més termòfiles, en detriment de les que ho són menys. Els sistemes de dispersió d'ous, larves i propàguls en general, molt lligats al sistema oceànic de corrents, d'abast mundial, haurà d'afavorir més que en els ecosistemes terrestres aquesta redistribució segons els nous escenaris tèrmics.

Actualment, algunes espècies d'àmplia distribució, que en mars més freds (com ara els marginals de l'oceà Atlàntic) són pròpies d'aigües superficials, se solen trobar al Mediterrani en aigües pregones; atès que el Mediterrani té temperatures més altes tant al llarg del cicle anual com seguint un perfil batimètric (la temperatura profunda d'aquest mar no davalla mai dels 12 °C, en clara contraposició amb les aigües oceàniques, que a partir d'alguns centenars de metres ja assoleixen els 4 °C), aquestes espècies cerquen el seu òptim tèrmic, que pot diferir molt en poblacions de la mateixa espècie a un cantó i l'altre de l'estret de Gibraltar, per exemple. És evident que aquest «enfonsament» cercant les temperatures més adients no es podrà produir gaire més enllà si la massa d'aigua en general, i no tan sols les aigües superficials, s'escalfa. A més a més, caldrà que les espècies de les quals depenen les que modifiquin el seu hàbitat també ho facin; en cas contrari, es poden donar situacions de manca parcial o total de correspondència depredador-presa, o altres relacions que poden quedar alterades (Durant *et al.*, 2007; MacLeod *et al.*, 2007; Freitas *et al.*, 2007; etc.).

Així mateix, al Mediterrani hi ha hagut històricament un clar gradient latitudinal: les espècies més termòfiles, tant les pelàgiques com les bentòniques, es trobaven limitades a les costes nord-africanes i llevantines (Mediterrani oriental), mentre que les més capaces de tolerar temperatures baixes eren més pròpies de les costes europees, en especial del Mediterrani occidental. Hom podia trobar distribuïdes adientment segons els gradients tèrmics esmentats les espècies que havien entrat al Mediterrani, un cop restablerta la connexió d'aquest mar amb l'Atlàntic fa uns cinc milions d'anys, en les èpoques glacials (espècies d'afinitats temperades i boreals, més pròpies de les aigües septentrionals i pregones del Mediterrani) i les que hi havien entrat en èpoques interglacials (espècies d'afinitats tropicals i subtropicals, més pròpies de les aigües meridionals i superficials del Mediterrani).

Darrerament, algunes d'aquestes espècies mediterrànies d'afinitats tropicals o termòfiles han ampliat la seva distribució; el raor (*Xyrichtys novacula*), el fadri (*Thalassoma pavo*) i l'anfós (*Epinephelus marginatus*), per exemple, entre els peixos, són ara ben comunes en aigües del Principat, mentre que fa poques dècades eren rares i es trobaven en abundància només en àrees més meridionals (per exemple, les illes Balears). *Parablennius pilicornis* (una bavosa), *Scorpaena maderensis* (escòrpora de Madeira) i *Pomadasys incisus* (roncador), entre altres, han estat esmentades recentment de les costes catalanes i franceses, molt més septentrionals que la seva àrea de distribució habitual. És molt probable que aquesta situació sigui més general, però hi ha poques espècies tan fàcils d'observar i tan conegudes com els peixos.

Així mateix, a les aigües més càlides de les Balears, en especial, han trobat recer espècies alienes procedents de la migració lessepsiana (Por, 1978) o d'altres orígens (vegeu l'apartat 2.6). Això és així per a algunes espècies de peixos (com ara *Siganus rivulatus*) i per a moltes espècies d'algues (*Asparagopsis taxiformis*, *Womersleyella setacea*, *Lophocladia lallemandii*, *Caulerpa racemosa*, *C. taxifolia*, *Acrothamnion preissii*, etc.), absents fa dues dècades i que avui dominen el paisatge submarí en alguns indrets de les Illes (Ballesteros, com. pers.; Patzner, 1998; Ballesteros *et al.*, 2007; etc.).

Un dels pocs estudis que demostren clarament el canvi en la distribució d'una espècie és el de Sabatés *et al.* (2006), sobre l'alatxa (*Sardinella aurita*). El treball analitza els canvis en l'abundància i la distribució d'aquesta espècie termòfila al llarg de les darreres dècades i troba una correlació positiva entre les anomalies tèrmiques i les captures: les abundàncies d'un any depenen de les temperatures registrades en l'època de maduració de l'any



anterior. Al mateix temps, el límit septentrional dels ous i les larves de l'alatxa ha passat de la latitud aproximada del delta de l'Ebre de fa vint anys a la latitud de Blanes d'avui dia: l'escalfament progressiu de les aigües superficials ha permès l'extensió cap al nord de l'espècie, i no deu ser l'única (Brunel i Boucher, 2007).

En qualsevol cas, si les espècies d'afinitats tropicals podran expandir la seva àrea de distribució en un escenari d'escalfament del Mediterrani, què els passarà a les espècies d'afinitats boreals, constituents de les anomenades «faunes fredes» (Pérès i Picard, 1964), moltes de les quals actualment es troben acantonades en aigües pregones o localitats molt septentrionals d'aquest mar, on formen poblaments reduïts o relictos? No és difícil pronosticar que el ritme de reducció de la seva àrea de distribució continuarà, un procés que segurament va començar des de la mateixa introducció en aigües mediterrànies, ara fa alguns milions d'anys, des de les fredes aigües de l'Atlàntic durant els períodes glacials.

Això és el que sembla que els passa, entre altres espècies, als mol·luscs *Cyprina (Arctica) islandica* i *Buccinum undatum*, i als peixos *Platichthys flesus* i *Raja clavata*. Algunes davallades importants en les poblacions de determinades espècies (per exemple, de fucals; Thibaut *et al.*, 2005) podrien estar produïdes, entre altres impactes, per l'escalfament creixent de les nostres costes.

Canvis en la fenologia

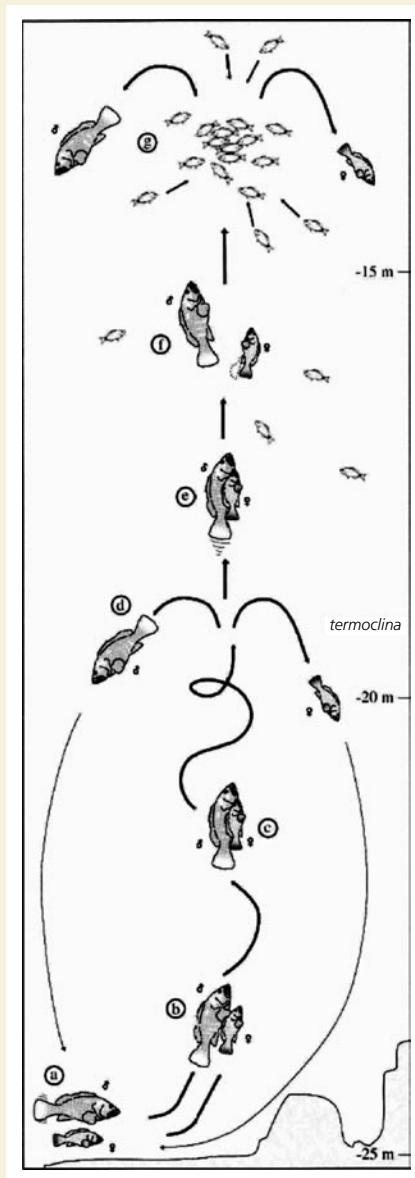
El canvi tèrmic no tan sols afecta la distribució: algunes espècies veuen alterades pautes biològiques i ecològiques de tota mena, que van des de la variació en la disponibilitat d'aliment fins a la proporció entre els sexes, molt dependent de la temperatura en els peixos (Mora i Ospina, 2001; Navarro *et al.*, 2005). L'efecte demogràfic a mitjà termini d'aquests canvis pot ser força important. Així mateix, com ja està ben establert en els ecosistemes terrestres, en els marins es pot donar un decalatge en les èpoques de fresa i reproducció en les espècies en què la dependència de la temperatura és forta, en lloc de seguir una pauta més lligada al temps calendari (Høye *et al.*, 2007; Greenwood, 2007; Hawkes *et al.*, 2007; etc.).

Un dels canvis més espectaculars, ultra els relacionats amb la variació de la proporció sexual en algunes espècies de peixos, és el que correspon a la parada nupcial i la fresa de l'anfós (*Epinephelus marginatus*), observada per primer cop en aigües catalanes (de les illes Medes) fa una dècada (figura 2; Zabala *et al.*, 1997). La reproducció d'aquesta espècie termòfila no s'havia registrat mai a una latitud tan alta, on només arribaven juvenils desclosos en aigües meridionals del Mediterrani. De segur que aquest no és l'únic cas.

Estrès fisiològic

Els organismes no responen com a màquines de tot o res al canvi climàtic: la temperatura em convé i em quedo o no em convé i marxo. Les noves condicions poden comportar modificacions en la fisiologia, des d'una menor quantitat d'oxigen disponible per a les activitats normals (Morán *et al.*, 2006; Portner i Knust, 2007; Michaelidis *et al.*, 2007; Anestis *et al.*, 2007; etc.) fins a una menor capacitat competitiva amb relació a les altres espècies en les noves condicions, que s'afegeixen a les limitacions en les disponibilitats alimentàries ja esmentades. L'adaptació a les noves condicions, doncs, comporta canvis notables en la biologia de les espècies i en l'ecologia de les comunitats.

Figura 2. Representació esquemàtica d'un episodi de fresa en l'anfós, segons el van observar i el van descriure per primer cop a les illes Medes Zabala et al. (1997). No totes les conseqüències del canvi climàtic al Mediterrani són tan interessants.



Malalties

Alguns d'aquests canvis cauen dins de l'apartat de malalties: l'estrès fisiològic debilita unes espècies i n'augmenta la morbiditat, i les noves condicions faciliten la proliferació d'altres que són causants de malalties. Bona part dels casos de malalties i mortalitats en massa (vegeu l'apartat 2.6) estan lligats a altes temperatures episòdiques o duradores (Harvell et al., 1999; Lafferty et al., 2004; Bruno et al., 2007; Bally i Garrabou, 2007; etc.). Cal interpretar «malalties» d'una manera molt àmplia, des de la proliferació de gèrmens (a causa de l'augment de la temperatura o d'altres efectes sinèrgics, com, per exemple, l'augment de nutrients; vegeu l'apartat 1.3) fins a la sobreabundància d'espècies tòxiques, bàsicament dinoflagel·lats i altres algues causants de proliferacions nocives



(Gómez i Claustre, 2001; Vila i Masó, 2005). Les característiques ambientals que faciliten aquesta proliferació (aigües tranquil·les, càlides i riques en nutrients) sembla que són cada cop més freqüents en àrees arrecerades del litoral mediterrani.

No cal dir que l'ús d'antibiòtics, que és una pràctica comuna en l'aqüicultura extensiva, ha comportat la generació de resistència per a molts patògens, cosa que s'afegeix als efectes de l'escalfament esmentats més amunt, en un exemple clar de sinergia entre diferents impactes antròpics (vegeu l'apartat 2.6).

Episodis de mortalitats en massa i a gran escala

De tots els efectes catastròfics associats al canvi climàtic, el que fins ara sembla més ben establert i que ha produït uns resultats espectaculars (per negatius) i catastròfics (pel seu abast) és el seguit de condicions oceanogràfiques i d'altres que provoquen episodis de mortalitat en massa a gran escala. Aquests episodis no són desconeguts en el medi marí (Korringa, 1973) i darrerament han proliferat com a conseqüència de les fortes pressions sobre els esculls de corall i altres ecosistemes oceànics (Hughes *et al.*, 2003; McClanahan *et al.*, 2007; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007; etc.), però mai no s'havien documentat tan bé com al llarg de la darrera dècada en el Mediterrani nord-occidental.

Al final de l'estiu del 1999, hom va observar un episodi de mortalitat en massa, sense precedents, al llarg de centenars de quilòmetres de les costes de la Provença i de la Ligúria (Perez *et al.*, 2000; Cerrano *et al.*, 2000; Romano *et al.*, 2000; Garrabou *et al.*, 2001; etc.). Les espècies afectades van ser sobretot invertebrats sèssils i suspensívors de la comunitat del coral·ligen (Ros *et al.*, 1985; Ballesteros, 2006), situats entre els 10 i els 40 m de profunditat: esponges (*Hippospongia communis* i *Spongia officinalis*, etc.), cnidaris (especialment els antozous *Corallium rubrum*, *Paramuricea clavata*, *Eunicella cavolinii*, *E. singularis* i *Cladocora caespitosa*), mol·luscs bivalves, briozous i ascidis. El sentit de propagació de la mortalitat fou des de l'est cap a l'oest. El resultat fou una pèrdua de biomassa estimada en el 50% de la que és pròpia d'aquesta comunitat (entre 150 i 1 200 g (p. s.) m⁻²), deguda a necrosi dels teixits de les colònies, amb posterior despreniment o ocupació de les colònies per part d'espècies epibionts.

L'any 2003 es va repetir l'episodi, amb una notable extensió cap al sud de les àrees afectades: gairebé tota la costa italiana des del mar Tirrè fins al golf de Nàpols, Còrsega, l'estret de Bonifacio, Catalunya, Menorca i els Columbrets (figura 3). El 2006, novament, es va produir un episodi de mortalitat en massa de suspensívors, aparentment amb un impacte menor que el de tres anys abans. L'episodi del 1999 es va poder detectar i avaluar perquè en algunes àrees protegides de la zona s'hi duïen a terme estudis de seguiment de les comunitats, i en els anys posteriors es va procedir a fer el seguiment de l'impacte i de la recuperació eventual de les poblacions de les espècies de suspensívors afectades. Atès que les mortalitats s'han repetit en anys successius, s'ha posat en marxa un programa internacional de detecció primerenca, avaluació i, eventualment, identificació de les causes (Medchange).

Figura 3. Extensió dels dos episodis de mortalitat en massa (EMM) del 1999 i el 2003 (Font: Perez et al., 2000; Garrabou et al., 2001; etc.).

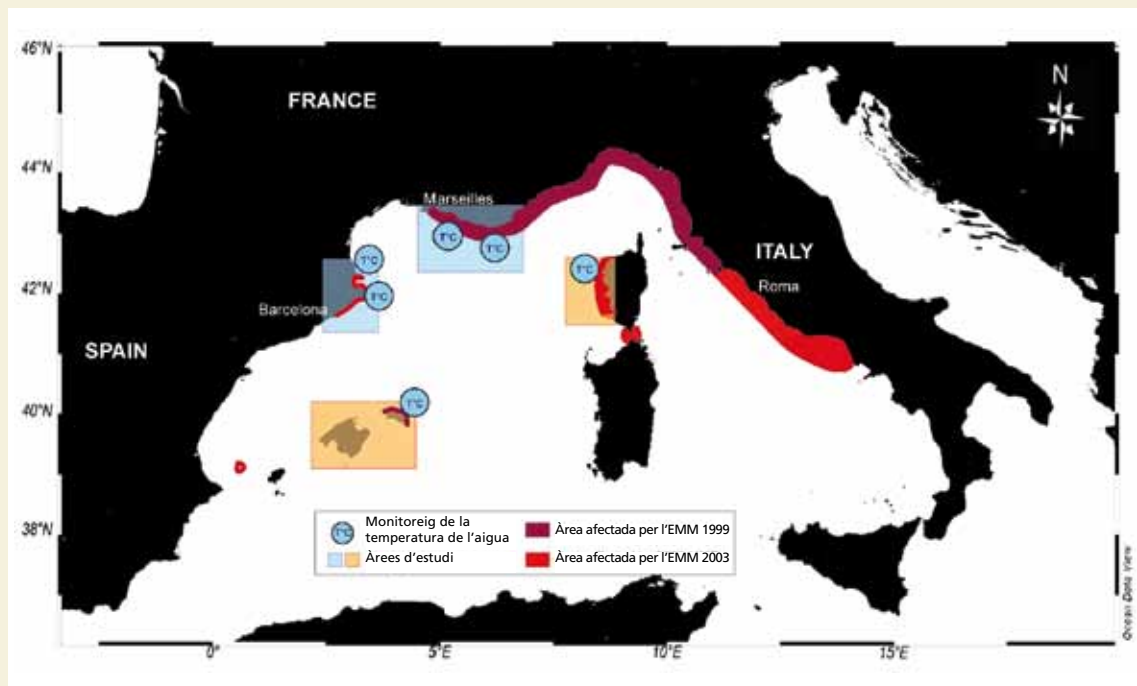
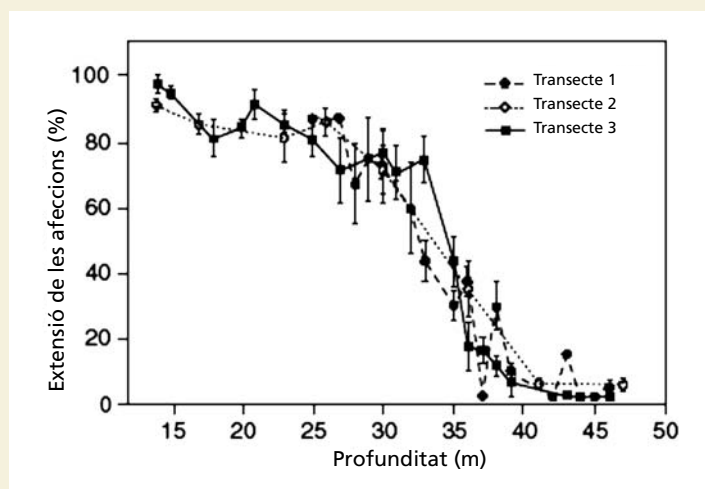


Figura 4. Importància de les afectacions per l'episodi de mortalitat en massa del 1999 (percentatge de teixit necrosat sobre el total) en la gorgònia *Paramuricea clavata* al llarg de tres transectes a l'illa de Port-Cros.



Fins als 30 m de profunditat, l'afectació supera en tots els casos el 70% de les colònies, mentre que per sota dels 40 m és molt baixa.
[Font: Linares et al., 2005].



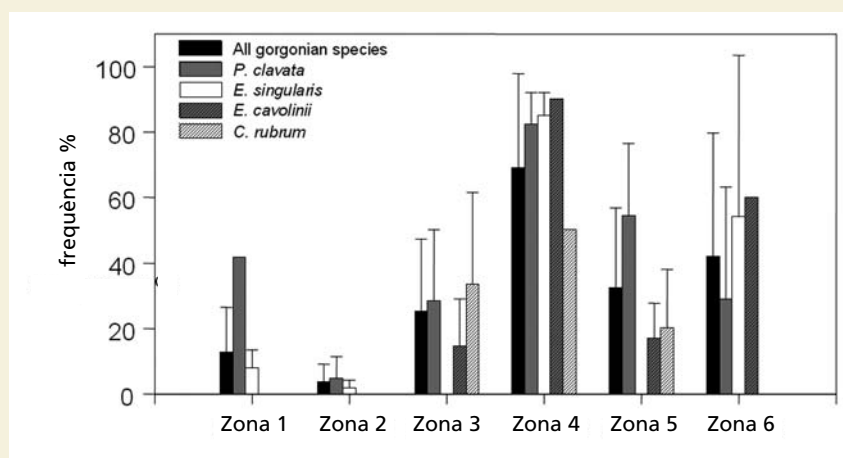
L'impacte d'aquests episodis ha estat enorme, tant per l'abast geogràfic com pel nombre d'espècies afectades, per la incidència en les poblacions (en total, s'estima que la pèrdua ha estat del 50% de la biomassa d'aquestes espècies, amb un clar gradient batimètric, ja que les poblacions més superficials han estat les més afectades: figura 4; Perez *et al.*, 2000; Cerrano *et al.*, 2000; Romano *et al.*, 2000; Garrabou *et al.*, 2001; Linares *et al.*, 2005), per la dificultat de recuperació (algunes d'aquestes espècies són de biologia parsimoniosa: la gorgònia *Paramuricea clavata*, per exemple, creix prop d'1 cm anual, de manera que recuperar la complexitat estructural de les comunitats del coral·ligen afectades, encara que sigui només parcialment, es pot allargar durant dècades), per l'impacte sobre la biodiversitat associada als «bosc» de suspensívors afectats, etc.

L'efecte no ha estat el mateix en totes les àrees geogràfiques ni en totes les poblacions, ni en els diferents anys en què s'ha detectat el fenomen (figura 5). La causa principal ha estat la prolongació, més enllà del que és habitual, del període de manteniment de la termoclina estival, que separa les aigües càlides superficials de les fredes pregones. Efectivament, durant els estius dels anys esmentats, aquesta termoclina —en lloc de trencar-se i permetre la barreja de les dues masses d'aigua superficial i pregonal al final de l'estiu, com sol ser el cas— es va mantenir aproximadament durant un altre mes, amb la qual cosa les aigües superficials del Mediterrani nord-occidental van gaudir d'una temperatura excepcionalment elevada i estable (23-24 °C) al llarg de tota la columna d'aigua, fins als 40 m de profunditat.

L'efecte sobre les espècies de suspensívors pot haver estat directe (per una inadaptabilitat a les condicions tèrmiques estivals prolongades, potser mitjançant un mecanisme fisiològic; vegeu l'apartat 2.3) o indirecte: per la manca de l'aliment (plàncton) que l'estratificació i, per tant, el retard en la barreja autumnal impedeix de proliferar; per l'efecte de gèrmens patògens afavorits per les temperatures elevades (Martin *et al.*, 2002; Bally i Garrabou, 2007); per l'efecte sinèrgic de tòxics en l'aigua procedents de contaminació, etc.

Gairebé totes aquestes hipòtesis tenen els seus defensors, i caldrà esperar resultats més concloents per acceptar-les o rebutjar-les, però el resultat d'aquests episodis és innegable i catastròfic. Com sigui que els diferents escenaris de canvi climàtic plantegen un augment de la temperatura al llarg del segle XXI, els episodis d'escalfament de les aigües superficials del Mediterrani poden deixar de ser fenòmens excepcionals per esdevenir habituals, amb les implicacions de pèrdua regional de biodiversitat que es pot suposar (Coma *et al.*, 2006; etc.).

Figura 5. Freqüència mitjana de colònies afectades de les quatre espècies de gorgonaris afectades per l'episodi de mortalitat en massa del 2003.



Zona 1: Balears; zona 2: Catalunya i Catalunya Nord; zona 3: Alps Marítims; zona 4: Ligúria; zona 5: Còrsega i nord de Sardenya; zona 6: golfs de Gaeta i de Nàpols. [Font: Garrabou *et al.*, 2001; Coma *et al.*, 2006].

Sinergia amb altres impactes (contaminació tèrmica, espècies al·lòctones, etc.)

Ja hem esmentat els dubtes sobre les causes últimes de les mortalitats catastròfiques induïdes per l'escalfament perllongat del Mediterrani nord-occidental: poden ser diverses. El mateix es pot dir d'altres situacions, en les quals l'escalfament global propicia i magnifica altres impactes; n'esmentarem un parell. Les àrees litorals tancades (ports, llacunes, etc.), amb aigües més càlides, són reservoris d'espècies exòtiques, entre les quals hi ha les d'afinitats tropicals, aportades en el passat o actualment mitjançant el transport en l'aigua de llast dels vaixells o en el *fouling* de les seves carenes. L'augment de la temperatura de les aigües del Mediterrani pot comportar l'«alliberament» d'algunes d'aquestes espècies acantonades en les esmentades àrees restringides, que podran ocupar àrees més extenses. Això és el que ha passat recentment amb el corall *Oculina patagonica*, fins fa poc restringit al port d'Alacant i ara està en els fons superficials de moltes localitats del Mediterrani occidental. Una situació similar es produeix amb les entrades a mar d'aigua sobreescalfada, procedent dels sistemes de refrigeració de centrals tèrmiques i nuclears, que són també nuclis potencials de dispersió d'espècies termòfiles, encara que la inèrcia tèrmica del mar és molt gran i l'abast d'aquest impacte, reduït.

Ja hem esmentat l'entrada al Mediterrani, i l'expansió posterior, d'espècies exòtiques lessepsianes o d'altres orígens, una expansió que l'augment de temperatura està afavorint i pot fer-ho encara més en el futur immediat (Occhipinti-Ambrogi, 2007).

Cal fer referència també a la situació d'erosió de la biodiversitat, d'exhauriment dels estocs pesquers, d'alteració de les aigües i els fons per la contaminació i altres activitats d'origen antròpic, que s'afegeixen sinèrgicament als impactes derivats del canvi climàtic. El resultat és una afectació molt important als hàbitats i a les espècies.

Impactes sobre la biodiversitat, sobre els serveis ecosistèmics i sobre els recursos apropiats per a l'home

Tots aquests impactes, i encara altres, es tradueixen en una pèrdua notable de biodiversitat, per bé que alguns fenòmens (com ara la incorporació d'espècies al·lòctones) podrien fer pensar el contrari. La biodiversitat marina del mar Mediterrani, que és notable (Pérès i Picard, 1964; Ros *et al.*, 1985; Giaccone i Geraci, 1989; Bianchi i Morri, 2000; Boudouresque, 2004; Boudouresque *et al.*, 2004; etc.), experimenta darrerament canvis importants com a conseqüència del canvi climàtic i d'altres activitats antròpiques; alguns són d'abast mundial i es produeixen a un ritme commensurat, mentre que altres són d'abast regional i molt ràpids.

Aquests canvis tenen dues característiques comunes: a) l'eliminació massiva de les espècies més fràgils i longeves, de biologia parsimoniosa i més adaptades, moltes de les quals són endèmiques i/o relictas, i la persistència i l'expansió d'espècies banals, pioneres, en gran manera al·lòctones; b) la «tropicalització» de la biota: no tan sols les espècies autòctones afavorides són les més termòfiles, sinó que tant les que entren de manera natural via Gibraltar com les migradores lessepsianes, i bona part de les que penetren afavorides pel transport humà (en el *fouling* o en el llast dels vaixells), són d'afinitat subtropical o tropical.

És difícil avaluar quins poden ser els efectes d'aquests canvis en la biodiversitat a l'escala de tot el Mediterrani, però com que es tracta d'un mar molt divers, és segur que l'empobriment d'uns actors i l'expansió dels altres, mitjançant impactes directes o induïts, a través d'efectes en cascada (Sala *et al.*, 1998; etc.) i de capgiraments en els equilibris poblacionals i ecosistèmics «naturals» (fins on sigui possible aquesta denominació; Jackson i Sala, 2001; Jackson *et al.*, 2001), provocaran alteracions importants en la biodiversitat i en l'ecodiversitat (*sensu* Margalef, 1997).

Això ja està passant en altres mars regionals (Jackson *et al.*, 2001; Hughes *et al.*, 2003; Sala i Knowlton, 2006; Clarke *et al.*, 2007; Aronson *et al.*, 2007; Jagtap i Nagle, 2007; etc.). El resultat, en tots aquests mars, és la



simplificació de les comunitats marines mitjançant diversos mecanismes: reducció accelerada de la biodiversitat marina; esfondrament de poblacions i extincions d'espècies; homogeneïtzació i banalització de les comunitats; reducció de l'estructura tridimensional biogènica; simplificació de les xarxes tròfiques; domini dels controls des de baix (*bottom up*) de les xarxes tròfiques amb relació als controls des de dalt (*top-down*); increment de la inestabilitat i disminució de la capacitat de recuperació; reducció de la biomassa total; augment del quocient P/B; reducció de la producció total i de la disponible per als éssers humans. Tot això tindrà (ja està tenint ara) conseqüències a l'escala ecosistèmica, però també en el forniment de serveis ecosistèmics (Worm *et al.*, 2007), alguns dels quals ens són fonamentals, com ara l'apropiació de proteïna en forma de peix i marisc (Cury *et al.*, 2008).

Potser el mar Mediterrani no deixarà de ser oligotròfic (Margalef, 1985) ni biodivers; potser no acabarà «tropicalitzant-se» (Bianchi, 2007); potser les algues frondoses no seran substituïdes pels coralls (Ballesteros i Zabala, 1989), però de segur que serà molt diferent del que van descriure els investigadors marins dels segles XIX i XX i els poetes de tots els temps.

Referències bibliogràfiques

- ALLEY, R. B. (2007). «Wally was right: Predictive ability of the North Atlantic "conveyor belt" hypothesis for abrupt climate change». *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, núm. 35, pàg. 241-272.
- ANESTIS, A.; LAZOU, A.; PÖRTNER, H. O.; MICHAELIDIS, B. (2007). «Behavioral, metabolic, and molecular stress responses of marine bivalve *Mytilus galloprovincialis* during long-term acclimation at increasing ambient temperature». *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, núm. 293(2), R911-R921.
- ARONSON, R. B.; THATJE, S.; CLARKE, A.; PECK, L. S.; BLAKE, D. B.; WILGA, C. D.; SEIBEL, B. A. (2007). «Climate change and invasibility of the Antarctic benthos». *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, núm. 38, pàg. 129-154.
- ATTRILL, M. J.; WRIGHT, J.; EDWARDS, M. (2007). «Climate-related increases in jellyfish frequency suggest a more gelatinous future for the North Sea». *Limnology and Oceanography*, núm. 52(1), pàg. 480-485.
- BAKER, A. C.; STARGER, C. J.; McCLANAHAN, T. R.; GLYNN, P. W. (2004). «Corals' adaptive response to climate change». *Nature*, núm. 430, pàg. 741.
- BALLESTEROS, E. (2006). «Mediterranean coralligenous assemblages: A synthesis of present knowledge». *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, núm. 44, pàg. 123-195.
- BALLESTEROS, E.; CEBRIÁN, E.; ALCOVERRO, T. (2007). «Mortality of shoots of *Posidonia oceanica* following meadow invasion by the red alga *Lophocladia lallemandii*». *Bot. Mar.*, núm. 50, pàg. 8-13.
- BALLY, M.; GARRABOU, J. (2007). «Thermodependent bacterial pathogens and mass mortalities in temperate benthic communities: a new case of emerging disease linked to climate change». *Global Change Biology*, núm. 13(10), pàg. 2078-2088.
- BAMES, D. K. A.; CROOK, A.; O'MOHONEY, M.; STEICIE, S.; MAGUIRE, D. (2001). «Sea temperature variability and *Paracentrotus lividus* population fluctuations». *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, núm. 81, pàg. 359-360.
- BARCELOS E RAMOS, J.; BISWAS, H.; SCHULZ, K. G.; LAROCHE, J.; RIEBESELL, U. (2007). «Effect of rising atmospheric carbon dioxide on the marine nitrogen fixer *Trichodesmium*». *Global Biogeochemical Cycles*, núm. 21(20), art. GB2028.
- BIANCHI, C. N. (2007). «Biodiversity issues for the forthcoming tropical Mediterranean Sea». *Hydrobiologia*, núm. 580(1), pàg. 7-21.

- BIANCHI, C. N.; MORRI, C. (2000). «Marine Biodiversity of the Mediterranean Sea: Situation, Problems and Prospects for Future Research». *Marine Pollution Bulletin*, núm. 40(5), pàg. 367-376.
- BIBBY, R.; CLEALL-HARDING, P.; RUNDLE, S.; WIDDICOMBE, S.; SPICER, J. (2007). «Ocean acidification disrupts induced defences in the intertidal gastropod *Littorina littorea*». *Biology Letters*, núm. 3(6), pàg. 699-701.
- BLACKFORD, J. C.; GILBERT, F. J. (2007). «pH variability and CO₂ induced acidification in the North Sea». *Journal of Marine Systems*, núm. 64(1-4), pàg. 229-241.
- BOSELLO, F.; ROSON, R.; TOL, R. S. J. (2007). «Economy-wide estimates of the implications of climate change: Sea level rise». *Environmental and Resource Economics*, núm. 37(3), pàg. 549-571.
- BOUDOURESQUE, C. F. (2004). «Marine biodiversity in the Mediterranean: status of species, populations and communities». *Scientific Reports of Port-Cros National Park*, núm. 20, pàg. 97-146.
- BOUDOURESQUE, C. F.; BOURY-ESNAULT, N.; HARMELIN-VIVIEN, M. (2004). «La biodiversitat marina: tendències, models i amenaces». A: VILÀ, M.; RODÀ, F.; ROS, J. D. (ed.). *Jornades sobre Biodiversitat i Conservació Biològica. Seminar on Biodiversity and Biological Conservation*, pàg. 189-209 i 391-410. Institut d'Estudis Catalans. Barcelona.
- BROECKER, W. S. (1991). «The Great Ocean Conveyor». *Oceanography*, núm. 4, pàg. 79-89.
- BRUNEL, T.; BOUCHER, J. (2007). «Long-term trends in fish recruitment in the north-east Atlantic related to climate change». *Fisheries Oceanography*, núm. 16(4), pàg. 336-349.
- BRUNO, J. F.; SELIG, E. R.; CASEY, K. S.; PAGE, C. A.; WILLIS, B. L.; HARVELL, C. D.; SWEATMAN, H.; MELENDY, A. M. (2007). «Thermal stress and coral cover as drivers of coral disease outbreaks». *PLoS Biology*, núm. 5(5), art. e124.
- CALDEIRA, K.; WICKETT, M. E. (2003). «Anthropogenic Carbon and Ocean pH». *Nature*, núm. 425, pàg. 365.
- CERRANO, C.; BAVESTRELLO, G.; BIANCHI, C. N.; CATTANEO-VIETTI, R.; BAVA, S.; MORGANTI, C.; MORRI, C.; PICCO, P.; SARÀ, G.; SCHIAPARELLI, S.; SICCARDI, A.; SPONGA, F. (2000). «A Catastrophic Mass-mortality Episode of Gorgonians and Other Organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), Summer 1999». *Ecology Letters*, núm. 3, pàg. 284-293.
- CICERONE, R. et al. (2004). «The ocean in a high CO₂ world». *Earth and Ocean Science*, núm. 85 (37), pàg. 351-353.
- CLARKE, A.; MURPHY, E. J.; MEREDITH, M. P.; KING, J. C.; PECK, L. S.; BARNES, D. K. A.; SMITH, R. C. (2007). «Climate change and the marine ecosystem of the western Antarctic Peninsula». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London [B]*, núm. 362(1477), pàg. 149-166.
- COMA, R.; LINARES, C.; RIBES, M.; DÍAZ, D.; GARRABOU, J.; BALLESTEROS, E. (2006). «Consequences of a mass mortality in populations of *Eunicella singularis* (Cnidaria: Octocorallia) in Menorca (NW Mediterranean)». *Marine ecology. Progress series*, núm. 327, pàg. 51-60.
- CURY, P. M.; SHIN, Y.-J.; PLANQUE, B.; DURANT, J. M.; FROMENTIN, J.-M.; KRAMER-SCHADT, S.; STENSETH, N. C.; TRAVERS, M.; GRIMM, V. (2008). «Ecosystem oceanography for global change in fisheries». *Trends in Ecology and Evolution*, núm. 23(6), pàg. 338-346.
- DUARTE, C. M.; TINTORÉ, J. (2001). «El cambio climático y sus consecuencias para los ecosistemas costeros de las islas Baleares». A: *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Conselleria de Medi Ambient, Govern de les Illes Balears.
- DURANT, J. M.; HJERMANN, D. O.; OTTERSEN, G.; STENSETH, N. C. (2007). «Climate and the match or mismatch between predator requirements and resource availability». *Climate Research*, núm. 33(3), pàg. 271-283.
- FIELDS, P. A.; GRAHAM, J. B.; ROSENBLATT, R. H.; SOMERO, G. N. (1993). «Effects of expected global climate change on marine faunas». *Trends in Ecology and Evolution*, núm. 8(10), pàg. 361-367.



- FINE, M.; TCHERNOV, D. (2007). «Scleractinian Coral Species Survive and Recover from Decalcification». *Science*, núm. 315, pàg. 1811.
- FRANCOUR, P.; BOUDOURESQUE, C. F.; HARMELIN, J. G.; HARMELIN-VIVIEN, M. L.; QUIGNARD, J. P. (1994). «Are the Mediterranean waters becoming warmer? Information from biological indicators». *Mar. Pollut. Bull.*, núm. 28(9), pàg. 523-526.
- FREITAS, V.; CAMPOS, J.; FONDS, M.; VAN DER VEER, H. W. (2007). «Potential impact of temperature change on epibenthic predator-bivalve prey interactions in temperate estuaries». *Journal of Thermal Biology*, núm. 32(6), pàg. 328-340.
- GARRABOU, J.; PEREZ, T.; SARTORETTO, S.; HARMELIN, J. G. (2001). «Mass mortality event in red coral (*Corallium rubrum*, Cnidaria, Anthozoa, Octocorallia) population in the Provence region (France, NW Mediterranean)». *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, núm. 217, pàg. 263-272.
- GAZEAU, F.; QUIBLIER, C.; JANSEN, J. M.; GATTUSO, J.-P.; MIDDELBURG, J. J.; HEIP, C. H. R. (2007). «Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification». *Geophysical Research Letters*, núm. 34(7), art. L07603.
- GIACCONE, G.; GERACI, R. M. (1989). «Biogeografia delle Alghe del Mediterraneo». *Anales Jard. Bot. Madrid*, núm. 46(l), pàg. 27-33.
- GILI, J. M.; PAGÈS, F. (2005). «Les proliferacions de meduses». *Butlletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, núm. 48, pàg. 1-22.
- GÓMEZ, F.; CLAUSTRE, H. (2001). «Spreading of *Gymnodinium catenatum* Graham in the Western Mediterranean Sea». *Harmful Algae News*, núm. 22.
- GOURETSKI, V.; KOLTERMANN, K. P. (2007). «How much is the ocean really warming?». *Geophysical Research Letters*, núm. 34(1), art. L01610.
- GREENWOOD, J. G. (2007). «Earlier laying by Black Guillemots *Cephus grylle* in Northern Ireland in response to increasing sea-surface temperature». *Bird Study*, núm. 54, pàg. 378-379.
- HALL-SPENCER, J. M.; RODOLFO-METALPA, R.; MARTIN, S.; RANSOME, E.; FINE, M.; TURNER, S. M. *et al.* (2008). «Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification». *Nature* (advance online publication 8 June 2008).
- HARLEY, C. D. *et al.* (2006). «The impacts of climate change in coastal marine systems». *Ecology Letters*, núm. 9, pàg. 228-241.
- HARVELL, C. D.; KIM, K.; BURKHOLDER, J. M.; COLWELL, R. R.; EPSTEIN, P. R.; GRIMES, D. J.; HOFMANN, E. E.; LIPP, E. K.; OSTERHAUS, A. D. M. E.; OVERSTREET, R. M.; PORTER, J. W.; SMITH, G. W.; VASTA, G. R. (1999). «Emerging marine diseases-Climate links and anthropogenic factors». *Science*, núm. 285, pàg. 1505-1510.
- HAWKES, L. A.; BRODERICK, A. C.; GODFREY, M. H.; GODLEY, B. J. (2007). «Investigating the potential impacts of climate change on a marine turtle population». *Global Change Biology*, núm. 13(5), pàg. 923-932.
- HOEGH-GULDBERG, O.; MUMBY, P. J.; HOOTEN, A. J.; STENECK, R. S.; GREENFIELD, P.; GÓMEZ, E.; HARVELL, C. D.; SALE, P. F.; EDWARDS, A. J.; CALDEIRA, K.; KNOWLTON, N.; EAKIN, C. M.; IGLESIAS-PRieto, R.; MUTHIGA, N.; BRADBURY, R. H.; DUBI, A.; HATZIOLOS, M. E. (2007). «Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification». *Science*, núm. 318(5857), pàg. 1737-1742.
- HOLLAND, M. M.; FINNIS, J.; BARRETT, A. P.; SERREZE, M. C. (2007). «Projected changes in Arctic Ocean freshwater budgets». *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, núm. 112(G4), art. G04S55.
- HOWAT, I. M.; JOUGHIN, I.; SCAMBOS, T. A. (2007). «Rapid changes in ice discharge from Greenland outlet glaciers». *Science*, núm. 315(5818), pàg. 1559-1561.

HØYE, T. T.; POST, E.; MELTOFTE, H.; SCHMIDT, N. M.; FORCHHAMMER, M. C. (2007). «Rapid advancement of spring in the High Arctic». *Current Biology*, núm. 17(12), R449-R451.

HUGHES, L. (2000). «Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?». *Trends in Ecology and Evolution*, núm. 15, pàg. 56-61.

HUGHES, T. P.; BAIRD, A. H.; BELLWOOD, D. R.; CARD, M.; CONNOLLY, S. R.; FOLKE, C.; GROSBERG, R.; HOEGH-GULDBERG, O.; JACKSON, J. B. C.; KLEYPAS, J.; LOUGH, J. M.; MARSHALL, P.; NYSTRÖM, M.; PALUMBI, S. R.; PANDOLFI, J. M.; ROSEN, B.; ROUGHGARDEN, J. (2003). «Climate Change, Human Impacts, and the Resilience of Coral Reefs». *Science*, núm. 301, pàg. 929-933.

IGLESIAS-RODRÍGUEZ, M. D.; HALLORAN, P. R.; RICKABY, R. E. M.; HALL, I. R.; COLMENERO-HIDALGO, E.; GITTINS, J. R. *et al.* (2008). «Phytoplankton Calcification in a High-CO₂ World». *Science*, núm. 320, pàg. 336-340.

JACKSON, J. B.; SALA, E. (2001). «Unnatural Oceans». A: GILI, J. M.; PRETUS, J. L.; PACKARD, T. T. (ed.). *A Marine Science Odyssey into the 21st Century*, pàg. 273-281. *Scientia Marina*, núm. 65 (supl. 2).

JACKSON, J. B. C.; KIRBY, M. X.; BERGER, W. H.; BJØRNDAL, K. A.; BOTSFORD, L. W.; BOURQUE, B. J.; BRADBURY, R. H.; COOKE, R.; ERLANDSON, J.; ESTES, J. A.; HUGHES, T. P.; KIDWELL, S.; LANGE, C. B.; LENIHAN, H. S.; PANDOLFI, J. M.; PETERSON, C. H.; STENECK, R. S.; TEGNER, M. J.; WARNER, R. R. (2001). «Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems». *Science*, núm. 293, pàg. 629-638.

JAGTAP, T. G.; NAGLE, V. L. (2007). «Response and adaptability of mangrove habitats from the Indian subcontinent to changing climate». *Ambio*, núm. 36(4), pàg. 328-334.

KORRINGA, C. (1973). «The Ocean as Final Recipient of the End Products of the Continent's Metabolism. Pollution of the Oceans: Situation, Consequences, and Outlooks for the Future». A: SIOLI, H. (ed.). *Ökologie und Lebensschutz in internationaler Sicht. Ecology and Bioprotection, International Conclusions*, pàg. 91-140. Rombach. Friburg de Brisgòvia. (Hi ha traducció castellana: *Ecología y protección de la naturaleza. Conclusiones internacionales*. Blume. Barcelona. 1982).

LAFFERTY, K. D.; PORTER, J. W.; FORD, S. E. (2004). «Are diseases increasing in the ocean?». *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, núm. 35, pàg. 31-54.

LEFÈVRE, N.; WATSON, A. J.; OLSEN, A.; RÍOS, A. F.; PÉREZ, F. F.; JOHANNESSEN, T. (2004). «A decrease in the sink for atmospheric CO₂ in the North Atlantic». *Geophys. Res. Lett.*, núm. 31, L07306. DOI: 10.1029/2003GL018957.

LEVITAN, O.; ROSENBERG, G.; SETLIK, I.; SETLIKOVA, E.; GRIGEL, J.; KLEPETAR, J.; PRASIL, O.; BERMAN-FRANK, I. (2007). «Elevated CO₂ enhances nitrogen fixation and growth in the marine cyanobacterium *Trichodesmium*». *Global Change Biology*, núm. 13(2), pàg. 531-538.

LEVITUS, S.; ANTONOV, J. L.; BOYER, T. P.; STEPHENS, C. (2000). «Warming of the World Ocean». *Science*, núm. 287, pàg. 2225-2229.

LIMA, F. P.; RIBEIRO, P. A.; QUEIROZ, N.; HAWKINS, S. J.; SANTOS, A. M. (2007). «Do distributional shifts of northern and southern species of algae match the warming pattern?». *Global Change Biology*, núm. 13(12), pàg. 2592-2604.

LINARES, C.; COMA, R.; DÍAZ, D.; ZABALA, M.; HEREU, B.; DANTART, L. (2005). «Immediate and delayed effects of mass mortality event on gorgonian population dynamics and benthic community structure in the NW Mediterranean». *Marine Ecology Progress Series*, núm. 305, pàg. 127-137.

MACKAS, D. L.; BATTEN, S.; TRUDEL, M. (2007). «Effects on zooplankton of a warmer ocean: Recent evidence from the Northeast Pacific». *Progress in Oceanography*, núm. 75(2), pàg. 223-252.



- MACKENZIE, B. R.; SCHIEDEK, D. (2007). «Daily ocean monitoring since the 1860s shows record warming of northern European seas». *Global Change Biology*, núm. 13(7), pàg. 1335-1347.
- MACKENZIE, B. R.; GISLASON, H.; MOLLMANN, C.; KOSTER, F. W. (2007). «Impact of 21st century climate change on the Baltic Sea fish community and fisheries». *Global Change Biology*, núm. 13(7), pàg. 1348-1367.
- MACLEOD, C. D.; SANTOS, M. B. A.; REID, R. J.; SCOTT, B. E.; PIERCE, G. J. (2007). «Linking sand eel consumption and the likelihood of starvation in harbour porpoises in the Scottish North Sea: could climate change mean more starving porpoises?». *Biology Letters*, núm. 3(2), pàg. 185-188.
- MARGALEF, R. (ed.) (1985). *Western Mediterranean*. Pergamon Press. Oxford, etc. (versió castellana del 1989: *El Mediterráneo Occidental*. Omega. Barcelona).
- MARGALEF, R. (1997). *Our biosphere*. Excellence in Ecology, 10. Ecology Institute. Oldendorf (Luhe).
- MARTIN, Y.; BONNEFONT, J. L.; CHANCERELLE, L. (2002). «Gorgonians mass mortality during the 1999 late summer in French Mediterranean coastal waters: the bacterial hypothesis». *Water Research*, núm. 36(3), pàg. 779-782.
- McCLANAHAN, T. R.; ATEWEBERHAN, M.; MUHANDO, C. A.; MAINA, J.; MOHAMMED, M. S. (2007). «Effects of climate and seawater temperature variation on coral bleaching and mortality». *Ecological Monographs*, núm. 77(4), pàg. 503-525.
- McGRANAHAN, G.; BALK, D.; ANDERSON, B. (2007). «The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones». *Environment & Urbanization*, núm. 19(1), pàg. 17-37.
- MICHAELIDIS, B.; SPRING, A.; PORTNER, H. O. (2007). «Effects of long-term acclimation to environmental hypercapnia on extracellular acid-base status and metabolic capacity in Mediterranean fish *Sparus aurata*». *Marine Biology*, núm. 150(6), pàg. 1417-1429.
- MIESZKOWSKA, N.; HAWKINS, S. J.; BURROWS, M. T.; KENDALL, M. A. (2007). «Long-term changes in the geographic distribution and population structures of *Osilinus lineatus* (Gastropoda: Trochidae) in Britain and Ireland». *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, núm. 87(2), pàg. 537-545.
- MILES, H.; WIDDICOMBE, S.; SPICER, J. I.; HALL-SPENCER, J. (2007). «Effects of anthropogenic seawater acidification on acid-base balance in the sea urchin *Psammechinus miliaris*». *Marine Pollution Bulletin*, núm. 54(1), pàg. 89-96.
- MILLS, C. E. (2001). «Jellyfish blooms: are populations increasing globally in response to changing ocean conditions?». *Hydrobiologia*, núm. 451, pàg. 55-68.
- MORA, C.; OSPINA, A. F. (2001). «Tolerance to high temperatures and potential impact of sea warming on reef fishes of Gorgona Island (tropical eastern Pacific)». *Marine Biology*, núm. 139, pàg. 765-769.
- MORÁN, X. A. G.; SEBASTIÁN, M.; PEDRÓS-ALIÓ, C.; ESTRADA, M. (2006). «Response of Southern Ocean phytoplankton and bacterioplankton production to short-term experimental warming». *Limnology and oceanography*, núm. 51(4), pàg. 1791-1800.
- NAVARRO, L.; BLÁZQUEZ, M.; PIFERRER, F. (2005). «Efecto de la temperatura sobre la proporción de sexos de la lubina (*Dicentrarchus labrax*)». A: CASTAÑO, J. P.; MALAGÓN, M. M.; GARCÍA NAVARRO, S. (ed.). *Avances en endocrinología comparada*, núm. 2, pàg. 135-138. Universitat de Còrdova.
- NOAA (2008). *The State of the Coral Reef Ecosystems of the United States and Pacific Freely Associated States: 2008*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington.
- OCCHIPINTI-AMBROGI, A. (2007). «Global change and marine communities: Alien species and climate change». *Marine Pollution Bulletin*, núm. 55(7-9), pàg. 342-352.

- ORR, J. C. *et al.* (2005). «Anthropogenic Ocean Acidification over the Twenty-First Century and its Impact on Calcifying Organisms». *Nature*, núm. 437, pàg. 681-686.
- PARRILLA, G.; LAVÍN, A.; BRYDEN, H.; GARCÍA, M.; MILLARD, R. (1994). «Rising temperatures in the Subtropical N. Atlantic over the past 35 years». *Nature*, núm. 369, pàg. 48-51.
- PATZNER, R. (1998). «The invasion of *Lophocladia* (Rhodomelaceae, Lophotaliae) at the northern coast of Ibiza (Western Mediterranean Sea)». *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, núm. 41, pàg. 75-80.
- PÉRÈS, J.-M.; PICARD, J. (1964). «Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée». *Rec. Trav. Sta. Mar. Endoume*, núm. 31(47), pàg. 5-137.
- PEREZ, T.; GARRABOU, J.; SARTORETTO, S.; HARMELIN, J. G.; FRANCOUR, P.; VACELET, J. (2000). «Mortalité massive d'invertébrés marins: un événement sans précédent en Méditerranée nord-occidentale – Mass mortality of marine invertebrates: an unprecedented event in the NW Mediterranean». *C. R. Acad. Sci. Paris*, III, núm. 323, pàg. 853-865.
- POR, F. D. (1978). *Lessepsian migration*. Springer. Berlín, Nova York.
- PORTNER, H. O.; KNUST, R. (2007). «Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance». *Science*, núm. 315(5808), pàg. 95-97.
- RAHMSTORF, S. (2007). «A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise». *Science*, núm. 315(5810), pàg. 368-370.
- RIEBESELL, U.; ZONDERVAN, I.; ROST, B.; TORTELL, P. D.; ZEEBE, R. E.; MOREL, F. M. M. (2004). «Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂». *Nature*, núm. 407, pàg. 364-367.
- ROMANO, J. C.; BENSOUSSAN, N.; YOUNES, W. A. N.; ARLHAC, D. (2000). «Anomalies thermiques dans les eaux du golfe de Marseille durant l'été 1999. Une explication partielle de la mortalité d'invertébrés fixés». *C. R. Acad. Sci. Paris*, III, núm. 323, pàg. 415-427.
- ROS, J. D. (2007). «Medusas». *Cultura/s-La Vanguardia*, núm. 268, pàg. 2-3.
- ROS, J. D.; ROMERO, J.; BALLESTEROS, E.; GILI, J. M. (1985). «Diving in blue water: the benthos». A: MARGALEF, R. (ed.). *Western Mediterranean*, pàg. 233-295. Pergamon. Oxford.
- ROYAL SOCIETY (2005). *Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*. The Royal Society. Londres.
<http://www.royalsoc.ac.uk/displaypagedoc.asp?id=13314>.
- SABATÉS, A.; MARTÍN, P.; LLORET, J.; RAYA, V. (2006). «Sea warming and fish distribution: the case of the small pelagic fish, *Sardinella aurita*, in the Western Mediterranean». *Global Change Biology*, núm. 12, pàg. 2209-2219.
- SABINE, C. L.; FEELY, R. A.; GRUBER, N.; KEY, R. M.; LEE, K.; BULLISTER, J. L.; WANNINKHOF, L.; WONG, C. S.; WALLACE, D. W. R.; TILBROOK, B.; MILLERO, F. J.; PENG, T. H.; KOZYR, A.; ONO, T.; RÍOS, A. F. (2004). «The oceanic sink for anthropogenic CO₂». *Science*, núm. 305, pàg. 367-371.
- SALA, E.; KNOWLTON, N. (2006). «Global Marine Biodiversity Trends». *Annual Review of Environment and Resources*, núm. 31, pàg. 93-122.
- SALA, E.; BOUDOURESQUE, C. F.; HARMELIN-VIVIEN, M. (1998). «Fishing, trophic cascades and the structure of algal assemblages: evaluation of an old but untested paradigm». *Oikos*, núm. 82, pàg. 425-439.
- SALAT, J.; PASCUAL, J. (2006). «Principales tendencias climatológicas en el Mediterráneo Noroccidental, a partir de



más de 30 años de observaciones oceanográficas y meteorológicas en la costa catalana». A: *Clima, sociedad y medio ambiente*, pàg. 283-290. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Saragossa.

SIMMONDS, M. P.; ISAAC, S. J. (2007). «The impacts of climate change on marine mammals: early signs of significant problems». *Oryx*, núm. 41(1), pàg. 19-26.

SMITH, K. L.; ROBISON, B. H.; HELLY, J. J.; KAUFMANN, R. S.; RUHL, H. A.; SHAW, T. J.; TWINING, B. S.; VERNET, M. (2007). «Free-drifting icebergs: Hot spots of chemical and biological enrichment in the Weddell Sea». *Science*, núm. 317(5837), pàg. 478-482.

THIBAUT, T.; PINEDO, S.; TORRAS, X.; BALLESTEROS, E. (2005). «Long-term decline of the populations of *Fucales* (*Cystoseira* spp. and *Sargassum* spp.) in the Albères coast (France, North-western Mediterranean)». *Marine Pollution Bulletin*, núm. 50(12), pàg. 1472-1489.

TURLEY, C. M.; ROBERTS, J. M.; GUINOTTE, J. M. (2007). «Corals in deep-water: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems?». *Coral Reefs*, núm. 26(3), pàg. 445-448.

VÁZQUEZ-DOMÍNGUEZ, E.; VAQUÉ, D.; GASOL, A. M. (2007). «Ocean warming enhances respiration and carbon demand of coastal microbial plankton». *Global Change Biology*, núm. 13(7), pàg. 1327-1334.

VILA, M.; MASÓ, M. (2005). «Phytoplankton functional groups and harmful algae species in anthropogenically impacted waters of the NW Mediterranean Sea». *Scientia Marina*, núm. 69(1), pàg. 31-45.

WORM, B.; BARBIER, E. B.; BEAUMONT, N.; DUFFY, J. E.; FOLKE, C.; HALPERN, B. S.; JACKSON, J. B. C.; LOTZE, H. K.; MICHELI, F.; PALUMBI, S. R.; SALA, E.; SELKOE, K. A.; STACHOWICZ, J. J.; WATSON, R. (2006). «Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services». *Science*, núm. 314, pàg. 787-790.

ZABALA, M.; BALLESTEROS, E. (1989). «Surface dependent strategies and energy flux in benthic communities or, why corals do not exist in the Mediterranean». *Scientia Marina*, núm. 53(1), pàg. 3-17.

ZABALA, M.; GARCÍA-RUBIES, A.; LOUISY, P.; SALA, E. (1997). «Spawning behaviour of the Mediterranean dusky grouper *Epinephelus marginatus* (Lowe, 1834) (Pisces, Serranidae) in the Medes Islands Marine Reserve (NW Mediterranean, Spain)». *Scientia Marina*, núm. 61(1), pàg. 65-77.





Implicacions Socioeconòmiques entorn del sector de l'aigua

Resum

David Saurí

Universitat Autònoma de Barcelona

Aquest bloc examina les principals implicacions dels canvis en la disponibilitat de recursos hídrics derivats del canvi climàtic en diferents sectors socioeconòmics: agricultura; energia; indústria; i usos residencials, comerç, i turisme. A partir d'estimacions provinents de taules *input-output* de l'economia catalana, l'impacte econòmic d'episodis de manca d'aigua com els que es poden produir com a conseqüència del canvi climàtic es pot estimar, a títol orientatiu, entorn d'un 7,7% del PIB català d'acord a l'actual estructura socioeconòmica. Aquests resultats preliminars posen de manifest el previsible gran impacte del canvi climàtic en termes econòmics, i només per efecte de les afeccions a un únic sector o àmbit, el de l'aigua, tot i que aquest és, evidentment, transcendental.

Agricultura

A Catalunya, l'agricultura i la ramaderia presenten dues cares ben diferenciades. D'una banda, el sector es troba en uns mínims històrics, amb una població ocupada de tot just 60.000 persones i una contribució directa al PIB de l'economia catalana inferior a l'1,5% del total. D'altra banda, el primer sector industrial de Catalunya (amb una contribució superior al 15% del PIB regional) és l'agroalimentari, amb una gran presència arreu del país, fet que el converteix en un component estratègic del reequilibri territorial. Altrament, Catalunya és la primera regió europea en agroalimentació si se sumen les indústries de primera i de segona transformació. Tampoc no cal oblidar els beneficis intangibles del sector agrari, especialment el més tradicional, en termes de manteniment de la biodiversitat, els paisatges, el control de riscos com els incendis, etc.

En línies generals, el canvi climàtic, amb l'increment tèrmic previst, pot generar un augment de la demanda d'aigua dels conreus per a compensar una major evapotranspiració. Dins d'un escenari tendencial, es podria dir que els problemes més grans es produiran en l'agricultura de secà i, molt especialment, en els cereals. Les actuals superfícies de cereals en secà de la Catalunya interior seran molt difícils de mantenir i fins i tot és probable que a comarques on ara no és necessari el reg (Berguedà, Ripollès, Garrotxa, etc.) en el futur aquest reg sigui imprescindible. Pel que fa als conreus llenyosos, la tendència actual a regar la vinya i l'olivera es podria generalitzar en el futur, sobretot a les comarques més seques. El sector de la fruita dolça també podria experimentar canvis en funció de la temperatura, però la disponibilitat d'aigua continuarà essent essencial.

Una resposta a aquest augment de la demanda d'aigua seria ampliar la superfície de regadiu. Tanmateix, el futur de la demanda d'aigua per a reg a Catalunya és ple d'interrogants molt importants. El Pla de regadius de Catalunya pretén afegir unes 125.000 hectàrees a les 260.000 hectàrees ja existents (increment de gairebé el 50% de la superfície i, de mitjana, d'un 25% de l'aigua de reg). Amb un escenari de canvi climàtic acompanyat per una disminució de les precipitacions resulta difícil esbrinar com es poden generar aquests recursos addicionals, i més si es té en compte que altres sectors també en necessitaran. En qualsevol cas, resulta imprescindible aprofitar totes les possibilitats tecnològiques per a incrementar la productivitat de l'aigua aplicada a l'agricultura; en altres paraules, caldria produir més per metre cúbic emprat, tal com ja es fa en molts sectors industrials.

Segons l'informe de l'IPCC del 2007 i diferents capítols anteriors d'aquest informe, a les àrees mediterrànies, especialment, l'increment dels episodis de calor, sequeres i inundacions associats amb alguns escenaris del canvi climàtic reduiran la productivitat dels conreus i de les cabanes ramaderes. Al mateix temps, augmentaria el risc d'incendis forestals i també de plagues. Una sequera extrema podria fer minvar el 30% el PIB del sector.

Altrament, si no es manté o es conserva o es protegeix l'agricultura, especialment a les zones de muntanya, ens podem trobar que d'aquí a pocs anys els grans incendis de la Catalunya central de la dècada del 1990 tinguin lloc en nous emplaçaments, amb conseqüències potencialment encara molt més devastadores.

Energia

L'economia catalana mostra una forta vinculació entre creixement econòmic i consum d'energia. Entre 1990 i 2005 l'increment anual mitjà del consum d'energia primària va ser del 3%. Les principals fonts d'energia primària a Catalunya són el petroli (50%), el gas natural (25%) i l'energia nuclear (20%), i la dependència de l'exterior és del 96%. Les energies renovables no arriben al 3% (sense considerar la hidroelèctrica, que suposa entre un 5 i un 10%, en funció dels anys), molt per sota del que signifiquen en altres comunitats autònomes.

Els efectes del canvi climàtic sobre el sector energètic dependran sobretot de les oscil·lacions en la quantitat d'aigua disponible en rius i llacs per a la producció d'electricitat, per a la refrigeració de centrals tèrmiques convencionals o nuclears, o per a la transformació de combustibles (consum d'aigua en refinament). Aquestes necessitats també variaran depenent dels canvis que es produeixin en l'oferta energètica en resposta al canvi climàtic i de l'escassetat més gran d'algunes fonts energètiques, com el petroli. En la mesura que el canvi climàtic faci necessari utilitzar recursos alternatius com aigües dessalinitzades, dessalobrades o residuals regenerades, es pot produir un augment notable de la demanda d'energia.

Tanmateix, el principal impacte del canvi climàtic tindrà lloc segurament en la producció hidroelèctrica, ja que probablement els cabals fluvials disponibles per a aquest ús seran més escassos i estaran sotmesos a més oscil·lacions que en l'actualitat. En països com Espanya, i a títol orientatiu, la disminució de la producció hidroelèctrica com a conseqüència de la minva de recursos hídrics es pot situar entre el 20% i el 50%. I com a efecte d'una freqüència més alta de sequeres, hi cal afegir un increment de la necessitat d'aigua per al manteniment dels ecosistemes fluvials, i també per a altres sectors.

Indústria

El sector industrial català absorbeix directament un 9,7% del consum total d'aigua. Aquesta xifra augmenta, però, fins a un 38,2% quan considerem els *inputs* que li són subministrats per altres sectors, com ara l'agrari.

L'augment de la demanda d'aigua de la indústria a causa del canvi climàtic es preveu que sigui relativament petita, de menys del 5% per al 2050, i se situarà molt especialment en l'àmbit de la refrigeració. En general, es preveu que els sectors industrials siguin menys vulnerables als impactes del canvi climàtic que altres sectors com l'agricultura. Les principals excepcions són les instal·lacions situades en àrees sensibles a fenòmens extrems (com la costa i les valls inundables) i els sectors industrials dependents d'*inputs* sensibles al clima (com és el cas del processament d'aliments). L'impacte d'una sequera extrema sobre el sector industrial (incloent-hi també la producció d'energia) se situaria entre aproximadament el 5% i el 7,5% del PIB corresponent. Pel que fa al sector de la construcció, l'impacte econòmic d'una sequera de gran intensitat seria de l'ordre del 5,6% del PIB del sector.



Medi residencial, comerç i turisme

Aquest sector constitueix un element fonamental de l'economia catalana (el turisme per si mateix significa entorn d'un 10% del PIB català) i, de maneres diferents, també pot ser afectat pels canvis en la disponibilitat i la demanda d'aigua derivats del canvi climàtic.

Globalment es considera que una pujada de la temperatura mitjana de l'ordre de 2 °C a l'horitzó temporal del 2025 pot donar lloc a un increment d'usos domèstics del 5%, tot i que algunes referències parlen de fins al 12%. Altres fonts apunten increments del 3% per cada grau centígrad d'augment respecte de la temperatura mitjana. Aquests increments serien motivats per l'augment de la demanda d'aigua per a higiene i confort personals, per l'augment de la demanda de parcs, jardins i altres àmbits públics, i per un creixement i una desestacionalització de les activitats d'oci i lleure (piscines, parcs aquàtics, etc.). La demanda d'aigua per a usos residencials també podria augmentar si se segueix expandint el model de creixement de baixa densitat, amb proliferació de jardins i piscines. En la resta del sector serveis no es preveuen impactes gaire significatius, llevat del turisme.

Els consums turístics, que varien molt depenent del model de desenvolupament dominant, concentrat o dispers, poden augmentar, però també es poden desestacionalitzar. A les àrees de muntanya la principal afecció sobre els sectors econòmics s'espera a les estacions d'esquí, que patirien la reducció de la innivació, tant per la pujada de les temperatures com per una irregularitat més gran en les tendències de precipitació esperades, i, en general, un escurçament de la temporada.

Un episodi de sequera extrema podria comportar reduccions del PIB del sector serveis d'entre un 8% pel que fa a l'hoteleria i un 5% pel que fa als serveis socials.

Finalment, després d'aquesta anàlisi per sectors econòmics, l'informe com a tal acaba amb algunes reflexions sobre el model de desenvolupament actual i les seves tendències i implicacions amb el canvi climàtic, així com amb la Directiva marc de l'aigua.

Els canvis en el règim de cabals i la qualitat de l'aigua i dels ecosistemes associats, induïts a través del canvi global i el canvi climàtic, hauran de fer replantejar els valors de referència avui dia considerats, i modificar si s'escau els possibles programes de mesures dimensionats per a cada cas. Els objectius de qualitat es poden veure greument afectats i probablement hauran de ser revisats per ajustar-los al nou context ambiental. La Directiva marc de l'aigua gairebé no ha contemplat fins ara aquests elements futurs de canvi, però des d'Europa ja s'estan realitzant importants reflexions i plantejaments per a incorporar el canvi climàtic a l'agenda de la Directiva i als esquemes de Planificació Hidrològica.

Amb aquesta perspectiva, la implementació d'un model de gestió de transició o adaptatiu pot ser la via que garanteixi la provisió de serveis d'aigua de qualitat a llarg termini per tal de reduir la vulnerabilitat davant el canvi climàtic. Aquest model de transició es fonamentaria, entre d'altres, en la determinació de límits quantitatius clars i absoluts, encara que dinàmics amb l'oferta i la demanda d'aigua, la promoció d'estructures institucionals més descentralitzades, a on es fomenti la participació social sota una perspectiva de gestió de conca, l'increment de la flexibilitat dels sistemes de dotació d'aigua, el desenvolupament de polítiques transversals i integrades entre diferents àmbits i sectors i en la derivació dels excedents aconseguits mitjançant millores d'estalvi, l'aplicació de mesures de mercat i/o fonts alternatives de recursos a la progressiva restauració integral dels ecosistemes aquàtics, en lloc de dirigir-se a crear noves demandes. La Planificació Hidrològica, en el seu sentit més ampli, ha d'integrar tots aquests elements per assolir un desenvolupament autènticament sostenible, així com la necessitat d'un desenvolupament que faci més èmfasi en el mig i llarg termini que no pas en el curt i que parteixi sempre des d'una posició molt més central i coherent respecte la resta d'altres polítiques com l'agricultura, l'energia, la planificació territorial o la conservació de la natura i el mateix canvi climàtic.



22. Incidència del canvi climàtic sobre l'abastament urbà, l'oci i el turisme

Ignasi Puig
ENT Environment and Management

Introducció, objectiu i abast

Tot i que els efectes del canvi climàtic sobre els abastaments urbans són complexos i de diversa incidència, es poden identificar alguns dels principals aspectes que afectaran l'abastament i alguns usos urbans de l'aigua a Catalunya.

Des del punt de vista de la demanda, els principals efectes derivaran de l'increment mitjà de temperatures, que incrementarà, al seu torn, la demanda d'aigua per diverses vies:

- Més demanda d'aigua per a higiene personal. La pujada de temperatures provocarà una sensació més gran de calor i una transpiració més elevada.
- Més demanda d'aigua per a reg de parcs i jardins, a causa de la seva evapotranspiració més elevada.
- En un pla quantitativament molt menys important, més demanda d'aigua per a consum de boca per mantenir els mateixos nivells d'hidratació, singularment aigua envasada. En aquest sentit, envasar els 2,4 hm³ anuals d'aigua envasada que es produeixen actualment a Catalunya comporta unes 120.000 tones de CO₂/any (ACA, 2008a), molt més intensiu energèticament que la majoria dels altres processos i tractaments del cicle de l'aigua.
- Possible increment de la demanda d'aliments que incorporen més aigua en el seu procés de producció. La necessitat més gran d'hidratació també es pot reflectir en un increment del consum de fruita i verdura, produccions intensives en el consum agrícola d'aigua. En un altre pla més anecdòtic, també pot augmentar el consum de gelats, com també de glaç (que en el passat ja ha esdevingut ocasionalment escàs).
- Tendència més elevada a l'ús d'instal·lacions com ara piscines, parcs aquàtics, etc. (European Environment Agency, 2007), també durant èpoques de l'any en què no s'utilitzaven fins ara (primavera i tardor).
- Més demanda d'aigua pel model d'urbanisme adoptat. Els models urbans dispersos originen un consum més elevat d'aigua, sobretot per l'augment de zones enjardinades i piscines. Aquesta és una causa en si mateixa, com el mateix creixement demogràfic esperat, amb més transcendència sobre el consum d'aigua que el canvi climàtic; tanmateix, l'urbanisme dispers també quedarà més afectat per aquest fenomen pel fet que les zones enjardinades demanaran un consum més elevat.

D'altra banda, un dels motors de l'economia catalana és el turisme (i més generalment l'oci), que és una activitat que presenta consums d'aigua importants. Saurí (a impremta) assenyala un consum diari mitjà d'aigua per turista a Benidorm de 180 litres. Aquest és un cas extrem de turisme en un model urbanístic vertical i, per tant, *a priori* pot ser un valor inferior a la mitjana. D'aquesta manera, els consums turístics se situen per sobre del consum domèstic mitjà a Catalunya, que és aproximadament de 140 litres per habitant i dia.

Diverses activitats del sector turístic podran resultar afectades pel canvi climàtic amb relació a la disponibilitat d'aigua.

Dades, resultats i conclusions principals

Globalment, es considera que una pujada raonable de la temperatura mitjana al voltant dels 2 °C a l'horitzó temporal del 2025 pot donar lloc a un increment d'usos domèstics a la ratlla del 5% (tot i que algunes referències parlen de fins al 12%; ACA, 2008b). Altres fonts apunten increments de prop del 3% per cada grau centígrad d'increment respecte de la temperatura mitjana.

Malgrat que els usos urbans són, en principi, els darrers que queden afectats per talls de subministrament, els aspectes anteriors, juntament amb una possible propensió més gran a episodis de sequera, poden incrementar el risc d'arribar a la situació en què s'hagin d'efectuar talls en aquest subministrament. A aquest extrem també hi contribuiria una presumible menor recàrrega i disponibilitat de recursos als aqüífers, per diversos factors, entre els quals destaca la intensificació dels episodis pluviomètrics concentrats estacionalment, que generarien una disminució del total infiltrat al subsòl (capítols 11 i 12). Evidentment, les conseqüències d'arribar a efectuar talls en el subministrament domiciliari serien greus (o molt greus, depenent de la durada dels talls). Diverses activitats econòmiques situades en l'entramat urbà resultarien també perjudicades per aquestes restriccions eventuais en el subministrament. La valoració més detallada d'aquests aspectes està essent objecte d'un estudi específic per part de l'Agència Catalana de l'Aigua mitjançant l'anàlisi de les matrius *input-output* de l'economia catalana, tal com indicarem de manera molt resumida en un exemple al final d'aquest capítol.

Una eventual menor disponibilitat de recursos d'aigua també pot derivar en un empitjorament de la seva qualitat, per efecte d'una menor dilució de contaminants i/o una intrusió salina més elevada als aqüífers costaners deguda a l'increment del nivell del mar (European Environment Agency, 2007), i això a la vegada pot derivar en unes dificultats i uns costos més grans per garantir subministraments urbans de qualitat (capítol 15).

A títol orientatiu, al sistema d'abastament del Canal Isabel II de Madrid s'ha estimat que el compliment de la continuïtat en el subministrament d'acord als nivells de garantia actual, requeriria un increment en inversions en infraestructures estratègiques de tractament, transport i distribució en l'entorn d'un 2% per cada °C d'increment en la temperatura màxima diària (tenint present que a Madrid la demanda és molt sensible a partir de temperatures superiors als 35 °C). Els increments previstos per a mitjans de segle representarien augments d'inversions de l'ordre del 10% sobre les condicions actuals.

La freqüència més elevada de grans aiguats pot provocar una afectació sobre infraestructures de captació superficial per a abastament urbà, de clavegueram i de metro, principalment. També podran resultar afectats alguns habitatges i activitats econòmiques a causa d'una probabilitat més elevada d'inundacions i, indirectament, de les dificultats generades sobre la mobilitat. Tot això també tindrà presumiblement incidència sobre una necessitat més gran d'assegurances (GIECC, 2007).

Pel que fa a les activitats turístiques, més específicament, hi ha diversos aspectes que poden quedar afectats per la incidència del canvi climàtic sobre els usos de l'aigua:

D'una banda, el turisme de sol i platja (àrees litorals) pot quedar afectat per l'increment previst del nivell del mar, un fet que —potser amb l'efecte combinat de tempestes més intenses— provocarà una recessió més gran de platges. De manera addicional, la pujada de les temperatures pot provocar que aquest turisme desplaci les seves estades cap a destinacions més benignes (per exemple, els països nòrdics), amb l'impacte econòmic consegüent. Presumibles restriccions d'aigua per omplir piscines o talls eventuais en l'abastament urbà també poden fer perdre competitivitat a Catalunya com a destinació turística, davant de destinacions menys afectades. D'altra banda, una reducció eventual del nombre de turistes redundaria en una menor pressió sobre el recurs aigua.

A les àrees de muntanya, l'afecció principal sobre els sectors econòmics s'espera a les estacions d'esquí, on es reduiria la innivació, tant per la pujada de les temperatures com per la irregularitat més gran en les tendències de precipitació esperades i, en general, un escurçament de les temporades d'esquí. La pujada de les temperatures



provocarà una pujada de la cota de neu; algunes estimacions apunten que s'haurà de pujar com a mínim fins als 2.000 metres per trobar una neu de qualitat suficient per a la pràctica de l'esquí. Atès que a Catalunya les cotes de les estacions d'esquí estan entre els 1.800 i els 2.600 m, moltes estacions quedarien seriosament afectades¹. D'acord amb les estimacions del Secrèariat d'État et du Tourisme, un increment de la temperatura mitjana d'1,8 °C podria reduir el nombre de dies de nevada en el 60% als Pirineus catalans (ACA, 2007; Campillo i Font, 2004). Aquestes menors aportacions de neu podrien fer que moltes estacions d'esquí optessin per utilitzar més els canons de neu artificial (actualment, la innivació arriba al 42% del domini esquiable; ACA, 2007), la qual cosa provocaria un consum més elevat d'aigua, que avui dia ja és d'1,8 hm³/any (ACA, 2008a), i d'energia. De fet, el Pla director de les estacions de muntanya 2006-2011 (DPTOP, 2006) preveu una «necessitat creixent de neu artificial» i el Pla Inniva 2011, consistent en un programa d'ajuts a la innivació artificial. En aquest sentit, serà determinant el paper que adopti l'Administració davant d'aquests nous usos.

El turisme d'esports d'aventura que requereixen aigua (caiac, ràfting, barranquisme, etc.) quedaria afectat per extensió, si la manca de neu a les muntanyes derivés en un menor cabal als rius.

De manera addicional, també poden quedar afectades activitats d'oci com ara el golf (i les seves variants) — responsable del consum anual d'uns 10 hm³ (ACA, 2008a), tot i que és un sector en el qual es potencia la reutilització d'aigües regenerades i encara es potenciarà més en el futur—, a causa d'una menor adaptació de la vegetació utilitzada per a aquestes activitats (vegetació atlàntica) a les condicions previstes de temperatura i precipitació, la qual cosa requerirà una necessitat més gran d'aigua per mantenir-la en les condicions actuals, que, a més a més, s'incrementaria per l'evapotranspiració més elevada que s'espera. En aquest sentit també es poden veure afectats parcs temàtics i parcs aquàtics. Novament, sobre l'evolució d'aquestes activitats serà determinant el paper que adopti l'Administració respecte de la utilització permesa d'aigua.

En definitiva, globalment es pensa que la interrelació dels factors de demanda i d'oferta d'aigua d'abastament pot provocar una menor garantia dels recursos totals disponibles o una dificultat més gran i costosa per obtenir-los en quantitat i qualitat suficients.

En aquest sentit, s'ha desenvolupat un model *input-output* de simulació econòmica d'una contingència en l'abastament d'aigua per a Catalunya, a partir de la metodologia d'anàlisi *input-output* i les taules *input-output* per a Catalunya 2001 (Puig i Freire, 2008).

L'escenari per al qual s'ha dut a terme aquesta simulació correspondria a un episodi de sequera extrema (superior a la viscuda durant l'episodi 2007-2008), amb una reducció eventual del subministrament del 50% en l'agricultura respecte dels anys ordinaris, restriccions del 10% a bona part d'altres activitats econòmiques i de fins al 20% en aquells sectors que es proveeixen de la xarxa però que tenen més marge per a reduccions del seu subministrament d'aigua —regs públics, gimnasos, etc.

A part de les hipòtesis bàsiques de la metodologia d'anàlisi *input-output*, en els models hi ha el supòsit implícit que les restriccions són sobre consums anuals i, per tant, la reducció estimada de PIB és també anual, com també que l'estructura productiva correspon aproximadament a la del 2001 o l'actual.

A tall orientatiu, en la taula 1 es poden consultar els impactes d'aquesta sequera en termes de reducció del PIB, per a cadascun dels grans sectors econòmics. Cal entendre que aquesta és només una aproximació preliminar, relativament simple, a la quantificació econòmica d'una problemàtica extremadament complexa.

¹ Entrevista a Joan Carles Llurdés, la Mañana, 21 de novembre de 2005 (www.lamanyana.es) i a: <http://www.cambio-climatico.com/el-turismo-de-nieve-ser-el-mas-afectado-por-el-cambio-climatico>

Taula 1. Reducció del PIB sectorial en un episodi de sequera extrema segons els models *input-output*.

Sector econòmic	Reducció del PIB
Agricultura, ramaderia, caça, silvicultura, pesca	-29,4%
Indústries extractives, manufactures i energètiques	-7,5%
Construcció	-5,7%
Comerç	-6,8%
Hoteleria	-7,5%
Transports i comunicacions	-6,8%
Mediació financera i activitats immobiliàries i serveis empresarials	-6,6%
Administració pública, educació, sanitat i serveis socials, i altres activitats socials	-9,1%
Total	-7,7%

Segons els models hidrològics en escenaris futurs de canvi climàtic, s'espera que aquestes sequeres extremes incrementaran la seva freqüència aproximadament fins al doble de l'actual o històrica, amb la qual cosa s'incrementaria també la freqüència esperada de les afectacions econòmiques associades, amb els valors estimats segons aquesta metodologia.

Incerteses

L'increment i la freqüència més elevada de fenòmens extrems poden produir una pèrdua d'atractiu de Catalunya com a destinació turística, amb la qual cosa pot perdre competitivitat respecte a altres destinacions que resultin menys afectades. Si bé la competitivitat com a destinació turística depèn principalment d'altres aspectes, singularment del preu i de la qualitat dels serveis oferts, el clima és un aspecte important de l'oferta turística (CADS, 2005). Diferents destinacions turístiques al món (per exemple, el Carib) veuen com s'hi redueixen les visites en èpoques amb més propensió a fenòmens climàtics extrems. Més a prop tenim els exemples de Benidorm, que va perdre bona part del turisme alemany a causa de la crisi hídrica que va patir als anys setanta, o el cas de Mallorca l'any 2000 (Saurí i Llordés, 2005).

En canvi, la pujada de les temperatures pot provocar que aquest turisme desplaci les seves estades cap a estacions més suaus (tardor i primavera) i pot fer disminuir l'estacionalitat en el sector (Diversos autors, 2007), cosa que pot tenir efectes econòmics positius. Tanmateix, aquestes estacions més suaus (tardor i primavera) són més propenses a fenòmens climàtics extrems com ara pluges intenses i aiguats. Tot plegat té una incidència global incerta.

En general, tot i que hi ha molts aspectes sobre aquest conjunt d'impactes que han estat àmpliament tractats en l'àmbit qualitatiu, cal recordar les grans dificultats que hi ha avui per establir quantificacions prou fiables i representatives d'aquestes afeccions. En aquest sentit, el que presentem en aquest treball és només una primera aproximació sobre els ordres de magnitud econòmica d'aquests impactes, a tall orientatiu, però recordant que estaran condicionats, per exemple, per la mateixa evolució de l'escalfament global i els seus efectes climàtics, com també per les mesures d'adaptació que es vagin prenent durant els propers anys. Cal recordar també que, en quant a l'abastament urbà en general, el seu creixement tindrà probablement major pes sobre la disponibilitat hídrica que l'eventual reducció i/o extremalització dels recursos.



Oportunitats

La demanda més gran d'aigua a causa principalment de l'augment de temperatura es pot reduir en part per polítiques actives d'eficiència i estalvi d'aigua (per exemple, jardins que necessitin menys aigua o que aprofitin millors les aigües grises i/o pluvials), per polítiques d'increment de la disponibilitat o per polítiques mixtes. Una percepció més estesa entre la ciutadania envers la situació de sequera pot possibilitar la contenció d'aquesta demanda —tal com ha succeït durant la passada sequera, tot i que cal entendre que aquests efectes poden tendir a esvair-se amb el temps— i permetre la introducció, entre altres mesures, d'instruments econòmics com ara tarifes progressives amb l'objectiu de compensar, en part, la tendència esperada d'increment futur de la demanda d'aigua d'abastament.

Referències bibliogràfiques

ACA (2007). *El consum d'aigua per generació de neu artificial. Informe de situació.*

ACA (2008a). *Bases per a un model de gestió de l'aigua a Catalunya 2007-2025.* Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya.

ACA (2008b). *Aigua i canvi climàtic. L'energia al cicle integral de l'aigua a Catalunya: Diagnosi i Estratègies de Mitigació.* Esborrany versió 3.3, febrer de 2008.

CADS (2005). *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya.*

CAMPILLO BESSES, X.; FONT FERRER, X. (2004). *Avaluació de la sostenibilitat del turisme a l'Alt Pirineu i Aran.* Documents de recerca, 8. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible, Generalitat de Catalunya.

DEPARTAMENT DE POLÍTICA TERRITORIAL I OBRES PÚBLIQUES (2006). *Pla director de les estacions de muntanya (2006-2011).*

DIVERSOS AUTORS (2007). *El cambio climático en España. Estado de situación. Informe para el presidente del Gobierno elaborado por expertos en cambio climático.* Document resum, novembre de 2007.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2007). *Climate change and water adaptation issues.* EEA Technical report, núm. 2.

GIECC (2007). *Technical Paper on Climate Change and Water.* Draft.

PUIG, I.; FREIRE, J. (2008). *Aplicació de les matrius input-output de l'economia catalana al sector aigua.* Agència Catalana de l'Aigua (a impremta).

SAURÍ, D.; LLURDÉS, J. C. (2005). *El canvi climàtic a Catalunya. El turisme*, pàg. 447-487. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible, Generalitat de Catalunya.



23. Canvi climàtic i incidència sobre la disponibilitat d'aigua en l'agricultura

David Saurí
Universitat Autònoma de Barcelona

Introducció, objectiu i abast

Context mundial

L'activitat agrària continua constituint el gruix de l'ús humà de recursos hídrics a escala planetària, en xifres que van des d'aproximadament el 80% del total als països en desenvolupament fins al 30% per cent als països desenvolupats (World Resources Institute, 2006). A l'Estat espanyol i a Catalunya, tot i que són països rics, l'agricultura significa entre el 70% i el 80% dels usos d'aigua, xifres que han variat relativament poc els darrers anys. A Catalunya, però, cal fer notar les diferències existents entre les conques internes, on el consum agrari se situa entorn del 30%, i les conques de l'Ebre, on el consum supera el 80%.

A escala mundial, i fins a finals del 2006, la producció i la productivitat agrícoles mostraven una tendència a la baixa o, si més no, un cert alentiment en els ritmes de creixement. Tot i aquest declivi, la FAO estima que la producció agrícola mundial continuarà augmentant fins al 55% el 2030 i fins al 80% el 2050 (en comparació dels nivells de 1999-2001). Aquest increment es basarà en el conreu addicional de 185 milions d'hectàrees de secà i uns 60 milions d'hectàrees de regadiu (augment del 30% respecte a les xifres de 1999-2001). L'expansió es produirà essencialment a l'Àfrica i a l'Amèrica Llatina, on pot entrar en competència amb la conservació d'altres ecosistemes. Així mateix, la productivitat dels cereals als països pobres pot passar de les 2,7 t/ha actuals fins a les 3,8 t/ha l'any 2050. El nombre de persones mal alimentades disminuiria dels 800 milions actuals fins a 300 milions el 2050.

Tanmateix, aquesta era d'aliments disponibles a preus relativament baixos sembla haver arribat a un límit. Un conjunt de factors que han coincidit al llarg del 2007 i del 2008 podria explicar els ràpids augments de preu en alguns aliments bàsics, especialment cereals. En primer lloc, cal esmentar el mateix augment de la població i, sobretot, l'augment de la població a les ciutats, que fa incrementar la demanda i, per tant, els preus. En segon lloc, els canvis en els costums alimentaris d'alguns països amb classes mitjanes cada cop més nombroses ha impulsat també la demanda de determinats productes, especialment la carn, amb el consegüent augment de la demanda per a pinsos. En tercer lloc, l'augment de la demanda per a biocombustibles (etanol i biodièls, fonamentalment) derivats de cereals, olis i sucre implica una competència directa amb els consumidors d'aliments, que fa augmentar els preus. Finalment, també cal tenir en compte els moviments dels mercats financers i el creixent atractiu de les *commodities* agràries per als inversors que defugen, per exemple, els actius immobiliaris. Per a altres autors, el principal motiu no està en els factors anteriors, sinó més aviat en la destrucció de l'agricultura de subsistència en els països pobres, que s'han hagut d'especialitzar en determinats conreus per a l'exportació i han abandonat conreus bàsics per a l'alimentació dels seus habitants, seguint les oscil·lacions dels mercats internacionals. A més, el desmesurat creixement urbà als països pobres (molt relacionat amb la crisi de l'agricultura tradicional) ha fet minvar dràsticament el nombre de productors familiars que es podrien beneficiar de preus més alts (Von Braun, 2007).

Context català

A Catalunya, l'agricultura i la ramaderia presenten dues cares ben diferenciades segons l'òptica d'anàlisi que s'empri. D'una banda, i pel que fa al valor relatiu de les produccions i a l'ocupació laboral, el sector està en uns mínims històrics, amb una població ocupada de tot just 60.000 persones i una contribució directa al PIB de l'economia catalana inferior a l'1,5% del total. D'altra banda, la superfície de conreu continua disminuint (el 7% de mitjana entre el 1974 i el 2004, encara que augmentà lleugerament entre el 1995 i el 2005). El descens és en superfície de secà, mentre que la de regadiu mostra una tendència a l'estabilització. Internament, aquestes xifres varien segons les comarques: baixa la superfície agrària a les corones metropolitanes per la pressió de la urbanització; també baixa a les comarques dels Pirineus (llevat, potser, de la Cerdanya, on encara hi ha ordi i blat), on conreus com el sègol o l'espelta han desaparegut en benefici dels prats i, sobretot, del bosc. En aquestes comarques, el policultiu i les explotacions establades de vaquí de llet i de carn estan en una situació de crisi greu, per a no parlar ja de l'oví, en clar perill de desaparició a Catalunya. En canvi, la superfície conreada ha augmentat a la Catalunya central i al llocs interiors de comarques com el Montsià o el Baix Ebre: el que es pot reconvertir a conreu es reconverteix, i el que no, es deixa al bosc.

D'altra banda, també cal destacar evolucions positives de l'agricultura catalana. El primer sector industrial de Catalunya (amb una contribució superior al 15% del PIB) és l'agroalimentari, amb una gran presència arreu del país, fet que el converteix en un component estratègic del reequilibri territorial. Catalunya és la primera regió europea en agroalimentació si se sumen les indústries de primera i de segona transformació. En bona part, aquest sector deu la seva puixança a la ramaderia i particularment al porc i l'aviram, amb dos problemes fonamentals: la necessitat d'importar pinso (el consum actual de pinso equival a la producció d'unes 100.000 hectàrees i, segons altres estimacions, fins i tot de 200.000) i la gestió de les dejeccions. La forta dependència de l'exterior en productes com el blat de moro, la civada o la soja (Catalunya és un dels principals importadors del món de matèries primeres per a l'alimentació animal), juntament amb els augments de preu, pot generar impactes molt seriosos sobre el sector. Això podria justificar un increment substancial de la superfície de regadiu a fi de millorar la competitivitat de les produccions locals. Finalment, l'agricultura també compleix un conjunt de funcions socioambientals difícils de quantificar en termes econòmics, però nogensmenys importantíssimes.

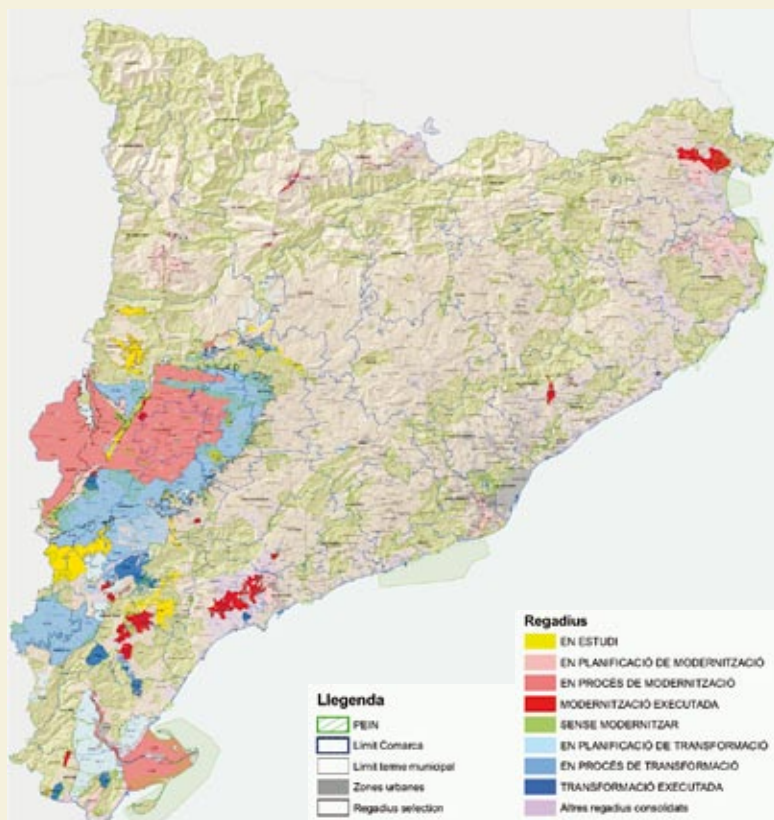
La reforma de la política agrària comunitària (PAC) del 2003 incidia precisament sobre moltes de les qüestions que s'han plantejat en el paràgraf anterior: la necessitat de desacoblar els ajuts de la producció, l'imperatiu del mercat en orientar les decisions sobre la producció, el suport al desenvolupament rural dins d'una perspectiva ambientalista, però al mateix temps la necessitat de forçar el conreu de terres abans en guaret si el mercat ho requereix, especialment amb la qüestió dels biocombustibles per davant. Dues notes importants: en primer lloc, la Unió Europea afirma que combat el canvi climàtic fent disminuir els caps de bestiar (Comissió de les Comunitats Europees, 2007, pàg. 11); i en segon lloc, la gestió sostenible de l'aigua serà un dels instruments clau de la nova PAC. Totes dues afirmacions poden tenir repercussions importants sobre l'agricultura i la ramaderia catalanes.

El regadiu català ocupa entre 260.000 i 280.000 hectàrees i significa una despesa anual d'aigua d'uns 2.500 hm³ per any, amb fortes concentracions a les terres de Lleida i de l'Ebre (més del 80% del total) (vegeu el mapa 1). Per sistemes, el reg per gravetat encara és majoritari, amb un 65%, seguit pel reg localitzat (20%) i el reg per aspersió (15%). Destaca, doncs, l'encara molt important presència del reg per gravetat, la proporció del qual és sensiblement superior a la mitjana espanyola situada en el 35% del total (Garrido i Valera, 2008). Així, doncs, encara existeix una superfície important regada amb conreus de rendibilitats baixes. El Pla de regadius de Catalunya pretén posar en regadiu més de 125.000 ha, un 60% de les quals corresponen al canal Segarra-Garrigues, de molt l'obra hidràulica de més envergadura de Catalunya en aquests moments. El pla considera dotacions de plena transformació (fins a 6.500 m³/ha/any) i de suport (fins a 3.500 m³/ha/any, amb una mitjana de 1.500 m³/ha/any), la qual cosa situaria la demanda addicional d'aigua en 540 hm³ aproximadament. Aquestes



quantitats haurien de sortir principalment del Segre i de l'Ebre, ja que el segon projecte en magnitud és el canal Xerta-Sénia, un vell projecte de la dècada de 1970 que ara s'ha tornat a recuperar.

Figura 1. Distribució dels regadius a Catalunya, en rosa els existents i en blau els projectats (Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural; vegeu la bibliografia).



Quina és la sensibilitat de la demanda d'aigua del sector agrícola a canvis en les condicions climàtiques (augment de temperatura, reducció minsa de les pluges, augment de la seva irregularitat, augment d'onades de calor, etc.)? Quins impactes podem esperar sobre aquesta demanda seguint l'escenari tendencial?

Cal partir d'un fet obvi: el clima encara és el principal responsable de la variabilitat de les collites i qualsevol canvi que experimenti, principalment a pel que fa a les temperatures i les precipitacions, comportarà efectes sobre les produccions agrícoles i ramaderes. Segons el 4t informe de l'IPCC, la producció global d'aliments pot augmentar si l'increment de les temperatura se situa entre 1 i 3 °C. Increments més grans de temperatura, però, podrien implicar una disminució de la producció. Aquest augment es produiria sobretot a les regions de latituds altes i mitjanes. En canvi, a les baixes, hi caldria esperar un descens. En termes d'afectacions, la major part dels efectes negatius es concentraran a l'Àfrica subsahariana, però podrien arribar fins a l'Europa del sud. Les variacions també poden ser notables segons els conreus. A tall d'exemple, s'assenyala que un conreu bàsic en el camp dels biocombustibles com la remolatxa sucrera (etanol), seria afavorit per un increment de la temperatura. En canvi, cereals bàsics per a l'alimentació humana (mill, sorgo, etc.) en podrien sortir perjudicats.

Els possibles efectes positius de temperatures mitjanes més elevades s'han de matisar segons el futur de les disponibilitats hídriques. En aquest sentit, l'informe de l'IPCC albira un increment de la demanda d'aigua per part dels conreus com a conseqüència d'un augment de l'evapotranspiració (encara que també hi ha la hipòtesi d'una reducció de l'evapotranspiració en ser més curt el cicle dels conreus). Aquest augment de l'evapotranspiració es xifra entre el 5% i el 8% globalment cap al 2070, encara que altres xifres apunten un increment del 20% cap al 2080 en l'agricultura del món desenvolupat. Davant d'aquests escenaris, una disminució mitjana de les precipitacions o un repartiment encara molt més desigual d'aquestes, tal com s'apunta per a l'àrea mediterrània, pot agreujar encara més l'estrès hídric dels conreus. En definitiva, com assenyalen els autors del capítol sobre agricultura inclòs en l'Informe sobre el Canvi Climàtic a Catalunya, l'amenaça més important per a l'agricultura catalana és la possible disminució de les aportacions d'aigua (Sebastià *et al.*, 2005).

Si segueixen les tendències actuals, la disponibilitat d'aigua amb destinació agrària té un futur incert. D'una banda, sembla força probable que tendeixi a augmentar, encara que només sigui, com ja s'ha dit, per motius fisiològics de resposta a un increment de l'evapotranspiració. D'altra banda, però, a aquesta tendència caldria contraposar-hi més eficiència en el reg, l'aplicació de recursos no convencionals (com les aigües regenerades), unes polítiques de preus d'acord amb els principis que inspiren l'article 9 de la Directiva marc de l'aigua i que incentivin l'estalvi, o uns preus més competitius de les produccions internacionals enfront de les autòctones, la qual cosa obligui l'agricultura catalana a especialitzar-se en produccions de qualitat que es podrien adaptar millor als canvis i per a les quals potser el regadiu no seria tan necessari. En qualsevol cas, resulta imprescindible aprofitar totes les possibilitats tecnològiques per a incrementar la productivitat de l'aigua aplicada a l'agricultura; en altres paraules, a produir més per metre cúbic emprat, tal com es fa ja en molts sectors industrials.

El futur de la demanda d'aigua per a reg a Catalunya és ple d'interrogants molt importants. Abans, ja s'ha dit que el Pla de regadius de Catalunya pretén afegir unes 125.000 ha a les 260.000 ha ja existents; això és un increment de gairebé el 50% de la superfície i, de mitjana, del 25% de l'aigua destinada a l'agricultura. Amb un escenari de canvi climàtic acompanyat per una disminució de les precipitacions és difícil esbrinar d'on pot sortir tota aquesta aigua, i més si tenim en compte que altres sectors també la poden necessitar. A tall d'exemple, i seguint els que ens argumenta Ignasi Aldomà (2006) per al cas del canal Segarra-Garrigues, els cabals del riu Segre en els quals es basen les previsions de regadiu del projecte poden ser alterats en el futur per factors com la probabilitat que, almenys dos cops cada 10 anys, la disponibilitat d'aigua sigui inferior a la demanda prevista (altres estimacions com les de la mateixa ACA, situen aquesta proporció en gairebé 5 de cada 10 anys); que calgui revisar a l'alça els cabals ecològics (fins al 20% de les aportacions mitjanes); que aquests cabals minvin per l'expansió del regadiu a la Cerdanya i a l'Alt Urgell; que el creixement urbanístic o les necessitats de neu artificial a les comarques pirinenques exigeixin més recursos, o que l'avenç del bosc en detriment dels conreus i dels prats dispari el consum hídric en les cobertures forestals de capçalera i disminueixi així les aportacions a les lleres. Potser l'element que genera més preocupació és que, en el futur, entre el 20% i el 30% dels cabals de regadiu podrien estar compromesos, la qual cosa suposaria més de 500 hm³ anuals. Com ja s'ha dit abans, més que pensar en recursos nous, el que caldria és millorar l'eficiència dels regadius ja consolidats, especialment dels que empenen 8.000 i fins a 9.000 m³/ha/any per a conreus com el blat de moro. En canvi, el regadiu de suport sembla molt més factible i, sobretot, molt més segur.

Com pot ser afectat el sector agrícola, directament o indirectament, pel canvi climàtic i per la consegüent incidència sobre el cicle de l'aigua?

En línies generals, el canvi climàtic pot generar un augment de la demanda d'aigua dels conreus i afegir encara més incerteses a la ja característica variabilitat del clima mediterrani. Com recorden Garrido i Varela (2008), les necessitats hídriques dels conreus poden oscil·lar molt depenent de si l'any és sec o humit. Per al conjunt de l'Estat



espanyol, la diferència pot arribar gairebé a 2.000 hm³ anuals, la qual cosa equival a un consum de 22 milions de persones a raó de 250 litres per persona i dia. Amb aquestes incerteses, els autors afirmen que Andalusia, per exemple, sempre es trobarà en fase d'alerta o prealerta de sequera. És possible que la situació no sigui tan greu a Catalunya, però tampoc no es pot descartar.

L'augment de les necessitats hídriques dels conreus es pot afrontar mitjançant diferents alternatives: incrementant la superfície de regadiu; canviant els conreus o les varietats per altres de menys consumidores d'aigua, introduint conreus modificats genèticament a fi de fer-los més resistents a l'estrès hídric, canviant la localització de conreus determinats cap a àrees amb més recursos, o abandonant els conreus amb un requeriment d'aigua més elevat (vegeu la taula 1). L'agricultura catalana del futur segurament resultarà d'una combinació de totes aquestes possibilitats, llevat, potser, de l'adopció dels conreus modificats genèticament (almenys a curt termini) per la forta hostilitat social que generen a Europa.

Taula 1. Possibles efectes del canvi climàtic sobre l'agricultura (extret de Sebastià et al., 2005).

	Respostes biològiques	Vulnerabilitat regional	Solucions tecnològiques	Condicionaments socioeconòmics	Oportunitats
Cereals	Resposta positiva al CO ₂ en plantes C3. Resposta positiva en plantes C4. Esgurçament del cicle	Zones de secà meridionals molt vulnerables. Possibilitats d'incrementar la superfície de les zones més septentrionals	Disponibilitat de varietats resistents a la sequera. Canvi dates de sembra. Canvi a varietats de cicle curt	Reducció o desaparició, en alguns llocs, dels cereals de secà actuals	En alguns indrets, increment del sorgo, mil·liat de moro
Hortalisses	Respostes diverses al CO ₂ . Efectes més aviat negatius a l'augment de la temperatura. Elevada sensibilitat a l'estrès hídric	Augment de la necessitat d'aigua de reg. Increment de plagues	Grans possibilitats de resposta amb canvis varietals, de tipus de conreu, característiques de cultiu, etc. Estratègies per augmentar l'eficiència en l'ús de l'aigua: encoixinats del sòl, tallavents, gota a gota, etc	Vulnerabilitat dels petits productors amb capacitat de resposta limitada per adaptar-se als canvis tècnics necessaris. Pèrdua de superfície de conreu per increment de	Cultiu de varietats precoces. Substitució de cultius menys rendibles per cultius hortícoles adaptats. Nous cultius
Cultius en hivernacle		Augment de la necessitat d'aigua de reg. Increment de plagues	Estratègies per augmentar l'eficiència en l'ús de l'aigua, encoixinats del sòl, tallavents, gota a gota, captació d'aigua per la coberta o hivernacle, recirculació de l'aigua de reg, increment dels cultius en sense sòl, etc	Pèrdua de superfície de conreu per increment de zones urbanes i per l'adopció d'altres tècniques de protecció. Increment en zones periurbanes	Reducció de despeses de calefacció i combustibles fòssils i d'adobat amb CO ₂ . En canvi, increment de despesa per a refrigeració estival. Cultius d'origen més càlid, hortícoles o ornamentals
Cultius llenyosos	Necessitat d'un nombre determinat d'hores de fred per floració alta i regular i qualitat adequat. Pèrdua de qualitat de la fruita amb temperatura alta	A zones fredes, augment de risc de pèrdues per avançament de floració, seguit de gelades. Més demanda de reg	Canvis varietals i, fins i tot, d'espècies. Augment de l'eficiència de l'ús de l'aigua		Introducció de nous cultius sensibles a gelades, com el nesprer. Introducció de varietats més primerenques de preu de venda més alt. Introducció i ampliació de la superfície de cítrics
Farratgeres	Resposta positiva al CO ₂ en lleguminoses i altres. Augment del cicle productiu (alfals)	Zones fredes vulnerables segons disponibilitat d'aigua	Introducció de barreges. Canvis varietals i d'espècies		Increment del nombre de dalls en zones de regadiu. Allargament de l'estació de creixement
Prats de muntanya	Pèrdua de biodiversitat. Canvis d'espècies amb possible disminució de les bones farratgeres. Ràpidament mineralització inicial, amb risc de pèrdua posterior de fertilitat del sòl.	Molt vulnerables a tota la zona de distribució. Possibilitats de moviments altitudinals, fins on sigui possible, altrament extinció. Sistemes alpins especialment vulnerables	Difícils pel que fa al canvi climàtic. Desbrossament i cremes controlades per mantenir les superfícies de pastura. Ajuts a la ramaderia extensiva	Fortes interaccions amb canvis en l'ús del sòl per abandonament. Ajuts a sistemes extensius de la UE	Increment inicial de la productivitat
Pastures mediterrànies		Capacitat de desplaçament de les espècies en altitud	Desbrossament i cremes controlades per mantenir les superfícies de pastura. Ajuts a ramaderia extensiva	Urbanització i infraestructures dificulten llur desplaçament. Pèrdua de superfície per abandonament de pastures	Augment de la superfície per abandonament de conreus

i molt especialment en els cereals. Les superfícies de cereals de secà actuals de la Catalunya interior seran molt difícils de mantenir, i fins i tot és probable que a comarques on ara no és necessari el reg (Berguedà, Ripollès, Garrotxa, etc.) en el futur aquest reg sigui imprescindible. Pel que fa als conreus llenyosos, la tendència actual a regar la vinya i l'olivera es podria generalitzar en el futur, sobretot a les comarques més seques. El sector de la fruita dolça també podria experimentar canvis en funció de la temperatura (les varietats dominants de pomes, peres i préssecs no toleren unes temperatures mitjanes anuals gaire elevades, i podrien seguir l'expansió dels cítrics cap al nord), però la disponibilitat d'aigua continuarà essent essencial. També podria canviar la localització d'aquests conreus cap a comarques més humides (com ja es comença a intuir amb la vinya al Pallars Sobirà). Els conreus d'alt valor afegit, com els horticòles o els ornamentals, poden gaudir d'uns certs avantatges comparatius si se situen, com fins ara, a les perifèries de les ciutats i es poden regar amb aigües regenerades. Amb els conreus farratgers la situació és semblant a la dels cereals: o bé es reguen o bé la seva continuïtat pot restar compromesa. Així, és possible que els prats de dall dels Pirineus s'hagin de regar. Amb aigua suficient, però, la seva productivitat pot augmentar. Entre les farratgeres cal comentar una mica el cas del blat de moro o panís, ja que es tracta d'un conreu amb unes necessitats molt grans d'aigua i que no suporta gaire bé els climes molt freds. Esbrinar com el canvi climàtic pot afectar el sector ramader (el que aporta més al valor afegit agrari) és força més complicat. Abans, ja s'ha comentat que Catalunya depèn fortament de les importacions de pinso, i que davant l'encariment d'aquests, les produccions autòctones (necessàriament de regadiu) podrien esdevenir competitives.

Com pot repercutir sobre el sector agrícola l'increment de fenòmens extrems?

Els fenòmens extrems de la natura sempre han tingut un paper fonamental en la producció i la productivitat agràries. Segons l'informe de l'IPCC del 2007, a les àrees mediterrànies especialment, l'increment dels episodis de calor, sequeres i inundacions associats amb alguns escenaris del canvi climàtic reduiran la productivitat dels conreus i de les cabanes ramaderes. Al mateix temps, augmentaria el risc d'incendis forestals i també de plagues, amb els consegüents efectes negatius sobre les produccions. Per tant, els episodis extrems poden reduir la producció i la productivitat agràries, més enllà de la reducció ja esperada pels possibles problemes de dèficit hídric.

L'anàlisi d'alguns episodis recents ens permet obtenir algunes indicacions sobre els impactes que podem esperar en el futur. Per exemple, l'onada de calor que patí Europa l'estiu del 2003 tingué repercussions molt importants per a l'agricultura del continent: la producció de blat de moro va caure el 36% a la vall del Po, a Itàlia, i el 30% en el conjunt de França. En aquest darrer país, la collita de blat minvà el 21% respecte a la xifra de l'any anterior, i la de la fruita disminuï el 30%. Fou, també, un estiu molt dolent per a la vinya, amb la pitjor producció dels darrers 10 anys. Les pèrdues econòmiques de l'onada de calor del 2003 a Europa s'estimaren en uns 13.000 milions d'euros (una tercera part a França, només) (Easterling *et al.*, 2007).

Pel que fa a les sequeres, històricament sempre han tingut un gran impacte sobre la producció agrària, i de vegades han arribat a provocar, fins i tot, l'abandonament d'aquesta activitat. El problema actual és que amb una població activa mínima, episodis futurs podrien malmetre molt uns determinats subsectors fins a extrems potser irreversibles. Per exemple, la sequera del 2004-2005, que afectà sobretot el cereal de secà, amb pràcticament la meitat de les explotacions dedicades a aquests conreus afectades, deixà uns 135 milions d'euros en pèrdues al sector i tingué una incidència especial sobre la ramaderia ovina, de manera que la continuïtat de molts ramats esdevingué inviable. En aquest sentit, és possible que episodis de sequera com el que acabem d'esmentar hagin accelerat la crisi de certs subsectors com la ramaderia extensiva d'oví i vaquí, ara per ara en una situació molt precària a Catalunya, i que està començant a afectar fins i tot els ramats anomenats «ecològics».

Un últim aspecte del qual convindria parlar en aquest apartat capgira l'interrogant inicial: el que es pregunta ara és com l'evolució de l'agricultura a Catalunya pot contribuir a generar riscos ambientals, agreujats a més pel



canvi climàtic. Hi ha uns lligams ben establerts, i també ben estudiats, sobre les relacions entre l'abandonament de l'activitat agrària i ramadera i la proliferació d'uns riscos determinats, com ara l'erosió i, sobretot, els incendis forestals. En aquest sentit, si no es manté o es conserva o es protegeix l'agricultura, especialment a les zones de muntanya, ens podem trobar que d'aquí a pocs anys els grans incendis de la Catalunya central de la dècada del 1990 s'esdevinguin ara a les comarques pirinenques, amb conseqüències potencialment encara molt més devastadores.

Conclusions

En tenir una influència clara sobre la disponibilitat futura de recursos hídrics, és probable que el canvi climàtic incideixi d'una manera important en l'ús i la gestió de l'aigua en l'agricultura. D'una banda, una disponibilitat menor d'aigua, juntament amb la competència d'altres usos i les normatives comunitàries, faran augmentar inevitablement l'eficiència en el reg: resulta del tot insostenible que avui dia encara més del 50% del reg sigui per gravetat i que es destini a produccions amb un valor afegit molt baix. Menys disponibilitat d'aigua també pot forçar el canvi de conreus o canvis en la localització d'aquests, depenent, també, de l'evolució de la temperatura. Resta per veure si les innovacions agronòmiques (especialment la modificació genètica dels conreus) podran assolir millores substancials de la productivitat amb menys necessitats hídriques i, sobretot, si la seva percepció social (ara molt negativa) canviarà en el futur.

Les previsions sobre la disponibilitat futura de recursos hídrics per a l'agricultura de regadiu tampoc encaixen gaire bé amb les previsions sobre el futur de la superfície de regadiu a Catalunya. Expandir la superfície de regadiu unes 125.000 ha fins al 2025, tal com preveu el Pla de regadius de Catalunya, amb unes necessitats suplementàries d'aigua d'entre 400 i 800 hm³, no sembla gaire realista, tret que una part substancial vingui de l'estalvi o del canvi cap a conreus amb menys requeriments hídrics. Al mateix temps, però, el sector agrari català, fortament especialitzat en al ramaderia porcina i en l'aviram, depèn d'importacions de cereals i farratges, que cada cop seran més cares. En el futur caldrà veure, també, si determinades produccions locals, ara ruïnoses en termes de consum d'aigua i de competitivitat, poden esdevenir rendibles. L'augment del preu de les matèries primeres agràries als mercats internacionals pot afeblir l'agricultura a Catalunya, però també pot justificar l'expansió del regadiu com a instrument per a evitar el declivi definitiu del camp català. En síntesi, i davant les incerteses generades pel canvi climàtic, l'agricultura catalana té un triple repte: garantir unes produccions adequades que permetin assegurar la continuïtat d'un sector molt estratègic per a l'economia i la societat catalanes; garantir la continuïtat de les explotacions familiars, veritable suport d'una gran part del territori català, i garantir que la producció i la productivitat podran avançar amb una gestió més eficient de l'aigua, que potser faci innecessària la creació de grans infraestructures de regadiu. Per descomptat, aquesta tasca no ha de recaure només en els agricultors, sinó que és una tasca de tot el país en conjunt.

Referències bibliogràfiques

ALDOMÀ, I. (ed.) (2006). *Un Canal Segarra-Garrigues per al segle XXI*. Pagès Editors. Lleida.

CEC (COMISSION OF EUROPEAN COMMUNITIES) (2007). *Preparándose para el «chequeo» de la reforma de la PAC*. Comunicació de la Comissió de les Comunitats Europees al Parlament Europeu i al Consell, 20 de novembre. Brussel·les (Bèlgica).

DEPARTAMENT D'AGRICULTURA, ALIMENTACIÓ I ACCIÓ RURAL. Mapa de la distribució dels regadius a Catalunya. (Disponible a: http://www20.gencat.cat/docs/DAR/Documents/Arxius/www.gencat.net_darp_c_camp_regadius_reg00.htm%20-%20presenta.pdf)

EASTERLING, W. E. [et al.] (2007). «Food, fibre and forest products». A: M. Parry [et al.] (eds). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of the Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit). Pàg. 273-313.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION) (2006). *World agriculture: towards 2030/2050-Interim Report: prospects for food, nutrition, agriculture and major commodity groups*. Roma.

GARRIDO, A.; VARELA, C. (2008). *Economía del agua en la agricultura e integración de políticas sectoriales*. Panel Científico-Técnico de Seguimiento de Política de Aguas. Fundación Nueva Cultura del Agua i Universidad de Sevilla.

THE ECONOMIST: *Briefing: Food and the Poor*. 19 d'abril de 2008, pàg. 32-34.

SEBASTIÀ, M. T. [et al.] (2005). «Agricultura i Silvicultura». A: J. E. Llebot (ed). *Informe sobre el Calvi Climàtic a Catalunya*. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS) i Institut d'Estudis Catalans (IEC). Barcelona.

VON BRAUN, J. (2007). *The World Food Situation. New driving forces and required actions*. International Food Policy Research Institute. Washington DC (Estats Units).
[<http://www.ifpri.org/pubs/fpr/pr18.asp>].



24. Implicacions del canvi climàtic sobre la disponibilitat d'aigua en el sector industrial. Situació i perspectives en el sector energètic

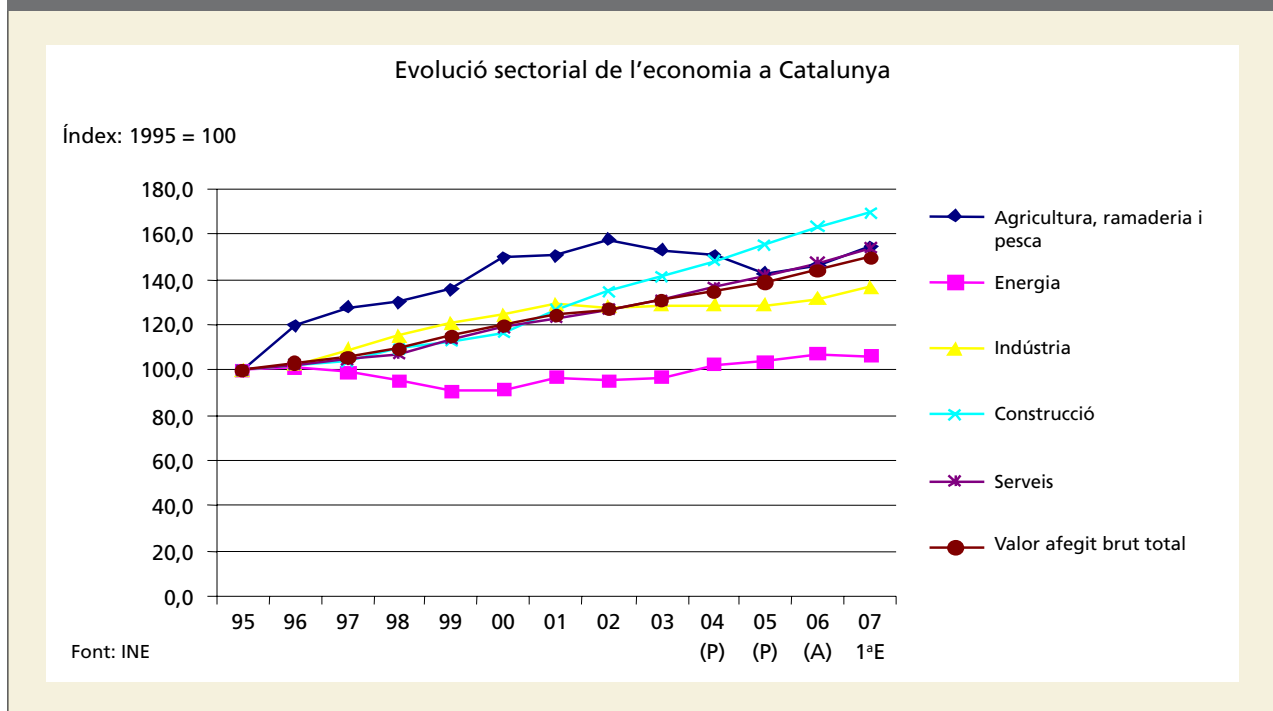
Vicent Alcántara i Emilio Padilla
Universitat Autònoma de Barcelona

Introducció

El consum d'aigua en el sector industrial a Catalunya representa entorn del 35% de l'aigua consumida i no utilitzada en el sistema de regs, el que suposa el 10% del total. Com es mostra al final d'aquesta introducció, encara que el consum directe de la indústria es pot considerar baix, quan computem el contingut d'aigua que els productes industrials incorporen, de manera directa i indirecta, tenint en compte l'estructura productiva del sistema econòmic, els resultats no són tan baixos. Per tant, els efectes d'escala, atès el nivell de consum de productes industrials, pot ser no negligible, tant des de la perspectiva del consum de béns finals (consum i exportacions), com de les utilitzacions com a béns de capital. És rellevant tindre això en compte perquè a curt termini, i donada la situació econòmica actual, la disminució del consum podria fer-nos pensar en canvis en l'estructura productiva i de consum d'aigua que solament estarien mostrant el canvi de cycle econòmic.

Per tal de posar de manifest, encara que d'una manera no gaire elaborada, el que hem apuntat, convé considerar quina ha estat l'evolució sectorial de l'economia a Catalunya:

Figura 1. Evolució sectorial de l'economia a Catalunya els últims 12 anys.



Com és palès al gràfic, a partir del 2001 es produeix un alentiment dels sectors industrials i de l'agricultura, i tornen a créixer a partir del 2005, cosa que no és sorprenent, tenint en compte els efectes d'arrossegament de la construcció i els serveis. El quadre següent, elaborat a partir de l'evolució en volum que elabora l'Institut Nacional d'Estadística (INE), ens pot ajudar:

Taula 1. Taxes de creixement mitjà dels sectors econòmics (%).

	2004-2007	2000-2007
Agricultura, ramaderia i pesca	0,9	0,5
Energia	1,3	2,3
Indústria	1,9	1,3
Construcció	4,9	6,4
Serveis	4,3	4,1
Valor afegit brut total	3,7	3,5

Els diferents escenaris a mitjà termini, doncs, podrien donar lloc a un ús més restringit d'aigua que ens podria fer pensar en millores solament afavorides per alguna de les possibles conjuntures:

Taula 2. Escenaris macroeconòmics de l'economia catalana. Producte interior brut (PIB pm). Base 2000. Per components de l'oferta. Taxa mitjana de creixement en volum a Catalunya 2006-2010 (%).

	Escenaris			
	Baix	Mitjà baix	Mitjà alt	Alt
PIB pm	2,4	2,9	3,4	4
Agricultura	0,4	0,9	1,9	2,5
Indústria	-0,1	0,4	0,8	1,4
Construcció	3,1	4,5	5,9	7,5
Serveis	3,1	3,5	3,8	4,2
Impostos nets sobre productes	2,9	3,8	4,8	5,8

FONT: IDESCAT i Departament d'Economia i Finances.
© Institut d'Estadística de Catalunya.

Per a fer-nos una idea de la complexitat del problema i de la importància de la indústria en el consum d'aigua, hem fet una primera anàlisi de les relacions d'aquest sector amb la resta de l'economia des d'una perspectiva *input-output*. Tenint en compte la limitació de la informació, fem aquesta anàlisi solament per a 14 sectors, que es corresponen amb els de la Taula Input-Output de Catalunya (TIOC) del 2001, elaborada per l'Institut d'Estadística de Catalunya (IDESCAT) Som conscients que si haguéssim disposat d'una informació més detallada



referent a les branques productives, això ens hauria permès una anàlisi molt acurada de les interdependències sectorials i la determinació dels nuclis de transaccions més rellevants que involucren el consum d'aigua. D'altra banda, ens hauria permès, també, la determinació dels sectors clau per al mateix consum (Sánchez Cepeda i Vegara i Carrió, 2007; Alcántara, 2007).

Com dèiem al principi, d'aquestes planes el realment significatiu quant al consum d'aigua del sector industrial no és tant el consum directe que en fa el mateix sector, com els efectes que provoca en altres sectors, en el quals, amb una mena de *feed-back*, podria generar problemes. Si pensem en termes d'una determinada branca productiva, una reducció de l'aigua disponible que afectés la productivitat dels seus sectors proveïdors, afectaria la seva pròpia producció, i convertiria aquesta branca en un coll d'ampolla per al sistema, per poc que aquesta constitueixi un centre determinant de les branques a les quals proveeix.

Encara que dit d'una manera molt agregada i molt rudimentària, en el cas de Catalunya, el sector industrial, per a atendre la seva demanda de consum final i les exportacions, necessita com a consum directe el 8,5% del consum total d'aigua. Però, d'altra banda, per a atendre aquesta mateixa demanda final, l'aigua incorporada als *inputs* que li són subministrats per altres sectors per a poder satisfer aquella demanda representa el 38,2% del consum total d'aigua. En total, doncs, en resulta un consum del 46,7%, quan el seu consum directe és, com hem assenyalat, d'aproximadament el 10%, el 9,7% segons la informació que nosaltres fem. De l'efecte arrossegament de la indústria, l'esmentat 38,2%, entorn del 97% prové dels recursos hídrics incorporats als productes de l'agricultura, la ramaderia i la pesca.

Com que l'interès d'aquest estudi va adreçat a mostrar la realitat actual, tenint en compte que les TIOC són del 2001, hem fet l'anàlisi atenent els fluxos interns del Principat; per tant, no hi hem considerat la dependència virtual d'aigua que les importacions representen, aspecte força important si tenim en compte els efectes d'una possible substitució d'importacions tenint present la tecnologia de Catalunya, d'una banda, o les possibles implicacions que una reducció de l'oferta dels països proveïdors tindria per a l'economia catalana. S'entreveuen, doncs, tres tipus de problemes: un possible impacte en les necessitats de recursos hídrics davant una possible necessitat de substitució d'importacions, la generació de colls d'ampolla quant a la limitació d'*inputs*, i els impactes de tipus financer davant les possibles pujades de preu enfront d'una limitació de l'oferta.

No obstant això, caldria disposar d'una informació més acurada per tal de dissenyar models fiables, el resultat de l'aplicació dels quals pogués orientar el disseny de polítiques adients.

Sensibilitat de la demanda d'aigua del sector industrial als canvis en les condicions climàtiques (augment de la temperatura, reducció minsa de les pluges, augment de la seva irregularitat, augment de les onades de calor...). Quins impactes podem esperar sobre aquesta demanda seguint l'escenari tendencial actual?

L'augment de la demanda d'aigua de la indústria degut al canvi climàtic es preveu que sigui relativament petit (alguns estudis estimen que l'augment de demanda domèstica i industrial a escala mundial pel canvi climàtic seria de menys del 5% per al 2050 (Mote *et al.*, 1999; Downing *et al.*, 2003).

Un efecte, més aviat petit, seria el causat per l'augment de la demanda d'electricitat per aire condicionat i refrigeració, tant per part de les indústries com del sector domèstic, la qual cosa tendirà a augmentar els requeriments d'aigua per a refrigeració de les centrals tèrmiques (IPCC, 2007). En general, l'augment de la temperatura mitjà i la freqüència més elevada d'onades de calor portarà a un augment de la demanda d'aigua per a refrigeració per part les indústries i les centrals tèrmiques.

En aquest sentit, si es prenen mesures de mitigació del canvi climàtic que impliquin un ús més gran d'energies renovables (amb relació a l'ús de les centrals tèrmiques), es podria reduir la demanda d'aigua per a refrigeració per part de les centrals tèrmiques.

Si es fa més depuració, tractament i reutilització d'aigües residuals per part de la indústria, això pot implicar més descàrrega d'aigua a la superfície (tot i que també es poden produir problemes de més contaminació química i biològica de l'aigua a causa del canvi climàtic).

Hi haurà més pressió per a la disponibilitat d'aigua per via de les dessaladores. Això voldrà dir que les indústries hauran d'afrontar preus més alts per l'aigua i que s'haurà d'assignar aquest recurs escàs de manera eficient amb preus que reflecteixin el cost.

Com a conseqüència de les onades de calor, un efecte que es pot esperar en aquest cas, si s'analitza el que ha succeït en casos anteriors, com l'onada de calor del 2003 a França, és un augment de la demanda d'aigua embotellada i del consum de gelats, cosa que implica un consum més gran d'aigua en aquestes indústries.

Actualment, els augments en la producció industrial continuen lligats a augments en el consum d'aigua. L'ús d'aigua per a producció industrial és un factor més que pot afectar l'estrès hídric. En el futur, s'hauria de deslligar la relació entre augment de la producció i augment de l'ús de l'aigua, amb les mesures pertinents (ús racional, reutilització d'aigües residuals, mesures d'estalvi, etc.).

En qualsevol cas, hi ha una tendència decreixent al consum d'aigua a la indústria per les mesures d'estalvi. En aquest sentit, cal destacar que el cànon ha anat augmentant, cosa que fa que hi hagi incentius a l'estalvi.

Com pot quedar afectat el sector de la indústria directament o indirectament pel canvi climàtic i la consegüent reducció de recursos d'aigua?

En general, es preveu que els sectors industrials siguin menys vulnerables als impactes del canvi climàtic que altres sectors com l'agricultura. Les principals excepcions són les instal·lacions situades en àrees sensibles al clima (com la costa i les valls inundables) i els sectors industrials dependents d'*inputs* sensibles al clima (com és el cas del processament d'aliments) (Ruth *et al.*, 2004).

Els diferents sectors industrials fan un ús més intensiu o menys intensiu de l'aigua en la seva producció i, per tant, també seran més afectats o menys per l'escassetat o el preu del recurs en el futur, i també seran més o menys afectats segons les mesures d'adaptació que es duguin a terme.

Com a resultat d'aquesta escassetat més gran, cal esperar un canvi en la visió social del valor de l'aigua. L'escassetat relativa més gran del recurs hauria de comportar més pressió per a fer-ne un ús més racional, tenint en compte la productivitat de l'aigua en el seu ús, tal com recomana l'IPCC (2008). Això podria portar a donar prioritat a la demanda domèstica i industrial per sobre de la demanda d'irrigació, i a l'aplicació de tecnologies estalviadores d'aigua i polítiques de preus d'aigua.

Si s'augmenta l'oferta amb aigua dessalada, el cost de l'aigua, tant per a la indústria com per als altres usos, haurà d'incloure el cost del dessalatge (segons l'IPCC [2008], 1 \$/m³ i 0,60 \$ pel salobre, enfront de 0,02 \$ l'aigua dolça), la qual cosa afectarà les indústries segons la intensitat del consum d'aigua que facin, i també incentivarà l'estalvi i l'eficiència en el seu ús.

En alguns dels seus usos, la indústria podria emprar aigües residuals i de menys qualitat, quan aquesta qualitat no sigui necessària per a l'activitat.

Com pot repercutir en el sector de la indústria l'increment de fenòmens extrems?

Una de les interaccions més importats dels efectes del canvi climàtic sobre l'aigua en el sector de la indústria té a veure amb els efectes sobre la infraestructura d'algunes indústries, per la seva localització, a causa dels perills



de desbordaments i inundacions, tot i que el sector més afectat per aquest motiu és el turisme, que s'analitza en una altra capítol d'aquesta publicació (Puig, 2008).

Les vulnerabilitats de la indústria, les infraestructures, els assentaments i la societat al canvi climàtic són especialment greus a les zones costaneres i als costats dels rius. També ho són quan els sectors industrials estan molt lligats a *inputs* sensibles a aquests esdeveniments climàtics (producció d'aliments o d'altres recursos que sigui afectada per les inundacions o les sequeres).

Les inundacions i altres esdeveniments climàtics extrems (com ara tempestes i huracans) poden amenaçar les xarxes de transport en algunes àrees. Un exemple podria ser el metro de Barcelona, on l'augment del nivell del mar i una freqüència més alta de les tempestes de gran intensitat poden incrementar els problemes de drenatge que ja pateix. Les instal·lacions d'alguns metros i d'altres transports soterrats, i alguna altra infraestructura, podrien ser afectades i s'haurien de reformar.

Les inundacions poden danyar edificis residencials i comercials. Hi ha un risc especialment alt que això ocorri en la infraestructura costanera: els habitatges a primera línia de mar, però també el clavegueram, els ports i altres infraestructures.

També es poden produir costos en les infraestructures de transport d'aigua per les tempestes. Els costos poden atènyer més gent i més indústries que les directament afectades per les tempestes, en quedar interrompuda la provisió d'aigua.

Un exemple dels impactes d'una onada de calor el tenim amb l'onada de calor del 2003 a França. En aquella situació l'electricitat escassejava, la productivitat de la construcció va caure i els equips de refrigeració dels establiments alimentaris es van mostrar inadequats. La puntualitat del ferrocarril va caure (amb els subsegüents costos per a la indústria i tota l'economia). Van davallar les vendes de roba a l'agost, però van augmentar les vendes d'aigua embotellada (18%) i de gelats (14%), i el turisme va baixar al sud i augmentà al nord (IPCC, 2008).

Els costos per esdeveniments climàtics extrems ja han augmentat al món en les dècades recents. A causa de la concentració d'inundacions en el passat, les assegurances són limitades i els estats suporten alguns esquemes públics d'assegurances. Les assegurances ajuden a difuminar els riscos. Com ja hem comentat, el canvi climàtic tindrà efectes sobre el sector financer. Els riscos seran menys previsibles, la qual cosa farà augmentar les primes per risc i alguns esdeveniments no seran assegurats (per la carestia de les primes), cosa que pot augmentar el risc que suporta la població afectada, sobretot els agricultors i el sector turístic. També s'incrementaran les demandes d'assegurances en el sector públic. El sector financer podrà expandir la seva activitat per cobrir aquests riscos nous i més elevats.

Respecte a les possibles mesures d'adaptació, algunes possibilitats són la construcció de dics o murs, restriccions a la construcció en àrees perilloses, i un disseny i una construcció millors dels edificis.

En molts casos seran necessàries defenses més bones per a les marees i més despeses per a adaptar la infraestructura. També s'hauran d'incrementar les despeses en els sistemes de drenatge, per a evitar les inundacions causades per les tempestes intenses.

Els costos són menors si les actuacions es plantegen quan es planifica la construcció, quan es millora la infraestructura o quan es revisen els plans.

Situació i perspectives de l'energia a Catalunya

L'economia catalana mostra una forta vinculació entre creixement econòmic i consum d'energia. Entre 1990 i 2005 l'increment anual mitjà del consum d'energia primària va ser del 3%. Les principals fonts d'energia primària

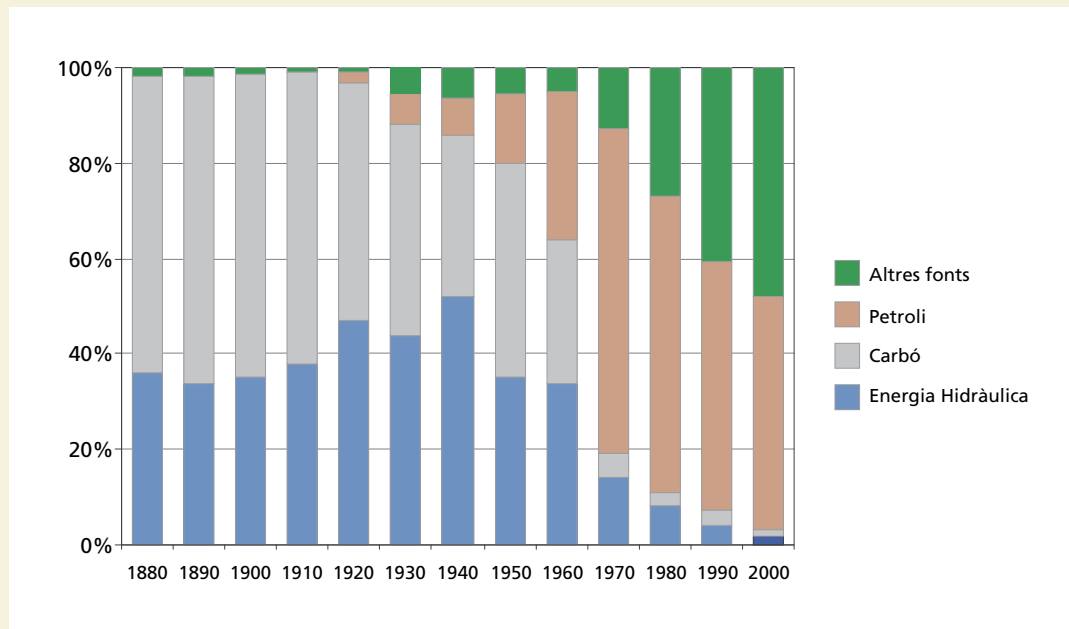
a Catalunya són el petroli (50%), el gas natural (25%) i l'energia nuclear (20%), i la dependència de l'exterior és del 96%.¹ En els darrers anys hi ha hagut certa tendència a la substitució del petroli per gas natural. En contrast amb aquestes dades, les energies renovables no arriben al 3%, molt per sota del que s'esdevé en altres comunitats autònomes (informe AMEEC, dades del 2005, Ramos, 2007).

A escala internacional, s'està produint un fort augment de la demanda d'energia i un encariment progressiu de les principals fonts d'energia (gas natural, urani i especialment el petroli). Segons algunes previsions, ja s'ha arribat o s'arribarà aviat al cim del petroli, cosa que, si és certa, agreujarà més la situació d'encariment i afectarà de manera especial les economies més dependents, com la catalana (informe AMEEC, Ramos, 2007). A això s'hi suma el fet de que en el futur s'haurà d'anar substituint la producció d'electricitat de les nuclears que vagin acabant la seva vida útil.

Entre els sectors econòmics amb més responsabilitat en aquest consum destaquen la construcció i, sobretot, el transport, que utilitza la meitat del petroli i genera la meitat d'emissions de CO₂.

Amb vista a contenir la demanda energètica de Catalunya, caldria desenvolupar mesures d'estalvi i eficiència i s'hauria d'optar decididament per repensar el model energètic, fomentant les energies renovables i aprofitant les sinergies de les polítiques de canvi climàtic amb la territorial, econòmica, industrial, ambiental, de mobilitat i d'infraestructures (informe AMEEC, Ramos, 2007).

Figura 2. Evolució de l'aportació relativa de les fonts d'energia primària a Catalunya.



¹ Com a fonts externes s'inclou l'urani, que s'ha d'importar.



Sensibilitat de la demanda d'aigua del sector energètic a canvis en les condicions climàtiques (augment de la temperatura, reducció mins de les pluges, augment de la seva irregularitat...). Quins impactes podem esperar sobre aquesta demanda seguint l'escenari de la tendència actual?

Els efectes respecte a la demanda d'aigua del sector energètic no s'espera que siguin gaire importants. Dependran, sobretot, de les necessitats d'aigua per a la producció d'electricitat (com és el cas de l'ús d'aigua per a refrigeració de les centrals tèrmiques), o per a la transformació de combustibles (consum d'aigua en refinament). Aquestes necessitats variaran en funció dels canvis que tinguin lloc en l'oferta energètica en resposta al canvi climàtic i a l'escassetat més gran d'algunes fonts energètiques, com, per exemple, el petroli.

Un efecte secundari del canvi climàtic, tot i que petit, serà el motivat per l'augment de la demanda d'electricitat per aire condicionat i refrigeració, cosa que tendirà a augmentar els requeriments d'aigua per a refrigeració de les centrals tèrmiques, i també per part de les empreses que utilitzin aigua per a refrigeració. Aquest seria un impacte afegit a l'augment del consum d'electricitat que es produiria independentment del canvi climàtic, i dependrà de la importància de les centrals tèrmiques convencionals en la provisió d'electricitat en el futur.

D'altra banda, a mesura que el petroli es faci més escàs, es faran més atractius econòmicament els crus pesants, els que s'obtenen de pissarres i altres tipus de petroli de qualitat inferior. Aquests crus tenen un impacte ambiental més gran. La mineria i la transformació de pissarres de cru i arenes de cru en combustible requereixen l'ús abundant d'aigua. Les arenes de petroli impliquen 6 litres d'aigua per litre de petroli (dades de l'IPCC, 2008). Bona part d'aquest consum, especialment el relatiu a la mineria, pot tenir lloc en altres regions del món, però la responsabilitat del seu ús, i per tant de les emissions contaminants i del consum d'aigua, serà dels que consumeixen l'energia que se n'obtingui. Si les opcions de mitigació eviten l'ús d'aquests combustibles, tindran un impacte positiu en la preservació dels recursos aquàtics.

També s'han de considerar les implicacions sobre la demanda d'aigua de les possibles respostes a les necessitats més grans d'energia, necessitats que en part són motivades pel canvi climàtic (més consum per aire condicionat i refrigeració, menys producció d'energia hidroelèctrica, i necessitat de reduir les emissions per a combatre el canvi climàtic i complir els compromisos de reducció assumits).

- Si es prenen mesures de mitigació que impliquin un ús més intens d'energies renovables (amb relació a les centrals tèrmiques), es pot reduir l'ús d'aigua per a refrigeració.
- Si per a respondre a les necessitats energètiques creixents es fan més embassaments, s'interferirà el règim de flux natural dels rius (la regulació ambiental fa bastant improbable aquesta opció a Catalunya).

Com pot ser afectat el sector de l'energia directament o indirectament pel canvi climàtic i la consegüent reducció de recursos d'aigua?

Hi ha una sèrie d'impactes sobre l'energia amb relació als impactes del canvi climàtic sobre l'aigua.

Un dels impactes més importants, que coincideixen a destacar els diferents estudis que analitzen els impactes del canvi climàtic, és l'impacte del canvi climàtic sobre la producció hidroelèctrica.

La generació d'hidroelectricitat és la font d'energia que probablement serà més impactada pel canvi climàtic, a causa de la seva sensibilitat a la magnitud i el patró temporal i geogràfic de les precipitacions, a la incidència de la temperatura sobre el fet de si la precipitació cau com a pluja o com a neu, i a la magnitud i l'estacionalitat del desglaç de la neu. Una reducció dels cabals dels rius impactaria negativament sobre el potencial hidroelèctric, mentre que cabals més abundants –si es produïssin en els moments adequats– podrien incrementar aquest potencial. En algunes regions del món, un canvi del patró temporal del flux dels rius de primavera a hivern podria

augmentar el potencial hidràulic a l'hivern més del que el redueix a la primavera i a l'estiu (no seria el cas de Catalunya). Però, en qualsevol cas, cal analitzar si els sistemes elèctrics poden aprofitar aquests increments dels fluxos d'hivern i si la capacitat dels embassaments pot fer realitat aquest potencial. Els projectes hidroelèctrics estan dissenyats, generalment, per a un règim de flux d'un riu específic, incloent-hi el marge de seguretat, i aquests fluxos variaran.

Hi ha diversos factors que hi poden influir i que poden reduir la capacitat de producció hidroelèctrica en un futur, com a conseqüència dels canvis que comportarà el canvi climàtic sobre el cicle de l'aigua i que s'han presentat en detall als capítols anteriors d'aquest informe:

- Menys precipitació i més evapotranspiració a causa d'una temperatura ambient mitjana més alta podrien causar la pèrdua del nivell d'aigua en rius i llacs, i això afectaria els resultats de les centrals hidroelèctriques.
- Més probabilitat i més freqüència de sequeres a tota la Mediterrània i al sud d'Europa (i, per tant, menys producció hidroelèctrica, també per les restriccions que s'hi apliquin).
- Menys precipitació de neu: això significarà menys aigua disponible durant els mesos càlids. Hi haurà, a més, menys provisió d'aigua per desglaç, ja que aquest es produirà abans i en menys quantitat.
- Canvis en els patrons de les pluges, amb menys previsibilitat.
- D'altra banda, augmentarà la freqüència d'esdeveniments extrems de tempestes, amb risc de desbordaments. Hi haurà esdeveniments més intensos de pluja a tot Europa, incloent-hi el sud d'Europa, la qual cosa requereix una actuació més conservadora en les estratègies d'emmagatzematge d'aigua per a prevenir danys per desbordaments i inundacions. Aquesta pluviositat intensa en uns moments determinats del temps no es podrà aprofitar per a la generació elèctrica, precisament per la necessitat d'evitar el risc d'inundació i desbordament.

Aquests factors conduiran a un potencial hidroelèctric menor —i menys flexible— en les centrals hidroelèctriques actuals.

L'alteració dels cabals dels rius en reduiran la disponibilitat per a l'ús, particularment en la generació d'electricitat a les hidroelèctriques. S'han estimat els impactes de l'alteració dels cabals sobre les hidroelèctriques a tot Europa, utilitzant un model hidrològic de macroescala. Els resultats indiquen que per al conjunt d'Europa (amb el 20% de generació d'electricitat en hidroelèctriques), la producció potencial de les plantes hidroelèctriques que existien al final del segle xx mostra una reducció del 7-12% per a la dècada del 2070 (assumint les emissions de l'escenari IS92a de l'IPCC). En el cas d'Espanya, Portugal, Ucraïna, Bulgària i Turquia, on entre el 10% i el 39% (depenent dels països) de l'electricitat és produïda per hidroelèctriques, s'estima que les reduccions seran d'almenys del 20-50%. En contrast amb això, augmentarà el 15-30% a Escandinàvia (on, actualment, l'electricitat que es produeix amb hidroelèctriques se situa entre el 19% a Finlàndia i gairebé el 100% a Noruega) i al nord de Rússia (Lehner *et al.*, 2005).

L'any 2003 a Catalunya hi havia 38 centrals hidroelèctriques de més de 10 MW (gran hidràulica) en servei, amb una potència total instal·lada de 2.047,1 MW. Pel que fa a l'energia minihidràulica, existien 345 centrals de fins a 10 MW de potència, de les quals 302 estaven en servei i 43 estaven aturades. La potència total instal·lada en aquestes centrals era de 278,6 MW, dels quals 273,1 MW corresponien a centrals en funcionament i la resta (5,5 MW) a centrals que estaven aturades. En suma, la potència total instal·lada el 2003 era de 2.325,7 MW. Amb dades també del 2003, la hidràulica representà un 13,3% de l'electricitat consumida (informe AMEEC, Ramos, 2007), tenint present, però, que en anys secs aquest percentatge es redueix a la meitat. Aquest és un percentatge menys important que en altres regions, però no deixa de representar una part prou important que previsiblement no es podrà mantenir en el futur.



D'altra banda, els fluxos menors dels rius i les temperatures més altes de l'aigua també podrien reduir la capacitat de producció de les termoelectriques (pel fet d'haver-hi menys aigua disponible i pel fet de ser més calenta i, per tant, menys eficient en la refrigeració).

Al problema de provisió d'energia hidroelèctrica se suma la pressió afegida d'una demanda d'energia creixent, que també serà afectada pel canvi climàtic. Hi haurà una demanda més gran d'energia —respecte a la situació sense canvi climàtic— a causa de la temperatura més alta: augmentarà la demanda d'aire condicionat, i, en el cas dels països de la Mediterrània, això no serà compensat per una demanda més baixa d'energia per a calefacció a l'hivern. La reducció en el potencial de les hidroelèctriques per a proveir electricitat es produeix en el context de tancament de les centrals nuclears, que actualment proveeixen el 56% de l'electricitat consumida. A això s'ha d'afegir la necessitat de complir els compromisos de reducció d'emissions, cosa que posarà pressió per a augmentar la producció d'energia hidroelèctrica o, almenys, perquè no es redueixi, atès que l'energia hidroelèctrica és, juntament amb l'eòlica, la principal font renovable d'energia avui dia.

Una possible resposta podria ser la construcció de més hidroelèctriques, tot i que tenen impactes sobre els ecosistemes dels rius i sobre les pesqueries, i augmenten les pèrdues d'aigua evaporatives. No obstant això, la construcció de la majoria d'embassaments no s'ha fet per motius energètics, i l'explotació energètica té pocs impactes addicionals associats. En qualsevol cas, les oportunitats més grans d'aquesta energia ja estan aprofitades, i els augments en la capacitat de noves centrals serien menors. A més, a Catalunya la regulació ambiental no possibilitaria fer més centrals (informe AMEEC, Ramos, 2007), i només es podria augmentar una mica la capacitat de les que ja hi ha instal·lades.

També s'han de considerar les respostes per a augmentar les provisions d'aigua i el seu efecte sobre l'energia. Per la banda de l'oferta, com hem vist, la creació d'embassaments queda limitada per la regulació ambiental, i la resposta (com a la major part de zones àrides) vindrà en bona part per l'augment en la reutilització d'aigües residuals i la dessalinització. Aquests processos farien augmentar el consum d'energia.

Com pot repercutir en el sector energètic l'increment de fenòmens extrems?

Com ja s'ha comentat, la freqüència més alta de sequeres limitarà la producció hidroelèctrica. La generació d'electricitat a les centrals quedarà reduïda a causa del cabal menor dels rius, i també per una política més prudent amb vista a prevenir problemes de provisió d'aigua.

D'altra banda, l'augment en la freqüència d'esdeveniments extrems de pluges també pot tenir un efecte negatiu en la producció elèctrica. La concentració de pluges molt intenses en moments puntuals del temps no fa que siguin aprofitables per a la generació elèctrica, atès que la capacitat d'embassament normalment no està pensada per a cobrir els esdeveniments extrems, i hi haurà més risc d'inundacions i de desbordaments. S'haurà d'augmentar el marge de seguretat dels embassaments, tenint en compte la freqüència més gran i la gravetat més accentuada d'aquests fenòmens. Per tant, l'increment en aquests episodis extrems de tempestes també contribuirà a limitar la capacitat de producció hidroelèctrica.

Les infraestructures de producció d'electricitat que se situen al costat dels rius podrien patir danys, de la mateixa manera que la resta d'infraestructures localitzades a prop dels rius i la costa.

Les fallades de les defenses contra inundacions poden interrompre les ofertes d'energia, a més de deixar les estacions de bombament d'aigua i d'aigua residual fora de funcionament, i també poden fer malbé la infraestructura.

Referències bibliogràfiques

- ALCÁNTARA, V. (2007). «Anàlisi input-output i medi ambient: una aplicació a la determinació de sectors clau en les emissions d'SO_x». *Nota d'economia. Revista d'economia catalana i de sector públic*, núm. 87 (1r quadrimestre).
- DOWNING, T. E.; BUTTERFIELD, R. E.; EDMONDS, B.; KNOX, J. W. [et al.] (2003). *Climate Change and the Demand for Water, Research Report*. Stockholm Environment Institute, Oxford Office. Oxford (Regne Unit).
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANNEL FOR CLIMATE CHANGE) (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge (Regne Unit). Pàg. 173-210.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANNEL FOR CLIMATE CHANGE) (2008). *Technical Paper on Climate Change and Water*.
- LEHNER, B.; CZISCH, G.; VASSOLO, S. (2005). «The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis». *Energy Policy*, núm. 33, pàg. 839-855.
- MOTE, P. W.; CANNING, D. J.; FLUHARTY, D. L.; FRANCIS, R. C. [et al.] (1999). *Impacts of Climate Variability and Change, Pacific Northwest*.
- RAMOS, J. (coord.) (2007). *Anàlisi del Metabolisme Energètic de l'Economia Catalana* (AMEEC, juny de 2007). Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS). Barcelona.
- RUTH, M.; DAVIDSDOTTIR, B.; AMATO, A. (2004). «Climate change policies and capital vintage effects: the case of U.S. pulp and paper, iron and steel, and ethylene». *Journal of Environmental Management*, núm. 70, pàg. 235-252.
- SÁNCHEZ CEPEDA, J. A.; VEGARA I CARRIÓ, J. M. (2007). «Anàlisi de les relacions intersectorials de l'economia catalana a partir de la TIOC₂₀₀₁ i la teoria de grafs». *Nota d'economia. Revista d'economia catalana i de sector públic*, núm. 87 (1r quadrimestre).
- PUIG, I. (2008). «Incidències del canvi climàtic sobre l'abastament urbà, l'oci i el turisme». 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.)



25. Transició i integració en la planificació de l'aigua a Catalunya davant el repte del canvi climàtic¹

Joan David Tàbara

ICTA-Universitat Autònoma de Barcelona

Introducció

Els problemes d'abastament i distribució d'aigua, no solament a Catalunya, sinó també a escala mundial, formen part del que ara anomenem *problemes persistents*. És a dir, problemes sistèmics i fortament interrelacionats els uns amb els altres, les causes dels quals està precisament en les «solucions» que se'ls aplica per a intentar abordar-los. Unes solucions que massa sovint tenen un caràcter parcial, no interesclar i no integrat. Davant els actuals problemes persistents d'insostenibilitat, com és ara la crisi energètica, el canvi climàtic o la preocupació creixent per la degradació i els mals usos dels sòls, les «sortides endavant» per tal de fer «més del mateix» acostumen a ser les respostes més comunes. Atès que aquestes solucions no ataquen l'arrel dels problemes persistents, l'únic que aconseguixen és desplaçar els problemes a altres àmbits o escales, crear situacions que a mitjà i a llarg termini encallen encara més el sistema, i incrementar la dependència de la trajectòria del desenvolupament del sistema a condicions cada vegada menys sostenibles i més vulnerables.²

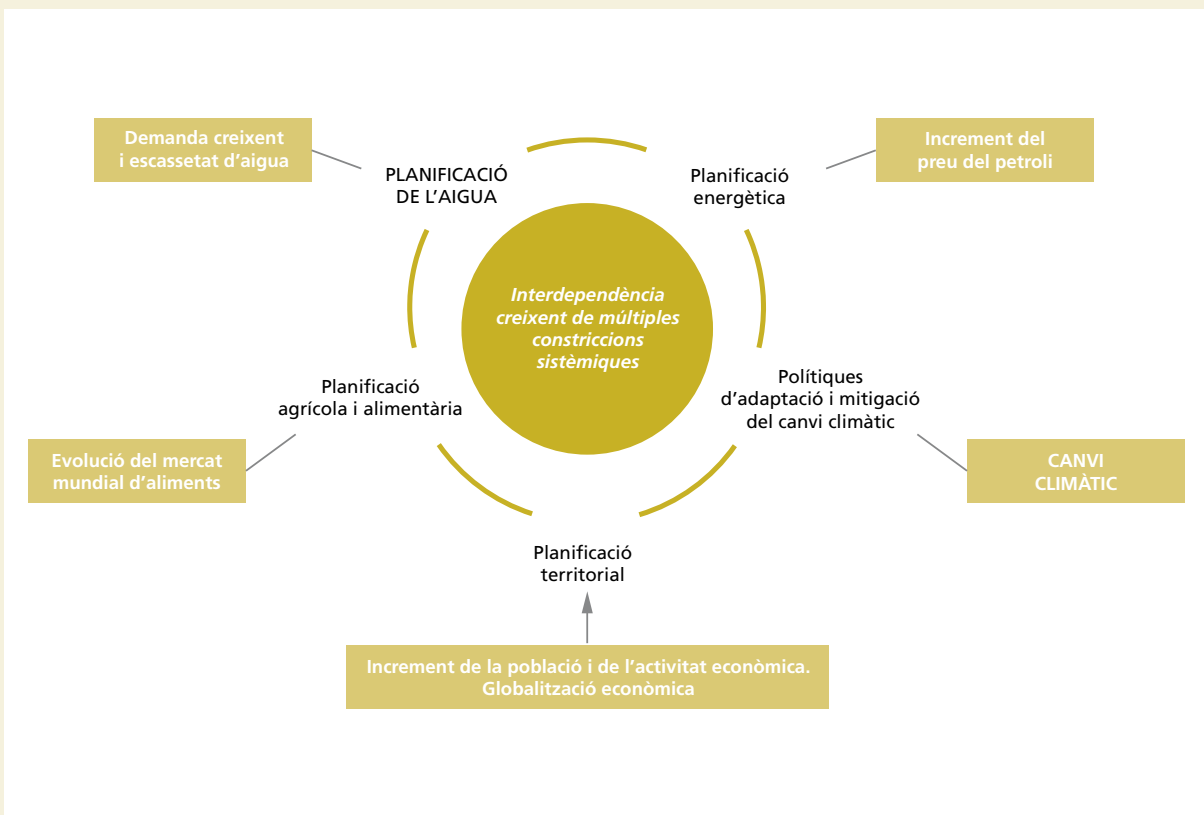
Si partim d'aquests pressupòsits, cal situar la planificació i la gestió de l'aigua a Catalunya dins d'un context molt més ampli i complex del que és definit pels objectius estrictes i les fronteres administratives de la «gestió de l'aigua». Els problemes de l'aigua tenen a veure amb les diferents visions i models de desenvolupament que es defensen i s'apliquen, així com amb les percepcions que tenim sobre la necessitat i les possibilitats de canvi i d'adaptació del conjunt del sistema. Des d'una perspectiva integrada, té poc sentit abordar les qüestions de l'aigua sense considerar el que ocorre en altres àmbits, com és ara els processos que afecten la planificació energètica i territorial, la política climàtica o la seguretat alimentària (figura 1). Això és així perquè, en realitat, *tots els sistemes de recursos estan cada vegada més interconnectats*,³ la qual cosa es fa encara més evident l'actual situació de globalització econòmica.

1 Amb any de referència del 2030 segons l'IDESCAT (2007), prenent el que es consideren els escenaris més probables, és a dir, l'escenari mitjà alt i l'escenari mitjà baix. La població de referència per a l'any de referència del 2025 segons un escenari tendencial (incrementalista i no adaptatiu) seria de 8,9 milions d'habitants segons ACA 2008a i de 8,5 milions segons ACA 2008b.

2 No es preveu cap increment segons una comunicació interna de l'ACA (maig del 2008).

3 Es preveu un increment d'unes 125.000 noves hectàrees de regadiu, la qual cosa suposaria entre 400 i 800 hm³ addicionals de necessitats d'aigua. Però aquest increment podria arribar a gairebé fins a 2.800 hm³ (Saurí, 2006).

Figura 1. Interdependència creixent de múltiples constriccions sistèmiques i relació de la planificació de l'aigua amb altres polítiques.



Des d'una perspectiva integrada no sembla possible ni responsable intentar abordar els problemes persistents de l'aigua sense tenir en compte les interrelacions amb altres àmbits i polítiques, i les seves interaccions amb les diferents escales d'acció.

Aquest document té com a objectiu avaluar de manera molt breu i sintètica quines podrien ser les diferents trajectòries sobre la provisió de *serveis d'aigua de qualitat* davant els possibles impactes del canvi climàtic en les properes dècades a Catalunya. En cap cas pretén ser una síntesi de cadascun dels impactes tal com han estat recollits en aquest informe, sinó que més aviat s'enfoca a aportar una reflexió general encarada a pensar el futur. En concret, entenc que no es poden considerar els *efectes* del canvi climàtic sobre l'abastament i la planificació de l'aigua sense considerar quin serà el *model* de gestió dels recursos hídrics que finalment acabin adoptant els diferents agents que en són responsables a Catalunya. Els impactes del canvi climàtic, en tot cas, dependran de les diferents respostes, les quals a la vegada seran diferents segons el model de gestió que s'adopti. Per aquest motiu, proposo de manera heurística dos tipus ideals de planificació i de gestió de l'aigua a Catalunya, per tal d'estimar els efectes del canvi climàtic i els diferents escenaris de futur, i dibuixar dues trajectòries possibles sobre la provisió de serveis d'aigua de qualitat en les properes dècades. Val a dir que el principal propòsit d'aquest document no és proveir de cap mena de «bola de cristall» per a preveure inexorablement quin serà el futur. Simplement l'objectiu és estimular la reflexió i el debat sobre la necessitat i les possibilitats d'adaptació a la interdependència creixent de constriccions sistèmiques en les quals se situa el repte del canvi climàtic en la planificació i la gestió de l'aigua a Catalunya a partir dels diferents models de gestió.



Canvi climàtic i transformació social. Dels impactes a les oportunitats

En un context de ràpida globalització econòmica i socioambiental com tenim en el present, sotmès a un augment fort i accelerat dels preus del petroli i a la inestabilitat financera, així com a constriccions creixents derivades de múltiples interaccions socioecològiques, es fa molt difícil destil·lar l'impacte específic del canvi climàtic sobre determinats sectors econòmics, i més, encara, sobre el conjunt de la societat catalana pel que fa als usos de l'aigua en les properes dècades. Això no obstant, el que sí que podem afirmar és que l'escenari de projecció de les tendències presents –tan usat en la planificació de recursos naturals– no solament és el menys probable, sinó, fins i tot, un dels menys útils per considerar. Els impactes d'uns recursos hídrics més escassos seran gairebé indestruïbles dels impactes que es derivin d'altres processos, com poden ser l'increment global del preu del petroli –que pot fer que determinades opcions com ara la dessalinització basada en energies no renovables siguin menys viables econòmicament– o els canvis en els mercats agrícoles i d'aliments –que poden fer augmentar la demanda d'aigua per part de l'agricultura a Catalunya. Les dinàmiques entre els sistemes ecològics i els sistemes socials globals i locals són cada vegada més compactes i inseparables.

D'una part, el canvi climàtic es pot entendre com un factor addicional en el conjunt de demandes i constriccions en les quals tradicionalment es mou la planificació i la gestió de l'aigua. En aquest sentit, el canvi climàtic sols representa una disponibilitat menor de cabals i un increment de demandes en determinats sectors. Entès així, el canvi climàtic constitueix simplement un problema d'adaptació. Això no obstant, i des d'un punt de vista més integrat, la problemàtica del canvi climàtic amb relació a l'aigua va més enllà de ser solament un problema adaptatiu. En concret, pot representar una oportunitat per a emprendre un conjunt d'actuacions de caràcter molt més general i sistèmic, i per a deixar d'entendre la política d'aigües principalment com un afer orientat a satisfer la demanda d'aigua imposada pel creixement econòmic i per altres polítiques no tant «sectorials». El canvi climàtic, així com les ben possibles més freqüents «emergències nacionals» de l'aigua, constitueixen oportunitats reals per a aprendre, per a emmarcar els problemes de recursos de manera distinta i per a fer «una altra cosa» que el que hem estat fent fins ara. El canvi climàtic obre un espai per a aplicar una política més integradora i transversal a tot un conjunt d'àmbits i sectors dins d'un context d'estreta i creixent interdependència entre múltiples constriccions socioambientals.

Així doncs, i des d'una perspectiva estratègica i integrada que tingui en compte la sostenibilitat a llarg termini del sistema de recursos hídrics a Catalunya, no té sentit parlar de millores en l'*eficiència* i estalvi sense parlar alhora de *suficiència*. En matèria de consum de recursos naturals ha quedat més que palès que a la llarga els guanys en ecoeficiència acaben sempre essent absorbits per nous increments induïts de la demanda. De fet, aquestes noves demandes són estimulades per uns costos més baixos i una disponibilitat més gran de recursos derivats precisament de les millores en ecoeficiència –per la qual cosa tota oferta és consumida. L'única manera d'evitar aquests «efectes rebot» (*rebound effects*) és mitjançant el fixament de límits quantitatius globals clars, en termes absoluts i a mitjà i llarg termini, en l'ús de recursos per a tot un conjunt de sistema de referència, que en el nostre cas és Catalunya. Aquests objectius-límit es poden intentar assolir mitjançant paquets de mesures diferenciades de control de la demanda segons els àmbits i els sectors, evidentment basats en l'eficiència i l'estalvi, però també poden també incloure objectius d'increment en les possibilitats d'ús de recursos en alguns sectors. En aquest sentit, els límits no s'han de veure com amenaces al desenvolupament, sinó precisament al contrari, com garanties per a un desenvolupament sostenible –ja que si no s'estableixen aquest límits quantitatius, el sistema serà incapaç de proveir uns serveis ambientals de qualitat i, així doncs, no podrà subministrar ni benestar ni seguretat a llarg termini.

En suma, la perspectiva sistèmica, integrada i d'aprenentatge social demana defugir la visió de la planificació i la gestió de l'aigua entesa principalment com un problema d'enginyeria social, en què el principal objectiu és satisfer les demandes, incrementar l'oferta i maximitzar la rendibilitat de la xarxa de captació, distribució i ús de

recursos hídrics. Aquest nou enfocament se centra a millorar la capacitat d'anticipació i de transformació de tots i cadascun dels agents socials i del conjunt del sistema. Es tracta d'una posició, i fins i tot d'un canvi de paradigma, del tot necessari per a evitar que les estratègies individuals adreçades a adaptar-se al canvi climàtic i a curt termini acabin traslladant el problema de l'adaptació a la mitigació a altres àmbits, a contextos socials més vulnerables o a escales temporals més àmplies,⁴ fent-la més difícil,

Tendències en l'ús de l'aigua a Europa i possibles impactes del canvi climàtic a Catalunya

Les projeccions en l'ús de l'aigua a l'Europa per a l'any 2030 segons la Agència Europea del Medi Ambient (EEA) varen ser realitzades segons el model WaterGAP (Flörke i Alcamo, 2004; actualment ja es treballa en la versió 3). Aquest model mostrava tendències en el consum de l'aigua el 2030 en funció de 8 forces motrius i 4 usos de l'aigua. En concret, les forces motrius eren les següents: 1) canvis en la població, 2) canvis en la renda per càpita, 3) canvis en la producció d'electricitat per centrals tèrmiques, i tipus de sistema de refrigeració de què disposin, 4) canvis en el valor afegit del sector econòmic que usa l'aigua, 5) variacions en l'àrea de regadiu 6) impactes del canvi climàtic i de la política climàtica, 7) canvis en la producció de bestiar, i 8) canvis tecnològics que puguin derivar en la millora de l'eficiència en l'ús de l'aigua. I pel que fa als usos de l'aigua se seleccionaren els següents: 1) domèstic, 2) industrial, 3) reg agrícola i 4) producció de bestiar. Les tendències i recomanacions destacades d'aquest informe foren les següents:

- En conjunt, a Europa, la tendència d'extraccions totals d'aigua és cap a la disminució.
- El perfil del consum de l'aigua a Europa està canviant. Al nord d'Europa el principal sector consumidor d'aigua és la producció d'electricitat, però això variarà i passarà a ser el sector domèstic i de producció de manufactures. Al sud d'Europa l'origen principal d'extraccions d'aigua és l'agricultura, i es preveu que es mantingui així en el futur pròxim. Això no obstant, és incerta l'evolució en el consum domèstic de l'aigua i es preveu que el sector elèctric perdi importància.
- S'espera que desenvolupaments tecnològics importants podrien millorar força l'eficiència en l'ús de l'aigua.⁵
- El consum derivat de l'extensió de regadiu al sud d'Europa es preveu que augmentarà, la qual cosa pot anar en detriment de la qualitat ecològica i química de les masses d'aigua en aquests indrets.
- Les polítiques climàtiques podrien tenir un efecte limitador en el consum d'aigua en la producció tèrmica d'energia elèctrica, com podria ser el cas de la refrigeració de les centrals tèrmiques.
- Són necessàries mesures de conservació d'aigua al llarg de tots els sectors, i tant a escala d'estats com a escala de conca.

Una revisió més exhaustiva i recent sobre escenaris relatius a l'evolució de la demanda l'aigua a Europa es pot trobar a Kok i Alcamo (2007), en què es recullen les observacions dels escenaris de gran escala produïts per l'IPCC, *Millenium Ecosystem Assessment*, el *Global Environmental Outlook (GEO) 3 i 4*, el projecte *Vision/Med Action*, l'Agència Europea del Medi Ambient i el *Global Water Outlook*. En aquest document, i partint del marc proveït per GEO 3 i 4 també se citen com aspectes importants en la confecció de les tendències futures de l'aigua a Europa, entre d'altres, la distribució i transport de l'aigua, o la demanda d'aigua per a la natura (taula 1).

4 Com poden ser la concentració de la producció agrícola, l'increment d'infraestructures hídriques, l'abandonament de zones agrícoles o forestals poc productives, o l'increment dels sistemes de refrigeració.

5 Com podria ser, en el cas de Catalunya, la generació de nous recursos d'obtenció d'aigua, no convencionals, que inclourien la dessalinització o la reutilització.



Taula 1. Factors que poden condicionar la demanda d'aigua a Europa segons els escenaris produïts als *Global Environmental Outlook 3 i 4* (Kok i Alcama, 2007; UNEP, 2002, 2007).

Escenari global	Mercat continental	Fortalesa global (en política)	Sostenibilitat	El principal, la sostenibilitat	
				global	regional
Escenari GEO	El principal, els mercats	El principal, la seguretat	El principal, la política	El principal, la sostenibilitat a partir de desenvolupaments globals	El principal, la sostenibilitat a partir de desenvolupaments locals
Demanda d'aigua	Fort increment	Fort increment i sobreexplotació de l'aigua	Increment, malgrat les fortes inversions	Reducció (seguretat alimentària global; comerç d'aigua virtual)	Forta reducció (mitjançant canvis locals en els comportaments)
Oferta d'aigua	Un cert increment (noves tecnologies)	Reducció (sequeres molt esteses)	Increment Increment	Fort increment	Increment (amb problemes de sequera)
Estrès hídric	Increment	Fort increment, però no per a tothom. Projectes de transvasaments d'aigua	(aprendre a enfrontar-se amb l'escassetat)	Reducció (la gent i la indústria han après a enfrontar-se)	Reducció (però encara hi ha grups que viuen sota estrès hídric)
Qualitat de l'aigua	Increment (amb punts negres de contaminació d'aigua)	Forta reducció, però no per a tothom (hi ha massa residus)	Increment (augment del tractament de l'aigua)	Increment	Increment
Tecnologia de l'aigua	Inversions extremes per tal d'augmentar l'oferta i la qualitat	Utilització de tecnologies velles	Grans inversions	Un èmfasi molt fort en les noves tecnologies	S'adopten a un ritme més baix, hi ha menys avenços importants
Distribució de l'aigua	Fortes desigualtats (els rics tenen més accés a l'aigua neta)	Desigualtats molt grans (formació de «bombolles de riquesa»)	Gran igualtat, tot i que alguns grups encara tenen problemes	Molta igualtat	Es produeixen diferències entre regions; Europa en general millora de manera significativa
Aigua per a l'alimentació	Més regadius, fertilitzants i bestiar. Els subsidis per a l'agricultura desapareixen	L'agricultura manté els subsidis	Menys subsidis. Els regadius s'incrementen	Els subsidis són substituïts pels pagaments en serveis ambientals	L'agricultura es torna més tradicional i extensiva. El total de l'àrea irrigada és estable
Aigua per a la natura	–	Degradació ambiental sense precedents	Èmfasi en la protecció ambiental	Creació de corredors entre parcs	–
Aigua per a la gent	–	–	L'accent en el consum continua	–	La gent es desmaterialitza i necessita menys aigua
Altres aspectes	L'aigua es privatitza	–	En general, positiu	–	–

Aquests escenaris permeten de manera sintètica seleccionar els elements principals per a enfocar l'anàlisi i les reflexions sobre els futurs de la demanda d'aigua a Europa. Nogensmenys, en principi les vuit forces motrius que podrien condicionar l'evolució del consum a Europa són plenament aplicables a Catalunya. Així, el paper que tingui el canvi climàtic o la política del canvi climàtic en les variacions de la demanda, tot i ser important, pot ser relativament menor en comparació del paper que tingui l'evolució de la població, de la renda o l'expansió dels regadius.

En particular, i respecte a l'impacte del canvi climàtic sobre el creixement econòmic, comencem ja a disposar d'unes quantes estimacions i programes que fins i tot avaluen que a escala mundial que la reducció del creixement podria ser d'entre 5% i el 20% del PIB en el cas de no fer res (Stern, 2006; CEC, 2007; IPCC, 2007). Així, podem preveure que el canvi climàtic es tradueixi en una necessitat més gran de portar a terme determinades inversions públiques poc productives, compensar danys derivats d'inundacions, incendis o sequeres, i d'aquesta manera incrementar les tensions inflacionistes, tot desaccelerant el creixement del PIB. L'estimació quantitativa d'aquests efectes directes i indirectes depenen en tot cas dels diferents escenaris i de la capacitat d'una resposta ràpida dels agents responsables per tal d'evitar danys futurs i transformar els riscos presents en noves oportunitats de desenvolupament (Tàbara, 2008; Bizikova *et al.*, 2007). Amb les dades disponibles i el nivell de profunditat d'aquest capítol és impossible quantificar el paper de les anteriors forces motrius, impactes i possibles respostes a Catalunya sota els diferents escenaris, tant climàtics com d'intervenció política. No obstant això, i tal com destaquen altres autors d'aquest treball (Alcàntara i Padilla, 2008; Saurí, 2008; Puig, 2008; vegeu també Álvarez *et al.*, 2005, i Olcina, 2008), és possible preveure algun dels sectors on el canvi climàtic podria tenir un impacte més gran a Catalunya:

- **Agricultura, ramaderia i sector forestal:** molt probablement seran els sectors més afectats pel canvi climàtic i, per tant, són els sectors que ofereixen també oportunitats més grans de transformació, d'adaptació i de contribució a una política adaptativa en l'àmbit de l'aigua, malgrat que alhora sovint acostumen a ser els menys flexibles. Els riscos de no prendre una estratègia adaptativa en aquest sector poden ser especialment elevats (per exemple, dificultats o pèrdua de qualitat en l'abastament d'aliments, o increment de focs forestals).
- **Sector domèstic, urbanisme i territori:** una variabilitat del règim hídric més accentuada juntament amb una possible freqüència més alta de fenòmens extrems poden incrementar els riscos de sequeres i inundacions, posar més pressió i crear costos inesperats sobre el manteniment de les infraestructures de l'aigua. En aquesta situació un sistema flexible que eviti la sobredimensió de les infraestructures podria resultar en un disseny més adaptatiu i a llarg termini més rendible econòmicament.
- **Conservació de la natura i de la biodiversitat:** La conservació dels ambients aquàtics pot ser afectada per una precipitació més baixa, l'increment de temperatures, la freqüència d'esdeveniments extrems, una competència més forta pel recurs de l'aigua, o altres processos d'intensificació de la contaminació, com pot ser una eutrofització més elevada.
- **Indústria i energia:** Algunes indústries manufactureres i agroalimentàries que fan un ús més intensiu de l'aigua podrien ser particularment afectades, de la mateixa manera que, pel que fa a l'energia, els sectors que podrien rebre un impacte negatiu més gran tindrien a veure amb la producció hidroelèctrica i nuclear, tant a causa de la disminució de les disponibilitats hídriques com per més necessitat de refrigeració i més evaporació.⁶ Per contra, les restriccions imposades per part de la política climàtica podrien afectar el desenvolupament d'activitats energètiques basades en la combustió, així com altres sectors difusos, com el transport, o puntuals, tot alliberant així d'un certa dotació addicional el cicle d'aigua.

6 Les previsions sobre reducció de les precipitacions depenen dels diferents escenaris i períodes al llarg del segle XXI, en què s'esperen variacions menors en el període 2010-2040 i superiors en el període 2070-2100. Per al conjunt de la Península, podrien disminuir entre el 5% i el 14% cap al 2030 i fins al 17% cap al 2060. A partir del 2070 les reduccions podrien assolir valors entre el 15% i el 25% o, fins i tot, podrien superar el 30% al sud peninsular (Moreno, 2005; DDAA, 2007).



- **Turisme:** És previsible un canvi en l'estacionalitat del turisme a Catalunya, amb un allargament o desplaçament del turisme estival a la primavera i a la tardor, tot i que algunes activitats podrien ser afectades per la disponibilitat d'aigua més restringida o per precipitacions de neu més escasses (com ara el golf o l'esquí). Això no obstant, a curt termini és previsible que les forces que mouen el turisme responguin a altres factors més sensibles que el canvi climàtic, com és la seguretat i l'atracció de la destinació, i els preus i el valor final dels serveis.

Dos models de planificació i gestió de l'aigua a Catalunya davant el canvi climàtic

La publicació *Bases per a un Model de Gestió de l'Aigua a Catalunya 2007-2025* (ACA, 2008a) constitueix un bon resum de la situació actual dels recursos i cap a on s'encara la política hídrica al nostre país. No obstant això, parteix del pressupòsit que un sol model és possible o desitjable, i tanmateix deixa un conjunt d'elements fonamentals, alguns de caràcter qualitatiu i fins i tot ideològic, sense definir, com és el cas del paper dels mecanismes reguladors del mercat en la planificació hídrica a Catalunya. En particular, el model que defensa l'ACA es basa en una visió en què, en termes totals i absoluts, a Catalunya «la prognosi per al futur mena cap a un creixement de les demandes» (p. 27). Això no obstant, tot i aquest increment de demanda prevista derivat de l'augment de la població, en termes relatius la dotació per habitant es preveu que es redueixi.

L'objectiu de les línies següents és adreçar-me a un debat precisament sobre el contingut i les possibles dimensions dels *diferents models* de gestió de l'aigua a Catalunya, amb el principal propòsit d'emfatitzar el fet obvi que és possible més d'un model, més que no pas especificar i quantificar en detall totes i cadascuna de les diferents característiques distintives dels diferents models. La raó d'aquest exercici és destacar que, en tot cas, els possibles impactes futurs que el canvi climàtic pugui suposar sobre la disponibilitat de recursos hídrics a Catalunya dependran de les diferents respostes que prenguin els diferents agents socials responsables, les quals depenen a la vegada del model i de la trajectòria de desenvolupament que es pretengui seguir a partir d'ara. En efecte, quan parlem en termes estratègics, cal evitar moltes de les contradiccions que tant sovint impregnen els discursos relatius al medi ambient i l'ús dels recursos naturals. En *termes absoluts* –que són els que comptem al cap i la fi–, no es poden augmentar i reduir els estocs que extraïem dels ecosistemes de suport o que hi aboquem alhora (en forma d'aigua, d'energia o de contaminació). Hem de decidir si el nostre model volem que contribueixi a fer una cosa o l'altra. No es poden fer les dues coses a la vegada.

Una forma senzilla d'il·lustrar de manera sintètica els possibles models i respostes que la planificació i la gestió de l'aigua podria adoptar a Catalunya en els propers anys davant el repte del canvi climàtic, és mitjançant el desenvolupament d'escenaris d'avaluació integrada (AI). El principal objectiu d'aquests escenaris és la creació de *narratives plausibles* sobre determinats desenvolupaments futurs de gestió, i que contenen tant variables socials com biofísiques. La literatura recent sobre escenaris d'AI i en particular els anomenats *escenaris de transició* (Sondeijker *et al.*, 2006; Raskin *et al.*, 2002) emfatitzen i exploren quins són els aspectes que limiten o impulsen determinades transformacions socials i individuals, com és el cas de la possible adaptació al canvi climàtic o la sostenibilitat, i són especialment interessants en el context que ara ens ocupa. Les taules 2 i 3 pretenen donar una primera aproximació a les diferents dimensions i els possibles indicadors distintius dels dos models dels quals podrien dependre les possibilitats de resposta al canvi climàtic pel que fa a la gestió i usos de l'aigua a Catalunya. És evident que la realitat final mai s'ajustarà plenament a cap d'aquests models o escenaris, ja que sempre serà molt més complexa, matisada i híbrida. No obstant això, i com he assenyalat, és important destacar que en conjunt els dos models no són compatibles, ja que mostren estats arquetípics oposats i, per tant, menen a resultats i trajectòries ben diferents.

Taula 2. Dos models de planificació i gestió de l'aigua.

Dimensió	Gestió incrementalista/ no adaptativa	Gestió de transició/adaptativa
Percepció de l'existència de límits a l'oferta d'aigua i de la necessitat de fixar-los anticipadament	No hi ha límits biofísics reals, i «tot és possible», la tecnologia pot resoldre els problemes d'oferta i cal continuar incrementant-la.	Hi ha límits reals a l'oferta i cal contenir-la. Cal fixar límits a l'oferta i la demanda de manera anticipada. Cal entendre aquests límits com a oportunitats per a la innovació i l'adaptació social i cal crear processos equitatius i transparents per a fixar-los.
Principal focus del problema i de la transformació	Cal transformar el medi ambient. Principal qüestió que cal respondre: «Quin és el problema?».	Cal transformar les persones i l'estructura social, política i econòmica. Principal qüestió que cal respondre: «Qui és el problema?».
Sistema de gestió i planificació. Principal distribució de la responsabilitat	Centralitzat, amb pocs actors, i de manera corporativista. Pocs i grans oferents i planificadors (p. ex., grans empreses i tècnics de l'Administració).	Policèntric, descentralitzat, amb molts actors, amb una capacitat notable de decisió autònoma. Un gran nombre de consumidors i usuaris amb múltiples responsabilitats àmpliament distribuïdes.
Desenvolupament i aplicació de sistemes de monitoratge i informació	Sistemes d'informació principalment enfocats al control i la gestió de l'aigua per part de les empreses d'aigua i de les agències públiques de planificació.	Desenvolupament avançat de sistemes de monitoratge descentralitzats, de mesurament personalitzat en cada llar i per a cada usuari d'aigua. Capacitat de vendre els excedents derivats d'estalvis individuals en mercats d'aigua.
Encaix de l'estructura de gestió de l'aigua en l'estructura i dinàmica dels ecosistemes aquàtics de Catalunya. (<i>fit / misfit of social-ecological systems</i>)	No és necessari adaptar l'estructura institucional de l'extracció i distribució d'aigua a l'estructura, condicions i dinàmiques dels ecosistemes aquàtics de Catalunya. La tecnologia permet superar aquestes condicions ambientals i ho ha de fer, p. ex., mitjançant les connexions entre conques en un sistema únic i interconnectat.	Gestió orientada a la millorar l'encaix entre les condicions ecològiques i les infraestructures de captació i distribució de l'aigua, amb l'objectiu de maximitzar la resiliència i la gestió integral del cicle de l'aigua dins de cada conca. Evitar les interconnexions de conques. Promoure múltiples cicles tancats o semitancats de l'aigua en funció de diferents serveis i diverses qualitats de l'aigua necessaris.
Nivell de compliment dels principis de la Directiva marc de l'aigua (millora de la qualitat ecològica, internalització de costos i participació pública, a escala de conca)	Baix	Alt
Desenvolupament dels mercats d'aigua. Rigidesa dels sistemes d'abastament i demanda d'aigua	Mercats d'aigua poc desenvolupats. Sistema molt rígid i oligopolístic en la oferta de l'aigua en un sistema únic interconnectat. Demandes i usos poc adaptables i movibles a variacions en l'oferta i la disponibilitat d'aigua.	Mercats d'aigua molt desenvolupats. Sistemes adaptables i competitius en l'oferta i la demanda d'aigua, adaptats a cada conca i en funció de cada situació de disponibilitat i necessitat de recursos. Mobilitat notable tant de l'oferta com de la demanda i usos d'aigua.



Dimensió	Gestió incrementalista/ no adaptativa	Gestió de transició/adaptativa
Paper de la política i de la planificació de l'aigua en el creixement i integració amb altres polítiques	Donar suport al creixement econòmic, com a política secundària o sectorial d'altres polítiques, com ara l'agricultura, l'habitatge i la política territorial. Objectiu: incrementar l'oferta en termes absoluts.	Reorientar, contenir i transformar el creixement econòmic, i convertir això en el pilar central, juntament amb la política energètica, de la gestió de la transició. Objectiu: contenir la demanda en termes absoluts.
Posició i rol de la política de l'aigua davant el canvi climàtic	Principalment adaptació. El canvi climàtic només representa una constricció més a l'oferta d'aigua, davant la qual solament cal adaptar-se i incrementar mesures d'estalvi i generar noves fonts d'oferta.	Adaptació i mitigació. El canvi climàtic implica la necessitat de reorientar la política hidràulica i de reformular la seva relació amb les altres polítiques. A més d'adaptar-se, la planificació de l'aigua ha contribuir a la mitigació del canvi climàtic, mitjançant el seu efecte de transformació sobre el model de desenvolupament econòmic.
Impacte de la reforma ambiental tributaria i de preus en la planificació de l'aigua	Baix. Ni els preus ni el sistema tributari segueixen sense reflectir els costos econòmics i ambientals reals de l'aigua.	Alt. Progressivament els preus i el sistema tributari tendeixen a reflectir els costos econòmics i ambientals reals de l'aigua.
Èmfasi a proveir quantitats d'aigua o èmfasi a proveir serveis d'aigua de qualitat	Centrat a incrementar la quantitat. Això obliga a utilitzar un nombre més alt de distintes qualitats d'aigua per a diferents usos i usuaris. Es tendeix a augmentar la utilització d'aigües de poca qualitat per a usos amb poca acceptabilitat social a causa de la seva percepció de risc sobre la salut; increment de la contaminació difusa. Es generen noves desigualtats hídriques.	Centrat a contenir la demanda, i a proveir serveis d'aigua de qualitat, evitar desigualtats hídriques i utilitzar les aigües de baixa qualitat solament en situacions d'emergència i amb un gran consens social. Desenvolupament de serveis que no requereixen aigua i que anteriorment eren molt intensius en aigua (p. ex., el vàter).
Principal (no únic) paper de la tecnologia	Incrementar l'oferta.	Contribuir a limitar la demanda.
Pressupòsits de gestió i filosofia política subjacent	«Més i més ràpid és millor». I «Més sempre serà possible».	«Millor és millor (més i més ràpid no és sempre millor); menys i més lent pot ser millor i, a llarg termini, és l'únic possible».
Relació mercat-política	El mercat (oligopolístic) domina i la política s'hi adapta.	La política (horitzontal i policèntrica) domina i el mercat s'hi adapta.
Principal destinació dels possibles excedents d'aigua obtinguts per mesures d'estalvi o fonts alternatives	Satisfer i crear noves demandes de caràcter econòmic i social.	Restaurar i millorar la resiliència dels ecosistemes aquàtics i reduir-ne la vulnerabilitat (p. ex., al canvi climàtic).

Taula 3. Alguns possibles objectius i indicadors distintius dels dos models de planificació i gestió de l'aigua al 2025 a Catalunya (ACA, 2008a, 2008b; vegeu les notes).

Indicador/sector	Situació actual (2003-2008)	Gestió incrementista no adaptativa (2025)	Gestió e transició/ adaptativa (2025)
Població i dotacions d'aigua			
Total de la població a Catalunya ⁷	6.913.585 habitants (2003)	8.400.000 habitants (2030)	7.500.000 habitants (2030)
Dotació mitjana en alta en dipòsit municipal	297 litres/hab./dia (2003)	283 litres/hab./dia	< 250 litres/hab./dia
Cabal subministrat en alta en les xarxes municipals de Catalunya	750 hm ³ /any (2003) (108,5 hm ³ per milió d'hab.)	915 hm ³ /any 102,3 hm ³ per (milió d'hab.; increment 22%)	< 750-825 hm ³ /any (< 96,2 hm ³ per milió d'hab.; no increment o increment < 10%)
Agricultura i ramaderia			
Demanda d'aigua per a agricultura i ramaderia a les conques internes de Catalunya	418 hm ³	418 hm ³ ⁸ (no increment)	334 hm ³ (Reducció 20 %)
Demanda d'aigua per a agricultura i ramaderia a les conques catalanes de l'Ebre	1.715 hm ³ /any	2.115-2.515 hm ³ ⁹ (increment del 23-47%)	1372 hm ³ (Reducció 20 %)
Indústria i energia			
Demanda d'aigua per a la producció industrial	283,4 ¹⁰	346-500 hm ³ (increment del 22-76%) ¹¹	298-312hm ³ (increment del 5-10%)
Demanda consumptiva d'aigua per a la producció d'energia elèctrica (principalment aigua evaporada en centrals nuclears i a la tèrmica de Cercs)	52-60 hm ³	55-66 hm ³ (no increment, o lleuger increment del 5-10%) ¹²	28-50 hm ³ (reducció del 10-50%)
Demanda urbana			
Demanda urbana al conjunt de Catalunya	750 hm ³	915 hm ³ (increment del 22%)	788-825 hm ³ (increment del 5-10%)



Indicador/sector	Situació actual (2003-2008)	Gestió incrementista no adaptativa (2025)	Gestió e transició/ adaptativa (2025)
Medi ambient i canvi climàtic			
Mitjana de cabal ecològic i demanda ecològica d'aigua per a la restauració dels ecosistemes aquàtics superficials, i recàrrega d'aqüífers. Increment de demanda per adaptació i mitigació del canvi climàtic (gestió de l'increment de l'evapotranspiració, etc.)	< 18-28%	< 18%	18-28%
Total de captació i transport + tractament i potabilització + dessalinització	1.803,6 hm³ anuals (segons ACA, 2008b)	2.290 hm³ anuals (segons ACA, 2008b) ¹³	1.803,6 hm³ anuals (no increment)

Conclusió. Transició i possibles trajectòries en la provisió de serveis d'aigua a Catalunya davant el repte del canvi climàtic i la globalització creixent

Els processos de transició són processos transversals que s'han de portar terme en molts àmbits d'acció alhora i no solament des de la planificació i la gestió de l'aigua. Solament és possible avançar cap a un escenari de transició en la mesura que aquesta perspectiva també impregni la direcció i la gestió d'àrees com la política energètica, l'agricultura, la planificació territorial o la mateixa gestió del medi ambient. En les condicions actuals de creixent interconnexió global de les constriccions socials i ecològiques, i des d'una perspectiva precautòria, cal entendre les polítiques de transició no com una alternativa més, sinó com una necessitat. Com he subratllat, la gestió incrementalista no és adaptativa, atès que a llarg termini tendeix a incrementar la demanda total d'aigua i no ataca les raons estructurals que condueixen el sistema a augmentar les seves pressions sobre els sistemes ecològics. Es tracta d'una estratègia que sovint està més preocupada a mantenir l'estat actual de les coses, evitar

7 Amb any de referència del 2030 segons l'IDESCAT (2007), prenent el que es consideren els escenaris més probables, és a dir, l'escenari mitjà alt i l'escenari mitjà baix. La població de referència per a l'any de referència del 2025 segons un escenari tendencial (incrementalista i no adaptatiu) seria de 8,9 milions d'habitants segons ACA 2008a i de 8,5 milions segons ACA 2008b.

8 No es preveu cap increment segons una comunicació interna de l'ACA (maig del 2008).

9 Es preveu un increment d'unes 125.000 noves hectàrees de regadiu, la qual cosa suposaria entre 400 i 800 hm³ addicionals de necessitats d'aigua. Però aquest increment podria arribar a gairebé fins a 2.800 hm³ (Saurí, 2006).

10 El valor de 283 hm³ s'ha extret segons dades i projeccions del 2002 i amb projeccions de població el 2025 de 7,5 milions, actualment totalment superades (vegeu Saurí, 2006), amb la qual cosa la demanda d'aigua per la indústria podria arribar a superar la xifra de 500 hm³.

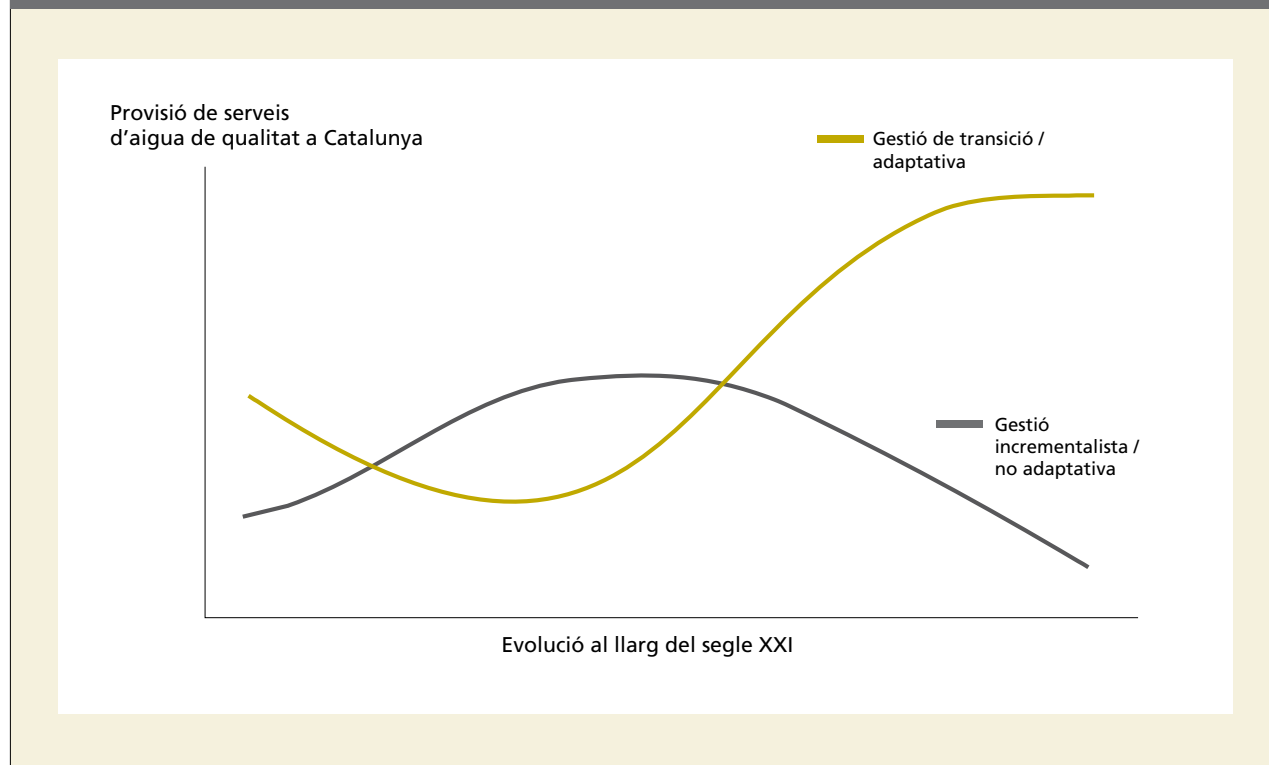
11 Dades de referència per a la gestió incrementalista obtingudes aplicant un increment del 22% del cabal subministrat a les xarxes municipals el 2025 per al cas de la indústria.

12 És poc previsible un increment de la potència nuclear instal·lada a Catalunya, tot i que si n'hi hagués una reducció, per exemple, pel tancament d'algun reactor, llavors els percentatges probablement serien força elevats.

13 Però probablement seran superiors si se satisfan totes les noves demandes projectades.

conflictes d'interessos i de legitimitat, i «resoldre» l'abastament a curt termini, que no pas a promoure una veritable transformació adreçada a adaptar el sistema socioecològic als cada vegada més urgents imperatius de sostenibilitat. Tenint en compte aquestes constriccions estructurals, i sobre la base dels treballs i les reflexions realitzats dins del projecte europeu Matiesse,¹⁴ la figura 2 il·lustra dues possibles trajectòries en l'evolució de la provisió de *serveis d'aigua de qualitat* relacionats amb la gestió de l'aigua a Catalunya en les properes dècades:

Figura 2. Dues possibles trajectòries en la provisió de serveis d'aigua de qualitat a Catalunya davant el canvi climàtic, segons dos models diferents de planificació i gestió.



En concret, el principal missatge de la figura 2 és el següent: s'entén que si seguíssim una trajectòria adaptativa, en una primera etapa seria possible preveure una relativa dificultat en la provisió de determinats serveis ambientals que tradicionalment han estat molt intensius en la utilització d'aigua. Aquests serveis podrien estar concentrats, encara que no únicament, en determinats sectors, com és el cas de l'agricultura o el sector ramader. En aquest període, alguns usos d'aigua desapareixerien, algunes activitats es transformarien i potser d'altres noves sorgirien, sempre que l'estructura general del sistema de provisió i consum d'aigua a Catalunya fos prou flexible i dotés els agents de mitjans per a participar en l'estratègia adaptativa. A continuació, s'entraria en una etapa en què les necessitats i els usos d'aigua ja serien menors i diferents, precisament pel fet d'haver portat a terme les mesures adaptatives a temps. En aquest cas, la provisió de serveis d'aigua de qualitat estaria garantida, atès que s'hauria evitat la creació de noves demandes innecessàries o supèrflues. En canvi, la trajectòria no adaptativa tendiria a incrementar incessantment noves demandes i consolidaria una estructura cada vegada menys flexible. Aquest procés es traduiria en un període inicial de relativa abundància hídrica a causa de les noves infraestructures i

¹⁴ www.matisse-project.net; per a una introducció al debat sobre transicions en la política de l'aigua aplicat al cas espanyol, vegeu Tàbara i Ilhan (2008).



interconnexions, però més endavant es traduiria en un increment encara més intens de la dependència energètica, hídrica i forana de recursos del conjunt del sistema, cosa que encara el faria molt més vulnerable, més rígid i més ineficient a l'hora de proporcionar els serveis d'aigua de qualitat que en principi hauria de proveir. Aquesta etapa de crisi també coincidiria precisament en un moment en què els impactes del canvi climàtic, com ara la reducció de les precipitacions, es farien més evidents, tal com apunten les previsions actuals. Tot això donaria lloc a una necessitat més gran d'utilitzar aigües diverses de baixa qualitat, més riscos de contaminació difusa i de salut, i un empitjorament de les desigualtats hídriques en el conjunt de Catalunya. D'altra banda, un increment més agut dels preus del petroli podria accelerar la trajectòria no adaptativa i fer encara més urgent la implementació de l'estratègia de transició.

Cal subratllar que, en tot cas, aquestes dues trajectòries no indiquen el que passarà, sinó *el que podria passar* si se segueix un model i una estratègia adaptativa o se'n segueix una de no adaptativa en la planificació i gestió de l'aigua a Catalunya davant el repte del canvi climàtic. Hom podria pensar en models i trajectòries intermèdies, bifurcacions i trencaments, o cicles que segueixin cronologies diferents. No obstant això, el que sí que cal recordar és que «no tot és possible», ja que en el conjunt del sistema de referència català no hi pot haver adaptació i no adaptació alhora. Les dues trajectòries no són compatibles. Aquest present treball només ha presentat dues rutes molt generals i que en tot cas caldria validar amb treballs molt més quantitatius, integrats i participatius.

En definitiva, si coincidim amb aquesta anàlisi de conjunt, podem concebre algunes mesures i actuacions principalment de caràcter social i polític que podrien contribuir a avançar el model actual de gestió i planificació d'aigua a Catalunya cap un disseny més adaptatiu, flexible i de transició i, per tant, més robust davant el repte del canvi climàtic i la globalització econòmica:¹⁵

- Integrar i combinar una perspectiva global i a llarg termini basada en el criteri de suficiència mitjançant l'establiment de límits absoluts i líndars màxims en l'ús del recurs de l'aigua amb polítiques i actuacions basades en l'eficiència i l'estalvi.¹⁶ Evidentment, l'establiment d'aquests límits quantitatius globals s'haurien de fer a través de processos transparents, democràtics i equitatius, i de manera integrada i participativa.
- Establir programes d'actuacions transversals aigua – agricultura – energia – urbanisme – conservació de la natura, orientats a establir prioritats i a abordar els aspectes de canvi climàtic i de gestió de l'aigua de manera integrada. I en aquest sentit, realitzar, experimentar i triar programes demostratius d'èxit en gestió i estalvi d'aigua a petita escala (per exemple, municipal) que es puguin estendre al conjunt de tot Catalunya, promovent així l'aprenentatge i el compromís social en matèria de gestió integral de l'aigua (i evitant, doncs, el risc de desencís i desarticulació social).
- Crear sistemes d'assegurança de riscos en la manca de provisió d'aigua, que cobreixin no solament els costos econòmics, sinó també altres de caràcter ambiental, i quantitats físiques en casos d'emergències. Aquests sistemes haurien de seguir el principi de la Directiva marc de l'aigua de gestió de conca, i ja que tradicionalment la interconnexió de conques ha tendit a incrementar el volum total de dotacions i usos d'aigua del conjunt del sistema.
- Promoció d'una política creació de múltiples cicles d'aigua tancats o semitancats (no interconnectats) de petita escala, en funció de la provisió de determinats serveis –principalment domèstics o industrials, incloent-hi l'aprofitament urbà d'aigües pluvials.

¹⁵ En tot cas, aquestes propostes, de caràcter general i social, solament intenten complementar-ne d'altres de més específiques, com les presentades a Estevan i Prat (2006). Vegeu també Estevan i Naredo (2004).

¹⁶ Tal com s'ha fet a la UE, en el cas del canvi climàtic, amb el líndar de 2 °C d'increment màxim de temperatura global, o amb l'objectiu de reduir el consum global d'energia el 2020 a la UE.

- Estimular processos que permetin l'intercanvi i la *transformació d'agents* en els sectors de l'aigua i l'energia, com és el cas d'agents i activitats relacionats amb usos molt intensius en aigua en l'agricultura i que es puguin derivar cap a la realització d'altres activitats productives com és la generació d'energies renovables.
- Controlar «la fuga de l'aigua» en forma d'aigua virtual (aigua continguda en béns com els agrícoles i alimentaris) dels cicles i conques de Catalunya.
- Crear estímuls i donar suport a xarxes d'actors i d'innovació social que defensin la *gestió cap a la transició* i la provisió de serveis ambientals i usos poc intensius en aigua en tots els sectors econòmics.
- Incrementar el nombre d'agents i empreses, i capacitar-los perquè participin activament en la gestió sostenible dels recursos hídrics i evitar situacions monopolístiques en la provisió d'aigua i gestió dels ecosistemes aquàtics, ja que això també suposa riscos de provisió i promou trajectòries dirigides a incrementar la interconnexió, la rigidesa del sistema i el volum total en les dotacions d'aigua a llarg termini. Evitar el risc que significa derivar cap a un sistema sociohídric sobredimensionat, però dominat per pocs actors amb interessos amb poca capacitat o voluntat de transformació.
- Promoure el desenvolupament de sistemes de coresponsabilitat descentralitzada molt clars, tant d'oferents com d'usuaris en la gestió integrada dels estocs i fluxos hídrics a Catalunya.¹⁷ Això inclou la creació de sistemes d'auditories i pressupostos d'aigua a tots els nivells, extensió dels sistemes de mesura individualitzada i sistemes d'informació, monitoratge i sancions que permetin la traçabilitat dels estocs i fluxos de l'aigua al llarg de tot el seu cicle en el conjunt de Catalunya (no només a l'Àrea Metropolitana de Barcelona i a les conques internes de Catalunya). Avançar decididament cap a una internalització més gran de costos ambientals mitjançant els preus, en la línia proposada per la Directiva marc de l'aigua.
- Adoptar una perspectiva ecosistèmica, d'aigües subterrànies i de conca en la gestió de l'aigua que realment compti amb la implicació dels agents socials. Aquest és el cas, per exemple, de les mesures orientades a millorar la participació social en les mesures adreçades a contribuir a la recàrrega i millora de la qualitat dels aquífers (incloent-hi la porositat i la permeabilitat de les superfícies urbanes i periurbanes), al manteniment de les infraestructures i als mitjans institucionals a escala de subconques que ho facin possible.
- Contribuir decididament a l'elaboració de campanyes de comunicació, educació i implicació dels ciutadans que vagin més enllà de demanar «que tanquin l'aixeta»..., tot mostrant vies de diàleg clares i de participació activa en el desenvolupament de formes de gestió alternatives i descentralitzades, com pot ser en la gestió d'aigües pluvials, pous o d'altres sistemes d'aprofitament locals.

I, d'una manera més general, suposaria, doncs, injectar i augmentar la complexitat institucional i la flexibilitat del sistema d'oferta i demanda d'aigua a partir de sistemes descentralitzats i orientats cap a la reducció d'oferta, en lloc de sistemes orientats cap al seu increment o cap a la simplificació del disseny institucional. En aquest sentit, l'estratègia adaptativa passa per integrar i conferir un lloc central a la planificació de l'aigua dins de la planificació territorial, agrícola i industrial, amb l'objecte de contribuir a reorientar el creixement i contenir processos com són ara la proliferació de la urbanització extensa i els regadius, tan intensius pel que fa a l'ús de l'aigua. Una de les principals característiques d'aquest nou canvi de paradigma dirigit a la transició en la planificació i la gestió de recursos és aprendre a treballar en termes absoluts –que són els que finalment afecten el funcionament dels ecosistemes naturals– i no solament en termes relatius. Dit altrament, la nova manera de planificar passa a combinar l'ecoeficiència amb la suficiència i *aprendre fins on no es vol arribar* tenint en compte el conjunt de les pressions antròpiques del nostre marc de referència, i no de manera separada per sectors o relativament

¹⁷ I fins i tot basats en dissenys «redundants», ja que aquests aporten un potencial de més seguretat i més resiliència en situacions de possible increment de la vulnerabilitat, com s'esdevé ara en el cas del canvi climàtic (vegeu Dietz *et al.*, 2003).



per agents. El principal missatge de tot això és que una gestió de transició també incrementa les garanties d'abastament a llarg termini, en tant que fa menys necessari l'augment continu de dotacions, i es millora així la seguretat i la qualitat del conjunt del sistema se'l fa menys vulnerable als possibles impactes del canvi climàtic. Des d'una perspectiva precautòria no podem esperar més a emmarcar el persistent problema de l'aigua i a actuar-hi de manera *diferent*, ja que fer «més del mateix» (augmentar l'oferta i anar a cavall de la demanda i d'altres polítiques) encara farà l'adaptació més difícil a mitjà i llarg termini. Al meu entendre, els riscos de no prendre la trajectòria adaptativa poden ser nombrosos i molt diversos, i no solament de manca d'abastament d'aigua, sinó també d'altres de més generals que podrien posar en compromís el mateix desenvolupament i benestar de la societat catalana en un futur no gaire llunyà.

Referències bibliogràfiques

ACA (AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA) (2008a). *Bases per a un model de gestió de l'aigua a Catalunya 2007-2025*. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Barcelona.

ACA (AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA) (2008b). *Energia al cicle integral de l'aigua a Catalunya. Diagnosi i estratègies de mitigació*. Esborrany 3.2, gener. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Barcelona.

ALCÀNTARA, V.; PADILLA, E. (2008). «Implicacions del canvi climàtic sobre la disponibilitat d'aigua en el sector industrial i energètic». 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.).

ÁLVAREZ, M.; CATALAN, J.; GARCÍA DE JALÓN, D. (2005). «Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales». A: J. M. Moreno (coord.). *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Proyecto ECCE. Universidad Castilla-La Mancha i Ministerio de Medio Ambiente.

BIZIKOVA, L.; ROBINSON, J.; COHEN, S. (2007). «Linking Climate Change and Sustainable Development at the Local Level». *Climate Policy*, núm. 7, pàg. 271-377.

CEC (COMMISSION OF EUROPEAN COMMUNITIES) (2007). *Adapting to Climate Change – Options for EU Actions. Green Paper from the Commission*. COM (2007), 345 (final), 29-06-07. Brussel·les.

DD.AA. (2007). *El cambio climático en España. Estado de situación. Informe para el Presidente del Gobierno elaborado por expertos en cambio climático. Documento Resumen*. Document presentat a la Conferència de Presidents Autònoms, gener del 2007.

DIETZ, T.; OSTROM, E.; STERN, P. C. (2003). «The struggle to govern the commons». *Science*, núm. 302, pàg. 1907-1912.

Estevan, A.; Naredo, J. M. (2004). *Ideas y propuestas para una nueva política del agua en España*. Bakeaz i Fundació Nova Cultura de l'Aigua. Bilbao.

Estevan, A.; Prat, N. (coords.) (2006). *Alternativas para la gestión del agua en Catalunya*. Bakeaz i Fundació Nova Cultura de l'Aigua. Bilbao.

Flörke, M.; Alcamo, J. (2004). *European outlook on water use*. Center for Environmental Systems Research, University of Kassel. Kassel (Alemanya).

IDESCAT (INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA) (2007). *Proyecciones de población de Catalunya 2015-2030 (Base del 2002)*. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
(www.idescat.net)

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANNEL FOR CLIMATE CHANGE) (2007). *IPCC Technical Paper on Climate Change and Water*.

KOK, K.; ALCAMO, J. (2007). *Report Reviewing existing large-scale scenarios and reasons for selection of the set most relevant to European water issues for the fast track process*. SCENES Deliverable 2.2. Wageningen University. Wageningen (Holanda).

MORENO, J. M. (Coord.). (2005). *Evaluación Preliminar de los Impactos en Espanya por Efecto del Cambio Climático*. Proyecto ECCE. Universidad Castilla-La Mancha i Ministerio de Medio Ambiente.

OLCINA, J. (2008). *Prevención de riesgos: Cambio climático, sequías e inundaciones*. Panel Científico de Seguimiento de la Política del Agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. Sevilla. (Disponible a: <http://www.unizar.es/fnca/varios/panel/61.pdf>)

PUIG, I. (2008). «Incidències del canvi climàtic sobre l'abastament urbà, l'oci i el turisme». 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.)

RASKIN, P.; BANURI, T.; GALLOPÍN, G.; GUTMAN, P. [et al.] (2002). *The Great Transition. The Promise and Lure of the Times Ahead*. Stockholm Environment Institute - Global Scenario Group. Boston (Estats Units).

STERN, N. (2006). *The Stern Review. The Economics of Climate Change*. Versió traduïda al català: *Aspectes econòmics del canvi climàtic*. Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya. Barcelona.

SAURÍ, D. (2008). «Canvi climàtic i incidència sobre la disponibilitat d'aigua en l'agricultura». 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.)

SAURÍ, D. (2006). «La demanda d'aigua a Catalunya». A: Mas-Pla (coord.). *La Directiva Marc de l'Aigua a Catalunya*. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible de Catalunya (CADS), Generalitat de Catalunya. Barcelona. Pàg. 77-91.

SONDEJCKER, S.; GEURTS, J.; ROTMANS, J.; TUKKER, A. (2006). «Imagining sustainability: the added value of transition scenarios in transition management». *Foresight*, núm. 8(5), pàg. 15-30.

TÀBARA, J. D. (coord.) (2008). *Percepció i Política del Canvi Climàtic a Catalunya*. Generalitat de Catalunya: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible de Catalunya (CADS) i Grup d'Experts de Canvi Climàtic a Catalunya (GECCC). Barcelona.

TÀBARA, J. D.; ILHAN, A. (2008). «Culture as trigger for sustainability transition in the water domain». *Regional Environmental Change*. (Disponible a: <http://www.springerlink.com/content/103880/?k=Ebro>)

TÀBARA, J. D.; PAHL-WOSTL, C. (2007). «Sustainability learning in natural resource use and management». *Ecology and Society*, núm. 12 (2), pàg. 3. (Disponible a: <http://www.ecologyandsociety.org/viewissue.php?sf=28>)

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME) (2002). *Global Environmental Outlook 3*. Nairobi (Kenya). (Disponible a <http://www.unep.org/geo/geo3/>)

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME) (2007). *Global Environmental Outlook 4*. Nairobi (Kenya). (Disponible a <http://www.unep.org/geo/geo4/media/>)



26. La Directiva marc de l'aigua i el canvi climàtic

Lorenzo Galbiati
Agència Catalana de l'Aigua

Introducció

La Directiva marc de l'aigua (DMA), 2000/60/CE, és la llei en temes d'aigua de més incidència a Europa. La seva aplicació permetrà delinear les directrius principals per a assolir una gestió sostenible de l'aigua amb l'objectiu principal de que totes les aigües –continentals, costaneres, de transició, superficials i subterrànies– assoleixin el bon estat ecològic l'any 2015.

La DMA marca un calendari i defineix les etapes que s'han de respectar per a assolir diferents fites mitjançant la definició d'objectius ambientals i ecològics. La millora de la quantitat i la qualitat de les aigües serà el resultat de l'aplicació de la DMA. Durant la seva aplicació serà necessari tenir en compte tots els factors que formen part de la gestió dels recursos hídrics, és a dir, els aspectes ambientals, econòmics i socials.

L'aplicació de la DMA en els països membres de la Unió Europea ha començat després de la seva publicació l'any 2000. La seva implementació durant aquests anys ha evidenciat diversos aspectes que necessiten una anàlisi més profunda de les relacions entre el cicle integral de l'aigua i els components ambientals, econòmics i socials d'un país. Entre aquests aspectes és evident que cal tenir en compte els impactes del canvi climàtic, d'importància fonamental per al desenvolupament d'una estratègia de gestió sostenible de les aigües europees. És evident que la gestió sostenible de l'aigua no pot prescindir de les perturbacions climàtiques que estan ocorrent, i que cada vegada es produiran amb més freqüència a Europa i arreu del món. Aquestes variacions afectaran tant el règim i la disponibilitat dels recursos hídrics, com la seva qualitat.

Fa uns quants anys la comunitat internacional va prendre consciència dels problemes relacionats amb el canvi climàtic. Una de les primeres accions en l'àmbit internacional ha estat la constitució del Grup o Panell Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC, en les sigles en anglès), una comissió d'experts mundials amb l'objectiu de construir i mantenir una base de dades d'informacions imparcials i objectives sobre canvi del clima. L'IPCC va publicar l'any 2001, en el seu 3r informe, una revisió a escala global i regional dels efectes més evidents del canvi climàtic. A més, aquest informe feia unes hipòtesis sobre els impactes futurs més probables (que han estat recentment actualitzades en el seu 4t informe del 2007). L'IPCC afirmava que «hi ha una nova evidència, cada vegada més forta, que la majoria de les alarmes observades durant els últims 50 anys poden ser atribuïbles a activitats humanes».

La Comunitat Europea, com a part integrant i activa del procés de conscienciació dels efectes del canvi climàtic sobre el medi ambient, publica l'any 2004 l'informe *Impacts of Europe's Changing Climate, an Indicator-Based Assessment* (EEA, 2004). En aquest document, l'Agència Europea del Medi Ambient (EEA) actualitza les informacions publicades al 3r informe de l'IPCC i les enfoca a dimensió europea. Per primera vegada, el document evidencia, de manera oficial i clara, com també a Europa l'escalfament mundial tindrà nombrosos efectes sobre el medi ambient. Entre aquests efectes, destaca que la disponibilitat d'aigua podrà variar en el futur com a conseqüència de canvis en el clima i en la hidrologia. A més, l'informe evidencia clarament que mentre que la DMA es preocupa d'aspectes relacionats amb la qualitat i la quantitat de l'aigua (per exemple, concentracions de nitrats, falta de cabals ecològics o garantia de recursos per a l'abastament, no té en compte explícitament el canvi

climàtic en el seu text. Aquest informe ha estat recentment actualitzat (2008) posant de manifest l'elevat ritme al que s'estan observant molts canvis.

Al final del 2004, el Centre de Recerca Conjunta (JRC, en les sigles en anglès), un altre òrgan de la Comissió Europea, publica l'informe *Climate Change and the European Water Dimension* (JRC, 2004), en el qual aporta una anàlisi del problema i formula unes hipòtesis dels possibles impactes del canvi climàtic sobre les aigües europees. En aquest document s'afirma que, tot i que la quantitat de dades disponibles no permetin determinar escenaris totalment fiables, és necessari fer un esforç i començar a actuar per a evitar que el canvi climàtic anul·li totes les estratègies d'implantació de la DMA i, en conseqüència, l'assoliment dels seus objectius.

En aquest context, des del començament del 2007, la Comissió Europea ha constituït en el marc de l'Estratègia Comuna d'Implementació (ECI)¹ un grup de treball de Canvi Climàtic i DMA. L'objectiu principal d'aquest grup és investigar i analitzar totes les possibles relacions entre el canvi climàtic i els plans de gestió de conca. El resultat d'aquest grup d'experts serà la definició d'una sèrie d'actuacions per a incloure en els plans de gestió proposats i mesures per a adaptar-se al canvi climàtic i mitigar-ne els efectes.

L'impacte del canvi climàtic sobre el cicle integral de l'aigua i la seva gestió

És indubtable que hi ha evidències científiques sobre el canvi climàtic i que aquests canvis afectaran el cicle integral de l'aigua. En totes les sèries històriques de dades climàtiques hi ha una constatació de l'increment de la temperatura mitjana de l'aire a Europa, en la mateixa direcció del que s'observa a escala mundial. En el 3r informe del 2001, l'IPCC xifrava aquesta diferència en uns 0,8 °C durant el segle xx, i les darreres actualitzacions fins i tot aporten revisions lleugerament a l'alça. Temperatures més altes produeixen més evaporació i més evapotranspiració. A més, la tendència de les precipitacions en el període 1900-2000 és d'una disminució mitjana de l'ordre de l'1% per dècada a l'Europa meridional (EEA, 2004). Aquests canvis afecten de manera més o menys directa diversos components del cicle de l'aigua que han estat tractats específicament en capítols anteriors d'aquest informe. Entre aquests efectes generals es poden destacar:

- Canvis en la temperatura i la qualitat de l'aigua.
- Canvis en els cabals circulants als rius.
- Canvis en la recàrrega d'aqüífers.
- Afeccions en la disponibilitat d'aigua.
- Augment de la freqüència d'esdeveniments extrems (inundacions i sequera).
- Impactes en ecosistemes aquàtics.

Altres aspectes potser més singulars o locals poden ser la disminució dels espais d'aiguamolls, els canvis de localització d'ecoregions, l'augment del i de l'expansió d'espècies invasores, l'increment del nivell del mar en la línia de costa, les intrusions salines en aqüífers costaners o l'erosió de platges. L'increment d'aquestes pressions generarà, indirectament, un canvi en els equilibris socioeconòmics, a més d'impactes sobre la biodiversitat i la distribució d'ecosistemes al nostre continent.

¹ Per a facilitar el compliment de la DMA per part de tots els estats membres, s'ha desenvolupat una Estratègia Comuna d'Implementació de la DMA (ECI), sota els auspicis dels Directors de l'Aigua. L'ECI es compon de diversos grups de treball, cada un dels quals orientat envers un tema crític de la implantació de la DMA.



Figura 1. Principals impactes previstos al cicle integral de l'aigua per efecte de l'escalfament global a Catalunya.

	Avui	Cap al 2030	Del 2030 al 2070	Al final del s. XXI
	0 a +1 °C	+1 °C a +2 °C	+2 °C a +4 °C	> de +4 °C
Impactes sobre la gestió de l'aigua	S'intensifiquen les sequeres			
		Creix el risc d'aiguats		
		Reducció de la recàrrega d'aqüífers i d'espais d'aiguamoll		
		Les demandes d'aigua s'incrementen de manera acusada		
		Riscos sobre la disponibilitat d'aigua		
			Desapareixen les aportacions nivals	
				El risc de desertització es generalitza

El canvi climàtic i la DMA

Lògicament, la implantació de la Directiva marc de l'aigua està relacionada amb les variables climàtiques, que són a la base de molts dels paràmetres que influeixen en la hidrologia i la gestió dels recursos hídrics. Per aquesta raó, tots els canvis en el cicle hidrològic que s'han esmentat afectaran, més o menys directament, la gestió dels recursos hídrics. Un aspecte molt important que s'ha de considerar durant la implantació de la DMA és la necessitat de planificar l'ús de l'aigua integrant tots els aspectes del cicle hidrològic, sigui durant les fases preliminars a la definició i caracterització de les masses d'aigua, o durant la definició dels objectius que cal complir el 2015. En aquest context de gestió integral, té una importància fonamental fer el seguiment del canvi climàtic i analitzar-ne els impactes durant la implantació de la DMA.

Un primer pas en aquesta direcció podria ser plantejar una pregunta fonamental: En quina mesura i amb quins instruments la DMA té en compte l'impacte del canvi climàtic sobre les aigües europees?. La resposta a aquesta pregunta es podria enfocar de dues maneres. D'una banda, és evident que la DMA, tal com s'ha estructurat, no té en compte explícitament els efectes del canvi climàtic en el cicle integral de l'aigua. D'altra banda, és indubtable que, com s'ha mostrat anteriorment, la DMA està totalment vinculada al cicle hidrològic, on el component climàtic té una importància fonamental, i per tant es podria pensar que no hi ha cap opció de fer un pla de gestió de conca sense tenir en compte l'impacte del canvi climàtic sobre els recursos hídrics.

Per la seva mateixa naturalesa, la gestió de l'aigua requereix flexibilitat i la capacitat d'adaptació contínua a condicions que poden variar de manera inesperada (una temporada de sequera o de pluges torrencials). En aquest sentit, la decisió més lògica seria incloure les condicions futures sota escenaris de canvi climàtic en els plans de gestió de conca, amb l'objectiu que les decisions preses avui continuïn essent vàlides en un futur que, com s'ha indicat, serà afectat de manera considerable per les pertorbacions climàtiques.

La implantació de la DMA és un procés gradual que, començant per la identificació de les masses d'aigües, i passant per la definició de les pressions principals i d'uns programes de mesures per compensar-les, acaba amb la definició d'uns plans de gestió de conca. Al llarg d'aquest procés hi ha diverses etapes intermèdies d'importància fonamental que, segons les condicions futures previstes, s'haurien d'enfocar des del principi considerant els impactes del canvi climàtic. Per exemple, durant el desenvolupament dels programes de mesures o durant l'estimació de la distància entre les condicions actuals i els objectius s'han d'assolir per a complir la DMA, s'haurien d'integrar des del principi totes les variables dependents del canvi climàtic que, directament o indirectament, podrien afectar l'eficàcia dels programes de mesures o augmentar (i/o en algun cas disminuir) la distància entre l'estat actual i el bon estat ecològic.

L'objectiu dels apartats següents és descriure, breument, com el canvi climàtic afectarà les principals fases d'implantació de la DMA.

Caracterització de les conques fluvials i estimació de les pressions i dels impactes principals

La definició de les característiques de les masses d'aigua i la identificació de les pressions i dels impactes principals són els primers passos que s'han de complir per a la implantació de la DMA. El canvi climàtic pot afectar directament o indirectament diversos aspectes d'aquesta fase de la implementació, d'acord amb els principals impactes previstos, que es resumeixen a la taula 1.

Taula 1. Principals impactes directes i indirectes del canvi climàtic en el sector de l'aigua a Catalunya.

Impactes directes

Canvis en les característiques físiques de les masses d'aigua (temperatura).
Afeccions en els règims hidrològics.
Disminució de la recàrrega dels aquífers.
Increment de la freqüència i la intensitat d'esdeveniments extrems (sequeres i inundacions).
Canvis en la qualitat de l'aigua i característiques de les càrregues contaminants.
Impactes en els ecosistemes aquàtics (extensió d'aiguamolls, localitzacions d'ecoregions).
Impactes en àrees costaneres (intrusió salina, erosió de platges).

Impactes indirectes

Canvis en la intensitat i tipologies d'activitats humanes relacionades amb l'ús de l'aigua (producció hidroelèctrica, abastament, reg, sanejament).
Augment de pressió deguda a alguns contaminants per la disminució dels cabals circulants i menys dilució.
Retroalimentació entre impactes del canvi climàtic i les pressions antropogèniques (per exemple, l'augment de la demanda de sistemes de refrigeració a causa de l'increment de temperatura).
Canvis en la gestió del territori a causa d'estratègies de mitigació (augment de bio-combustibles) i/o d'adaptació al canvi climàtic (augment de dessalinitzadores i dels costos energètics).

L'efecte combinat dels impactes del canvi climàtic podria afectar la definició de les tipologies de masses d'aigua, i la identificació de les condicions de referència que s'utilitzen com a base per a definir els objectius de bon estat ecològic que cal complir. Les condicions de referència s'estableixen segons la caracterització de les aigües; llavors, si sota l'efecte del canvi climàtic aquestes característiques canviessin, les condicions de referència també s'haurien d'actualitzar. El grup de treball sobre Canvi Climàtic i DMA de l'Estratègia Comuna d'Implementació ha identificat la variació de les condicions de referència com un dels punts més crítics en l'anàlisi de la incidència del canvi climàtic sobre la implantació de la DMA.

En l'àmbit de l'Estratègia Comuna d'Implementació és evident, també, una actitud bastant crítica amb relació als treballs d'IMPRESS enviats a la Comunitat Europea. Els experts dels grups de treball europeus opinen que



les definicions de les pressions i dels impactes més importants s'han fet, en la majoria de casos, sense tenir-hi en compte les probables variacions sota l'efecte del canvi climàtic. Aquest aspecte també podria tenir una importància crítica durant el desenvolupament dels plans de gestió de conca.

Definició dels objectius de la DMA

Com ja s'ha indicat, l'objectiu final de la DMA és assolir el bon estat ecològic de les masses d'aigua, i el bon potencial ecològic de les masses d'aigua definides com a fortament modificades. En primera anàlisi, el canvi climàtic no sembla que tingui cap impacte directe sobre la definició d'aquests objectius.

D'altra banda, com s'ha comentat a l'apartat anterior, el canvi climàtic sí que pot afectar parcialment o conjuntament les pressions degudes a activitats antropogèniques, la definició de les condicions de referència i/o l'estimació dels impactes de les pressions sobre les masses d'aigua. Per exemple, un increment de temperatura atmosfèrica podria portar a un augment de temperatura de les aigües i llavors variarien els paràmetres que són a la base de les reaccions fisicoquímiques en els rius, és a dir, variaria el mecanisme que regula la transformació i la degradació dels contaminants, el que podria anul·lar o reduir els esforços per a assolir el bon estat ecològic.

En altres paraules, la definició dels objectius de la DMA s'hauria de fer tenint en compte tant els impactes generats per les pressions principals a l'estat actual, com els impactes que es generaran a causa del canvi climàtic durant els pròxims anys i que demanarien una revisió de les condicions de referència utilitzades fins ara.

Segurament, amb les metodologies actualment disponibles, és molt difícil distingir entre els impactes generats enterament per l'activitat humana i els impactes generats pel canvi climàtic o per les seves sinergies amb altres pressions que no en depenguin.

Entrant en una anàlisi més profunda del problema, és bastant probable que les variacions degudes al canvi climàtic no seran les més «importantes» en el primer cicle d'aplicació de la DMA (fins al 2015). És bastant lògic pensar que, durant els pròxims 7 o 8 anys, els impactes generats per pressions d'origen antropogènic seran les més «importantes», i que llavors els esforços més intensos dels plans de gestió de conca se centraran a compensar aquestes pressions. En aquest sentit, podríem pensar que els objectius definits sota les caracteritzacions actuals podrien ser bastant realistes.

Segurament, la falta de metodologies adaptades a distingir entre l'origen dels impactes es podria convertir en un problema més important durant les següents fases de la DMA (2015-2021 i 2021-2027). En una perspectiva a llarg termini, els impactes del canvi climàtic podrien ser predominants respecte als impactes sobre els recursos hídrics de natura antropogènica. Aquesta desproporció, de moment imprevisible, podria fer inabastables o poc realistes els objectius definits en els plans de gestió de conca.

Programa de mesures

Com s'ha vist, els programes de mesures són el mecanisme principal que s'implantarà a les conques hidrogràfiques europees amb l'objectiu de complir la DMA. Com qualsevol altre component de la Directiva, els Programes de Mesures s'hauran de publicar a finals del 2009, conjuntament amb la presentació de la primera versió del Pla de gestió de conca.

Les mesures contingudes en els programes contribuiran, en sinergia amb les mesures d'adaptació al canvi climàtic, a millorar l'ús sostenible de l'aigua. A la Comunitat Europea es preveu que els programes de mesures seran molt heterogenis; per tant, no hi ha cap garantia que algunes de les mesures tinguin efectes oposats a propostes d'adaptació o, vist d'una altra manera, que les mesures d'adaptació tinguin efectes en la mateixa direcció que les mesures de sostenibilitat, estrictament, en l'ús de l'aigua. Un exemple prou clar d'això podria ser el del conreu de biocombustibles. Aquest tipus

de conreus s'estan difonent ràpidament a Europa amb l'objectiu de baixar la dependència dels combustibles fòssils. En aquest sentit, una disponibilitat més gran de biocombustibles tindrà un evident efecte positiu en la disminució d'emissions de gasos d'efecte hivernacle. L'augment de producció de biocombustibles, doncs, ajudarà a disminuir les emissions de CO₂, però un augment de superfície conreada amb biocombustibles correspon inevitablement a un augment de demanda d'aigua per a regadiu. En moltes conques hidrogràfiques, especialment a les mediterrànies, no és clar com aquest increment de demanda pot coexistir amb la demanda dels usos actuals, sobretot tenint en compte episodis de sequera recurrents i a priori creixents segons els escenaris de canvi climàtic previstos.

El veritable problema en considerar les interaccions entre els programes de mesures i el canvi climàtic és assegurar que les mesures implantades per a aconseguir els objectius de la DMA siguin compatibles amb les mesures d'adaptació al canvi climàtic. Aquest problema és particularment urgent per a les mesures que comporten inversions importants i a llarg termini (sobretot per a construcció d'infraestructures). Molts dels esforços més importants que s'estan fent per a arribar a dissenyar programes de mesures efectius consisteixen a aplicar mesures que respectin el principi del cost/eficàcia, és a dir, aplicar mesures que puguin assolir el millor resultat amb el menor cost possible. A la llum dels canvis generats pel canvi climàtic, no hi ha cap garantia que una mesura que tingui una bona relació cost/eficàcia avui dia continuï essent-ho els pròxims 10 o 20 anys.

En aquesta línia un dels resultats més importants del *workshop* que es va fer a Bonn el novembre del 2007 (*Common Implementation Strategies: Workshop on Climate Change and Water*; CIS, 2007), és que tots els plans de gestió de conca haurien d'incloure un *climate check* inicial dels programes de mesures, a més de preveure un mecanisme que permeti una revisió periòdica dels efectes de la mesura amb relació al canvi climàtic.

Clarament, el *climate check* dels programes de mesures podria evidenciar la incompatibilitat d'algunes mesures amb les mesures d'adaptació al canvi climàtic. En aquest cas, una de les possibles solucions seria aplicar l'article 4.7 de la DMA i demanar una excepció, argumentant una impossibilitat d'aconseguir el bon estat ecològic com a resultat de noves modificacions del medi ambient generades per factors naturals o antropogènics.

En general, l'estratègia que caldria seguir podria ser analitzar els programes de mesures amb relació a les mesures d'adaptació, i prioritzar les mesures que no evidenciïn cap conflicte entre les dues estratègies o que, fins i tot millor, treballin conjuntament vers una gestió sostenible dels recursos.

Un altre aspecte que cal considerar en l'anàlisi dels programes de mesures és la interacció amb les mesures de mitigació. Un exemple en aquest sentit pot ser el creixement de demanda energètica per al funcionament de depuradores, dessalinitzadores, etc., ja que els actuals models de gestió de l'aigua estan invertint molts recursos per sanejar les aigües residuals urbanes i industrials o per produir aigua dessalinitzada amb l'objectiu d'augmentar la garantia del recurs. Si, d'una banda, aquestes estratègies contribuïran a complir els objectius de la DMA, no hi ha cap previsió sobre la coherència de l'augment d'aquestes infraestructures (i l'impacte associat als seus consums energètics) amb les estratègies d'adaptació i/o mitigació al canvi climàtic que s'estan impulsant i implantant a Europa. En aquest sentit, cal esperar que els futurs criteris de sostenibilitat ambiental no només s'orientin cap al sector de l'aigua, sinó que integrin el binomi aigua-energia.

Programes de seguiment i control

Una altra etapa intermèdia molt important en la implantació de la DMA és el desenvolupament d'una xarxa de seguiment i control que permeti verificar de manera sistemàtica el compliment dels objectius de la DMA, a més de permetre evidenciar ràpidament canvis en les característiques de les masses d'aiga.

El repte és assegurar que les eines aplicades al seguiment i control siguin capaces d'evidenciar els impactes del canvi climàtic sobre les condicions hidrològiques i sobre els ecosistemes i la biodiversitat.



Anàlisi econòmica de la DMA i canvi climàtic

L'anàlisi econòmica de la DMA és un procés transversal que s'aplica al llarg de tot el calendari d'implantació de la Directiva. Considerar l'impacte del canvi climàtic és important en diferents fases d'aquesta anàlisi. En primer lloc, durant el desenvolupament dels documents de l'IMPRESS s'han calculat corbes de creixement de les activitats econòmiques (horitzó del 2015), que tenen importància sobre l'ús de l'aigua. És clar que aquestes anàlisis s'haurien hagut de desenvolupar i actualitzar tenint en compte els possibles impactes del canvi climàtic (per exemple, una temperatura més alta i més freqüència d'esdeveniments de sequera podrien fer disminuir de manera substancial el turisme a la costa mediterrània). Les previsions de la variació de les pressions degudes als usos de l'aigua són a la base de la determinació de la distància entre l'estat ecològic actual, l'estat ecològic projectat per al 2015 i els objectius que cal complir per a aquest mateix horitzó.

En aquest context, el cost total de la implantació dels programes de mesures pot variar de manera substancial a causa de la incertesa dels impactes generats pel canvi climàtic en la variació de les pressions futures.

Conclusions

La implantació de la DMA i les estratègies d'adaptació i mitigació del canvi climàtic són dos processos que no es poden desenvolupar sense considerar les seves interaccions, sinergies i contradiccions.

La implantació de la DMA és un repte que els països europeus estan intentant guanyar per complir els objectius prefixats en el 2015. En l'estat actual, molts d'aquests objectius no es podran assolir a causa de les pressions antropogèniques sobre les masses d'aigua.

L'impacte del canvi climàtic afegeix una altra variable de complexitat en aquest sistema.

La Comissió Europea ha posat en marxa un mecanisme de cooperació i col·laboració entre els països que hauria de portar a la definició d'unes estratègies i unes metodologies comunes per a conciliar la implantació de la Directiva i el control dels impactes del canvi climàtic. En aquest sentit, és molt clar que durant el disseny dels plans de gestió de conca és necessari considerar el canvi climàtic com un dels factors més importants en la definició dels objectius que s'han de complir, en el disseny dels programes de mesures que cal implantar i en la definició d'objectius, tot i que previsiblement no serà viable assolir-ho durant la primera fase d'aplicació de la DMA (2015).

Referències bibliogràfiques

CIS (COMMON IMPLEMENTATION STRATEGIES) (2007). *Workshop on Climate Change and Water*. 20-21 de novembre de 2007. Bonn (Alemanya).

http://circa.europa.eu/Members/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/implementation_convention/workshop_november/key_messagesppt/_EN_1.0_&a=d

EEA (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY) (2004). *Impacts of Europe's Changing Climate, an Indicator-Based Assessment*. Copenhagen (Dinamarca). ISBN: 92-9167-692-6.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANNEL FOR CLIMATE CHANGE) (2001). *Guidance Papers on the Cross Cutting Issues of the Third Assessment Report of the IPCC* R. Pachauri, T. Taniguchi, K. Tanaka (eds.). ISBN: 4-9980908-0-1.

JRC (JOINT RESEARCH CENTER) (2005). *Climate Change and the European Water Dimension*. Comissió Europea, EUR 21553 EN, Comunitats Europees.

