Aigua i canvi climàtic

Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya

Impactes hidrològics

Generalitat de Catalunya
Departament de Medi Ambient i Habitatge

Agència Catalana de l'Aigua

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 del 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 produeixin 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, conseqüentment, 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 decréixer 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 un 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 aqüífers 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 hídric (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 hídric 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 riuades (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'aqüífer 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'aqüífers i el foment de la reutilització. Un aspecte rellevant en la gestió raurà 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 hídric.

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 hídric (*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 aqüífers; 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 mes 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 a 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.

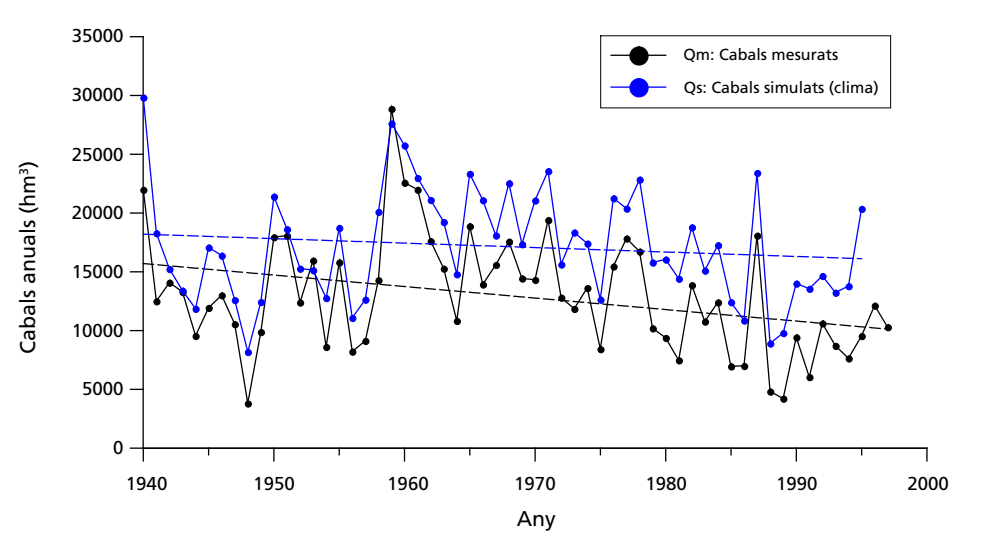
En el cas d'aplicació de proves estadístiques usuals a les tendències de les sèries, els percentatges indicats es corresponen amb la probabilitat de la hipòtesi alternativa (hi ha tendència), calculades considerant una sola cua de les distribucions per a poder-ne identificar el sentit. Com a exemple, si la sèrie de cabals d'un riu mostra una tendència de –1,357 hm^3 any^{-2}, i un error típic d'1,123, la prova de Student de la hipòtesi nul·la (tendència 0) dóna $t = -1{,}209$. 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 hm^3/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 hm^3 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.

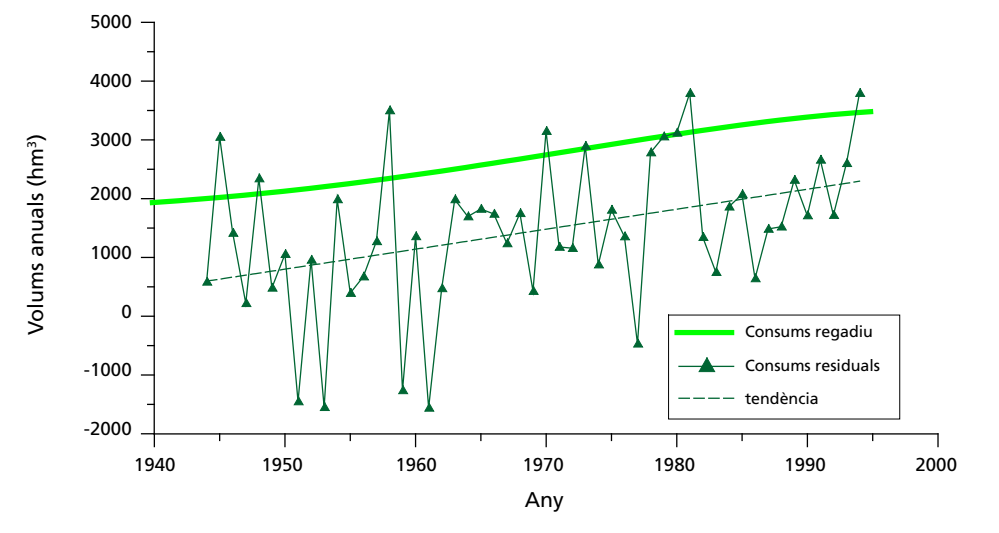
Els regadius

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 m^3/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) dóna un consum net anual de 4.400 m^3 /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 hm^3 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 hm^3 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 km^2 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 km^2 anuals, representaria una pèrdua anual aproximada de 30 hm^3 anuals, que es comparen molt bé amb els 34 hm^3 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 hm^3 anuals en el cas de les coníferes i de 32 hm^3 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, dóna 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 hm^3 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 hm^3 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 hm^3 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 hm^3 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 hm^3 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 ($Rm = 3 \cdot Q10^{(t^a-15)/10}$, on $Q10 = 2$). 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 12,9ºC (amb una correcció de –1ºC/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

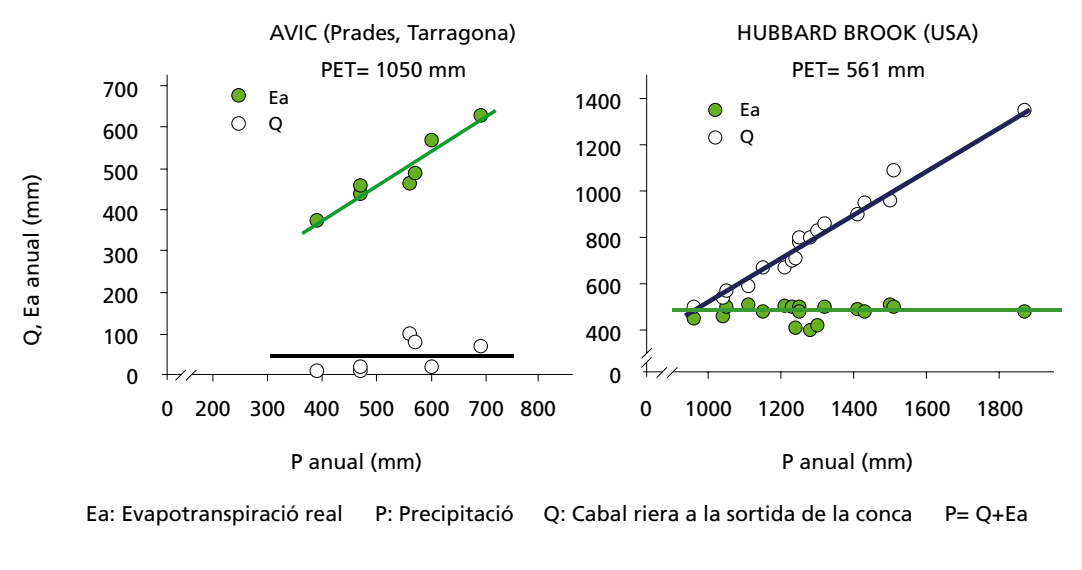
La modelització de l'evapotranspiració. El model Gotilwa+

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 avaluables 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.

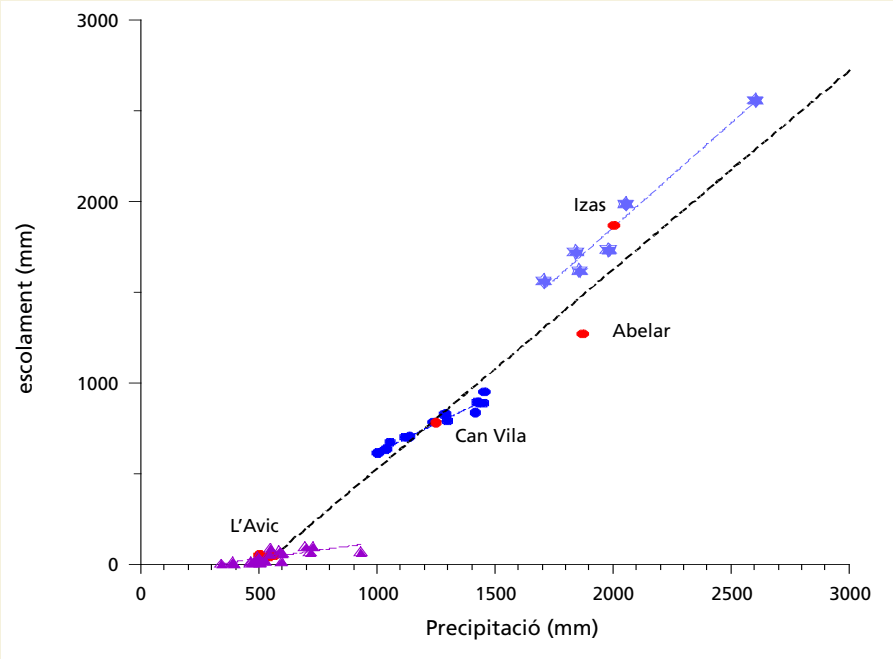


En aquestes conques, com que són impermeables, l'aigua de pluja (*P*) surt o bé per escolament i drenatge cap a la riera (*Q*), o bé s'evapotranspira (*Ea*). Si l'aigua retinguda al sòl no ha canviat, *Q + Ea = P*. (Adaptat de Piñol, 1990, i d'altres treballs seus posteriors Piñol *et al.*, 1992, 1999).

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

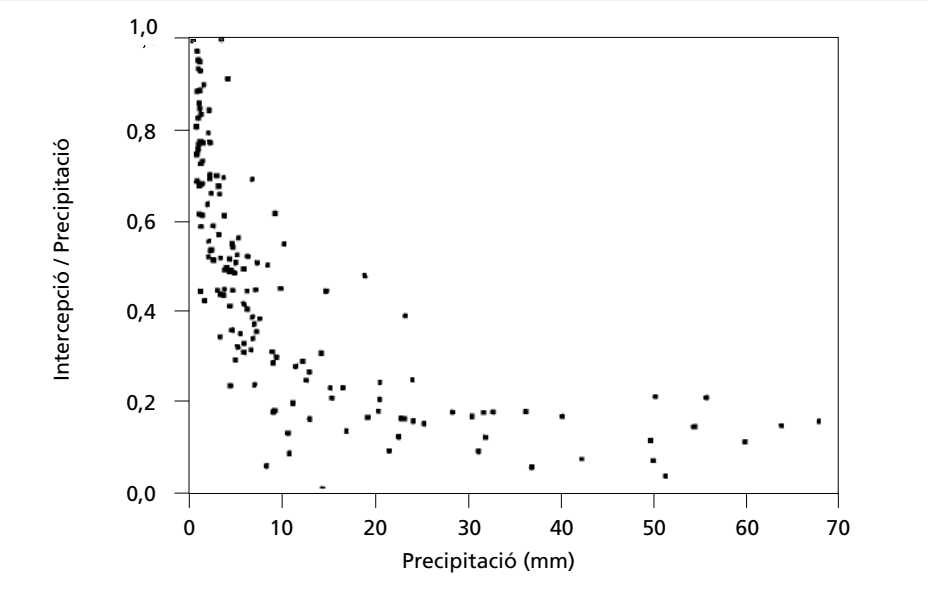
i eixugar encara més la conca. D'altra banda, no es projecta un augment de la pluviometria, sinó més aviat una disminució segons l'escenari climàtic que es considera, la qual cosa implica que els nostres ecosistemes patiran més sequera. Les sortides de la conca van, però, lligades al règim de pluja. 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).



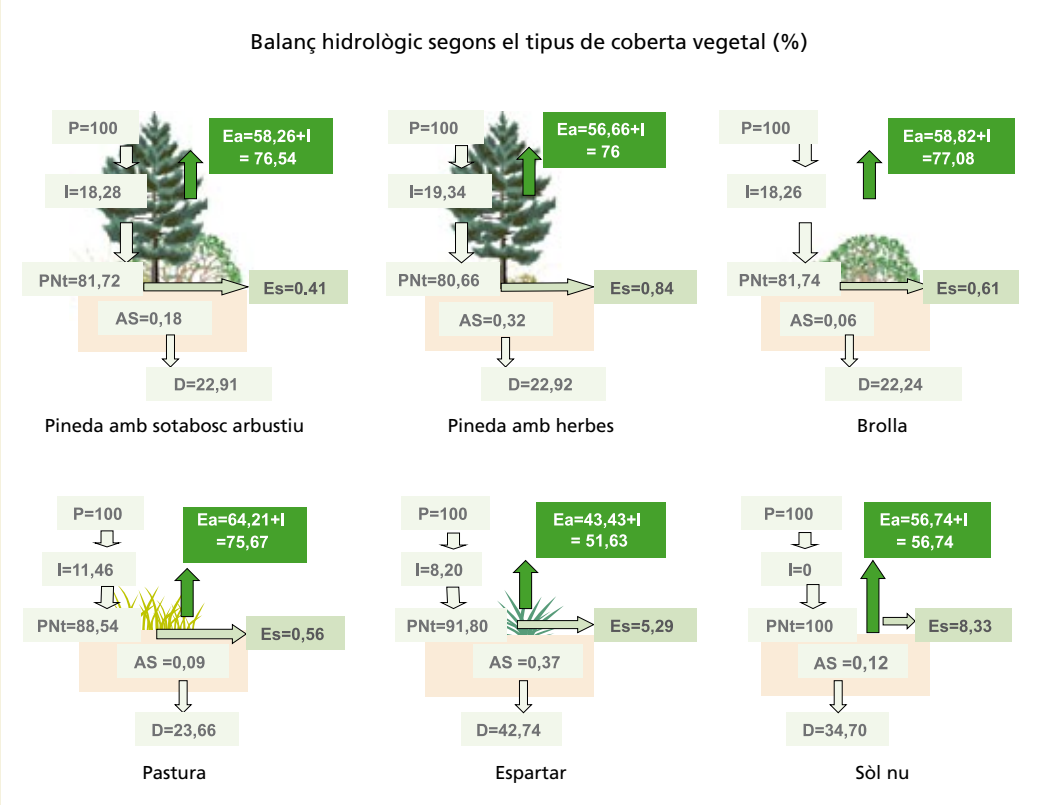
A la figura 2 es mostra la relació entre la pluja i l'escolament (dades anteriors de l'Avic incloses) per a diverses conques de la xarxa RESEL monitorades en el marc del projecte LUCDEME (Rojo, en premsa). A les zones de la Península on les precipitacions superen els 1.000 mm, la resposta a l'entrada 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 CO_2/mol H_2O, 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'escola 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 CO_2 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 nostre 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 CO_2, 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.

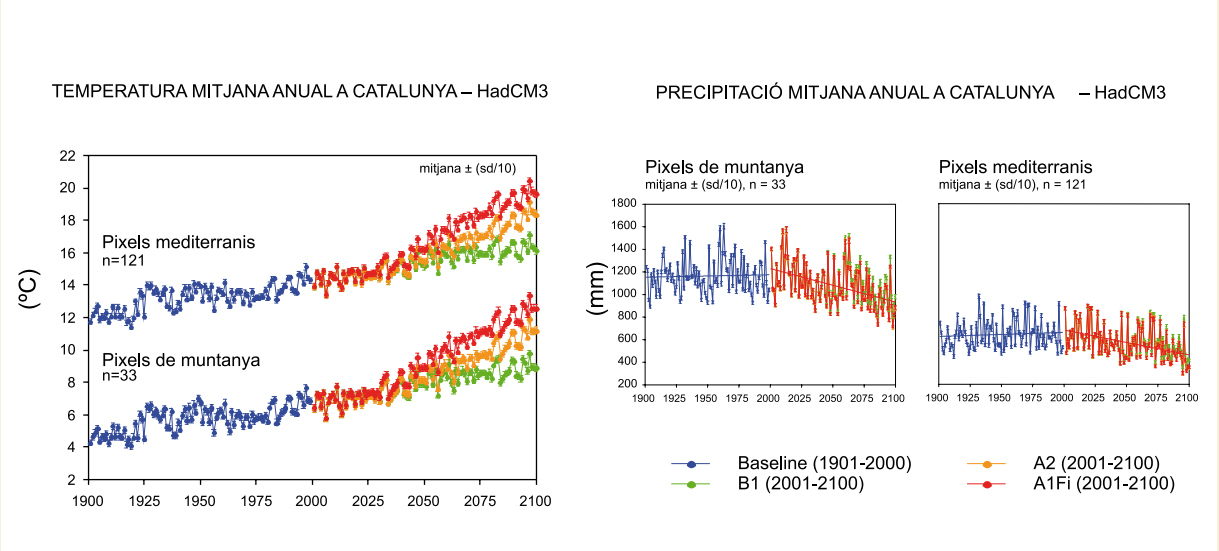
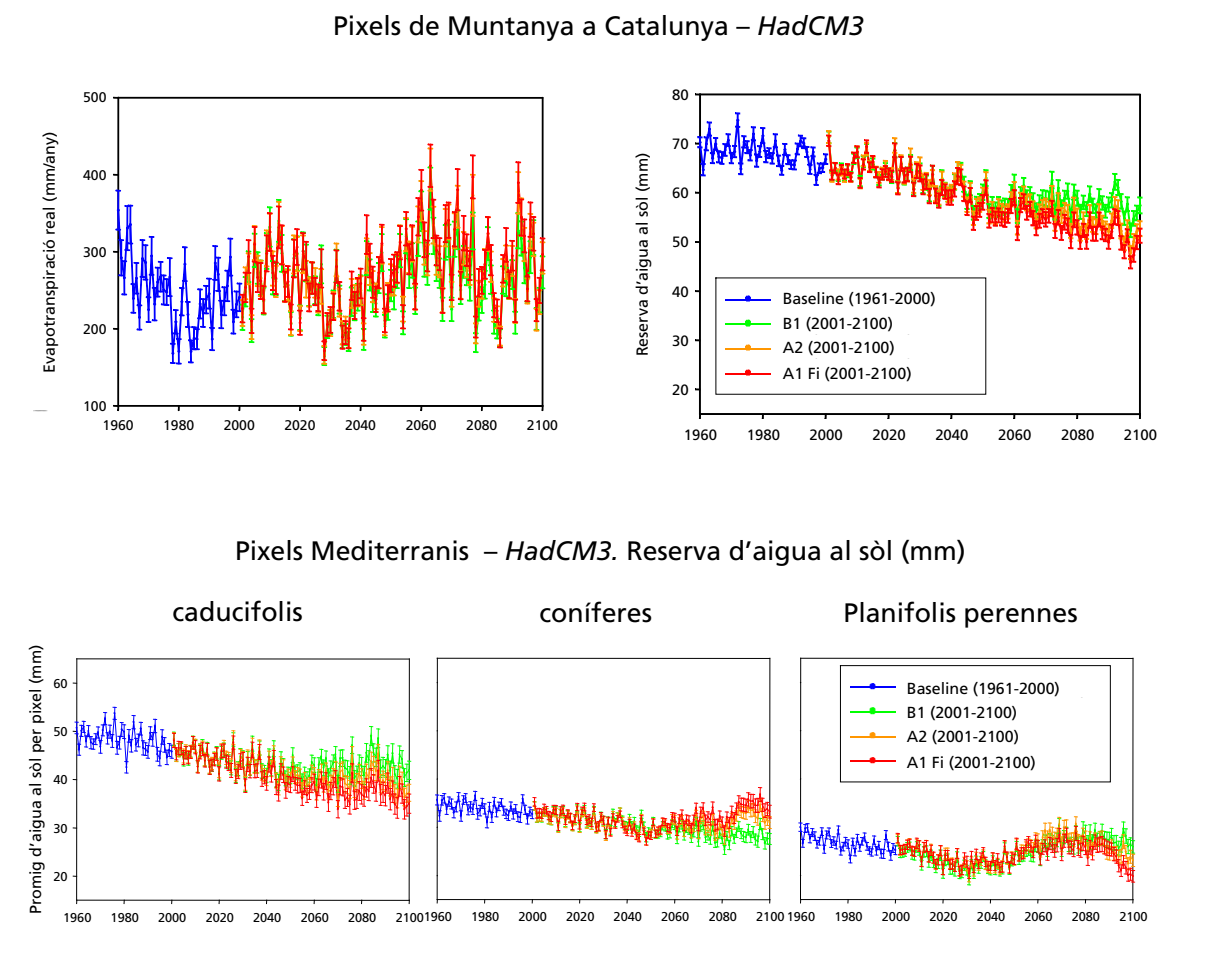


Figura 6. Evolució de l'evapotranspiració i de les reserves d'aigua al sòl segons el model Gotilwa+ en els píxels de muntanya, i reserves d'aigua al sòl en els píxels mediterranis amb diferents tipus de bosc (caducifoli, perennifoli i planifolis perennes), durant el període 1961-2000 (CRU, en blau) i 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 Estudies, 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 montainous 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*. Tesi 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 ilexL. 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 CO_2 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 conseqüent 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 (ºC)	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						
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							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

Amb canvi climàtic: l'evapotranspiració s'incrementa el 10%

Situació actual: el 70% de la precipitació s'evapotranspira

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 Agencia 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 ºC 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 ºC 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'1xCO_2 i 2xCO_2. 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 Llèmena (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 Llèmena 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 Llèmena (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 conseqüent 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 (hm^3)	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 $2xCO_2$ (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 ºC), 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 (hm^3)	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 ºC 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 conseqüent 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).

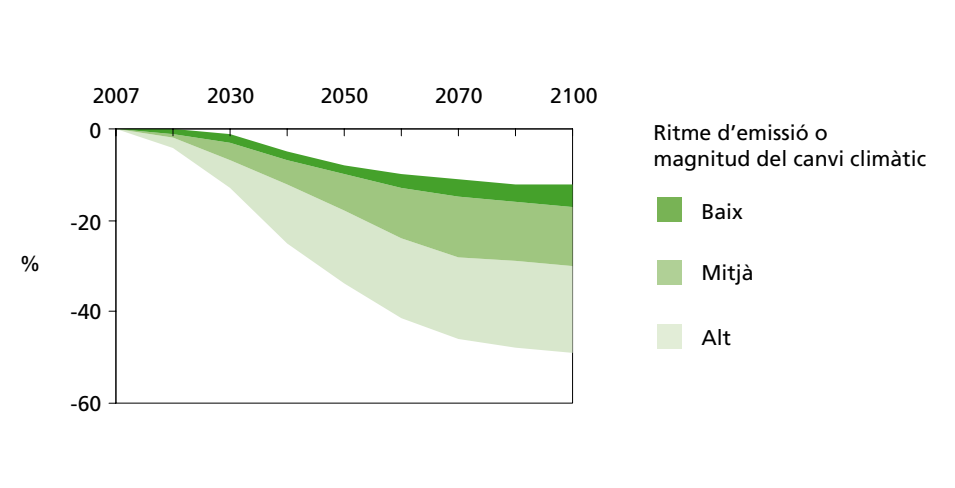
Conclusions

L'escalfament global dóna 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 A1Fl 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 vialibilidad 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*. Tesi doctoral. EscuelaTécnica 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.

Henrichs, 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 sobrelos recurso hídricos*. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Madrid. Pàg. 303-353.

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. 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 dóna 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 (Vàzquez-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 previsibles de la temperatura i d'altres variables climàtiques. Sabent l'evapotranspiració i les variacions previsibles 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.

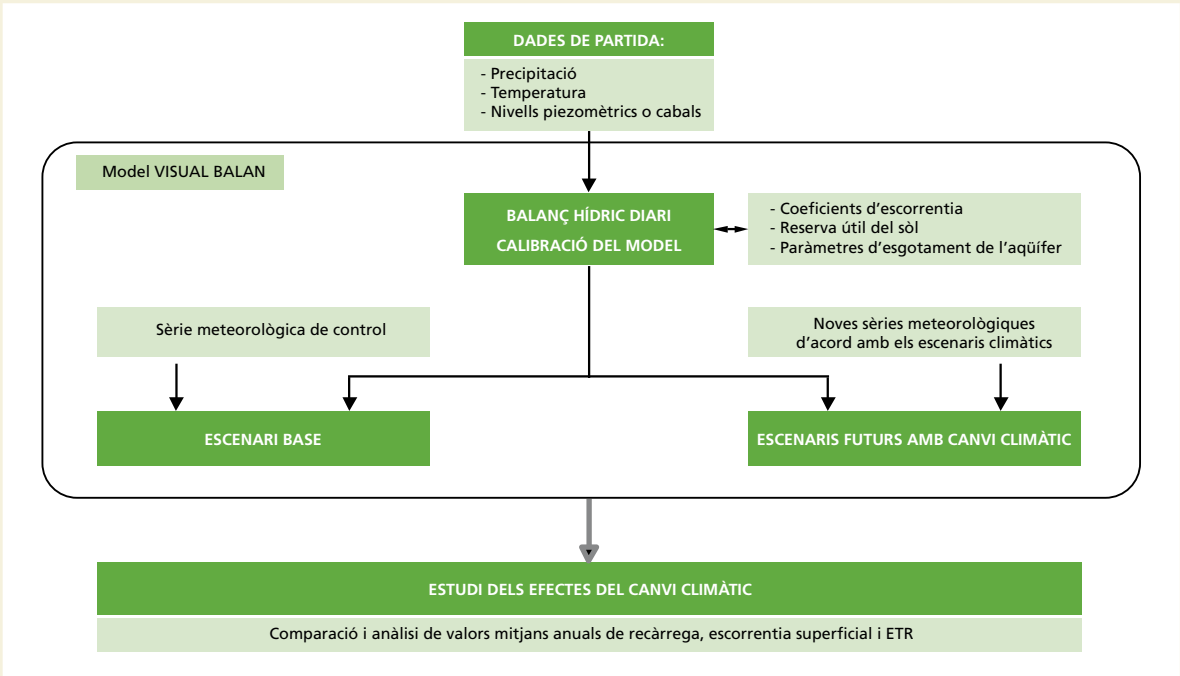
Metodologia

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

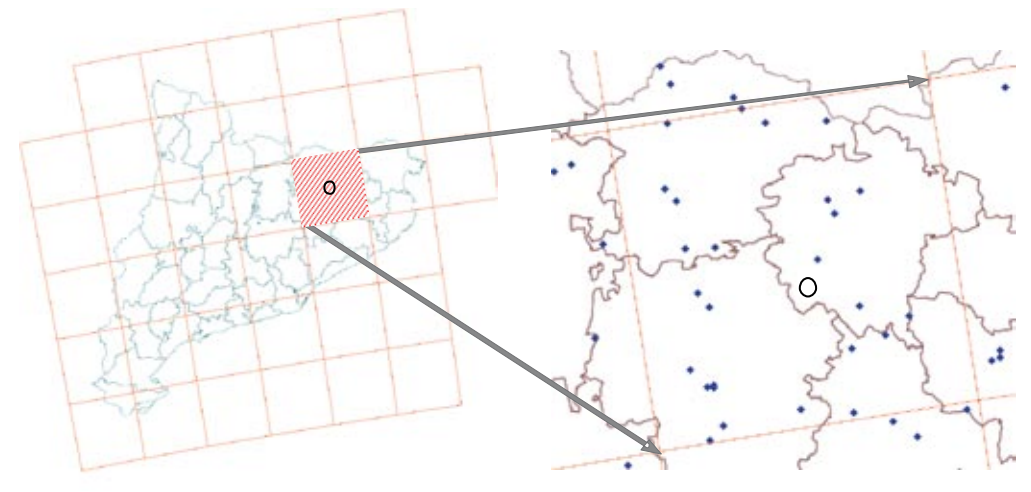
sulfat (SUL) A2 i B2. D'una banda, hi ha el denominat experiment de control, que reflecteix l'evolució observada o de referència del contingut global de GEI i SUL entre els anys 1961 i 1990. D'altra banda, també es tenen les dades dels escenaris d'emissió antropogènica d'aquests gasos SRS-A2 i SRS-B2, de 2071 a 2100, definits i publicats pel Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (*Intergovernmental Panell 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	0,44º (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.

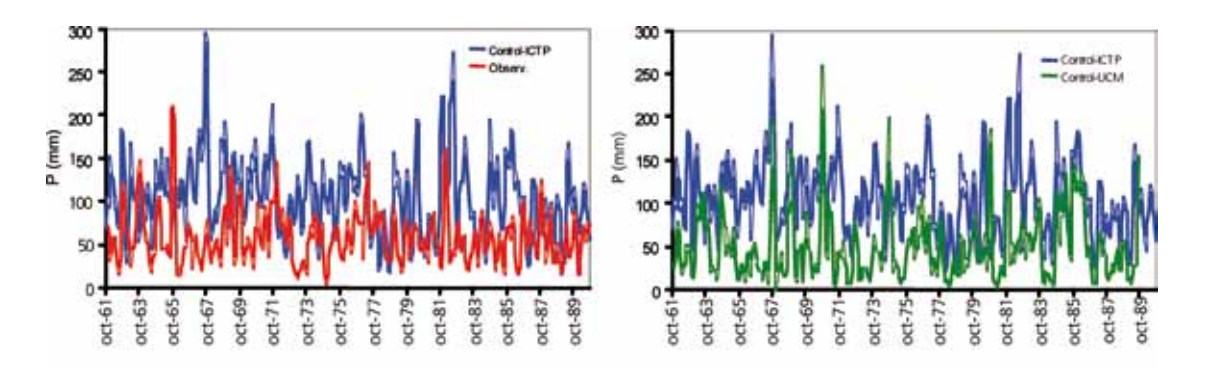
Figura 3. Cel·les per a Catalunya del model climàtic regional ICTP del projecte Prudence. El punt vermell correspon al punt d'interés i en blau s'indiquen les estacions meteorològiques reals de la xarxa EAMET



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.

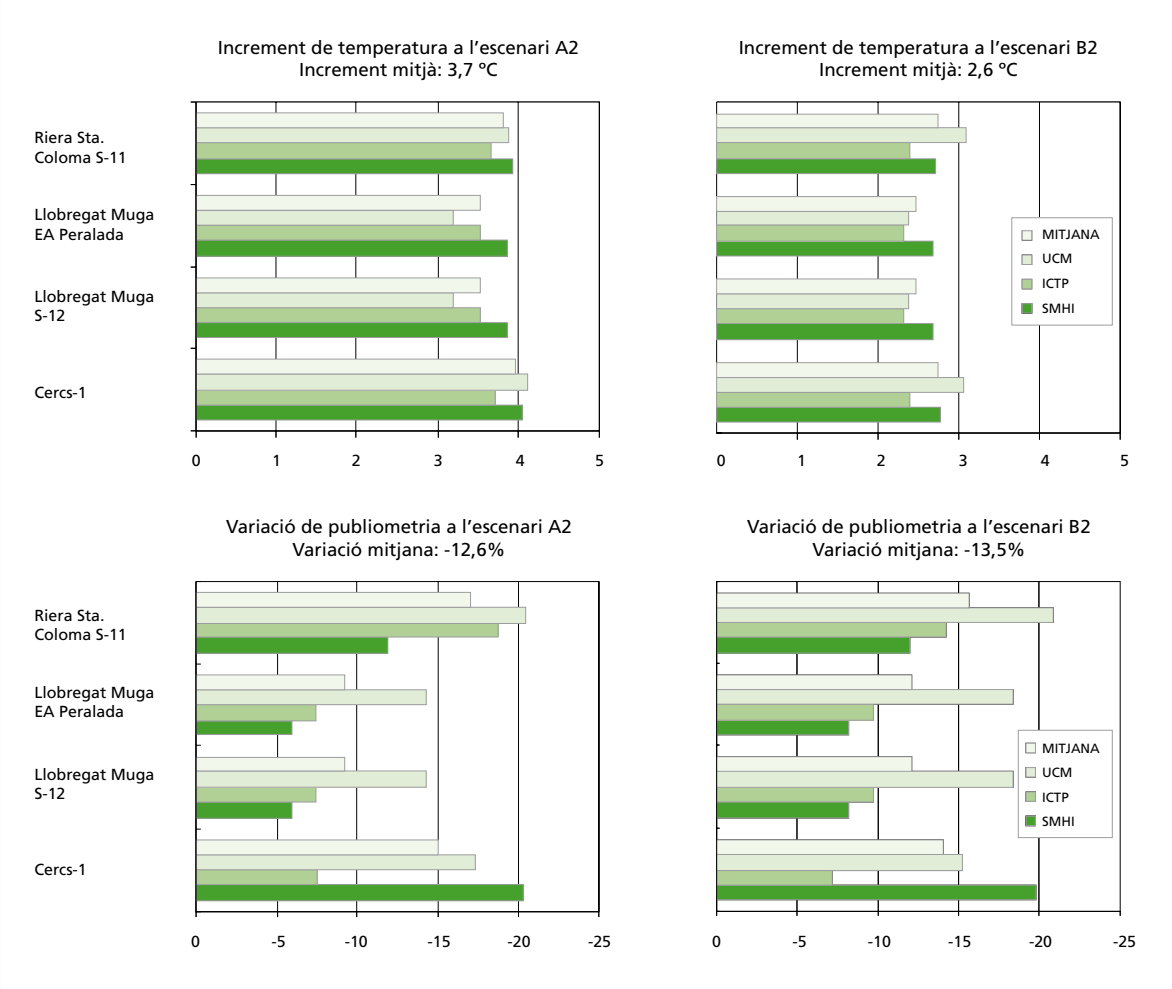
Figura 4. Sèries de precipitació del període de control 1961-1990 per al punt d'interés indicat a la figura 3. Es mostra la sèrie observada (vermell), la calculada pels models climàtics ICTP (blau) i UCM (verd).



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.

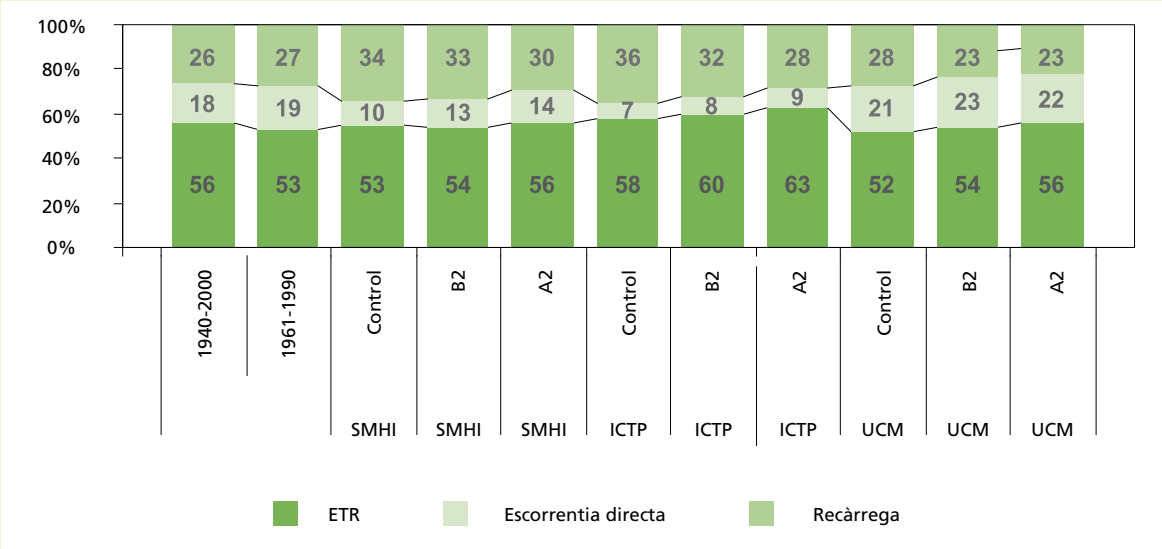
3. La pluviometria total serà menor.

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

Addicionalment, 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)



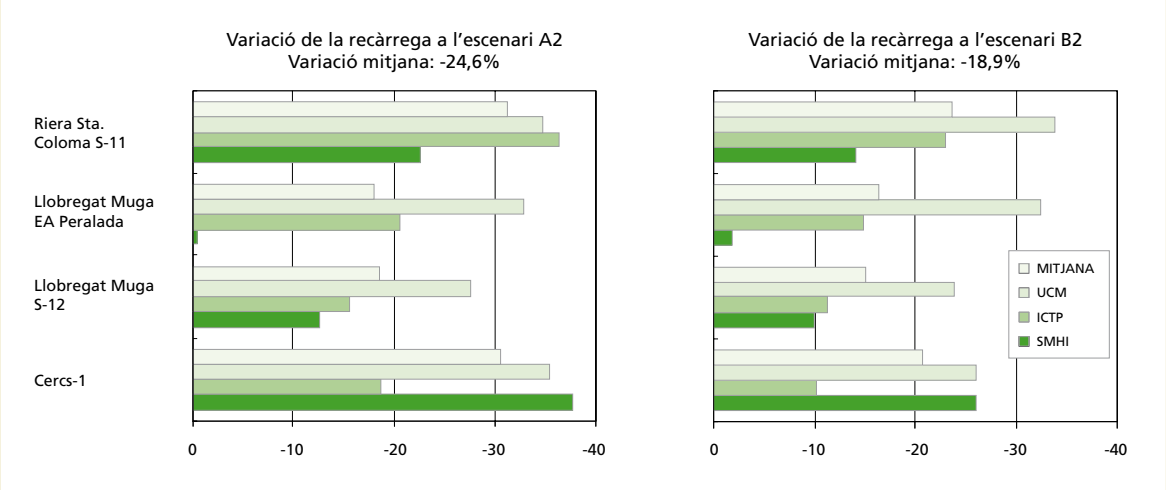
Percentatges mitjans de recàrrega, evapotranspiració i escorrentia directa respecte al total de pluviometria en tots els escenaris simulats pels models SMHI, ICTP i UCM en el piezòmetre S-11 de la riera de Santa Coloma. L'evapotranspiració i l'escorrentia directa augmenten sempre des dels escenaris de 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 CO_2 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, Vàzquez-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 reprodueixen 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.; Buishand, 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 ternes 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'emmascarin 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 conseqüent 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 conseqüent 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.

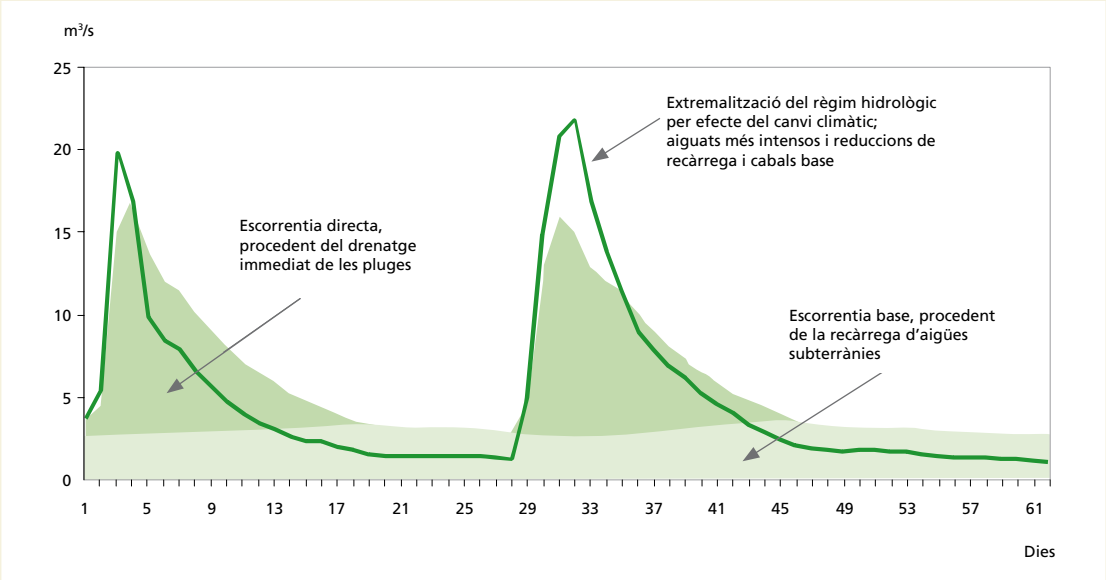
Dades, resultats i conclusions principals

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 xàfecs 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 hm^3 anuals, pot baixar fins a 50 hm^3, 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 hm^3/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 a 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.

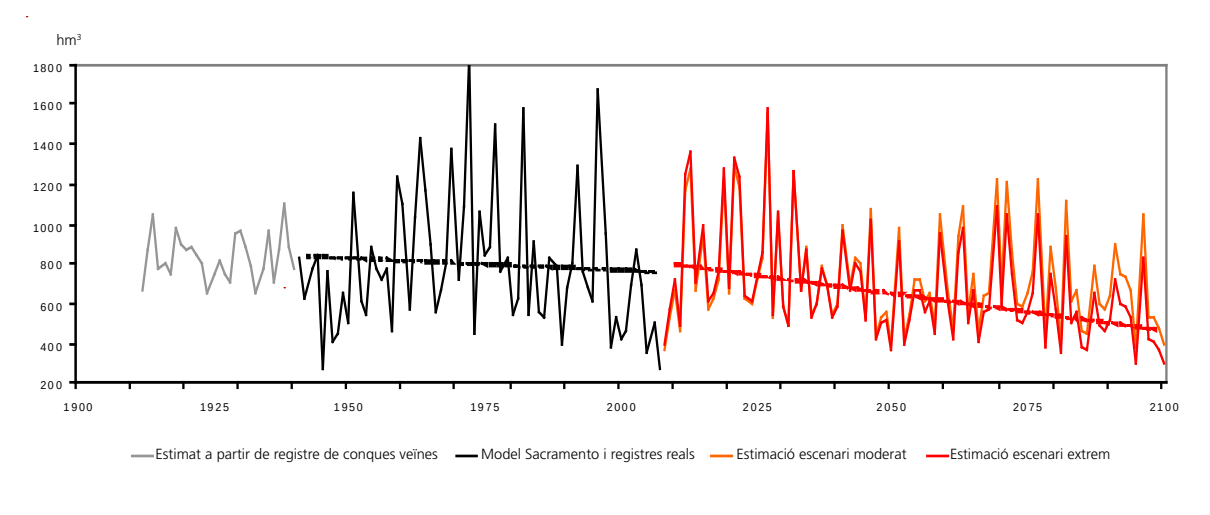
En el cas de la capçalera del riu Francolí, en el mateix treball, tot i que es detecta una dispersió més elevada en els resultats dels diferents models climàtics i escenaris considerats (i fins i tot s'arriben a observar resultats a priori contradictoris entre els escenaris A2 i B2), també se'n poden extreure conclusions i ordres de magnitud similars als del cas de la Muga. L'aportació mitjana, avui de l'ordre de 12,5 hm^3 anuals, baixarà fins a uns valors de 9 a 12 hm^3, 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 hm^3/any es podrien reduir a uns 3-4,8 hm^3, 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 conseqüents 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 dóna 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 significa 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'accentuï (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

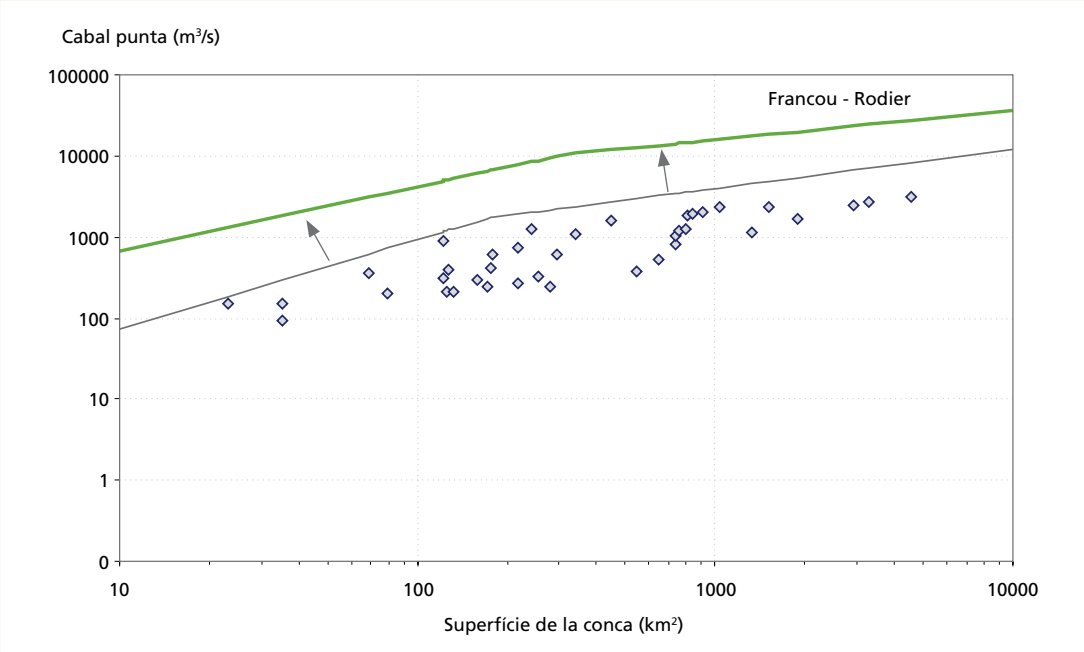
nival al final de la primavera, i ocasionalment fins a l'estiu, i a pluges extenses territorialment i temporalment, tot i que no especialment intenses, raó per la qual no són equiparables al cas de Catalunya. En altres regions del planeta l'alerta també ha saltat a causa dels grans impactes (absolutament 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 xàfecs 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 Merbourne, 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 envolupant 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'envolupant de Francou i Rodier, mostren que a partir d'una determinada grandària de conca, d'uns 300 km^2 aproximadament (potser uns 200 a 250 km^2 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.



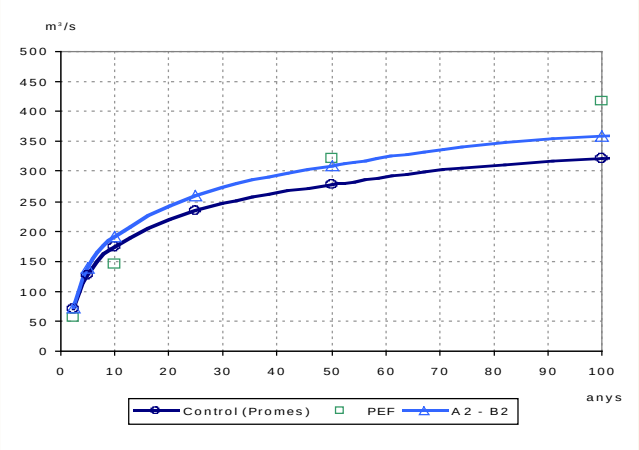
D'altra banda, sense considerar aquests possibles canvis tan profunds en les condicions pluviomètriques, el que sí que es podria observar amb relativa probabilitat seran aiguats menors, menys extraordinaris que els màxims abans comentats, amb més freqüència o amb creixements en l'àmbit de distribució 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).

	Cabals màxims diaris (m^3/s)		
T (anys)	**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 resguards enfront d'avingudes, de manera que la disponibilitat dels volums de regulació es de preveure 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 conseqüent 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 Grenlàndia. 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 deltaiques 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 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 (inclosos els resguards 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 vialibilidad 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*. Tesi doctoral. EscuelaTécnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (ETSICCPM), Universidad Politècnica 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.

Henrichs, 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 sobrelos recurso 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, IDÆA-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 pertorbacions 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 pertorbacions 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, isotermes 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, dieldrín 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.

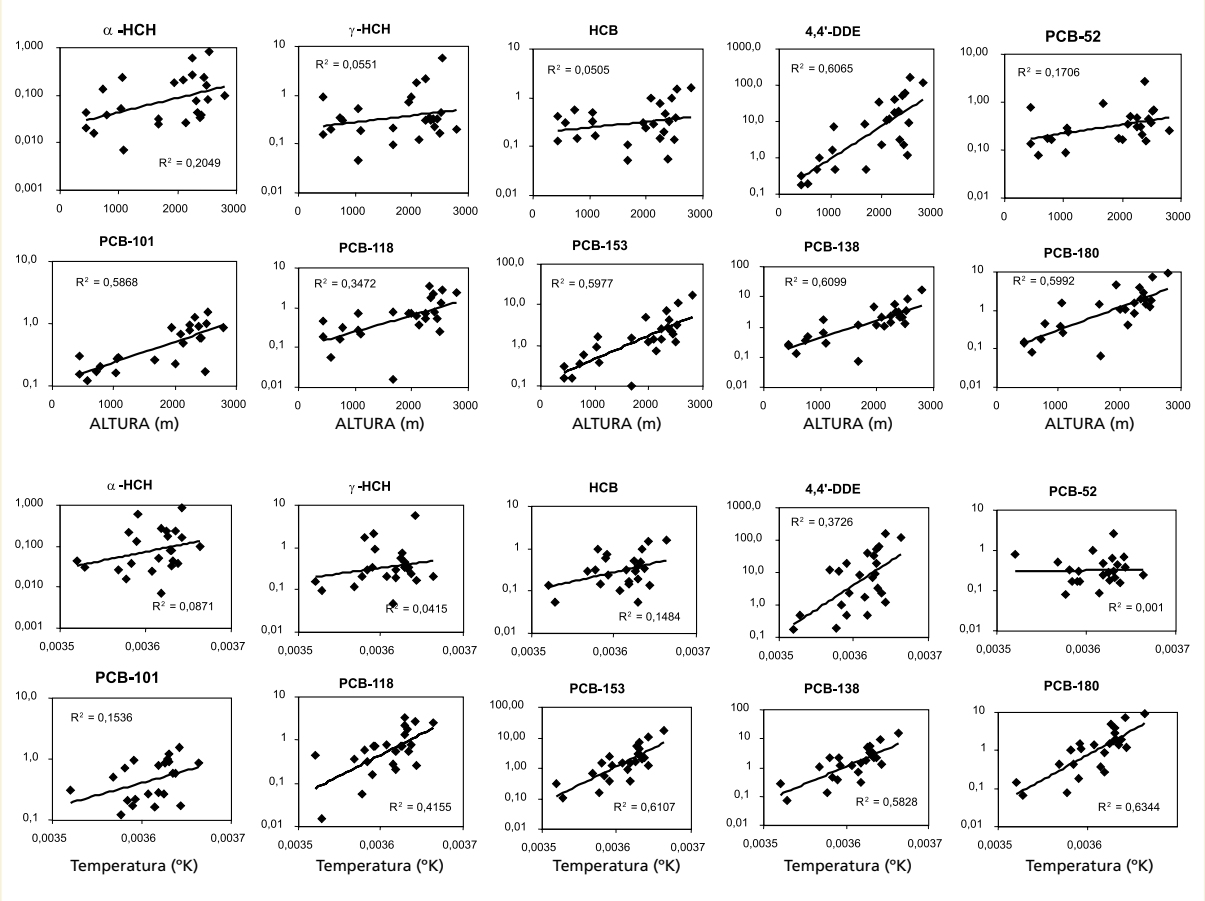
Molts dels POP tenen una pressió de vapor que permet un cert grau de volatilització. Per tant, poden passar a l'atmosfera en les zones calentes o temperades del planeta, i condensar-se o acumular-se en sòlids o líquids en les zones fredes. Aquest fenomen s'anomena "*efecte de destil·lació global* i depèn 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.



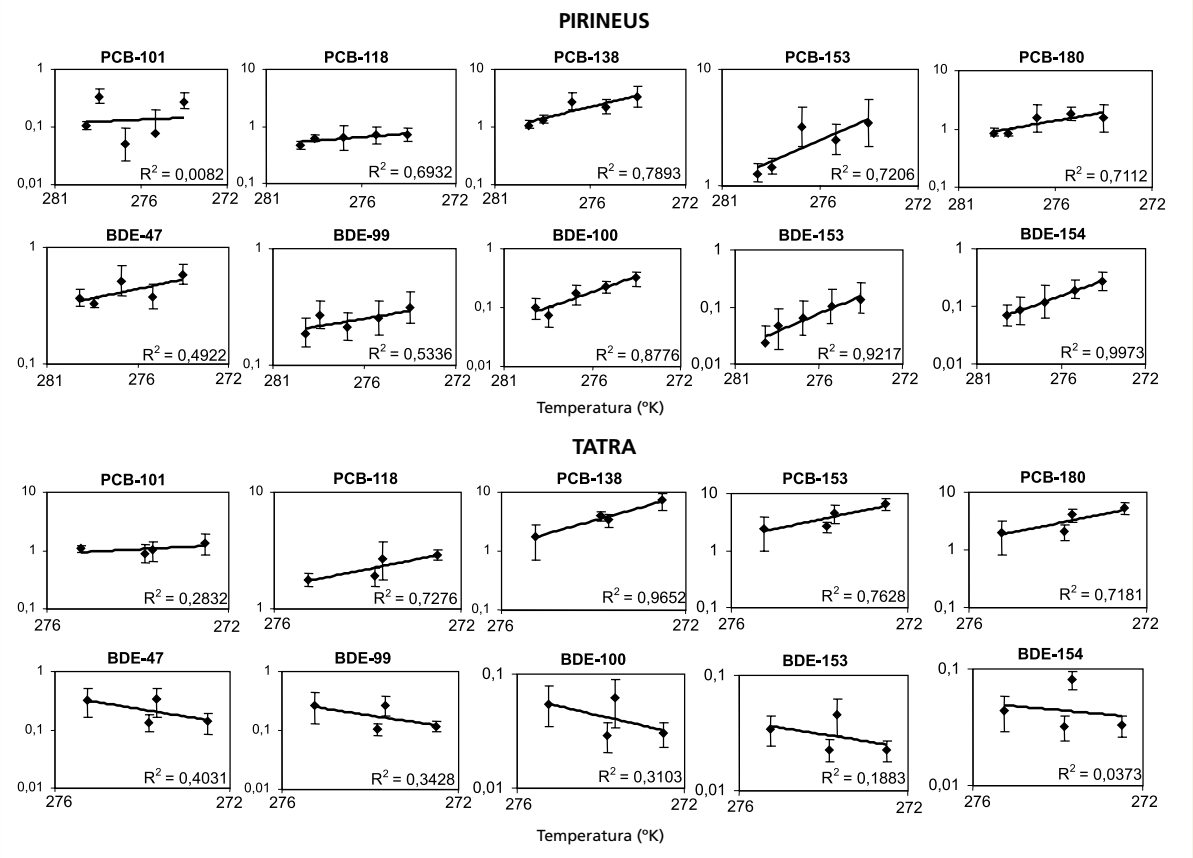
Cada punt correspon a la mitjana dels peixos estudiats en cada un dels llacs inclosos en l'estudi. S'observa una correspondència entre les concentracions dels compostos de massa molecular més elevada (4,4'-DDE, PCB 118, 153, 138 i 180) i altura o temperatura. Aquesta dependència significa una contaminació 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.

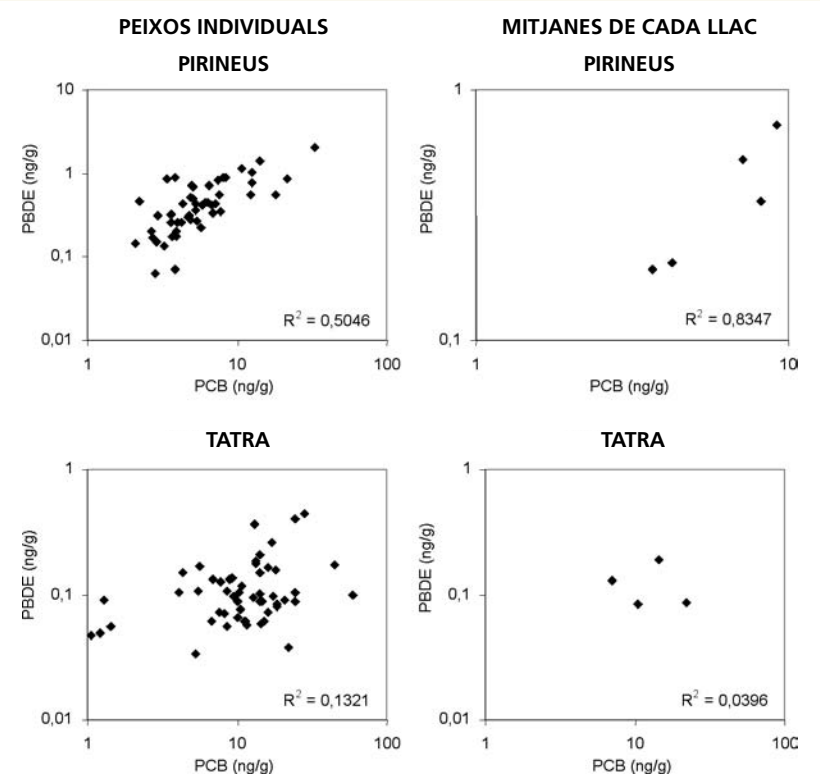


Cada punt correspon a la mitjana dels peixos estudiats en cada un dels llacs inclosos en l'estudi. S'observa una correspondència entre l'acumulació dels PCB de massa molecular més elevada i la temperatura en tots dos casos. S'observa la mateixa tendència per als PBDE als Pirineus, però no a les Tatra. 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, Llebreta, 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.



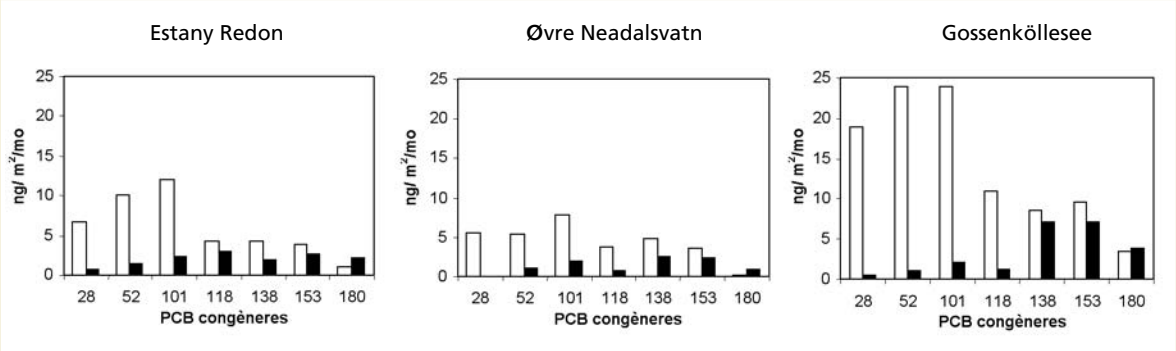
Als Pirineus s'observa una correlació estadísticament significativa en l'acumulació de PCB i PBDE, malgrat que els segons es començaren a introduir al medi ambient més de 40 anys més tard que els primers. Aquesta correlació no s'observa a les Tatra. En els Pirineus la distribució d'aquests compostos 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 mes 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.

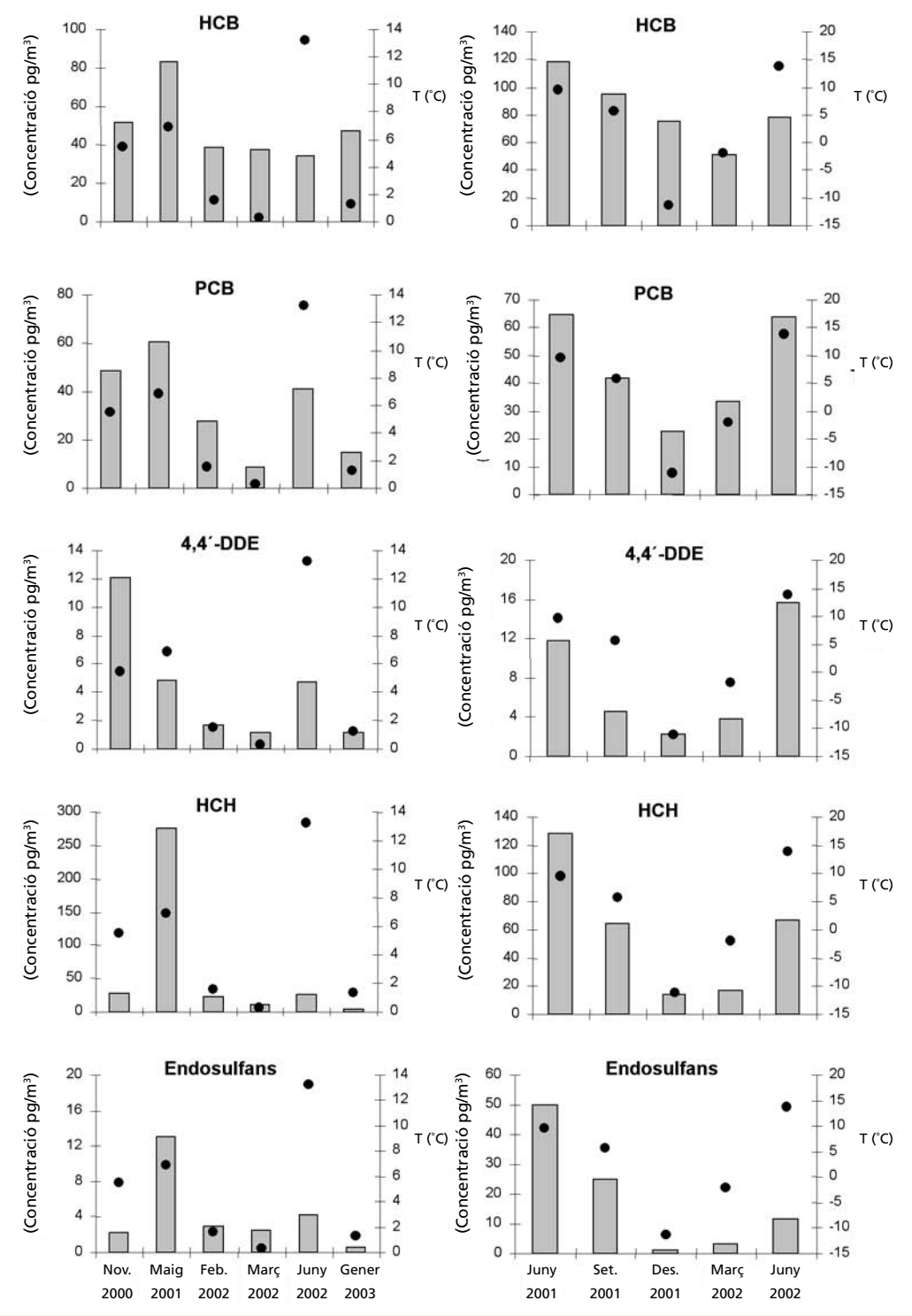


S'observen fluxos més grans de precipitació atmosfèrica per via atmosfèrica dels compostos amb menys massa molecular (més volàtils), però la retenció en els sediments afecta fonamentalment els que tenen més massa molecular (menys volàtils). Aquest fenomen és més marcat al llac més fred (Gossenköllesee)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

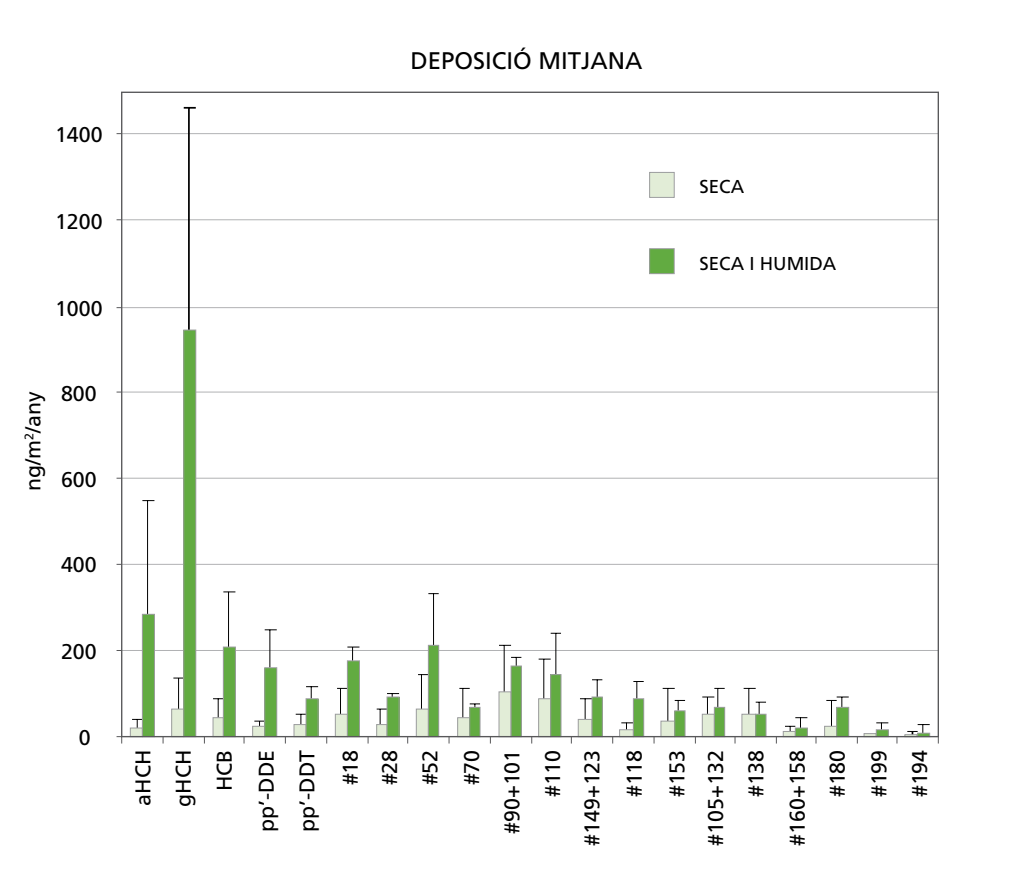
En qualsevol cas, l'ús progressiu d'energia i el fet que el 85% de l'energia s'obtingui a partir de la crema de combustibles fòssils, fa preveure que les concentracions d'aquests compostos augmentaran en el futur. Cal esmentar, en l'aspecte positiu d'aquest tema, que les concentracions d'HAP en llacs d'alta muntanya globalment disminuïren 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

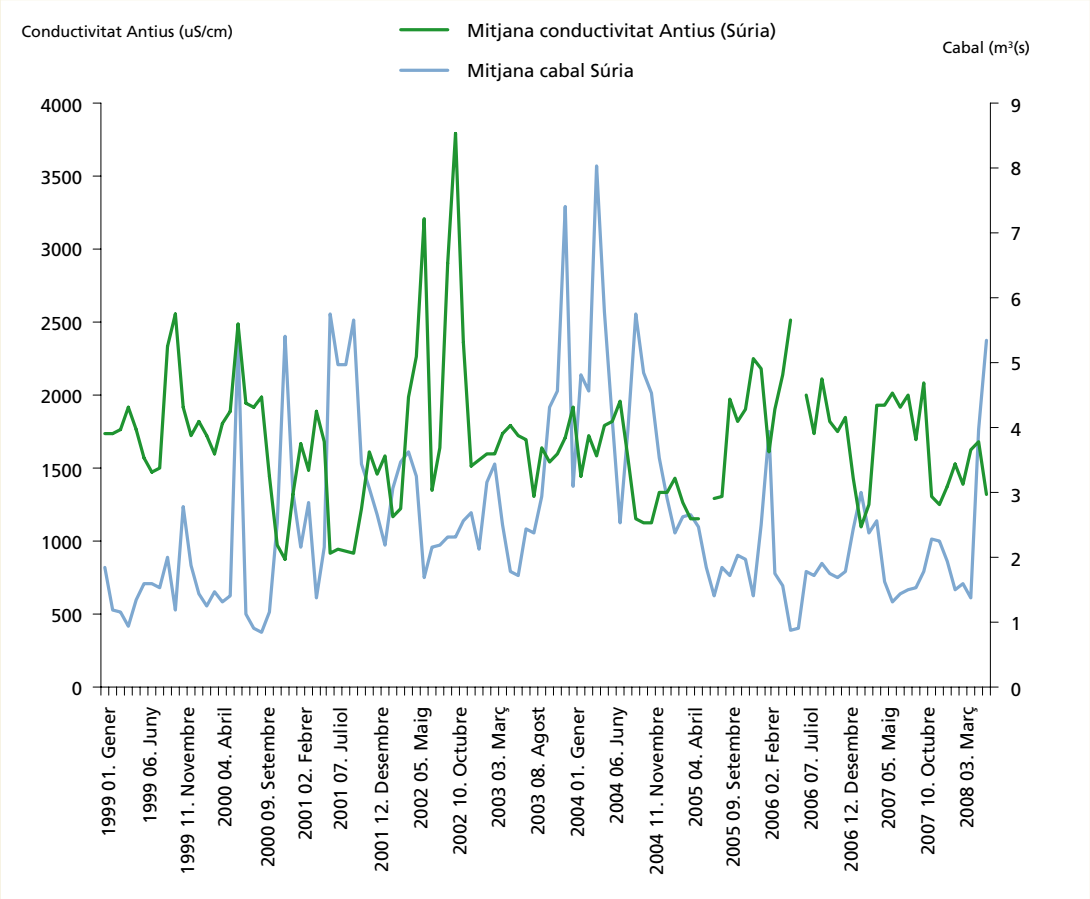
et al., 2007 i capítols 6 i 7 d'aquest informe). En altres paraules, un augment en la freqüència de fenòmens hidrològics extrems, com ara grans sequeres i avingudes. Els canvis en els patrons de precipitació influiran en els processos de transport i distribució de contaminants i en el seu impacte a les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



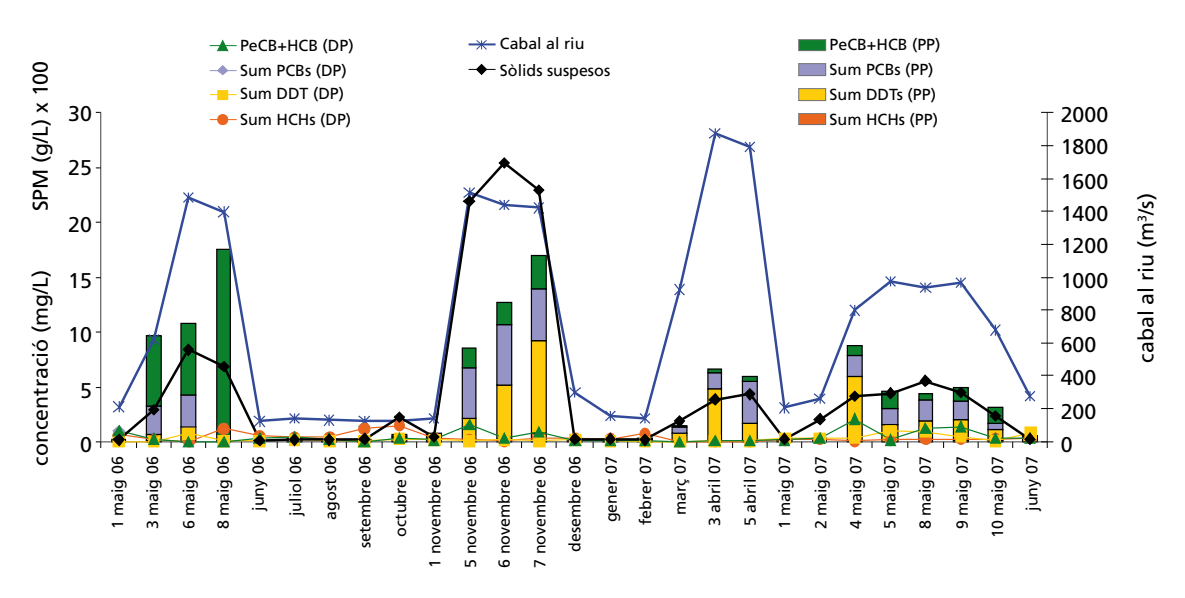
A títol il·lustratiu, es pot comentar el problema de la salinitat a la conca del Llobregat. Com és ben sabut, la salinitat d'aquesta conca, si bé és d'origen natural, està fortament afectada per les explotacions mineres presents o passades. La figura 7 mostra l'evolució de la salinitat (conductivitat) 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.



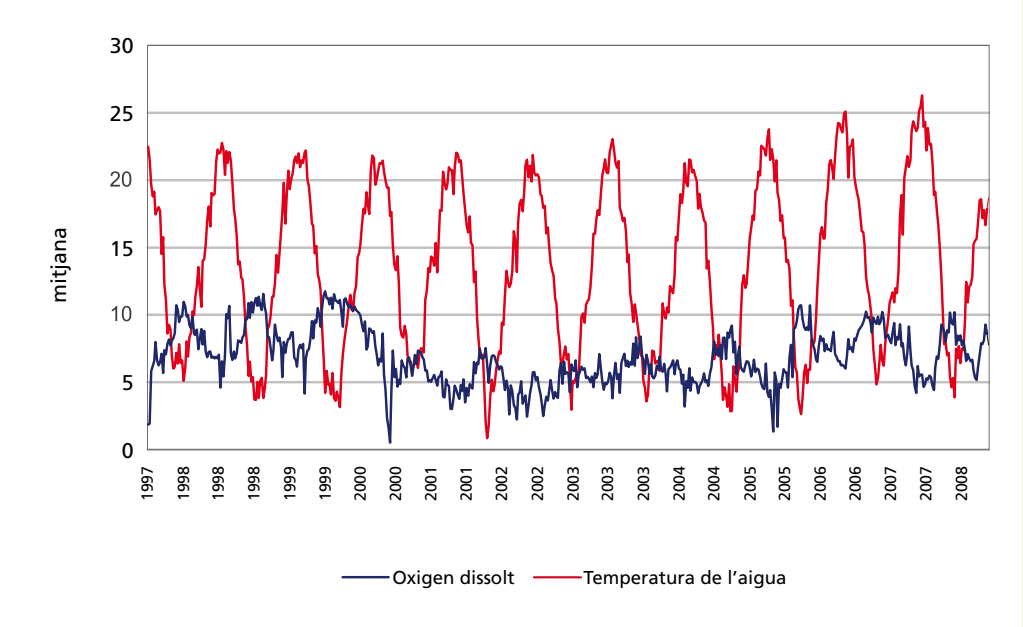
S'observen increments en la concentració d'aquests compostos en augmentar el cabal i les partícules en suspensió de l'aigua. Aquesta tendència reflecteix un arrossegament de part del material contaminant dipositat a l'embassament de Flix quan augmenta el cabal del riu.

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 conseqüent 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 hm^3/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 hm^3/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 eventuals 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 hídric 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 hídric a escala de conca. Per tant, els recursos hidrològics disponibles, el cabal superficial i la recàrrega dels aqüífers 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 ºC 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, conseqüentment, 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'escassesa 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 (Sophocleos, 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 nitrat en aqüífers profunds, lixiviats dels aqüífers lliures a través dels nivells d'aqüitards, 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.

Alhora, 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'aqüífer 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.

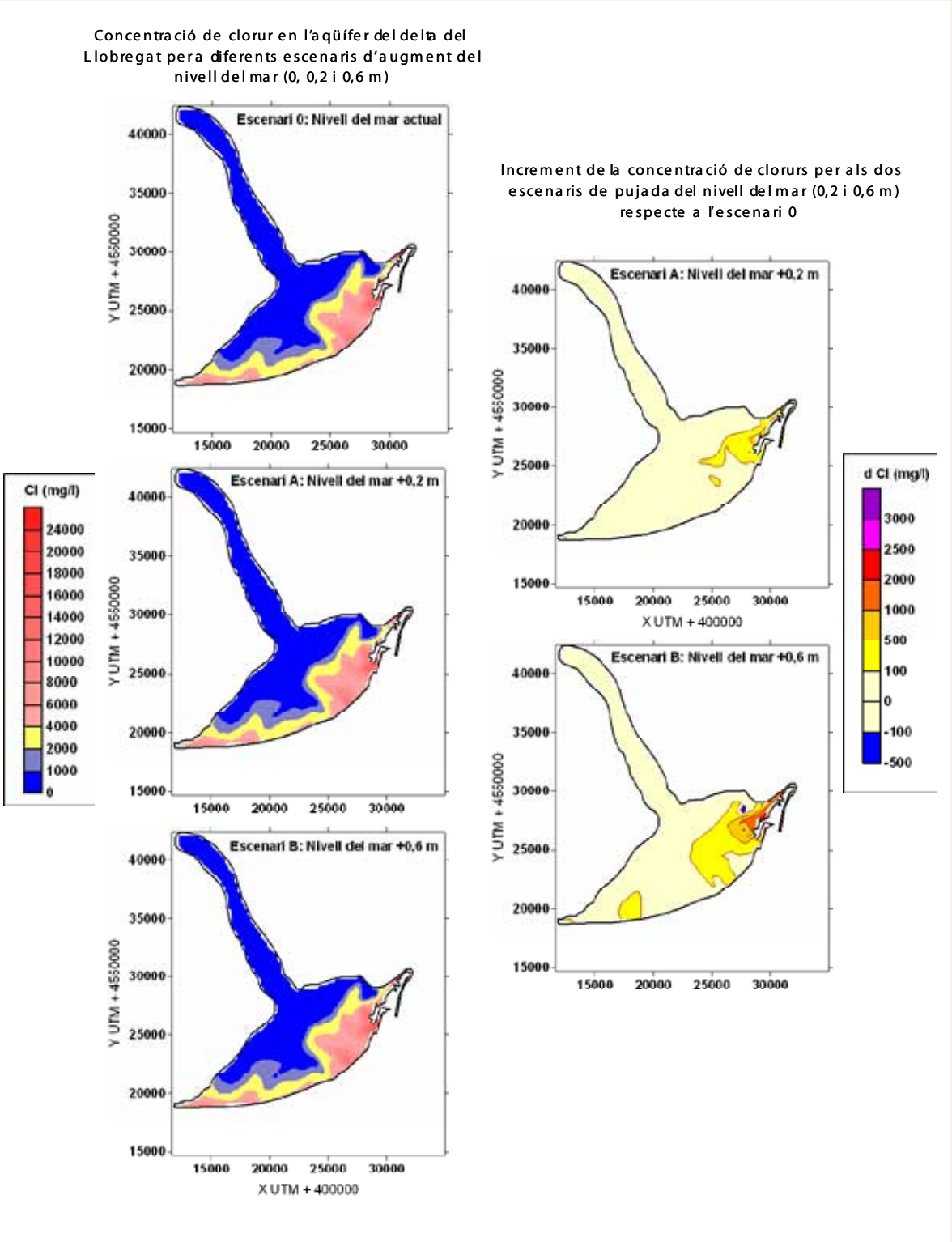
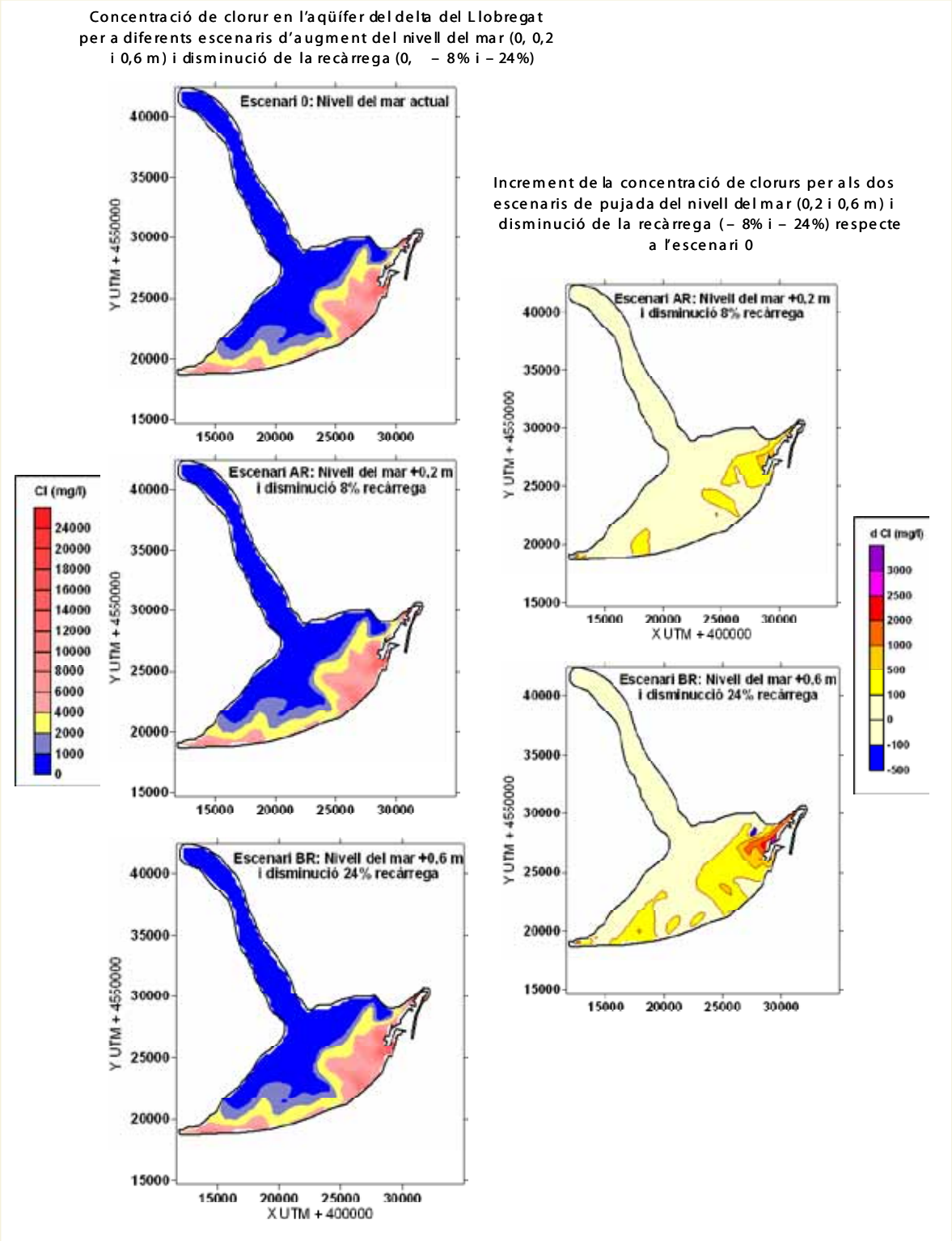


Figura 2. Increment de la concentració de clorurs a l'aqüífer principal del Llobregat per a finals d'aquest segle com a conseqüència de la pujada del nivell del mar i de la disminució de la recàrrega a l'aqüífer.



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 quantitatius 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 distints usos. Aquest coneixement seria més dificultós 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 representatius 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 geoespacials 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 priorització 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.; Ginebreda, A. (2008). «Canvi climàtic i qualitat química del medi aqüàtic». 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

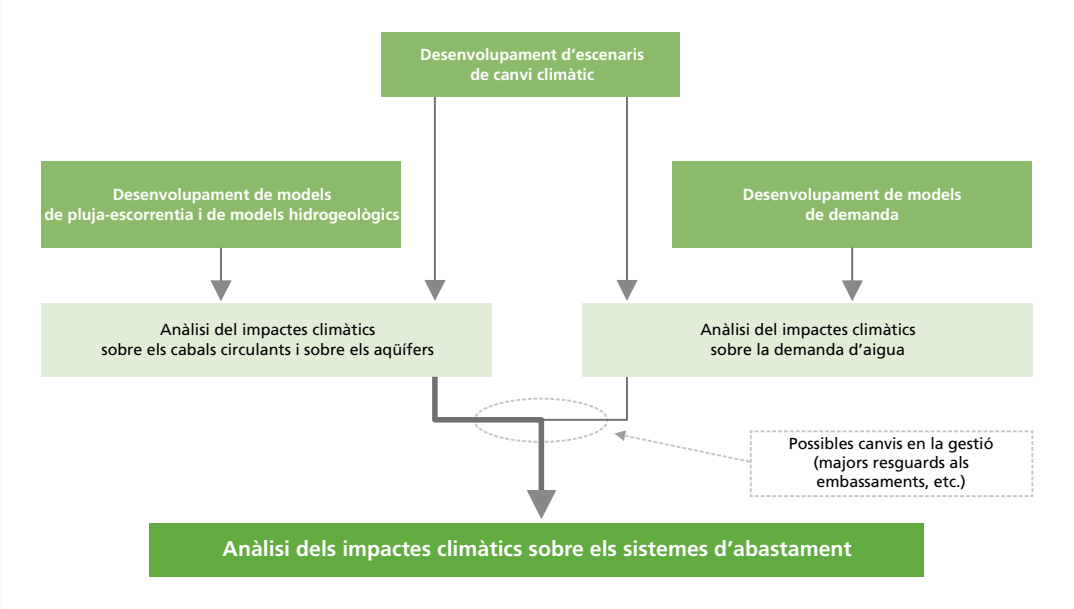
Introducció

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 dóna 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 resguards 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 potencial 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 sobreeiximents 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 ºC 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'Aquatool 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 hm^3 (respecte uns 700 hm^3 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 severs (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 (Instrucción de Planificación Hidrológica, 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 hm^3 de capacitat de regulació existents a les conques internes de Catalunya, uns 611 hm^3 corresponen als cinc grans embassaments dels quals depèn l'abastament del sistema Ter-Llobregat. Aquests embassaments són els de Sau (165 hm^3) i Susqueda (233 hm^3) al riu Ter, el de la Baells (109 hm^3) a la capçalera del riu Llobregat, i els de la Llosa del Cavall (80 hm^3) i Sant Ponç (24 hm^3) 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 nexe 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 hm^3/any, amb valors màxims que han superat 1.400 hm^3/any i mínims de l'ordre de 257 hm^3/any al llarg dels darrers 67 anys. A més de l'abastament de la regió metropolitana de Barcelona i el seu entorn (195 hm^3/any), des d'aquests embassaments també se subministren els abastaments de la zona centre de la Costa Brava (9 hm^3/any) i de Girona capital i part del seu entorn (10 hm^3/any), a més dels regs del Baix Ter (80 a 100 hm^3/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 m^3/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 hm^3/any de mitjana (que oscil·len entre un màxim històric d'uns 459 hm^3/any i un mínim de 44 hm^3/any) i a la Llosa del Cavall i Sant Ponç (situats en sèrie al Cardener) uns 101 hm^3/any de mitjana (que oscil·len entre un màxim per sobre dels 200 hm^3/any i un mínim de 32 hm^3/any). En el cas de la Baells cal tenir present que uns 55 hm^3/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 km^2 respecte a uns 800 km^2). 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 hm^3/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.

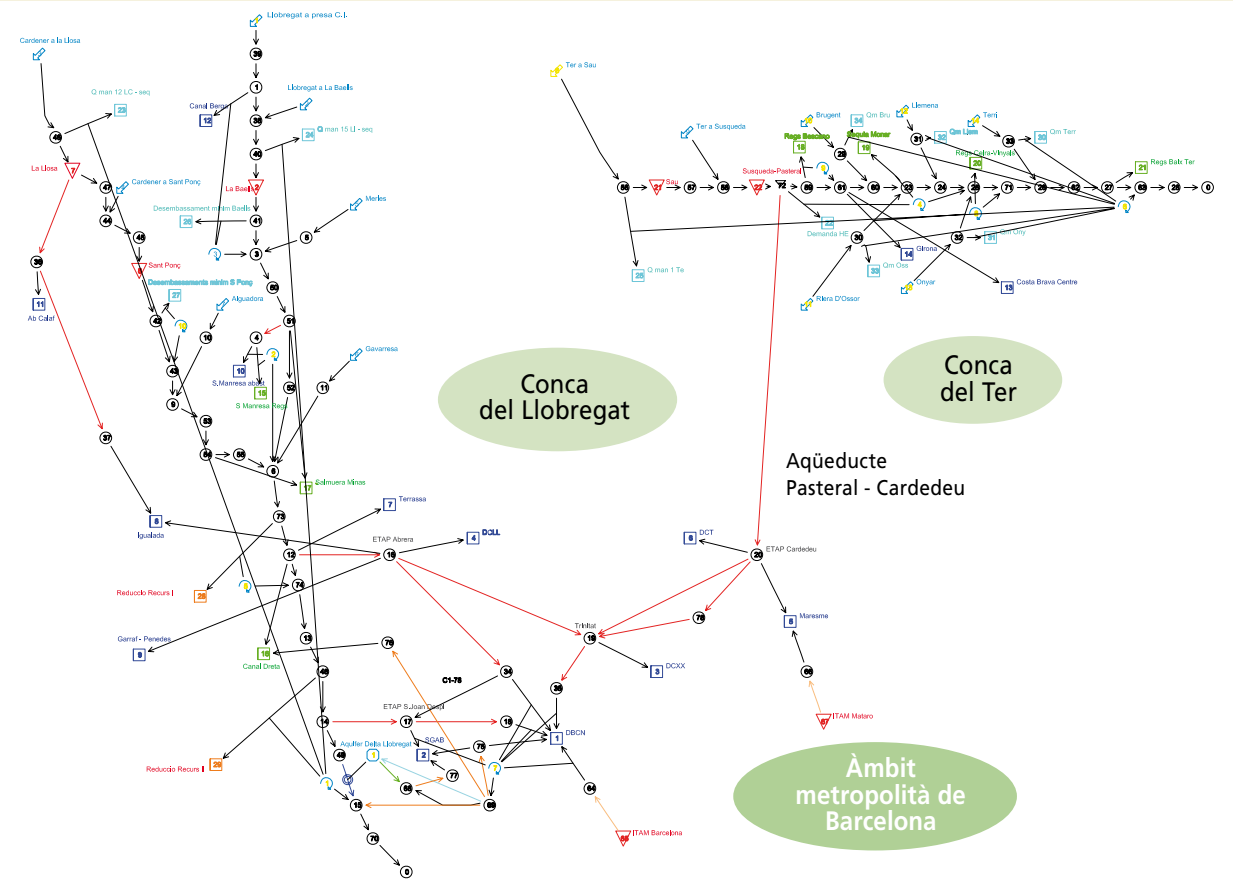
Finalment, el sistema té un suport procedent d'aigües subterrànies, de les quals destaquen les procedents de l'aqüífer de la Vall Baixa i Delta del Llobregat. En condicions normals, les aigües subterrànies aporten prop del 25% dels cabals consumits a la Regió Metropolitana de Barcelona (tot i que menys 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 hm^3/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.

Impactes del canvi climàtic sobre el sistema Ter-Llobregat

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'Aquatool. 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.

Figura 4. Esquema o gràfica del model de gestió del sistema Ter-Llobregat.



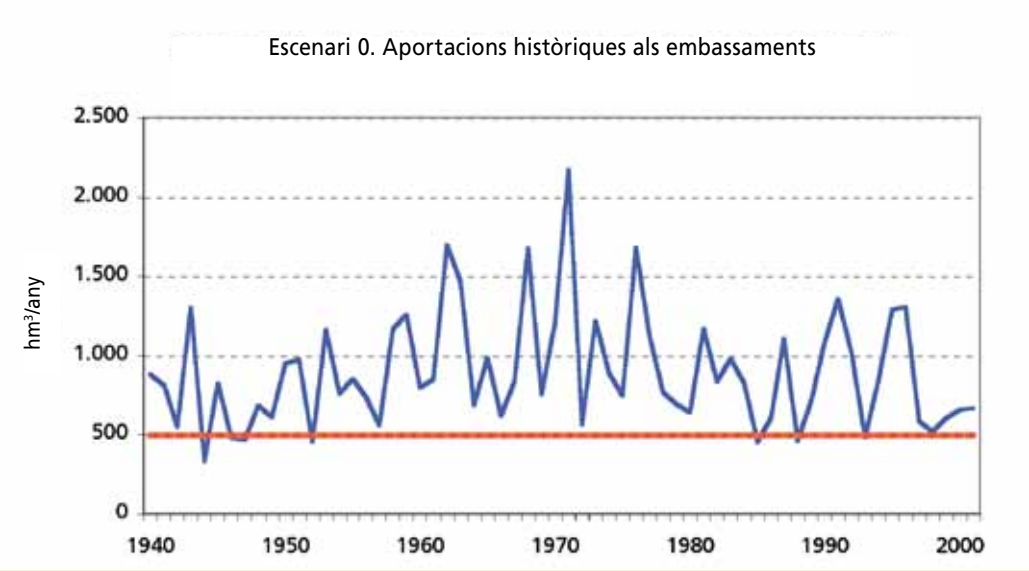
A fi de comparar la vulnerabilitat del sistema enfront de les diferents hipòtesis de canvi climàtic en les aportacions, és necessari escollir algun paràmetre que indiqui el grau de satisfacció de les demandes que es pot assolir en cada cas. Les opcions són moltes: nombre de fallades al llarg de la sèrie 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 hm^3/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 hm^3 d'abastament i 141 hm^3 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.

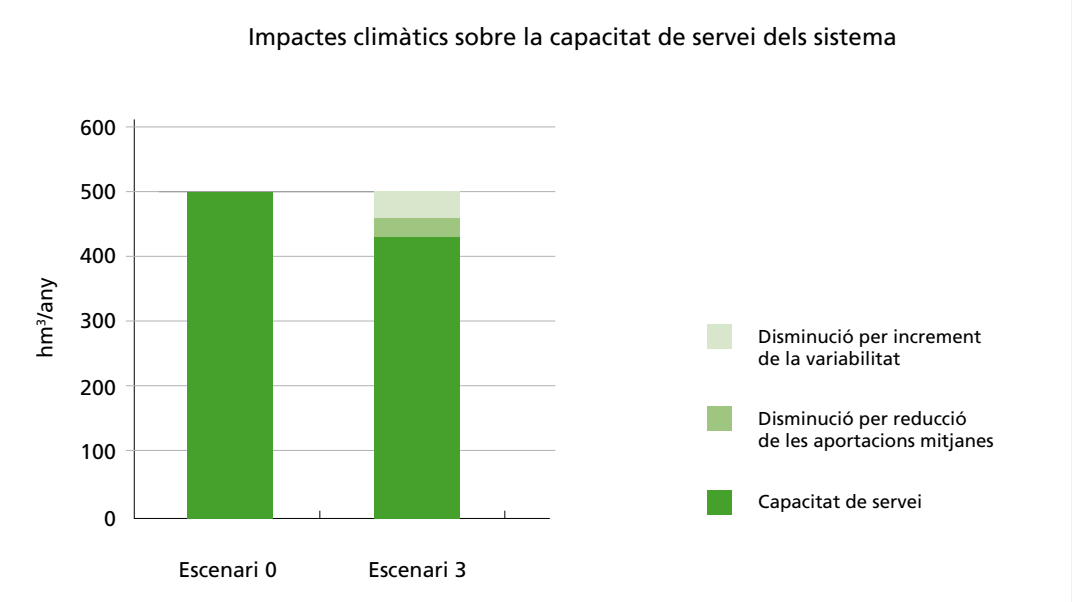
Figura 5. Simulació de les entrades als embassaments del sistema Ter-Llobregat durant la sèrie històrica 1940-2002 (en blau) i indicació de la capacitat de servei del sistema d'acord amb aquesta sèrie (en vermell).



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 (hm^3/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 hm^3/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 hm^3/any en el conjunt de Catalunya (incloent-hi consums domèstics, industrials i de serveis), s'incrementarà en uns 160 hm^3/any. Una part important d'aquests increments, entorn dels 110 hm^3/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 hm^3/any, dels quals 250 hm^3/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 hm^3/any) i s'està acabant de construir la planta del Llobregat (60 hm^3/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 hm^3/any, que tot i que és inferior a la demanda anual (d'uns 575 hm^3), 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 vialibilidad 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*. Tesi doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (ETSICCPM), Uiversidad 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.

Henrichs, 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 hidrològica.* Ordre 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.* Tesi doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (ETSICCPM), Uiversidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid.