

10 Ecosistemes aquàtics continentals

Autors

Sergi Sabater

Marisol Felip

Margarita Menéndez

Vicenç Acuña

Emili García-Berthou

Isabel Muñoz

Ramon J. Batalla

Stéphanie Gascón

Xavier Quintana

Carles Borrego

Rafael Marcé

Francesc Sabater

Andrea Butturini

Eugènia Martí

Sergi Sabater és doctor en biologia per la Universitat de Barcelona (1987), catedràtic d'ecologia a la Universitat de Girona i investigador sènior adscrit a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA). Desenvolupa la recerca en l'àmbit de l'ecologia dels sistemes fluvials, amb un interès especial en l'impacte del canvi global en la biodiversitat algal i bacteriana i en el funcionament dels ecosistemes com a resposta a les alteracions hidrològiques i als contaminants orgànics i nutrients.

Vicenç Acuña és investigador a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua, en la línia d'ecosistemes fluvials, des del 2009, i expert en el funcionament dels ecosistemes fluvials, en els efectes de la intermitència del flux d'aigua i en la interacció entre l'economia i l'ecologia.

Ramon J. Batalla és geomorfòleg, doctor en geografia per la Universitat de Barcelona (1993) i professor de geografia física a la Universitat de Lleida des del 1996. És investigador sènior adscrit a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua des del 2011, dirigeix el Grup de Recerca de Dinàmica Fluvial SGR-645 i treballa en el camp de l'anàlisi de processos biofísics en rius a Catalunya, especialment en el transport i el balanç de sediments, en les interaccions hidràuliques i sedimentàries, i en la influència sobre les comunitats d'invertebrats bentònics. També investiga els efec-

tes del canvi global en els recursos hídrics i la dinàmica dels rius, i estudia el comportament hidrosedimentari dels rius regulats, especialment a la conca de l'Ebre, on lidera projectes de recerca des del 2002.

Carles Borrego és ecòleg microbià especialitzat en ecologia microbiana d'ecosistemes aquàtics continentals, doctor en biologia (1996), professor titular de microbiologia de la Universitat de Girona des del 2001 i investigador sènior de l'Institut Català de Recerca de l'Aigua des del 2011, on lidera el grup de Qualitat i Diversitat Microbiana. Ha desenvolupat l'activitat investigadora en l'àmbit dels llacs i les llacunes estratificades, amb especial atenció a la diversitat i l'activitat microbiana en relació amb els cicles biogeoquímics. Actualment, les línies d'investigació se centren en la diversitat i la dinàmica del resistoma microbià com a resposta a la contaminació dels ecosistemes aquàtics per antibiòtics.

Andrea Butturini és expert en hidrologia dels sistemes fluvials intermitents i en biogeoquímica del carboni i el nitrogen. Actualment, és professor agregat al Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona.

Marisol Felip és professora agregada al Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona, investigadora del Biogeodynamics and Biodiversity

Research Group (CREAF-CSIC, UB) i membre del Grup d'Ecologia dels Canvis Ambientals (GECA), reconegut com a grup de recerca consolidat per la Direcció General d'Investigació de la Generalitat de Catalunya des del 1993. És experta en ecologia del plàncton microbià dels llacs d'alta muntanya i ha centrat la tasca investigadora en els Pirineus i els Alps del Tirol. Actualment, mitjançant l'aplicació de tècniques d'anàlisi individual, estudia la diversitat funcional de les algues per tal d'entendre la importància de la diversificació d'estratègies tròfiques com a motor d'evolució del fitoplàncton.

Emili García-Berthou és doctor en biologia i catedràtic d'ecologia a l'Institut d'Ecologia Aquàtica de la Universitat de Girona. Investiga sobre ecologia de peixos continentals en rius, embassaments i zones humides, especialment d'espècies invasores, i n'examina la biologia, l'ús de l'hàbitat, l'impacte ecològic i la interacció amb altres alteracions antròpiques, com ara la regulació hidrològica i la contaminació. Ha dirigit diversos projectes de recerca en ecologia de peixos, majorment finançats pel Ministeri de Ciència i Innovació i l'Agència Catalana de l'Aigua, ha dirigit deu tesis doctorals ja defensades i pertany al consell editorial de les revistes *Biological Invasions*, *Ecosphere*, *Neobiota* i *Neotropical Ichthyology*.

Stéphanie Gascón és professora titular d'ecologia de la Universitat de Girona i especialista en ecologia de llacunes i aigües somes mediterrànies, principalment de llacunes i aiguamolls temporanis. Estudia la influència de les variables ambientals en les comunitats aquàtiques i, especialment, els aspectes determinants per a la biodiversitat taxonòmica, però també la funcional. És autora d'una cinquantena de publicacions científiques i ha participat en diversos projectes de recerca tant nacionals com internacionals.

Rafael Marcé va obtenir el doctorat al Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona (2007), on es va formar com a especialista en ecologia d'embassaments. El 2009 es va incorporar a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua per tal de participar en les línies de modelització d'ecosistemes i conques i de sistemes lacustres i embassaments. L'activitat de recerca inclou l'ecologia d'embassaments, però també la modelització de

processos ecològics i biogeoquímics a escala de conca, el cicle del carboni en els ecosistemes aquàtics continentals, la dinàmica dels contaminants emergents a les xarxes fluvials, i la detecció dels impactes dels canvis globals en els ecosistemes aquàtics a escales regionals.

Eugènia Martí és doctora en ciències biològiques per la Universitat de Barcelona (1995) i, des del 2006, científica titular del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC) al Centre d'Estudis Avançats de Blanes (CEAB), en el qual treballa dins del grup de recerca Ecologia Integrativa d'Aigües Continentals. Centra la recerca en l'estudi dels ecosistemes fluvials i, concretament, està especialitzada a caracteritzar els processos biogeoquímics associats a la dinàmica del nitrogen, el fòsfor i el carboni, i a entendre els mecanismes i els factors que els regulen. També té interès a avaluar els efectes del canvi global en aquests processos i, en particular, els canvis derivats de l'activitat urbana.

Margarita Menéndez és doctora en biologia per la Universitat de Barcelona (1990) i, des del 2005, professora agregada en el marc del Pla Serra Húnter al Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona. És membre del grup de recerca consolidat FORESTREAM (Forest and Stream Ecological Links: Watershed Management and Restoration), ha participat en diversos projectes tant d'àmbit nacional com europeu, i enfoca la recerca en el camp dels processos ecològics als ecosistemes aquàtics, com ara la descomposició, la producció i la restauració ecològica als aiguamolls.

Isabel Muñoz és professora titular del Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona i orienta la recerca en l'àmbit de l'ecologia fluvial, especialment de rius mediterranis, per mitjà de l'ecologia dels invertebrats i l'estudi de la resposta de l'ecosistema als canvis globals. Actualment, treballa en la resposta de les relacions tròfiques de la comunitat davant de diferents perturbacions (com ara els canvis hidrològics o la contaminació química). Aquesta recerca és conseqüència de la participació i la direcció de diversos projectes científics d'àmbit nacional i europeu, i també de projectes d'un caràcter més aplicat. És autora de més de setanta articles i capítols de llibres, i editora de la revista indexada *Limnetica*.

Xavier Quintana és professor titular d'ecologia de la Universitat de Girona i director de la càtedra d'ecosistemes litorals mediterranis de la mateixa universitat. És especialista en ecologia de llacunes i aigües somes en ambients mediterranis, principalment de llacunes i aiguamolls costaners, en els quals ha estudiat la influència de les variables ambientals en la composició d'espècies i les interaccions tròfiques que determinen l'estructura de la comunitat aquàtica. També ha dirigit diversos projectes LIFE de restauració en sistemes aquàtics costaners.

Francesc Sabater és doctor en biologia per la Universitat de Barcelona (1987), professor titular del Departament d'Ecologia de la mateixa universitat i membre investigador del Centre de Recerca Ecològica i d'Aplicacions Forestals (CREAF). És director del grup de recerca consolidat FORESTREAM (2014-2017), reconegut per la Direcció General d'Investigació de la Generalitat de Catalunya, i ha orientat la recerca en l'ecologia i la biogeoquímica fluvial, especialment de rius i riberes mediterranis, i en la biodiversitat dels sistemes hiporreics.

Sumari

Síntesi	241
10.1. Introducció	242
10.2. Efectes del canvi climàtic en la dinàmica hídrica i el comportament biogeoquímic dels sistemes	242
10.2.1. Efectes de les sequeres	242
10.2.2. Efectes de les crescudes.....	244
10.3. Efectes del canvi climàtic en la biodiversitat.....	244
10.3.1. Canvis en el cicle vital i la distribució de les espècies	244
10.3.2. Canvis en les interaccions i les xarxes tròfiques.....	245
10.3.3. Afavoriment de les espècies invasores	246
10.4. Efectes del canvi climàtic en el funcionament dels ecosistemes	246
10.4.1. Impactes en el metabolisme	246
10.4.2. Efectes en la dinàmica dels nutrients.....	247
10.4.3. Efectes en la descomposició de la matèria orgànica.....	248
10.5. Sospites i evidències del canvi climàtic als sistemes fluvials.....	248
10.6. Sospites i evidències del canvi climàtic als sistemes lacustres	250
10.6.1. Sistemes lacustres d'alta muntanya.....	250
10.6.2. Sistemes lacustres càrstics	251
10.6.3. Embassaments	252
10.7. Sospites i evidències del canvi climàtic a les llacunes i les aigües temporànies	254
10.7.1. Llacunes temporànies	254
10.7.2. Llacunes costaneres	255
10.8. Possibles sinergies del canvi climàtic amb altres impactes antròpics	256
10.9. Conclusions	258
10.10. Recomanacions	258
Referències bibliogràfiques	259

Síntesi

Els sistemes aquàtics continentals inclouen rius, estanys (o llacs), llacunes (o estanyols) i embassaments com a masses d'aigua superficials. Aquests sistemes recullen tant les influències climàtiques com les que són fruit de l'activitat humana que es desenvolupa a la conca, de les quals les dinàmiques hidrològica, sedimentària, biogeoquímica i biològica són receptors directes. El canvi climàtic afecta la quantitat i la freqüència de les pluges i l'evapotranspiració que s'efectua a la conca, amb efectes directes en la magnitud i la freqüència dels patrons hidrològics. S'estima que el canvi climàtic pot ser el detonant de l'augment de la freqüència d'esdeveniments extrems i transitoris (com ara les sequeres i les avingudes) a les regions amb clima mediterrani, i de l'augment de la raresa de les condicions hidrològiques basals: els sistemes funcionaran cada vegada més en règim episòdic, mentre que els canvis progressius i estacionals seran més difusos. L'increment anòmal de la temperatura pot ser la causa de la disminució de la coberta del gel en els estanys pirinencs, de l'avançament i la prolongació del període d'estratificació de les masses d'aigua lacustres, i de l'increment de la temperatura de l'aigua fluvial, amb implicacions biogeoquímiques i per a la biodiversitat.

L'augment de la freqüència d'aquests episodis extrems té implicacions múltiples per als ecosistemes. D'una banda, les crescudes afavoreixen el pas ràpid de l'aigua i dels materials, cosa que comporta pics puntuals de més productivitat als ecosistemes receptors (com ara els estanys i els embassaments, les zones al·luvials i deltaïques i les zones costaneres); de l'altra, les sequeres fragmenten el continu fluvial o bé disminueixen dràsticament la durada del període d'inundació de les masses estagnants temporànies. Durant els períodes de cabal baix, que es preveu que seran més extensos a conseqüència del canvi climàtic, el temps de residència de l'aigua al sistema s'allargarà considerablement. Això té implicacions biogeoquímiques molt rellevants, amb la prevalença

de processos anaeròbics que produeixen gasos amb efecte d'hivernacle, com ara l'òxid nítrós, fruit de la desnitrificació, o el metà. També s'espera que s'afavoreixi la respiració de la matèria orgànica respecte de la producció de nova biomassa, fet que entenem com un afavoriment progressiu de l'heterotròfia.

La biodiversitat dels sistemes aquàtics continentals pot ser afectada pel canvi climàtic. Els ecosistemes aquàtics mediterranis presenten una diversitat elevada de fauna i flora, i per bé que la biota s'ha adaptat als canvis hidrològics extrems, l'increment d'aquests pot posar-la al límit de la capacitat de resiliència. Això pot empitjorar les condicions vitals dels organismes i, a mitjà termini, deixar nínxols buits i exposats a la invasió per espècies no natives. En pot resultar l'homogeneïtzació de les comunitats i la disminució del nombre d'espècies endèmiques, ara per ara molt més abundants que en moltes altres regions climàtiques.

L'acció humana directa pot tenir un efecte sinèrgic en les conseqüències potencials del canvi climàtic. La capacitat de retenció de nutrients dels rius (el procés d'autodepuració) disminueix quan se n'incrementa la concentració, ja que el sistema se sobreesatura de nutrients. Les entrades contínues procedents de les depuradores d'aigües residuals contribueixen a un excés de nutrients, fet que augmenta en condicions de cabal baix. La derivació i la regulació (per mitjà de canals, preses i embassaments), o el confinament de les masses d'aigua, interfereixen en les dinàmiques hidrològiques i sedimentàries dels ecosistemes respectius, compliquen la interpretació de l'efecte del canvi climàtic i, fins i tot, posen en segon pla l'efecte que el canvi climàtic exerceix sobre aquests ecosistemes. Es tracta de l'anomenat *canvi global*, el qual inclou tant els efectes del canvi climàtic com les alteracions que l'home realitza a escales temporals i espacials diferents.

Paraules clau

canvi climàtic, canvi global, biodiversitat, conservació, gestió, ecosistemes aquàtics

10.1. Introducció

Els ecosistemes aquàtics continentals són especialment sensibles a canvis ambientals de tota mena, els quals n'afecten la biodiversitat i el funcionament. Aquests ecosistemes responen molt ràpidament a les variacions en les precipitacions i les temperatures, atès que són els receptors de l'aigua que circula per la conca i de tot el que hi passa. Així doncs, els canvis en el clima que comporten variacions en la quantitat i/o la intensitat de les precipitacions, i increments en les temperatures mitjana i màxima, els quals incideixen en l'evapotranspiració a la conca, afecten directament el règim hidrològic dels rius, els estanys i les llacunes del territori. En aquesta equació no es pot oblidar que l'aigua és un element econòmic de primer ordre, cosa que sotmet aquests sistemes a múltiples pressions humanes que incideixen directament en la qualitat de l'hàbitat, en la qualitat de les aigües i en la biota que hi viu. El funcionament d'aquests sistemes aquàtics depèn, doncs, de tot el que passa a la conca, on conflueixen els canvis climàtics i els canvis d'usos del sòl fruit de les activitats humanes. Per tant, els ecosistemes aquàtics solen ser un «termòmetre» molt sensible que detecta les influències del canvi climàtic i global que afecten la biodiversitat i la salut dels nostres ecosistemes (ACA, 2009).

10.2. Efectes del canvi climàtic en la dinàmica hídrica i el comportament biogeoquímic dels sistemes

S'estima que la modificació climàtica pot ser el detonant de dos canvis dràstics en la variabilitat hídrica de les masses d'aigua superficials en les regions mediterrànies: un increment en la gravetat de les sequeres i, paral·lelament, un increment en la freqüència de les crescudes. Per tant, els esdeveniments extrems i transitoris augmenten, i les condicions d'estabilitat hidrològica estacional perden prevalença. Els sistemes funcionen cada vegada més en un règim en el qual els períodes discrets i discontinus s'imposen sobre els canvis progressius i estacionals.

L'increment de la severitat i la freqüència de les sequeres s'ha detectat, en els últims cinc decennis, a tota la península Ibèrica (i al sud d'Europa en general), i s'atribueix a l'increment de la demanda evaporativa atmosfèrica com a resposta a l'incre-

ment de les temperatures (Vicente-Serrano *et al.*, 2014). Es tracta d'un procés clarament estacional i molt rellevant durant l'estiu, quan l'evapotranspiració es dispara. A més a més, la gravetat de l'eixutesa es pot agreujar per la intensificació del consum d'aigua per a usos humans.

L'increment de la freqüència de les crescudes és més subtil. D'acord amb l'anàlisi de Barreda-Escoda *et al.* (2015), a Catalunya els esdeveniments més catastròfics (els desbordaments amb destruccions completes d'infraestructures pròximes a les lleres fluvials) no presenten cap tendència significativa. La freqüència de crescudes extraordinàries (els desbordaments amb destruccions puntuals), en canvi, tendeix a incrementar des del 1850. Hi ha una tendència a l'augment de les crescudes extraordinàries a final d'estiu i a començament de tardor, i també s'ha detectat un increment de la freqüència i la magnitud (el pic del cabal) de les crescudes de tardor que coincideix amb els períodes d'activitat solar alta. No obstant això, aquests increments no són atribuïbles, exclusivament, a cap alteració del règim de precipitacions, ja que també s'han detectat, molt especialment, en àrees força urbanitzades i extenses, on les lleres han estat canalitzades o, fins i tot, cobertes, i on l'aigua circula ràpidament sense oportunitat d'infiltrar-se en el subsòl i el freàtic.

10.2.1. Efectes de les sequeres

La sequera és un procés que incideix d'una manera important en el funcionament ecològic i biogeoquímic dels ecosistemes aquàtics. Des de la perspectiva hidrològica, la sequera causa la ruptura del continu fluvial i dona lloc a un conjunt de cossos d'aigua efímers i aïllats, o només connectats subsuperficialment. El temps de residència de l'aigua al sistema s'allarga considerablement. És a dir, un sistema hidrogràfic continu i unidireccional es converteix en un mosaic fragmentat d'illes d'aigua efímeres i desconnectades. Aquest procés es pot anomenar *lenticificació*, i és particularment patent a Catalunya, atès que molts dels nostres rius són ocupats per una xarxa molt densa de rescloses. Durant els períodes de sequera, aquestes rescloses, juntament amb els petits tolls aïllats de les lleres seques, acumulen la major part de l'aigua i l'activitat biològica de les xarxes fluvials. En termes generals, s'espera que el procés de lenti-

ficació provocat per la disminució dels cabals faci augmentar el temps de residència pràcticament a tots els cursos fluvials de Catalunya. Una anàlisi preliminar del canvi de cabals als rius catalans, tenint en compte els canvis esperats segons el darrer informe del Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (IPCC) per a un escenari de 2 °C d'augment, implicaria un increment del temps de residència de l'aigua d'un 13 % (figura 10.1).

Els canvis biogeoquímics associats a aquest increment del temps de residència de l'aigua relacionat amb les sequeres són múltiples. L'acumulació de matèria orgànica i l'increment de la temperatura afavoreixen els processos heterotròfics (és a dir, la utilització de la matèria orgànica com a font d'energia), que s'associen a un consum d'oxigen que redueix la disponibilitat d'oxigen en aquests ecosistemes. Aquestes condicions es magnifiquen a causa de la disminució de la solubilitat dels gasos que es produeix amb l'increment de la temperatura. El dèficit d'oxigen afavoreix processos anaeròbics com ara la desnitrificació, amb l'eliminació de nitrat i la formació de gasos parcialment reduïts com els òxids de nitrogen i el nitrogen molecular; la reducció de sulfat, amb l'aparició de sulfhídric, i fins i tot processos d'anaerobiosi extrema, com ara la meta-

nogènesi, que allibera metà, un gas amb un efecte d'hivernacle potent. Paral·lelament, els soluts reduïts com l'amoni i el sulfhídric n'incrementen la concentració ateses les condicions d'anòxia. Aquests processos anaeròbics poden produir l'acidificació de rius i estanys en aigües poc mineralitzades. L'acumulació de la matèria orgànica en els ecosistemes que s'assequen és força habitual. D'una banda, es produeix un increment gradual del contingut de substàncies orgàniques dissoltes procedent dels lixiviats dels detritus orgànics que s'acumulen a les lleres fluvials i que no es transporten aigües avall. De l'altra, l'estrès hídric estiuenc provoca una caiguda prematura de la fullaraca en la vegetació de ribera. En rius intermitents de capçalera, amb cobertura arbòria ben desenvolupada a la zona de ribera, es poden acumular fins a 300-800 g/m² de fullaraca al llarg de l'estiu. L'acumulació i la lixiviació posterior d'aquesta quantitat ingent de substàncies orgàniques també condicionen altres processos biogeoquímics importants com ara les variacions en l'alcalinitat, el pH, i el règim lumínic de la columna d'aigua. Precisament, les substàncies húmiques absorbeixen amb eficàcia la radiació solar i, d'aquesta manera, condicionen l'activitat fotosintètica. Si la llum i els nutrients no són limitants quan la temperatura és elevada i el cabal és

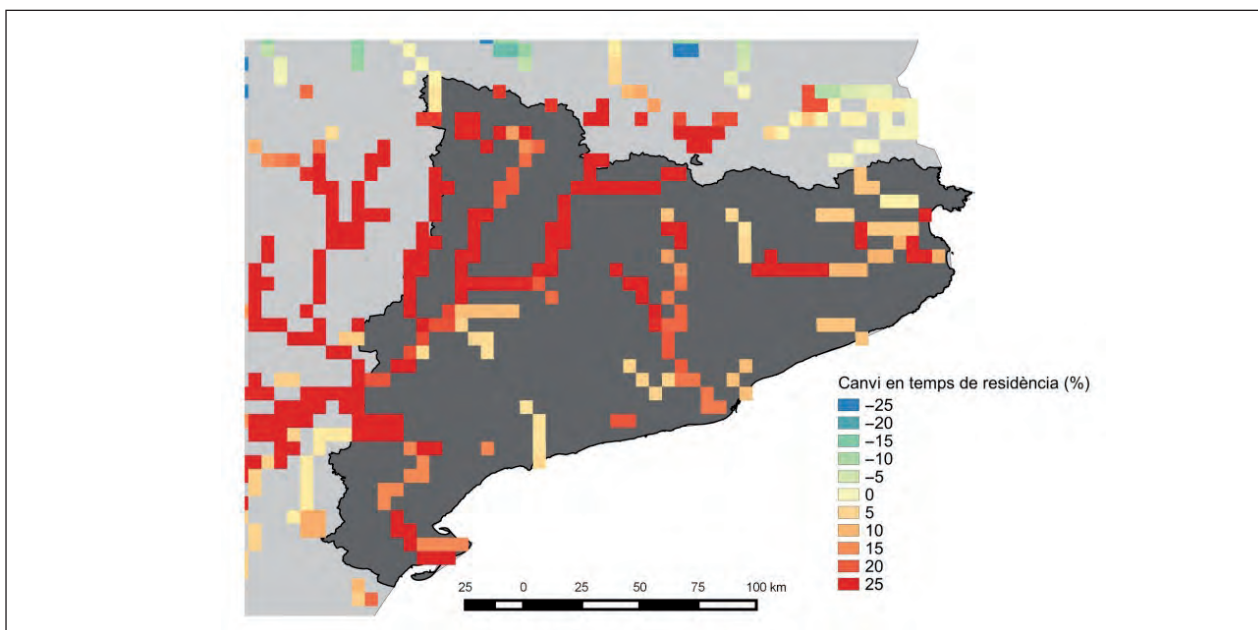


FIGURA 10.1. Canvi percentual en el temps de residència de l'aigua a la xarxa fluvial catalana considerant els canvis en l'escorrentia superficial per a un horitzó d'augment de 2 °C en la temperatura mitjana del planeta. L'anàlisi està feta a una escala d'1/16 de grau, per la qual cosa els rius de capçalera no hi són representats.

Font: R. Marcé.

molt baix, aleshores l'increment de la biomassa de productors primaris augmenta sensiblement l'acumulació de la matèria orgànica al riu.

Aquests canvis biogeoquímics es poden agreujar a causa d'aportacions d'origen antropogènic. Per exemple, a la Tordera, durant l'estiu, gairebé tota l'aigua circulant ha passat abans per una depuradora o un efluent industrial. En un context de sequera persistent mitigada únicament pels efluents de les depuradores, les aportacions de contaminants orgànics poden condicionar la capacitat autodepurativa del sistema aigües avall, la reactivitat i la fotodegradació de la matèria orgànica, i l'aparició i la persistència de metabòlits perjudicials per a la biota aquàtica i per als humans. L'aparició de grans poblacions estables de macròfits a rius regulats com el Segre i l'Ebre també és un efecte clar d'aquestes alteracions biogeoquímiques i del règim de cabals.

L'increment de la salinitat de les aigües continentals també es pot agreujar amb les sequeres. Les aportacions antropogèniques en molts rius es caracteritzen per les concentracions altes de clorurs, que poden esdevenir elevades a cabals baixos. Als sistemes deltaics, l'extensió temporal de les condicions de sequera i l'increment previsible del nivell del mar pot aguditzar la salinitat dels aqüífers i amenaçar la biota i la qualitat del recurs hídic.

10.2.2. Efectes de les crescudes

Les crescudes tensen el funcionament dels ecosistemes fluvials en un sentit contrari al de les sequeres. Durant una crescuda, els sistemes esdevenen mers conductes d'aigua i de materials. Un increment de la freqüència d'aquests esdeveniments pot augmentar puntualment les concentracions de moltes de les substàncies dissoltes, com ara el carboni orgànic dissolt i els nitrats, que l'ecosistema fluvial mateix amb prou feines pot retenir i processar. Precisament, la productivitat dels ecosistemes aquàtics receptors (els estanys i els embassaments, les zones al·luvials i deltaïques i les zones costaneres) és condicionada per aquestes addicions de matèria i energia. Les crescudes mobilitzen el substrat, erosionen la llera i transporten sediments. Un increment d'aquests successos extrems pot afavorir la incisió del riu i la desconnexió progressiva de la llera principal dels

braços secundaris i de la plana d'inundació. Els canvis en els hàbitats fluvials (la pèrdua d'heterogeneïtat) i la relació de les aigües superficials i subterrànies (el sobredrenatge d'aqüífers lligat a la dinàmica geomorfològica incisiva) també es preveu que siguin remarcables. A les àrees urbanitzades, les crescudes fàcilment col·lapsen les xarxes de sanejament i el funcionament de les depuradores, de manera que afavoreixen la pràctica del *bypass* i l'abocament massiu resultant d'aigües residuals sense tractament previ.

10.3. Efectes del canvi climàtic en la biodiversitat

Els ecosistemes aquàtics mediterranis tenen una fauna i una flora molt diversa, més rica en endèmiques que moltes altres regions climàtiques. La biota es caracteritza per ser molt resilient, amb prou capacitat per a retornar a les condicions prèvies a les pertorbacions. Moltes espècies són euritermes i, per tant, són menys vulnerables a l'augment de la temperatura. Pertorbacions com ara els canvis hidrològics extrems (com, per exemple, les sequeres i les riuades), que a la vegada impliquen canvis en l'hàbitat, poden desplaçar o eliminar espècies. Això pot deixar nínxols buits i exposats a la invasió per espècies no natives, la qual cosa comporta l'homogeneïtzació de les comunitats i la disminució del nombre d'espècies endèmiques.

10.3.1. Canvis en el cicle vital i la distribució de les espècies

Un augment de la temperatura de l'aigua té com a conseqüència immediata un augment de la respiració dels organismes en detriment de l'acumulació de biomassa. En el cas dels insectes aquàtics, a més, la temperatura marca el moment de la metamorfosi. En larves del tricòpter *Sericostoma personatum* s'ha observat experimentalment que la metamorfosi s'avança i el temps de desenvolupament es redueix amb l'augment de la temperatura; en resulten individus adults més petits i amb menys potencial d'èxit reproductiu.

La temperatura també determina el moment de l'eclosió dels ous o la fi del període de diapausa durant l'hivern. El cicle de vida de l'efímera *Ephoron virgo* a la part baixa de l'Ebre ha canviat entre 1987 i 2005, i els canvis probablement estan

relacionats amb l'augment de la temperatura a la zona. L'eclosió i el desenvolupament dels ous s'ha avançat pràcticament un mes; l'emergència dels adults comença tres setmanes abans i la proporció de femelles és més alta.

Molts dels organismes aquàtics dels rius mediterranis tenen temps de generació curts (menys d'un any) i diverses generacions l'any, fet que comporta que sobrevisquin a l'eixutesa de l'estiu i que com a mínim una generació quedi garantida abans que arribi una nova sequera. Això és especialment rellevant per als grups que tenen una capacitat limitada de migració, com ara els efemeròpters, els plecòpters i els tricòpters. Per contra, les espècies de mida més gran, cycle de vida llarg i més requeriments energètics seran menys resistents a aquests canvis.

L'evidència que les sequeres estivals no afecten la biodiversitat de la primavera següent demostra la rapidesa de la capacitat de recolonització d'aquests ecosistemes. Ara bé, sequeres intenses i més freqüents que no garantissin un flux poblacional mínim (especialment durant la primavera) implicarien canvis en l'abundància i la composició de les comunitats biològiques. La major part dels plecòpters, els efemeròpters i els tricòpters necessiten un règim de cabal més regular, i en el cas dels peixos, les sequeres limiten la recuperació de les poblacions durant el període humit, especialment en espècies com la bagra (*Squalius laietanus*), que necessita un hàbitat amb més volum d'aigua.

Algunes espècies han experimentat canvis en la distribució geogràfica que es poden relacionar fàcilment amb les variacions en la temperatura. L'odonat nord-africà *Trithemis annulata* ha colonitzat la península Ibèrica fins a França i Còrsega en els darrers quinze anys. La distribució d'espècies d'aigües fredes, com ara el peix *Salmo trutta*, l'efemeròpter *Baetis alpinus* o alguns plecòpters, es podria reduir per efecte de l'augment de la temperatura especialment en el Prelitoral i el Prepirineu, i altres espècies pròpies d'aigües temperades o càlides, com ara el barb (*Barbus* spp.), la bagra (*Squalius laietanus*) o altres ciprínids autòctons, es podrien expandir a altres zones ara massa fredes.

10.3.2. Canvis en les interaccions i les xarxes tròfiques

La intermitència del cabal determina canvis en la xarxa tròfica i, per tant, en l'alimentació d'alguns peixos. Comparant rius temporals i permanents dins d'una mateixa conca, la riera de Fuirosos i el tram principal de la Tordera, respectivament, s'ha observat que el barb de muntanya (*Barbus meridionalis*) i la bagra mengen menys quantitat d'aliment i el seleccionen menys en l'afluent temporal. La disponibilitat més petita de recursos per la intermitència del cabal és la causa d'una condició fisiològica més dolenta, fet que comporta que les gònades esdevinguin més petites i en condiciona la capacitat reproductiva (Mas-Martí *et al.*, 2010). Aquests peixos es troben a la part més alta de la xarxa tròfica, de manera que aquests canvis poden significar alteracions a tots els nivells de la xarxa.

Atès que la interacció entre el riu i la vegetació de ribera és molt estreta als rius poc cabalosos o intermitents, els canvis esmentats en el cycle de vida associats a l'augment de la temperatura determinen canvis temporals en la disponibilitat de preses per a alguns consumidors terrestres, amb conseqüències de desacoblament entre les xarxes tròfiques aquàtica i terrestre.

Les temperatures més altes també afavoreixen la colonització microbiana de les fulles i dels altres materials orgànics, que s'enriqueixen de nutrients, proteïnes i lípids, fet que en facilita l'assimilació als consumidors i compensa, així, les possibles pèrdues energètiques causades per l'increment de la respiració. A més, la lenticificació afavoreix la producció d'algues, especialment quan hi ha més disponibilitat de llum (a final d'hivern, quan encara no han sortit les fulles dels arbres de ribera, o bé a final d'estiu, quan hi ha més hores de llum i la pèrdua de fulles ja ha començat). Aquest recurs també esdevé part de les dietes de molts insectes, que són majorment detritívors, i d'alguns depredadors. Si els cabals baixos persisteixen més temps, aquesta situació podria modificar algunes de les interaccions tròfiques que imperen actualment. No obstant això, els efectes del canvi de dieta en el desenvolupament i en la reproducció dels consumidors són encara poc coneguts.

10.3.3. Afavoriment de les espècies invasores

Sovint, la desaparició o el declivi d'una espècie són deguts a múltiples causes. El canvi climàtic pot afavorir la presència de les espècies invasores, amb efectes ecològics importants. La desaparició local de les espècies natives afavoreix les espècies invasores, les quals molt sovint tenen taxes reproductives altes, són bones colonitzadores i resisteixen a la contaminació i a l'alteració hidrològica. És el cas del cranc de riu americà (*Procambarus clarkii*), del musclo zebra (*Dreissena polymorpha*), de la cloïssa asiàtica (*Corbicula fluminea*), del cargol poma (*Pomacea maculata*), de la gambúsia (*Gambusia holbrooki*) o de la carpa (*Cyprinus carpio*), entre d'altres. Aquestes espècies invasores sovint ocasionen impactes ecològics importants que dificulten la recuperació de les espècies natives. Moltes d'elles són termòfiles i limnòfiles (és a dir, prefereixen les aigües estagnants o amb poc corrent). Per tant, l'augment de la temperatura i la disminució del cabal poden afavorir la distribució, la capacitat reproductiva i la densitat de les poblacions. És possible que l'augment de la temperatura també afavoreixi l'establiment de noves espècies invasores, encara molt més termòfiles, que fins ara difícilment poden sobreviure a les temperatures hivernals o que encara no aconsegueixen reproduir-se als nostres ecosistemes aquàtics continentals. El jacint d'aigua (*Eichhornia crassipes*), les til·làpies

(*Oreochromis* spp.) i altres espècies (com ara els cíclids) tropicals o subtropicals són candidats potencials a noves espècies invasores.

10.4. Efectes del canvi climàtic en el funcionament dels ecosistemes

10.4.1. Impactes en el metabolisme

Els canvis en els règims dels cabals i les temperatures per als ecosistemes de la regió mediterrània creen unes condicions ambientals noves que són especialment rellevants per al funcionament dels ecosistemes aquàtics. El metabolisme d'aquests ecosistemes depèn del balanç entre la producció autòctona i la respiració. La producció és un procés que depèn, bàsicament, de la disponibilitat de llum, nutrients i temperatura, mentre que la respiració depèn de la disponibilitat de nutrients, temperatura i matèria orgànica. El canvi climàtic pot tenir un efecte intens en la temperatura i la disponibilitat de matèria orgànica, de manera que s'espera que els efectes siguin més acusats per a la respiració (figura 10.2).

La temperatura produeix efectes directes en la respiració dels organismes i en tots els processos de síntesi o producció primària, atès que es regeixen pels principis bàsics de la bioquímica. Tot i això, la sensibilitat de la producció primària als canvis de temperatura no és tan acusada com la

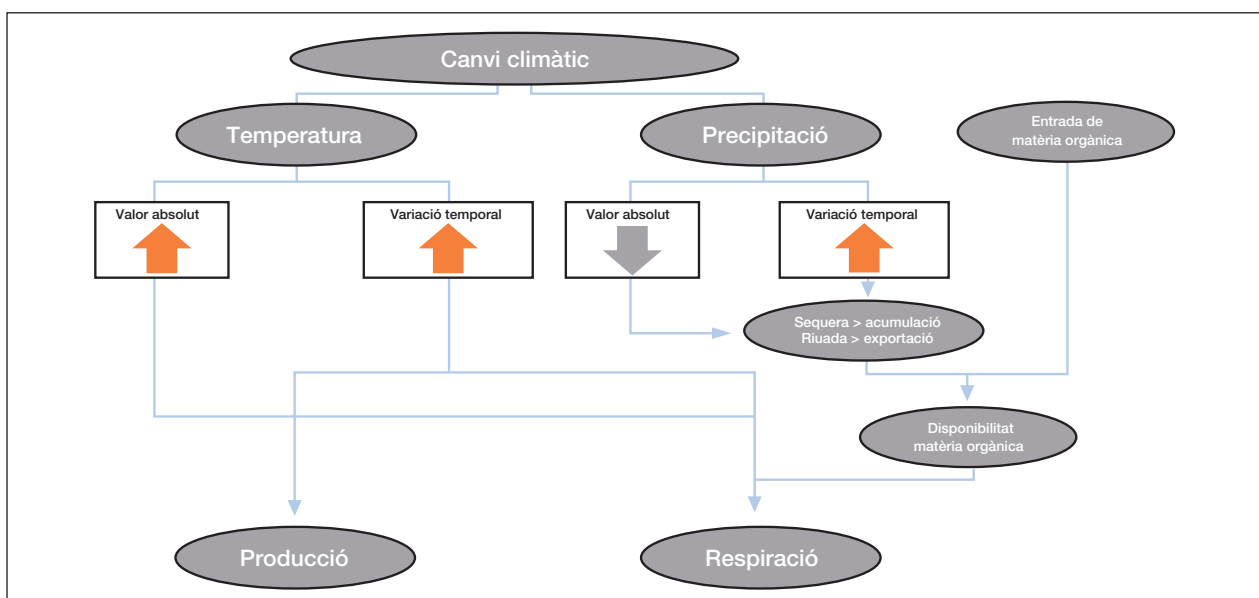


FIGURA 10.2. Efectes directes (per mitjà de canvis en la temperatura) i indirectes (per mitjà de canvis en la precipitació) del canvi climàtic en la producció i la respiració dels ecosistemes aquàtics continentals.

de la respiració, de manera que un increment, per exemple, de 2 °C pot correspondre a un increment d'un 19 % en la producció, però d'un 39 % en la respiració. Pel que fa a la disponibilitat de matèria orgànica, depèn fonamentalment de la retenció hidràulica del mateix sistema, que a la vegada es veu determinada pel cabal (figura 10.2). Els sistemes mediterranis es caracteritzen per experimentar fortes variacions quant a la matèria orgànica acumulada a les lleres, amb acumulacions importants durant períodes de cabals baixos o intermitents i, en canvi, exportacions massives durant les riuades. Així doncs, el canvi climàtic pot afectar el metabolisme d'una manera directa per mitjà de canvis en la temperatura i d'una manera indirecta per mitjà de canvis en la precipitació.

S'esperen increments en la producció d'algues i macròfits a causa de l'increment de la temperatura, especialment en períodes de cabals minsos, que poden ser llargs entre els episodis de riuades, i també increments més pronunciats en la respiració a causa de l'augment de la sensibilitat als canvis en la temperatura. No solament esperem canvis en els valors absoluts dels processos metabòlics (els valors anuals de respiració i producció), sinó també en les dinàmiques temporals, que es veuran molt més afectades pels extrems hidrològics (Acuña *et al.*, 2010). Així, doncs, es preveu que la xarxa fluvial mediterrània esdevingui més heterotròfica (un increment relatiu més gran de la respiració respecte de la producció), però alhora menys capaç de processar la matèria orgànica que hi entra. Això es pot explicar per les baixes respiracions durant els períodes secs i les altes exportacions de matèria orgànica durant les riuades. Una conseqüència d'aquests canvis en el metabolisme és que el processament del carboni en sistemes estagnants serà més important de resultes de l'augment de l'estabilitat hidrològica respecte dels sistemes lòtics (Acuña *et al.*, 2010).

10.4.2. Efectes en la dinàmica dels nutrients

Les concentracions de nutrients (com ara el nitrogen i el fòsfor) dissolts van lligades, en bona part, a l'increment de les condicions de sequera i als episodis de crescuda. En els sistemes fluvials, el control de l'activitat biòtica (de les algues, els bacteris i els fongs) sobre la química de les masses

d'aigua augmenta quan el riu queda fragmentat, cosa que explicaria l'increment de nitrats i matèria orgànica un cop el riu es torna a connectar amb el retorn de l'aigua. Els canvis produïts durant les crescudes, com ara l'erosió de la llera del riu i la inundació de les riberes, alteren les comunitats microbianes bentòniques i en redueixen la contribució com a reguladores i transformadores de nutrients. A més a més, durant aquests períodes, les entrades de matèria orgànica són intenses i massives, i no es dona l'oportunitat que puguin ser processades pels organismes fluvials. Això és especialment evident durant les crescudes de tardor, que transporten tota la matèria orgànica (especialment fullaraca) procedent de la zona de ribera.

La capacitat de retenció de nutrients als rius (anomenada *autodepuració fluvial*) depèn de la quantitat i la velocitat de l'aigua circulant, en el sentit que com més cabal hi ha més disminueix l'eficiència retentiva. Per tant, les crescudes redueixen dràsticament la capacitat d'autodepuració dels rius. No obstant això, encara no sabem com es veu alterada la dinàmica temporal de la retenció de nutrients en rius intermitents quan es recuperen del període de sequera. D'altra banda, la mateixa concentració de nutrients té un efecte directe en la capacitat d'autodepuració fluvial. L'eficiència de retenció disminueix a mesura que la concentració de nutrients augmenta, atès que la disponibilitat de nutrients és més elevada que la demanda biològica. En aquest context, les entrades continuades d'efluents de les estacions depuradores d'aigües residuals urbanes esdevenen determinants en les característiques químiques dels rius receptors, especialment en condicions de cabal baix. Es tracta d'una situació cada cop més freqüent, en la qual els nutrients aportats per les depuradores no són processats eficientment pel sistema fluvial. Aquest fet ocasiona un increment de les exportacions de nutrients aigües avall i afavoreix, per tant, les condicions d'eutròfia. L'entrada d'aigües residuals urbanes també aporta microcontaminants orgànics que provenen de productes de neteja, farmacèutics i cosmètics, i que poden afectar l'activitat dels microorganismes i reduir-ne l'activitat. Aquests processos són especialment interessants, però de moment no hi ha evidències conclouents de les implicacions per als ecosistemes aquàtics a causa dels efectes del canvi climàtic.

10.4.3. Efectes en la descomposició de la matèria orgànica

Als ecosistemes fluvials de capçalera, la vegetació de ribera és la contribuïdora principal de fullaraca, una de les fonts més importants de matèria i energia dels cursos fluvials. L'estrès hídric pot produir canvis en la qualitat, la quantitat i la temporalitat de la fullaraca que hi arriba, i de retruc en els processos i els organismes que en depenen i en l'energia que proporcionen. D'aquests processos, el més important és la descomposició de la matèria orgànica.

Precisament, aquest procés podria ser alterat per causes associades al canvi climàtic. Les concentracions més grans de lignina i tanins en les fulles de les plantes són provocades per l'increment de la concentració de CO₂ atmosfèric i en dificulten la colonització per part d'organismes descomponedors com ara els fongs. D'altra banda, la disminució d'aquests descomponedors pot afectar la degradació de la matèria orgànica. D'aquesta manera, la qualitat del material disponible per als macroinvertebrats detritívors disminueix, igual com ho fa la taxa de descomposició i la disponibilitat d'aliment per als nivells tròfics superiors. Per tant, petites reduccions en la qualitat del detritus poden tenir conseqüències per al funcionament dels ecosistemes. Tot i això, els efectes previstos en la qualitat de la fullaraca són variables i apunten cap a respostes fenotípiques particulars de cada espècie de planta. El canvi en el patró temporal de la caiguda de la fulla a causa dels períodes prolongats de sequera també en pot afectar la descomposició si no està sincronitzada amb el cicle de vida dels macroinvertebrats que la utilitzen com a aliment (els detritívors).

Es preveu que l'augment de la temperatura afavoreixi la descomposició microbiana. En canvi, una disponibilitat més limitada d'aigua provocaria la disminució de la degradació de la matèria orgànica per part dels detritívors. Si bé a determinades latituds més septentrionals la velocitat de degradació dels detritus no es veu tan afectada, als sistemes mediterranis la possible combinació amb més escassetat d'aigua podria fer disminuir tant la descomposició microbiana com l'efecte fragmentador dels detritívors, de manera que la matèria orgànica acumulada augmentaria substancialment. Tot i això, la magnitud de les crescudes i la duració de les sequeres condicionarà, també, la quantitat i

la qualitat de la matèria orgànica dissolta que flueix durant les crescudes següents i que es desplaça cap als sistemes receptors.

10.5. Sospites i evidències del canvi climàtic als sistemes fluvials

Els rius són sotmesos a pressions diverses que actuen a diferents escales. La més estesa és la del canvi climàtic, que s'expressa regionalment. A una escala intermèdia hi ha els canvis dels usos del sòl a la mateixa conca, i a una altra escala més local, els embassaments, les extraccions d'àrids, les derivacions d'aigua i les canalitzacions, que afecten localment la xarxa de drenatge fluvial. El procés d'adaptació dels sistemes fluvials depèn, en bona part, de la magnitud de la pressió, l'escala temporal i la distància respecte de la pertorbació. No obstant això, la mida de la conca també juga un paper clau en l'ajustament que experimenta un tram fluvial determinat i en com de ràpid respon al canvi. Cal esperar, doncs, que com més gran sigui la conca més lent serà l'ajustament a partir d'un mateix impacte, i que com més gran sigui l'escala de l'impacte més a llarg termini se'n veuran els efectes.

Els rius de capçalera són, *a priori*, més sensibles als canvis, ja que tenen una energia basal més elevada. Els temps reduïts de residència de l'aigua d'aquests sistemes comporten que les capçaleres fluvials es converteixin en «sentinelles» climàtics, molt sensibles a alteracions climàtiques. L'anàlisi de sèries hidrobiogeoquímiques temporals llargues ha permès determinar que els efectes climàtics són visibles a llarg, a mitjà i a curt termini. Per exemple, l'acumulació de sequeres al llarg dels anys (que es podria relacionar amb el fenomen d'El Niño) determina una reducció progressiva de l'arribada de fullaraca des del bosc de ribera. Els sistemes de capçalera responen molt ràpidament a canvis a llarg termini en la deposició dels sulfats que arriben a través de l'atmosfera; l'increment lleuger de nitrats a les capçaleres de la Tordera respon, probablement, a l'increment de la deposició de nitrogen procedent de l'àrea metropolitana de Barcelona.

Com més avall en el riu, més confosos i superposats es troben els impactes climàtics antròpics. Definir la rellevància del canvi climàtic en la hidrologia i la dinàmica fluvial a les grans conques catalanes (les del Llobregat, el Segre, el Ter i l'Ebre)

és una tasca complexa i d'un alt grau d'incertesa. Tots aquests rius han experimentat, d'una manera simultània a l'evolució climàtica, canvis molt notables en els usos del sòl (com ara la reforestació per l'abandonament de les àrees de muntanya o l'expansió de les àrees urbanes i industrials) al llarg del darrer segle. A més, són majorment regulats per grans preses, i les extraccions d'àrids, juntament amb les obres de canalització, han causat la major part dels canvis en la morfologia de les lleres. Només aigües amunt dels embassaments, on el règim hídric i sedimentari de la conca no és excessivament sotmès a canvis, és possible fer un assaig de la discriminació dels canvis en el règim hidrològic i sedimentari del riu, i extrapolar-ne, posteriorment, els resultats als trams inferiors de les grans conques (figura 10.3).

L'augment previst de la freqüència d'esdeveniments extrems, com ara sequeres i crescudes, pot tenir una gran incidència sobre els processos erosius a la conca i sobre la generació i la concentració de sediments. Un increment de la freqüència d'episodis de pluges torrencials i de l'erosivitat corresponent es podria veure compensat a la conca per l'increment de la coberta forestal i la disminució de l'erosivitat dels sòls. A les lleres fluvials, però, l'augment de la torrencialitat es podria traduir en processos generalitzats d'incisió del canal fluvial i comportar efectes rellevants en la quantitat i la qualitat de l'hàbitat disponible. Hipotèticament, els efectes serien semblants als que experimenten les lleres fluvials

aigües avall dels embassaments fins que la pertorbació s'estabilitza, perquè la incisió arriba a la roca mare i s'atura o perquè la capa superficial dels sediments esdevé més grollera i impedeix la mobilitat posterior dels sediments. En els trams que hi ha aigües avall dels embassaments l'increment de la torrencialitat es podria compensar per la laminació que les preses mateixes exerceixen en els cabals de crescuda. En aquests casos, l'efecte del canvi climàtic quedaria en segon terme, ja que la veritable reguladora de la dinàmica fluvial és la presa.

A les lleres de rius grans i mitjans no regulats, com ara a les parts altes del Ter i el Segre, s'observa, d'una manera natural, un canvi en el patró de drenatge dels rius, que perden dinamisme i passen, per exemple, d'una morfologia trenada, en la qual l'aigua circula per diferents canals dins la mateixa llera, a una de canal únic, molt més estable. Aquest canvi és l'expressió de la variació en el balanç entre cabal líquid i sòlid, i del balanç energètic associat als processos erosius fluvials. Un augment de la torrencialitat associada al canvi climàtic i una disminució de l'aportació de sediments associada als canvis a la conca poden comportar el canvi definitiu en el patró de drenatge. Aquesta nova morfologia, d'un sol canal, afavoreix l'increment de la presència de vegetació arbustiva i arbòria en zones del canal actives anteriorment. Així, per exemple, barres sedimentàries obertes fa alguns decennis ara apareixen cobertes per vegetació de ribera (figura 10.4).

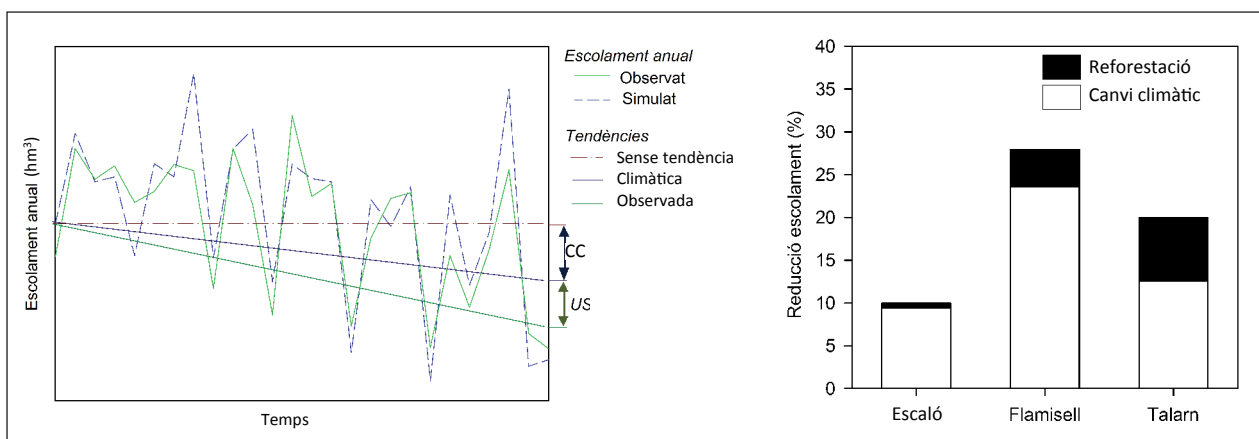


FIGURA 10.3. a) Model conceptual per a la comparació entre sèries de cabal observades i modelitzades mitjançant models hidroclimàtics a una conca de drenatge; la línia horitzontal indica que no hi ha tendència, mentre que les altres dues línies representen una disminució de l'escolament causat, inicialment, pel canvi climàtic, i després, pel canvi climàtic i els usos del sòl. b) Reducció de l'escolament en diferents punts de la Noguera Pallaresa per l'acció combinada del canvi climàtic i de la reforestació durant la segona meitat del segle xx.

Nombroses observacions indiquen que aquest procés de reducció de l'amplada activa i d'incisió és comú en rius d'ordre baix des de fa un parell de decennis; en trobem exemples a les rieres d'Arbúcies i Santa Coloma (a la serralada Prelitoral) i a la ribera Salada (al Prepirineu). En el cas de la ribera Salada, àrees de la llera fins fa pocs anys molt actives des del punt de vista sedimentari ara són ocupades per pins, una vegetació arbòria gens adaptada a les condicions hidràuliques que s'assoleixen durant les riudes, la qual cosa indica una reducció molt important de la magnitud i la freqüència dels episodis hidrològics extrems. No obstant això, encara no és possible determinar amb una certesa absoluta el grau de control de tots els processos sedimentaris i de la direcció i la velocitat del canvi en rius més grans. El que sí que és evident és que l'estabilització de les lleres produeix una sensació de falsa seguretat a la població local, que les acaba ocupant, cosa que augmenta el risc quan arriben els aiguats i les inundacions. Tot i això, cal afinar més bé el diagnòstic del que ha passat a escala regional per tal de poder predir la dinàmica futura de tots aquests processos.

10.6. Sospites i evidències del canvi climàtic als sistemes lacustres

10.6.1. Sistemes lacustres d'alta muntanya

Els estanys d'alta muntanya, a causa de la situació d'altitud, són sotmesos a condicions ambientals tradicionalment considerades extremes per a la

vida (com ara les temperatures baixes, la ultraoligotròfia, la radiació solar elevada i la presència d'una coberta de gel i neu durant l'hivern), que els fa molt sensibles a les influències externes. Aquesta sensibilitat, junt amb la distància relativa de les zones d'activitat humana, determina que els estanys d'alta muntanya esdevinguin enregistradors i bons sentinelles dels canvis ambientals del passat i del present.

Els efectes del canvi climàtic actual en la dinàmica dels ecosistemes aquàtics d'alta muntanya tenen diverses causes. L'augment de la temperatura atmosfèrica implica alteracions en l'estacionalitat, i l'alteració de la durada de la coberta de gel i neu que cobreix els estanys en el període hivernal i els canvis en la temperatura de l'aigua són especialment rellevants. Un allargament del període lliure de gel i un increment de la temperatura de l'aigua portaria els estanys cap a unes condicions més suaus i més productives, i els allunyaria de la ultraoligotròfia que els caracteritza. No obstant això, la interacció entre el clima i la dinàmica dels estanys és molt complexa, atès que hi intervenen molts factors i processos que tenen lloc a l'estany o a la conca mateixa. A més, la manca de sèries temporals llargues comporta que encara resulti difícil discernir els efectes de la tendència a l'escalfament dels efectes de les fluctuacions climàtiques periòdiques.

En el cas dels Pirineus, els estudis fets a l'estany Redon mostren una tendència clara a l'escalfament

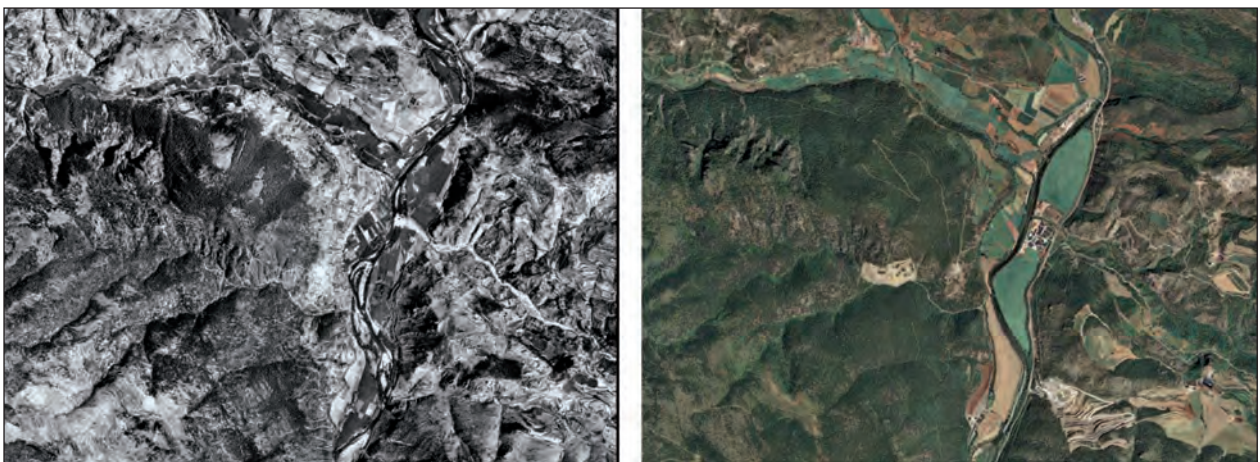


FIGURA 10.4. Canvis en el patró de drenatge del riu Segre a Organyà, aigües amunt de les grans preses, durant els darrers setanta anys (1945-2013). El riu ha perdut dinamisme, ha abandonat una morfologia trenada, indicadora d'un alt dinamisme fluvial, i ha esdevingut un riu de canal únic, amb els marges estabilitzats per la vegetació de ribera i la intrusió de conreus. En absència de preses, aquest canvi en el funcionament del riu només pot haver estat provocat per canvis en el règim de cabals i en l'erosió hídrica a la conca (la reforestació també és evident a les fotografies), i pel canvi climàtic.

al llarg de tot el segle XX, que s'accelera els darrers anys (Catalan *et al.*, 2002). Aquest augment es deu, bàsicament, a l'augment de les temperatures d'estiu i, sobretot, de les de tardor. L'efecte de l'escalfament esdevé evident en algunes espècies planctòniques de vida curta. És el cas de les diatomees *Fragilaria nanana* i *Cyclotella pseudostelligera*, que augmenten en abundància en connexió amb l'increment de temperatura del mes en què creixen (setembre i octubre, respectivament). També és el cas de les comunitats de crisòfits, en les quals el nombre i el tipus de cists que formen durant la primavera i l'estiu es correlacionen amb la temperatura de l'aire en la transició de l'hivern a la primavera (d'abril a maig), que determina el moment de fusió de la coberta de gel i l'inici del període de creixement a l'estany.

La importància de la durada de la coberta de gel en la composició de les comunitats dels estanys d'alta muntanya esdevé evident en un estudi estadístic que conté dades de diferents districtes lacustres, incloent-hi els Pirineus (Catalan *et al.*, 2009). Les comunitats de crustacis planctònics apareixen estretament lligades a la durada de la coberta del gel. Per exemple, hi ha una diferència clara entre els estanys on domina l'*Alonella excisa* i els estanys on domina la *Chydorus sphaericus* (de durada curta i llarga, respectivament), de manera que la proporció entre aquestes dues espècies es proposa com a indicador de la durada de la coberta de gel. Aquest estudi identifica un lliniar climàtic, corresponent a una durada de la coberta hivernal de 190 dies, el qual implica un canvi important de les característiques ecològiques dels sistemes i de la composició de les comunitats que hi creixen. Actualment, als Pirineus, una durada de la coberta de gel i neu de 190 dies se situa a l'entorn dels 2.400 m d'altitud, on trobem una gran proporció d'estanys. És fàcil preveure que un increment de pocs graus de temperatura de l'aire provocaria un escurçament de la durada de la coberta de gel d'aquests estanys, que traspassarien el lliniar esmentat i patirien canvis importants en la dinàmica física i química, i també en la composició de les comunitats d'organismes que hi viuen.

10.6.2. Sistemes lacustres càrstics

Els estanys (o llacs) i les llacunes (o estanyols) càrstics del sistema lacustre de Banyoles (Pla de

l'Estany) o l'estany de Montcortès (Pallars Sobirà) es caracteritzen per cubetes circulars i profundes que resulten de l'esfondrament del terreny per la dissolució dels guixos del subsòl a causa de l'acció de l'aigua freàtica. Això també determina que les aigües siguin molt riques en sulfats i que es produeixi una estratificació química gairebé permanent de la columna d'aigua al llarg de l'any (anomenada *meromixi*).

A l'estiu, aquest gradient químic coexisteix amb el gradient tèrmic i comporten una estratificació molt marcada de la columna d'aigua. Aquests sistemes tenen, doncs, una doble estratificació, que resulta més estable com més fort sigui el gradient de densitat entre les masses d'aigua o com més fonda sigui la cubeta. L'estabilitat i la durada d'aquesta estratificació tèrmica depèn de factors com ara la superfície, el volum, la morfometria i la profunditat de l'estany, i també la gravetat del clima (que depèn, en definitiva, de la localització geogràfica).

En termes generals, els estanys somers (com els existents a Catalunya) tendeixen a escalfar-se més ràpidament que els estanys de més fondària, atès que tenen menys inèrcia tèrmica i, per tant, responen ràpidament a canvis físics (com ara la temperatura o els gradients de densitat), químics (com ara la conductivitat, el pH o els nutrients) i biològics (com ara la producció primària, la composició del fitoplàncton i el zooplàncton, o la biomassa). Entre les variables de resposta (de fàcil mesura i integradores de l'estat de l'ecosistema, i per a avaluar els efectes de l'escalfament dels estanys causat pel canvi climàtic), hi ha la temperatura mitjana de l'epilímnion (la massa d'aigua superior en condicions d'estratificació), la durada del període d'estratificació estival i la fondària de la termoclina (Adrian *et al.*, 2009). La comparació d'aquestes tres variables en dues de les sis cubetes de l'estany de Banyoles (la C-II, situada al lòbul sud, i la C-III, situada al lòbul nord) mostra un canvi en els darrers tres decennis (figura 10.5). De fet, l'augment de la temperatura de l'epilímnion a l'estiu (de juny a setembre) s'estima en 1 °C per decenni i es correlaciona bé amb la temperatura de l'aire en el mateix interval de temps (Jordi Colomer, com. pers.). Si aquest increment es distribueix per tot l'any, en resulta un valor (0,03 °C/any) que triplica el registrat en la capa superficial dels oceans (0,01 [0,009-0,013] °C/any) per al perí-

ode 1971-2010 (IPCC, 2013). Tenint en compte les grans diferències quant a la superfície, el volum i la capacitat calorífica d'ambdós sistemes, sembla clar que l'escalfament d'ambdues masses d'aigua és comparable i entra dins dels marges d'error assumibles. Aquest escalfament anual és similar al registrat en altres llacs de l'hemisferi Nord, i va des dels 0,02 °C/any al llac Greifensee (Suïssa) als 0,157 °C/any al llac Stensjön (Suècia) (Adrian *et al.*, 2009).

L'escalfament també comporta una estabilitat més gran de l'estratificació estival, tot i que la durada no ha augmentat gaire en els darrers decennis. Així, s'ha passat dels sis mesos (de maig a octubre als cicles de 1997-1978; Abellà, 1980) als sis o set mesos en els darrers anys (de mitjan abril a final d'octubre o a principi de novembre; Borrego, dades no publicades) en el cas de la cubeta C-III. Aquesta estabilitat és afavorida per una transició més suau entre l'estiu i la tardor, que endarrereix

la barreja de la columna d'aigua fins a mitjan o final de novembre. L'escalfament de l'epilimnion té, a més, conseqüències des del punt de vista biològic, ja que estimula, entre d'altres, el creixement i l'activitat fitoplanctònica, zooplanctònica i bacterioplànctònica (Adrian *et al.*, 2009) i, per tant, acaba provocant un augment de la càrrega orgànica interna del sistema. La sedimentació posterior de la matèria orgànica a les capes profundes, aïllades en fondària per l'estratificació, i l'oxidació per part dels microorganismes acaba esgotant l'oxigen i genera una massa d'aigua anòxica en la qual s'acumulen compostos reduïts com ara l'amoni, el sulfhídric o el metà.

10.6.3. Embassaments

Al nostre país, els embassaments són els principals sistemes quasilacustres de grans dimensions, mentre que els estanys naturals són molt escassos. El paper com a interruptors del flux natural dels rius implica que siguin particularment sensi-

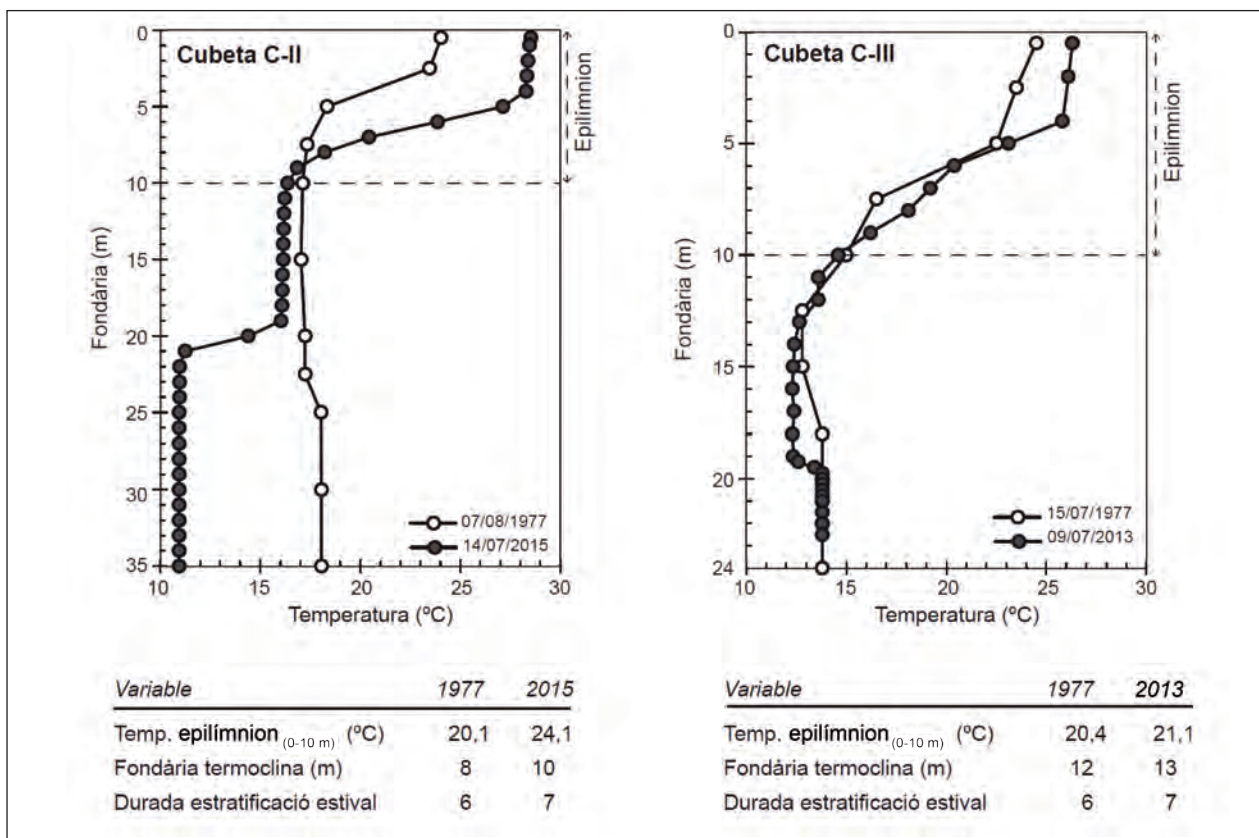


FIGURA 10.5. Comparació dels perfils verticals de temperatura a les cubetes C-II i C-III de l'estany de Banyoles als estius de 1977 i 2015 (C-II), i 1977 i 2013 (C-III), respectivament.

Font: Estació Meteorològica de l'Estartit i de Torroella de Montgrí (<http://meteolestartit.cat/banyoles>); Abellà (1980), i Borrego (dades no publicades). Es mostren, també, algunes de les variables de resposta recomanades com a indicadors del canvi climàtic (Adrian *et al.*, 2009).

bles a qualsevol alteració hidrològica o als canvis d'usos del sòl aigües amunt, com ho va reconèixer el darrer informe de l'IPCC, citant un estudi sobre l'embassament de Sau com a exemple de detecció i atribució dels impactes del canvi climàtic en la qualitat de l'aigua als ecosistemes aquàtics continentals (Marcé *et al.*, 2010; Jiménez Cisneros *et al.*, 2014).

L'augment de la temperatura de l'aire podria afectar l'estratificació tèrmica dels embassaments. La possible tendència entre els patrons d'estratificació tèrmica i les variacions de temperatura és modulada per la gestió hidrològica que l'home en fa. Els gestors humans dels embassaments extreuen aigua de diferents fondàries segons l'època de l'any, fet que determina canvis en la fondària i l'estabilitat de la termoclina (Moreno-Ostos *et al.*, 2008). Com que la fondària d'extracció és variable tant al llarg de les estacions com al llarg dels anys (a causa de possibles variacions en els criteris de gestió dels volums embassats), qualsevol impacte per canvis de temperatura en l'estratificació queda difuminat per la gestió antròpica. Aquest efecte és probablement més petit en embassaments molt reduïts, amb pocs canvis de nivell i gestió pràcticament inexistent (com, per exemple, l'embassament de

Foix), que poden respondre d'una manera similar a l'esperada als estanys (amb un augment de l'estabilitat de la termoclina i un allargament del període d'estratificació).

L'impacte de l'aigua circulant i entrant des dels rius en la qualitat de l'aigua als embassaments és evident. A l'embassament de Sau s'ha comprovat que el cabal fluvial té un paper fonamental en la generació de capes anòxiques en les capes profundes de l'embassament. Aquesta dinàmica defineix, en bona part, la qualitat de l'aigua a l'embassament (amb tensions baixes d'oxigen, presència de metalls solubles i altres substàncies reduïdes, càrrega interna de fòsfor, etc.). Breument: com menys cabal més desenvolupament de les capes anòxiques. A Sau s'ha detectat que el descens significatiu del cabal del riu Ter en els darrers quaranta anys ha afavorit la generació de capes anòxiques a l'embassament (Marcé *et al.*, 2010).

Es preveu que l'impacte del canvi climàtic en la qualitat de l'aigua als embassaments de Catalunya serà més gran per la molt probable disminució de cabals en un futur proper. La manca de dilució dels abocaments puntuals de matèria orgànica que arriben al riu des de les depuradores afectarà

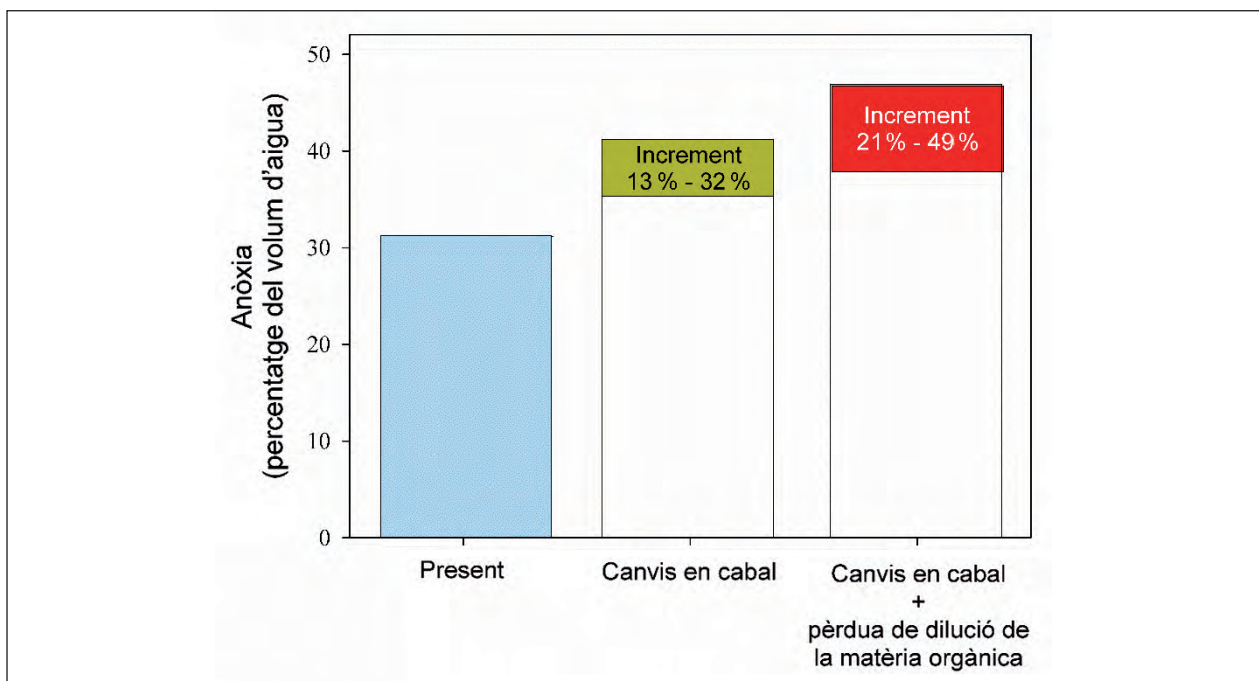


FIGURA 10.6. Canvis esperats en la quantitat d'aigua anòxica a l'embassament de Sau, tenint en compte els canvis esperats en el cabal del riu Ter per a un escenari d'augment de 2 °C de temperatura i l'efecte de la pèrdua de la capacitat de dilució de la matèria orgànica d'origen humà al mateix riu.

la qualitat de l'aigua dels embassaments i afavorirà el desenvolupament de capes anòxiques. Aquest efecte indirecte s'afegirà a l'efecte directe de la disminució dels cabals (figura 10.6).

10.7. Sospites i evidències del canvi climàtic a les llacunes i les aigües temporànies

10.7.1. Llacunes temporànies

La major part de les llacunes (o estanyols) temporànies s'omplen amb les pluges de tardor, si són prou importants, i després retenen l'aigua fins a la primavera, quan, si torna a ploure, fins i tot poden millorar el nivell hidrològic. De la primavera a l'estiu el nivell d'aigua descendeix ràpidament a causa de l'alta evaporació d'aquest període, i arriba a assecat-se totalment. Aquestes llacunes es coneixen com a *llacunes temporànies* i són abundants a les regions mediterrànies.

Les principals amenaces derivades del canvi climàtic per a les llacunes temporànies són degudes a canvis en el règim hídric, és a dir, canvis en la durada de la inundació, la freqüència de la dessecació i la predictibilitat dels moments d'inundació o d'assecatge, que depenen de la temperatura atmosfèrica i de la quantitat de precipitació. L'efecte del canvi climàtic en la temperatura atmosfèrica i la precipitació a Catalunya implicarà canvis en el règim hidrològic de les llacunes temporànies d'interior. Així, les pluges de tardor es preveu que siguin més minses (un 5 % menys per al decenni del 2012 al 2021 respecte de les que es van produir del 1971 al 2000), i les temperatures, més altes, de manera que l'evapotranspiració augmentarà i, per tant, el procés d'assecatge s'accelerarà. Conseqüentment, les llacunes patiran períodes de sequera més llargs, especialment les que presenten una hidrologia més dependent de les precipitacions. En un context d'escassetat hídrica també es pot esperar una explotació més gran dels aqüífers per part de l'home, que a la llarga farà disminuir la capacitat de recàrrega d'aigua de les llacunes per via subterrània. Tot plegat ocasiona la disminució de la durada i la freqüència dels períodes d'inundació, sobretot a les llacunes amb la hidrologia fortament vinculada a la dinàmica dels aqüífers. Així, doncs, llacunes que fins ara han estat permanents (han tingut aigua durant tot l'any) poden

esdevenir temporànies, i llacunes que actualment són temporànies poden desaparèixer o veure accentuat el caràcter efímer.

Els canvis en la hidrologia afectaran directament molts dels organismes aquàtics que habiten en aquestes llacunes, el desenvolupament larvari dels quals requereix un temps mínim en aigua. Per tant, la capacitat d'adaptació a situacions més temporànies i efímeres serà clau. Els organismes que podran sobreviure seran els que disposen d'estratègies vitals davant de la dessecació, mostren plasticitat fenotípica i/o tenen més capacitat de dispersió.

Entre les estratègies per a superar la fase eixuta hi ha l'existència d'estructures de resistència, sovint en forma d'ous, que s'acumulen al sediment i creen el que es coneix amb el nom de *banc d'ous*. Aquest banc d'ous, però, pot no ser suficient si l'escurçament de l'hidroperíode n'afecta directament l'eclosió o bé si, tot i poder eclosionar, no poden completar el cicle biològic i crear noves estructures de resistència abans que no s'assequi la llacuna. A la llarga, un potencial empobriment del banc d'ous posaria en perill la subsistència d'organismes que *a priori* semblaria que no s'haurien de veure afectats per un escurçament de l'hidroperíode. De fet, sense una plasticitat fenotípica elevada els organismes no podran sincronitzar l'època de reproducció amb el moment en què es produeixin les condicions ambientals òptimes per a assegurar la descendència. S'ha comprovat que espècies d'amfibis de llacunes temporànies presenten més plasticitat fenotípica que altres de llacunes permanents (Richter *et al.*, 2006), la qual cosa els permet adaptar el cicle vital a la impredictibilitat del medi. Ara bé, la plasticitat fenotípica té un límit, i quan el canvi ambiental és massa important pot ser insuficient per a permetre l'adaptació de l'organisme a les noves condicions. És en aquests casos que es comencen a percebre decalatges entre les condicions ambientals i els cicles biològics dels organismes que a la llarga poden comportar una pèrdua de biodiversitat. Per això és important considerar, també, la capacitat de dispersió a l'hora de valorar el possible impacte del canvi climàtic. Per exemple, els odonats presenten una capacitat de dispersió elevada; algunes espècies poden recórrer fins a 12 km al dia quan migren, tot i que en general les

distàncies varien entre 0,5 i 14 km l'any (Bush *et al.*, 2014). Per tant, la capacitat de dispersió és essencial per a assegurar la supervivència de les poblacions quan, a causa dels canvis hidrològics esperats, algunes llacunes existents avui dia desapareguin.

Així, doncs, les espècies que no disposin d'estratègies per a passar la fase seca a la llacuna, que mostrin una plasticitat fenotípica baixa o que tinguin menys capacitat de dispersió seran més susceptibles als canvis i poden arribar a desaparèixer, fet que comportaria l'empobriment de les comunitats biològiques. D'aquesta manera, llacunes amb hidroperíodes més curts i imprevisibles normalment van vinculades a comunitats aquàtiques amb menys riquesa d'espècies, menys presència de predadors i, en general, xarxes tròfiques més curtes.

10.7.2. Llacunes costaneres

S'ha detectat que l'increment del nivell del mar a la costa catalana és proper als 4 mm anuals i que va acompanyat d'un augment en la freqüència dels episodis de temporals de mar (Pascual *et al.*, 2012). Aquests canvis poden afectar la hidrologia de les llacunes costaneres, especialment les llacunes mesoeuhalines confinades, com ara les de l'Empordà i el Baix Ter, i les llacunes oligohalines no confinades, com ara les del delta de l'Ebre.

Les llacunes mesoeuhalines confinades ocupen depressions darrere el front dunar litoral i no disposen d'entrades més o menys continuades d'aigua dolça continental, de manera que la inundació depèn essencialment del mar. La hidrologia és determinada pel patró d'inundació i confinament: inundacions intenses i sobtades per temporals de mar, seguides de llargs períodes de confinament, durant els quals el nivell de l'aigua baixa progressivament (sovint fins a la dessecació a l'estiu) i la salinitat i el contingut de matèria orgànica augmenten. Aquest patró hidrològic influeix en la dinàmica dels nutrients, molt més influenciada per processos endògens que no pas per les entrades a través de les aigües d'aportació. La pujada del nivell del mar podria compensar la possible disminució de l'entrada d'aigua dolça i ocasionar llacunes de volum similar, però amb més salinitat. Aquestes fluctuacions en la salinitat

no comporten cap problema per als organismes que colonitzen aquestes aigües, ja que es tracta d'espècies eurihalines i euritermes, molt ben adaptades als canvis de temperatura i de salinitat tan característics d'aquests ecosistemes (Quintana *et al.*, 1998). L'augment en la irregularitat de les entrades d'aigua tampoc no sembla que hagi de ser un inconvenient, atès que accentuaria la dinàmica d'inundació i confinament, a la qual tota la comunitat aquàtica està molt ben adaptada. El principal risc per als sistemes costaners confinats deriva de la possibilitat de retrocés, i fins i tot de desaparició, si l'increment del nivell del mar segueix aquesta tendència.

Dos aspectes relacionats amb l'activitat humana poden magnificar el retrocés de les llacunes confinades. D'una banda, la major part han desaparegut durant els darrers decennis, ja que han estat substituïdes per urbanitzacions, càmpings i altres equipaments vinculats a l'activitat turística. Eren molt més abundants a mitjan segle passat, però actualment només en queden vestigis, sovint força degradats en una costa catalana majorment urbanitzada. D'altra banda, infraestructures com ara motes, esculleres i carreteres sovint delimiten d'una manera contundent els límits de la zona inundable. En absència d'aquestes barreres artificials, els sistemes aquàtics costaners podrien compensar l'increment gradual del nivell del mar amb un retrocés, també gradual, cap a l'interior. Però succeeix tot el contrari: la presència de barreres físiques limita dràsticament aquest esponjament (figura 10.7).

Una problemàtica molt diferent és la que es produeix a les llacunes oligohalines no confinades. En aquest cas, la circulació més o menys continuada d'aigua dolça, superficial o subterrània, trenca el patró de confinament tan característic de les llacunes confinades. A les llacunes oligohalines les previsions de canvis en la intensitat i la irregularitat de les precipitacions poden comportar un augment progressiu de la salinitat, i això sí que pot causar canvis en l'estructura de la comunitat aquàtica, atès que les espècies que colonitzen aquestes aigües toleren menys les fluctuacions de salinitat i necessiten una certa circulació d'aigua dolça. La dinàmica de nutrients en aquestes llacunes no depèn tant de processos endògens, sinó bàsicament

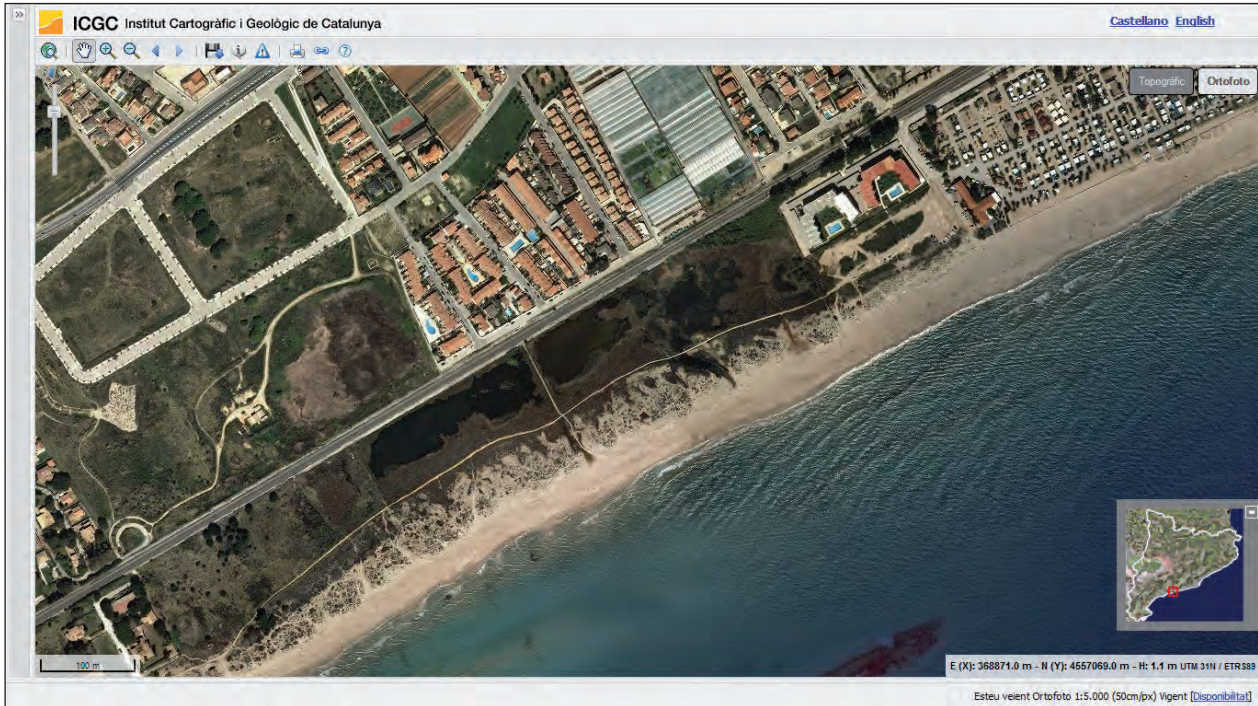


FIGURA 10.7. Ortofotomapa dels Muntanyans de Torredembarra, on el pas de la via del tren limita la capacitat d'esponjament i de desplaçament cap a l'interior dels aiguamolls com a resposta a una possible pujada del nivell del mar.

Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

de les càrregues de nutrients que entren amb les aigües. Es tracta, doncs, d'ecosistemes molt sensibles a la contaminació difusa originada a la conca de recepció.

En aquestes llacunes, el flux d'aigua dolça sempre és condicionat pels usos humans, bé per la captació d'aigua de consum, bé per l'escorrentia d'aigües de regadiu (figura 10.8). L'explotació dels aqüífers litorals fa disminuir el nivell freàtic i afavoreix la salinització de l'aqüífer, però també és freqüent que el cabal que els arriba depengui més de les necessitats d'aigua per al regadiu que del règim de precipitacions. A les llacunes del delta de l'Ebre, el patró de circulació d'aigua depèn del conreu de l'arròs, fet que causa una circulació d'aigua dolça i una taxa de renovació màxima a l'estiu (Comín *et al.*, 1993). A les llacunes oligohalines del Baix Ter, els màxims de circulació d'aigua coincideixen amb les necessitats de regadiu. El control del cabal en les aigües dolces també influeix sobre el cabal sòlid, i d'una manera notable sobre la dinàmica hidromorfològica del sistema litoral, com posa de manifest la influència dels embassaments sobre el transport de sediments al riu i la dinàmica mor-

fològica del delta de l'Ebre consegüent (Ibáñez *et al.*, 1996; Tena *et al.*, 2013).

10.8. Possibles sinergies del canvi climàtic amb altres impactes antròpics

Tant els canvis en el clima com les empremtes derivades directament de l'activitat humana són part de l'anomenat *canvi global*. Moltes de les perturbacions que acompanyen aquest canvi global són de tal intensitat que no poden ser assumides per la biota. Quan les accions del canvi climàtic es conjuguen o coincideixen amb les produïdes per l'activitat humana directa, els impactes es multipliquen i la predicció es complica.

Els fenòmens climàtics produeixen impactes importants als sistemes aquàtics continentals. Com a exemple, tenim els observats al riu Llobregat a partir de dipòsits paleosedimentaris. S'ha pogut saber que l'avinguda més gran de les enregistrades en temps moderns a l'altura de Pont de Vilomara (1971; $2.300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) fou excedida en cinc ocasions al llarg dels darrers 2.700 anys, amb descàrregues entre 3.700 i $4.300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Thorndycraft *et al.*, 2005). Per tal d'imaginar el possible efecte

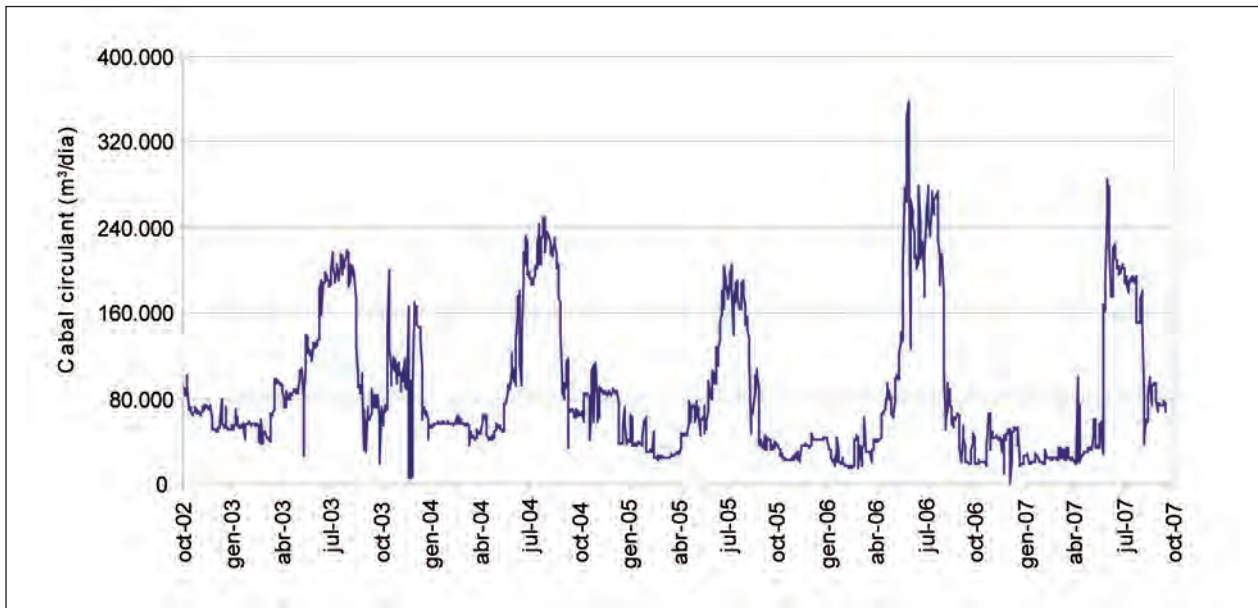


FIGURA 10.8. Evolució dels cabals circulants pel rec de Sentmenat (Baix Ter), on s'observa un cicle hidrològic invertit, amb màxims que coincideixen amb l'època estival i mínims que coincideixen amb el període de regadiu, a l'hivern i a la primavera.

Font: Montaner (2010).

sobre l'estructura física del riu i sobre la biota, es pot comparar aquest valor amb el cabal mitjà que transporta el riu, que és de $21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Aquest increment sobtat d'energia causat per riuades grans encara és molt més elevat en el cas dels rius que encara tenen un caràcter més mediterrani i torrencial, com ara els rius que drenen les serralades costeres i les rieres litorals.

Aquestes perturbacions naturals extraordinàries dissipen una quantitat enorme d'energia d'una manera puntual, molta més de la que es produeix per la mà de l'home, la qual, en canvi, té una perdurabilitat alta i efectes extensius i crònics sobre els ecosistemes. És el cas de les canalitzacions, l'assecament de zones humides o la contaminació crònica, entre moltes d'altres, que afecten la biodiversitat i el funcionament dels sistemes aquàtics continentals en diferents graus. Aquestes perturbacions extensives i persistents es combinen amb les climàtiques, i comporten que els ecosistemes «emmalalteixin» i esdevinguin molt més vulnerables.

L'alteració principal que pateixen els sistemes aquàtics continentals va lligada al cicle hidrològic. Del flux d'aigua que circula a escala global pels continents (aproximadament, uns $40.000 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$) un 15 % és retingut en 45.000 grans embassa-

ments i retirat per a la irrigació, l'aigua potable, les activitats industrials i el transvasament entre conques. El resultat d'aquestes manipulacions i de l'ús subsegüent d'aquests cabals és que fins a un 52 % de la superfície ocupada pels grans rius mundials és fortament modificat per canals i preses. Com és obvi històricament, Europa és el continent amb la proporció més gran de segments de riu regulats, i la conca mediterrània n'és una de les més afectades. En molts casos, és habitual que els rius arribin exhausts al mar, la qual cosa evidencia la intercepció dels cabals que s'hi produeix. A Catalunya, la fracció retinguda per l'home a les conques internes és del 36,4 %, i baixa lleugerament al 30 % si incorporem el Segre en el còmput. Això representa que més d'un terç de l'aigua que es renova cada any a Catalunya per raó del cicle hidrològic és interceptada i derivada per a ser utilitzada per a la irrigació o com a aigua potable. Es tracta d'un impacte extraordinari derivat de l'acció humana directa que afavoreix moltes de les alteracions que pateixen els sistemes aquàtics continentals.

L'excés de nutrients, l'arribada de materials contaminants orgànics i l'aparició d'espècies invasores no tenen origen climàtic, sinó directament humà, i contribueixen a incrementar l'estrès dels ecosistemes aquàtics. Aquests efectes es combinen amb

l'estrès hidrològic que descrivíem i en resulten ecosistemes que funcionen amb comunitats empobrides en espècies, on només podran sobreviure les més adaptades, que sovint són les oportunistes o, fins i tot, exòtiques.

El resultat del canvi global, incloent-hi el climàtic, als sistemes aquàtics continentals és extensiu i els situa en una posició al límit de la capacitat de càrrega, és a dir, que excedeix la capacitat natural de recuperació. Per tant, funcionen més malament i esdevenen més fràgils.

Els sistemes estan molt afectats, però també ho estan els beneficis que com a societat en traiem. Els ecosistemes aquàtics continentals proporcionen serveis com ara la depuració de les aigües, el control de les avingudes i el control dels gasos amb efecte d'hivernacle. Quan l'ecosistema es troba en una situació d'estrès, el funcionament i la qualitat dels serveis que proporciona empitjoren. A tall d'exemple, un riu contaminat i que duu poca aigua (per tant, amb una concentració alta de materials dissolts) se satura, i l'eficiència en la captació de nutrients o de contaminants orgànics disminueix. En un riu contaminat, a més, les diferències en l'oxigen dissolt entre el dia i la nit són grans, i màximes a temperatures elevades i a cabals baixos, de manera que els peixos i els altres organismes sensibles a aquestes oscil·lacions responen desplaçant-se a un lloc més favorable o, simplement, desapareixent.

Aquesta situació no solament empobreix els ecosistemes, sinó que, a més, és costosa per diverses raons. Primer, perquè ens obliga a recuperar els sistemes invertint recursos econòmics en la restauració. Després, perquè el fet de no poder utilitzar els beneficis directes que proporcionen comporta haver-los de suplir amb una tecnologia energèticament cara. I sobretot, perquè col·loca els nostres ecosistemes en una situació que no hauríem de llegar a les generacions que ens segueixen.

10.9. Conclusions

Separar els efectes del canvi climàtic de les altres alteracions humanes és difícil en un medi com el nostre, en el qual les influències humanes han estat tan esteses i constants des de fa segles. Pel que fa als receptors d'aquestes influències, les

comunitats aquàtiques, els arriba una successió i miscel·lània de pressions que posen en risc el funcionament dels ecosistemes. És obvi que les aigües continentals es troben en una situació de risc, i, per tant, també s'hi troben la biodiversitat, el funcionament i els serveis que ens proporcionen. Les implicacions del canvi climàtic i de les pressions humanes directes afecten tant els recursos (cada cop més minvats i de menys qualitat) com la biodiversitat (decreixent i més trivial). Els ecosistemes cada cop estan sotmesos a més pressions, i la capacitat d'aportar serveis (serveis ecosistèmics) decreix qualitativament. Aquestes són les conseqüències de l'anomenat *canvi global*, que inclou tant els efectes del canvi climàtic com les alteracions que l'home efectua a diferents escales.

No obstant això, la biota dels ecosistemes aquàtics continentals ha evolucionat sota el caràcter efímer i fluctuant, a escala temporal geològica, en comparació amb els sistemes marins. Per això els organismes tenen una plasticitat fenotípica elevada per a sobreviure a l'eixutesa, trets biològics per a adaptar-se a les fluctuacions ambientals tèrmiques i de salinitat, una resistència i una resiliència elevades davant les pertorbacions i una gran capacitat de dispersió i colonitzadora de nous ambients aquàtics. Tot i això, cal mitigar, en la mesura que sigui possible, els efectes del canvi climàtic en els ecosistemes aquàtics continentals.

10.10. Recomanacions

La mitigació dels efectes del canvi climàtic comporta disminuir tant com sigui possible els efectes associats al canvi global. Aquestes mesures es poden concretar en les següents:

- Cal un monitoratge més precís dels ecosistemes aquàtics continentals i un seguiment de les espècies més amenaçades pel canvi climàtic. Cal potenciar el coneixement de la resposta de les espècies al canvi climàtic, les quals actuen com a sentinel·les del canvi, i el seguiment a llarg termini d'ecosistemes clau. El seguiment correcte d'uns i altres permetrà extrapolar les possibles conseqüències del canvi climàtic. Les xarxes de seguiment actuals, pensades especialment per a la qualitat química de les aigües, són insuficients per a detectar els canvis en ecosistemes sensibles. Molts d'aquests, com ara els estanys d'alta

mntanya o les llacunes costaneres, no semblen sotmesos a perills immediats, però ho estan a d'altres que actuen a llarg termini, com ara el canvi climàtic. Per tant, les xarxes de seguiment han d'incorporar aquests sistemes fent servir indicadors adequats que permetin definir els impactes acuradament.

- Cal preservar especialment les capçaleres dels rius, origen múltiple del complex sistema de drenatge que caracteritza els sistemes fluvials. Salvaguardar les capçaleres és salvaguardar els rius. Les capçaleres poden esdevenir intermitents fàcilment, i la vegetació de ribera dels ecosistemes de ribera associats és susceptible de desaparèixer. Mitigar els impactes sobre els rius implica disminuir tant com sigui possible els usos del territori que siguin lesius a les capçaleres o que les puguin afectar directament (com ara la simplificació de la llera, l'eliminació del bosc de ribera i l'arribada de purins o de fertilitzants).
- En el cas dels ecosistemes costaners, recuperar, almenys allà on encara sigui possible, la capacitat d'esponjament i dotar el sistema costaner de l'amplada suficient per a adequar-se als futurs canvis en el nivell del mar ha de ser una prioritat. Als sistemes costaners no confinats, controlar i revertir les disfuncions en els usos de l'aigua a la conca és prioritari per a garantir la funcionalitat ecològica dels sistemes aquàtics costaners. Reforçar les infraestructures costaneres per tal de defensar-nos de la possible pujada del nivell del mar pot afectar, secundàriament, aquests sistemes tan delicats. Caldrà posar l'èmfasi a resoldre la causa dels problemes, i no tant a resoldre'n les conseqüències. No ens podem permetre, en un país sotmès a una pressió turística i demogràfica formidable, malmetre ni un més d'aquests sistemes.
- En el cas de les llacunes temporànies d'interior, el règim hidrològic no solament és clau per a preservar la singularitat de la flora i la fauna, sinó també per a preservar-ne la funcionalitat. Cal evitar, doncs, possibles modificacions justificades per les necessitats creixents d'aigua de la població, ja sigui utilitzant aquestes llacunes per a emmagatzemar aigua d'una manera permanent o bé extraient-ne la que, d'una manera natural, s'hi acumula.

- Cal desenvolupar estratègies per tal d'evitar la proliferació d'espècies invasores i el declivi de les espècies natives amenaçades, tenint cura especial de la connectivitat fluvial i de la qualitat de l'entorn lacustre. Evitar l'establiment de les espècies invasores comporta, forçosament, mantenir la qualitat de l'hàbitat i de l'aigua dels sistemes aquàtics.
- La conjunció del canvi climàtic i altres elements globals a Catalunya pot fer més difícil el compliment de directives (com ara la Directiva marc de l'aigua, la Directiva de zones vulnerables als nitrats, la Directiva d'hàbitats o la Directiva d'inundacions) que cal complir obligatòriament. Aquestes directives, en molts casos dissenyades per a altres ambients i climes que no són mediterranis, no han estat pensades per a situacions d'estrès derivades de l'agreuiment del canvi climàtic i global. Mantenir el nivell de qualitat a què obliguen aquestes directives ambientals ens ha de dur a anticipar aquestes situacions legislativament i a generar un diàleg més fluid entre la recerca i la gestió dels sistemes aquàtics continentals. Això hauria d'anar paral·lel a una planificació curosa del territori, que preservés els sistemes sensibles com ara els estanys d'alta muntanya, els sistemes càrstics, les àrees costaneres o les capçaleres fluvials, per tal d'amosir els impactes al territori.

Referències bibliogràfiques

- ABELLÀ, C. (1980). *Dinàmica poblacional comparada de bacterias fotosintéticas planctónicas*. Tesi (doctorat). Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- ACA = AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA (ed.) (2009). *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya* [en línia]. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua <http://www.gencat.cat/mediamb/publicacions/monografies/aigua_canvi_climatic.pdf> [Consulta: 22 gener 2016].
- ACUÑA, V.; TOCKNER, K. (2010). «The effects of alterations in temperature and flow regime on organic carbon dynamics in Mediterranean river networks». *Global Change Biology*, 16, p. 2638-2650.

- ADRIAN, R.; O'REILLY, C. M.; ZAGARESE, H. [et al.] (2009). «Lakes as sentinels of climate change». *Limnology and Oceanography*, 54, p. 2283-2297.
- ARRHENIUS, S. (1915). *Quantitative laws in biological Chemistry*. Londres: Bell.
- BARRERA-ESCODA, A.; LLASAT, M. C. (2015). «Evolving flood patterns in a Mediterranean region (1301-2012) and climatic factors: The case of Catalonia». *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, p. 465-483.
- BUENDÍA, C.; BATALLA, R. J.; SABATER, S. [et al.] (2015). «Runoff trends driven by climate and afforestation in a Pyrenean basin». *Land Degradation and Development*. DOI: 10.1002/ldr.2384.
- BUSH, A. A.; NIPPERESS, D. A.; DUURSMA, D. E. [et al.] (2014). «Continental-scale assessment of risk to the Australian odonata from climate change». *Plos One*, 9, p. e88958.
- CATALAN, J.; BARBIERI, M. G.; BARTUMEUS, F. [et al.] (2009). «Ecological thresholds in European alpine lakes». *Freshwater Biology*, 54, p. 2494-2517.
- CATALAN, J.; PLA, S.; RIERADEVALL, M. [et al.] (2002). «Lake Redo ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century». *Journal of Paleolimnology*, 28, p. 129-145.
- COMÍN, F. A.; VALIELA, I. (1993). «On the controls of phytoplankton abundance and production in coastal lagoons». *Journal of Coastal Research*, 9(4), p. 895-906.
- FILIPE, A. F.; LAWRENCE, J. E.; BONADA, N. (2013). «Vulnerability of stream biota to climate change in Mediterranean climate regions: A synthesis of ecological responses and conservation challenges». *Hydrobiologia*, 719, p. 331-351.
- IBÁÑEZ C.; PRAT, N.; CANICIO, A. (1996). «Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary». *Regulated Rivers: Research and Management*, 12(1), p. 51-62.
- JIMÉNEZ CISNEROS, B. E.; OKI, T.; ARNELL, N. W. [et al.] (2014). «Freshwater resources». A: IPCC = INTER-GOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. Edició de C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press, p. 229-269. També disponible a: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap3_FINAL.pdf> [Consulta: 22 gener 2016].
- MARCÉ, R.; RODRÍGUEZ-ARIAS, M. A.; GARCÍA, J. C. [et al.] (2010). «El Niño-Southern Oscillation and climate trends impact reservoir water quality». *Global Change Biology*, 16, p. 2857-2865.
- MAS-MARTÍ, E.; GARCÍA-BERTHOUS, E.; SABATER, S. [et al.] (2010). «Comparing fish assemblages and trophic ecology of permanent and intermittent reaches in a Mediterranean stream». *Hydrobiologia*, 657, p. 167-180.
- MONTANER, J. (ed.) (2010). *El flux hidrològic de la plana litoral del Baix Ter: Evolució fluvial, caracterització hidrològica i pautes de gestió*. Torroella de Montgrí: Càtedra d'Ecosistemes Litorals Mediterranis.
- MORENO-OSTOS, E.; MARCÉ, R.; ORDÓNEZ, J. [et al.] (2008). «Hydraulic management drives heat budgets and temperature trends in a Mediterranean reservoir». *International Review of Hydrobiology*, 93, p. 131-147.
- PASCUAL, J.; BENSOUSSAN, N.; SALAT, J. [et al.] (2012). «Clima i règim tèrmic de les aigües de les illes Medes i el Montgrí». A: HEREU, B.; QUITANA, X. (ed.). *El fons marí de les illes Medes i el Montgrí: quatre dècades de recerca per a la conservació*. Torroella de Montgrí: Càtedra d'Ecosistemes Litorals Mediterranis, p. 63-78.
- QUINTANA, X. D.; COMIN, F. A.; MORENO-AMICH, R. (1998). «Nutrient and plankton dynamics in a Mediterranean salt marsh dominated by incidents of flooding. Part 2: Response of the zooplankton community to disturbances». *Journal of Plankton Research*, 20, p. 2109-2127.
- RICHTER-BOIX, A.; LLORENTE, G. A.; MONTORI, A. (2006). «A comparative analysis of the adaptive developmental plasticity hypothesis in six Mediterranean anuran species along a pond permanency gradient». *Evolutionary Ecology Research*, 8, p. 1139-1154.
- TENA, A.; BATALLA, R. J. (2013). «The sediment budget of a large river regulated by dams (Ebro, NE

Spain)». *Journal of Soils and Sediments*, 13(5), p. 966-980.

THORNDYCRAFT, V. R.; BENITO, G.; RICO, M. [et al.] (2005). «Long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain». *Journal of Hydrology*, 313(1-2), p. 16-31.

VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S. [et al.] (2014). «Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in Southern Europe». *Environmental Research Letter*, 9, p. 044001.