

Estanys d'alta muntanya

testimonis dels canvis ambientals

La major part dels estanys d'alta muntanya es van originar durant la darrera glaciació per l'acció del gel; per tant, són relativament joves. Malgrat que sembla que tenen un paper marginal en el sistema terrestre, són particularment adequats per a estudis ambientals i ecològics. La situació dels estanys determina un gran nombre de condicions ambientals que tradicionalment s'han considerat extremes per a la vida. La sensibilitat d'aquests ecosistemes a influències externes, combinada amb la distància respecte de zones d'alta activitat humana, genera uns ecosistemes excel·lents com a sentinelles i enregistradors dels canvis ambientals del passat i actuals.

Parc Nacional
d'Aigüestortes.

Preparació del
material necessari
per mostrejar la
vora de l'estany.

Escrit per

Mireia Bartrons

Centre d'Estudis Avançats de Blanes (CEAB-CSIC)

Alteracions antròpiques directes recents als estanys

Malgrat que són ecosistemes remots, els estanys d'alta muntanya han estat afectats per alteracions antròpiques directes. Històricament, la desforestació i l'erosió relacionades amb la pastura van ser relativament modestes, excepte en els estanys més baixos, situats per sota del límit del bosc. En temps recents, les alteracions directes estan relacionades amb explotacions hidroelèctriques (Catalan *et al.*, 1997) i introduccions de peixos (Miró i Ventura, 2004). Canvis abruptes en el nivell de l'aigua dels estanys, com a resultat de la construcció de preses, poden afectar tota la biota del litoral i, en particular, la supervivència de les poblacions de macròfits (Gacia i Ballesteros, 1996). La introducció de peixos pot afectar, i fins i tot suprimir, algunes espècies típiques d'aquests indrets, ja que s'estableix com a depredador superior. L'existència de forts pendents o de trams de rius subterranis a la sortida de la major part d'estanys dificulta l'arribada de peixos de manera natural. Per això, en la major part d'aquests ecosistemes la presència actual tan sols es pot atribuir a la introducció artificial.

Transport de contaminants a llarga distància i toxificació de la natura

La nostra societat té la tendència d'anar augmentant l'ús de recursos naturals i l'alliberament de deixalles. Avui, a part dels problemes que comporten l'eutrofització i l'acidificació, bàsicament produïts per residus naturals, hi ha un augment de contaminants nous a causa de la industrialització, que també va comportar una revolució en la química orgànica, que deixa la natura globalment intoxicada. Els ecosistemes remots són indrets apropiats per estudiar la magnitud i les conseqüències eventuais d'aquesta propagació de tòxics persistents. En aquest sentit, els estanys d'alta muntanya d'Europa s'han estudiat amb relació als agents d'acidificació, els metalls pesants i els contaminants orgànics persistents.

Contaminació atmosfèrica per metalls pesants

Els primers contaminants amb capacitat de ser transportats a llargues distàncies des de la font van ser els

metalls pesants. El terme *metall pesant* s'utilitza en sentit ampli quan es parla en termes ambientals; també inclou metal·loides com l'arsènic (As) i el seleni (Se). La dispersió de metalls pesants al medi va despertar l'interès particularment per les grans quantitats de plom (Pb) emeses per la combustió interna de benzina amb plom. Tot i així, l'estudi de testimonis ha demostrat que el transport de metalls a llarga distància és un fenomen molt antic. Pel que fa als Pirineus, els sediments lacustres presenten contaminació per metalls pesants provinents de la mineria i la foneria des del temps dels romans (Camarero *et al.*, 1998).

La comparació de les concentracions de metalls pesants en sediments contemporanis i preindustrials de testimonis d'un gran nombre d'estanys dels Pirineus, permet definir l'estat actual de contaminació regional (Camarero, 2003). L'anàlisi mostra que la concentració traça de metalls i metal·loides és significativament alta en els sediments moderns d'aquests estanys pirinencs relativament remots i prístins; són valors comparables als trobats en sediments moderadament contaminats. L'arsènic presenta concentracions remarcablement altes als Pirineus de manera natural. Els processos sedimentaris d'aquests estanys, ateses les característiques particulars (taxes baixes de sedimentació, alt contingut orgànic, partícules de mida petita), tendeixen a concentrar els metalls en els sediments, de què resulta un enriquiment natural en comparació amb les roques mare. A més a més, cal afegir-hi el fenomen de la contaminació atmosfèrica, que fa que les concentracions de metalls pesants siguin més altes en els sediments contemporanis. Les correlacions entre concentracions de metalls pesants en sediments superficials són més altes que entre sediments preindustrials, fet que posa en evidència l'origen comú com a contaminants contemporanis.

Acidificació

La major part dels estanys dels Pirineus són sensibles a l'acidificació perquè es troben en substrats de roca cristal·lina de baixa solubilitat i tenen aigües amb baixa capacitat de tamponament d'àcids. De totes maneres, la deposició

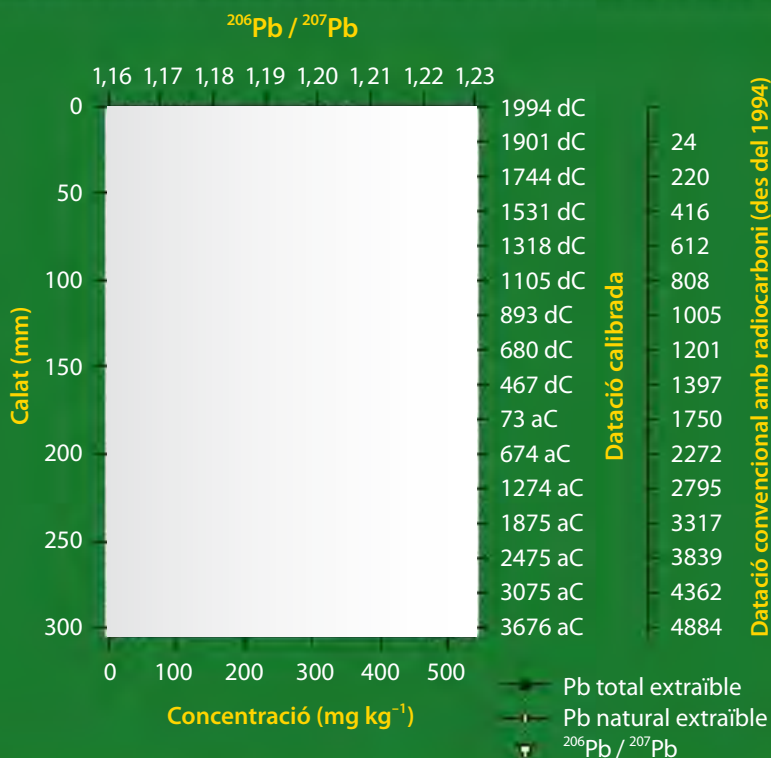


Figura 1. Plom total extraïble i plom originat a la conca (estimat a partir de les concentracions d'alumini), i quocient ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb amb relació a escales de temps i profunditat en el sediment per a l'estany Redon (adaptat de Camarero et al., 1998). ▲

atmosfèrica als Pirineus no té, en general, un caràcter especialment àcid. Tot i que els nivells dels contaminants àcids NO₃⁻ i SO₄²⁻ estan en el mateix marge que els d'altres regions muntanyoses europees que reben més precipitació àcida, la deposició de cations als Pirineus és més alta i les contribucions àcides queden neutralitzades (Camarero i Catalan, 1998). Les masses

d'aire humit que originen precipitacions sobre els Pirineus centrals arriben en quantitats similars des de dues direccions principals: nord-oest (Atlàntic) i sud-est (Mediterrani). La precipitació que prové del Mediterrani tendeix a ser més rica en cations; en canvi, la que prové de l'Atlàntic té més influència marina, per la qual cosa porta més compostos àcids

de sofre i nitrogen (Camarero i Catalan, 1998). Així doncs, la pols que prové de la península Ibèrica i del Sàhara és una font important de cations per als Pirineus, que neutralitza l'efecte àcid dels contaminants emesos. Com que la mitjana de la precipitació no és àcida, els estanyes dels Pirineus no presenten símptomes de danys causats per l'acidificació (Catalan et al., 1998). Tot i així, malgrat les entrades de cations, l'acidificació química resultant de la contaminació sembla que sí que s'ha dut a terme. Entre el 15 % i el 20 % dels estanyes dels Pirineus (aquells amb pH entre 5,5 i 6,5, i alcalinitat menor de 30 µeq L⁻¹) són molt sensibles a l'acidificació. El model d'alcalinitat regional dels estanyes, que té en compte els canvis estimats de càrrega àcida en el temps, indica una disminució mitjana de l'alcalinitat de 35 µeq L⁻¹ des del 1900 fins al 1987 (Camarero i Catalan, 1998). Tot i que aquest fenomen ha tingut molt poc efecte pel que fa a l'acidificació real dels estanyes, la capacitat amortidora dels sòls (i.e., el reservori de cations intercanviables) s'ha reduït significativament, s'ha reobert lentament i s'ha accentuat la sensibilitat de les conques. Actualment, als Pirineus, i malgrat la reducció de les emissions d'òxids de sofre a l'atmosfera, la deposició àcida encara excedeix la càrrega crítica en prop del 10 % - 12 % dels estanyes. La deposició de nitrogen és més important que la de sofre en la major part d'indrets a l'hora de crear excedents, fet que remarca la necessitat d'incorporar els processos del nitrogen en els models de càrregues crítiques d'aquesta regió. Altres processos, com per exemple les taxes de meteorització accelerades per l'escalfament climàtic (Camarero et al., 2004), també poden afectar el balanç àcid-base als estanyes dels Pirineus.

Compostos orgànics persistents

Les concentracions ambientals totals d'hidrocarburs aromàtics polícíclics (PAH) van augmentar bastant al segle XX com a resultat d'un increment general dels processos de combustió. Aquests compostos i els metabòlits s'han estudiat àmpliament per les propietats carcinogèniques i mutàgenes que tenen. S'han trobat concentracions importants d'aquests contaminants en sediments,



En tota la vora de l'estany en colpegen repetidament les roques (*kicking*) per tal de poder capturar els macroinvertebrats que l'habiten.

Estany Baciver (Pallars Sobirà).

aigua i aire de zones d'alta muntanya (Fernández *et al.*, 2006). El transport de PAH a àrees remotes depèn de la deposició de partícules i, per això, és sotmès a les variacions climàtiques. Mentre que el peix té funcions mixtes del sistema oxidant, que metabolitzen ràpidament els PAH, aquests enzims estan molt poc desenvolupats en alguns invertebrats i, com a conseqüència, aquests presenten una taxa menor de degradació de PAH. Per això, les concentracions baixes de PAH en els peixos no indiquen necessàriament que no estiguin rebent fluxos significatius de contaminants ni que estiguin lliures d'estress.

Per primer cop en la història de l'evolució de les espècies, els organismes estan sotmesos a dosis baixes d'un còctel complex de substàncies tòxiques, la major part de les quals no existien anteriorment. La distribució i la bioconcentració d'aquestes substàncies no és uniforme, perquè són emeses des de punts diferents i perquè la facilitat de transport, acumulació i destrucció també varia entre si. En l'última dècada, s'ha observat que alguns contaminants orgànics, com ara els compostos organoclorats semivolàtils (OC), es transfereixen des de zones temperades, on es produeixen i s'utilitzen, a punts freds i distants, sense presentar una dilució significativa en com-

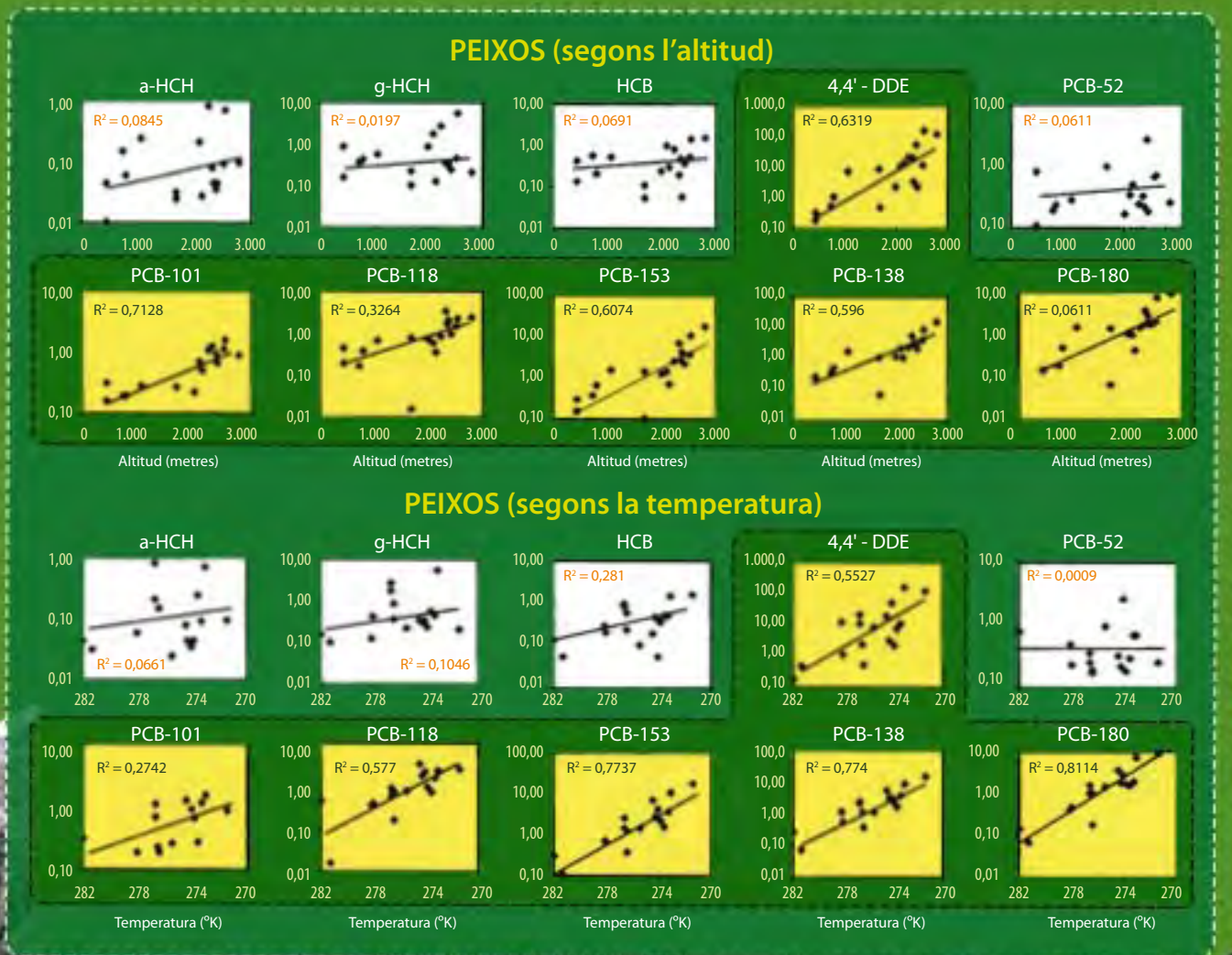
parar les zones d'arribada i d'acumulació. Els processos naturals de volatilització i absència mitjançant el transport atmosfèric fan que els OC s'acumulin en ecosistemes i organismes de latituds altes. En aquest context, s'ha demostrat que també hi ha una tendència a acumular aquests compostos en latituds altes a causa de la disminució corresponent de les temperatures (Grimalt *et al.*, 2001) (Fig. 2). Tot i això, no tots els organismes es comporten de la mateixa manera. Han observat que l'activitat metabòlica determina la bioacumulació de PCB en altura dels diferents organismes de la xarxa tròfica, o que la metamorfosi fa variar les concentracions d'OC i PBDE en insectes aquàtics (Bartrons *et al.*, 2007). Els patrons de deposició d'aquests compostos probablement estarà sota la influència del canvi climàtic en un futur immediat, ja que la retenció en zones d'acumulació d'aigua dolça després del transport atmosfèric depèn de les condicions climàtiques locals (Carrera *et al.*, 2009).



© Lluís Camarero

Determinació al laboratori de les espècies de macroinvertebrats capturades a l'estany mitjançant microscopis estereoscòpics.

Figura 2. Concentracions d'OC (ng g⁻¹ de pes humit) en peixos seleccionats respecte a l'altitud de l'estany i la temperatura. Els punts representen la mitjana de valors en individus analitzats particularment en cada estany (adaptat de Grimalt *et al.*, 2001) ▼



Canvi(s) climàtic(s)

Desenvolupament d'indicadors (proxys) nous

La recerca sobre canvis climàtics ha adquirit molta rellevància actualment en haver-se demostrat que les activitats humanes els poden induir o modificar. Es necessiten registres climàtics de temps molt llarg per valorar les fluctuacions climàtiques del passat. Per raons òbvies, els registres meteorològics són limitats en el temps, per això ha augmentat l'interès per desenvolupar tècniques que permetin reconstruir les fluctuacions climàtiques del passat amb molta resolució temporal. Durant les darreres dècades, la paleolimnologia ha estat molt utilitzada a l'hora de valorar i reconstruir de manera quantitativa problemes ambientals, mitjançant microfòssils (p. ex., diatomees, cladòcers i quironòmids) com a indicadors, d'algunes variables ambientals. Tot i que els canvis en les comunitats d'algues estan relativament lligats a canvis en algunes condicions limnològiques (p. ex., fòsfor [pH]), la traducció consegüent en informació climàtica és més difícil. Per exemple, les diatomees s'han utilitzat indirectament com a indicador climàtic per la resposta als canvis de conductivitat, en assumir que està relacionat, en últim terme, a canvis en el balanç entre la precipitació i l'evaporació. També els canvis de pH inferits a partir dels registres de la composició d'espècies de diatomees s'han relacionat amb

Estany Gelat de Comaloforno, Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici.

condicions climàtiques del passat. No hi ha un indicador ideal per a la reconstrucció climàtica, ja que cada indicador té avantatges i inconvenients. Propietats com la sensibilitat, la reproductibilitat, la disponibilitat local i la continuïtat a través del temps varien en cada indicador. Com a conseqüència, és bo utilitzar aproximacions diferents a l'hora de reconstruir el clima. Els crisòfits són un component clau en el fitoplàncton dels estanys oligotròfics temperats i de muntanya, on exhibeixen diferent estacionalitat, i són presents en un marge ampli de condicions ambientals. En el cicle vital presenten un estadi de pausa en què la cèl·lula queda dintre d'un embolcall de silici, anomenat *estomatocist* o, simplement, *cist*. Aquests cists són comuns en els sediments dels estanys de muntanya i la composició de les seves comunitats reflecteix l'ambient fisicoquímic adjacent. Les comunitats de cists de crisòfits als estanys d'alta muntanya sembla que estan relacionades amb els components climàtics d'hivern/primavera que determinen la durada de la coberta de gel. En aquest sentit, s'han utilitzat per reconstruir les fluctuacions d'aquest període de l'any al llarg de l'Holocè (Pla i Catalan, 2005). L'ús dels registres de cists de crisòfits en les reconstruccions climàtiques pot aportar un complement molt valuós als altres indicadors que estan més influenciats per l'estació més càlida, com és el cas de la vegetació terrestre.

Estany Redon (Vall d'Aran), l'estany més estudiat dels Pirineus.



© Miria Barrons

Canvi climàtic present

Actualment hi ha un coneixement molt més generalitzat de la importància del canvi climàtic actual en els ecosistemes aquàtics alpins (Bat-

Pesca de truites i de zooplàncton amb les barques.

© Miria Barrons



© Lluís Camarero

tarbee *et al.*, 2002). Tot i això, la interacció entre el clima i la dinàmica dels estanys és complexa, perquè aglutina molts processos que tenen lloc en els mateixos estanys o indirectament a la conca. En el cas dels Pirineus, s'ha investigat la resposta de l'ecosistema de l'estany Redon a les fluctuacions de la temperatura estacional de l'aire durant els dos últims segles (Catalan *et al.*, 2002). La tendència general d'augment de la temperatura mitjana anual que ha tingut lloc

als Pirineus centrals prové de l'augment de les temperatures de primavera i, sobretot, de les de tardor. S'ha observat una resposta directa i ràpida d'algunes espècies a aquestes tendències. Com més curta és la durada del cicle vital, més immediata és la resposta. Així algunes espècies petites de diatomees planctòniques segueixen estretament les fluctuacions de tardor. En canvi, organismes de cicle de vida més llarg tenen unes respostes més integrades a fluctuacions que duren alguns anys, com és el cas d'algunes espècies de quironòmids que responen de manera inversa a les fluctuacions de juny. Si s'extrapola aquests resultats a organismes de vida més llarga, s'ha d'assumir que els canvis de les poblacions com a resposta a canvis climàtics presents es detectaran amb dificultat en els estadis inicials, tret que s'entri en dinàmiques no lineals i apareguin canvis sobtats poc predictibles. Les respostes de comportament i fenologia poden donar millors aproximacions a curt termini. |

Referències bibliogràfiques

- BARTRONS, M.; GRIMALT, J. O.; CATALAN, J. (2007). «Concentration changes of organochlorine compounds and polybromodiphenyl ethers during metamorphosis of aquatic insects». *Environmental Science and Technology*, núm. 41, p. 6137-6141.
- BATTARBEE, R. W. [et al.] (2002). «Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years». *Journal of Paleolimnology*, núm. 28, p. 161-179.
- CAMARERO, L. (2003). «Spreading of trace metals and metalloids pollution in lake sediments over the Pyrenees». *Journal de Physique Iv*, núm. 107, p. 249-253.
- CAMARERO, L.; CATALAN, J. (1993). «Chemistry of bulk precipitation in the central and eastern Pyrenees, northeast Spain». *Atmospheric Environment*, núm. 27, p. 83-94.
- (1998). «A simple model of regional acidification for high mountain lakes: Application to the Pyrenean lakes (North-East Spain)». *Water Research*, núm. 32, p. 1126-1136.
- CAMARERO, L. [et al.] (1998). «Historical variations in lead fluxes in the Pyrenees (northeast Spain) from a dated lake sediment core». *Water Air and Soil Pollution*, núm. 105, p. 439-449.
- CAMARERO, L. [et al.] (2004). «Application of MAGIC to lake Redo (Central Pyrenees): an assessment of the effects of possible climate driven changes in atmospheric precipitation, base cation deposition, and weathering rates on lake chemistry». *Journal of Limnology*, núm. 63, p. 123-132.
- CARRERA, G. [et al.] (2002). «Atmospheric deposition of organochlorine compounds to remote high mountain lakes of Europe». *Environmental Science and Technology*, núm. 36, p. 2581-2588.
- CATALAN, J. [et al.] (1993). «Chemical composition of disturbed and undisturbed high-mountain lakes in the Pyrenees: a reference for acidified sites». *Water Research*, núm. 27, p. 133-141.
- CATALAN, J. [et al.] (2002). «Lake Redó ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century». *Journal of Paleolimnology*, núm. 28, p. 129-145.
- CATALAN, J. [et al.] (1997). *L'obra hidràulica en els Pirineus: avaluació, correcció i prevenció de l'impacte mediambiental. El Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici*. Barcelona: Fundació la Caixa.
- FERNÁNDEZ, P. [et al.] (2003). «Factors governing the atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons to remote areas». *Environmental Science and Technology*, núm. 37, p. 3261-3267.
- GACIA, E.; BALLESTEROS, E. (1996). «The effect of increased water level on *Isoetes lacustris* L in Lake Balciver, Spain». *Journal of Aquatic Plant Management*, núm. 34, p. 57-59.
- GRIMALT, J. O. [et al.] (2001). «Selective trapping of organochlorine compounds in mountain lakes of temperate areas». *Environmental Science and Technology*, núm. 35, p. 2690-2697.
- MIRÓ, A.; VENTURA, M. (2004). «Història de la truita comuna i altres espècies de peixos als estanys del Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici: orígens, aprofitament i distribució». *La investigació al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici* [VI Jornades sobre Recerca, octubre 2003].

Mireia Bartrons (Barcelona, 1981)

Llicenciada en ciències biològiques per la Universitat de Barcelona (2004), actualment està a punt d'acabar

la tesi doctoral, codirigida per Jordi Catalan i Joan O. Grimalt, que té per objectiu principal estudiar la bioacumulació de compostos halogenats en la xarxa tròfica dels estanys d'alta muntanya. Forma part del grup de recerca GECA, Grup de Recerca dels Canvis Ambientals, del Centre d'Estudis Avançats de Blanes (CSIC).

Han contribuït en aquest article també J. Catalan, A. Miró, M. Ventura, E. Gacia, E. Ballesteros, L. Camarero, M. Bacardit, M. Altuna, S. Pla, P. Fernández i J. O. Grimalt. Agraïm la col·laboració lingüística de M. Bacardit i M. Vilamala.

