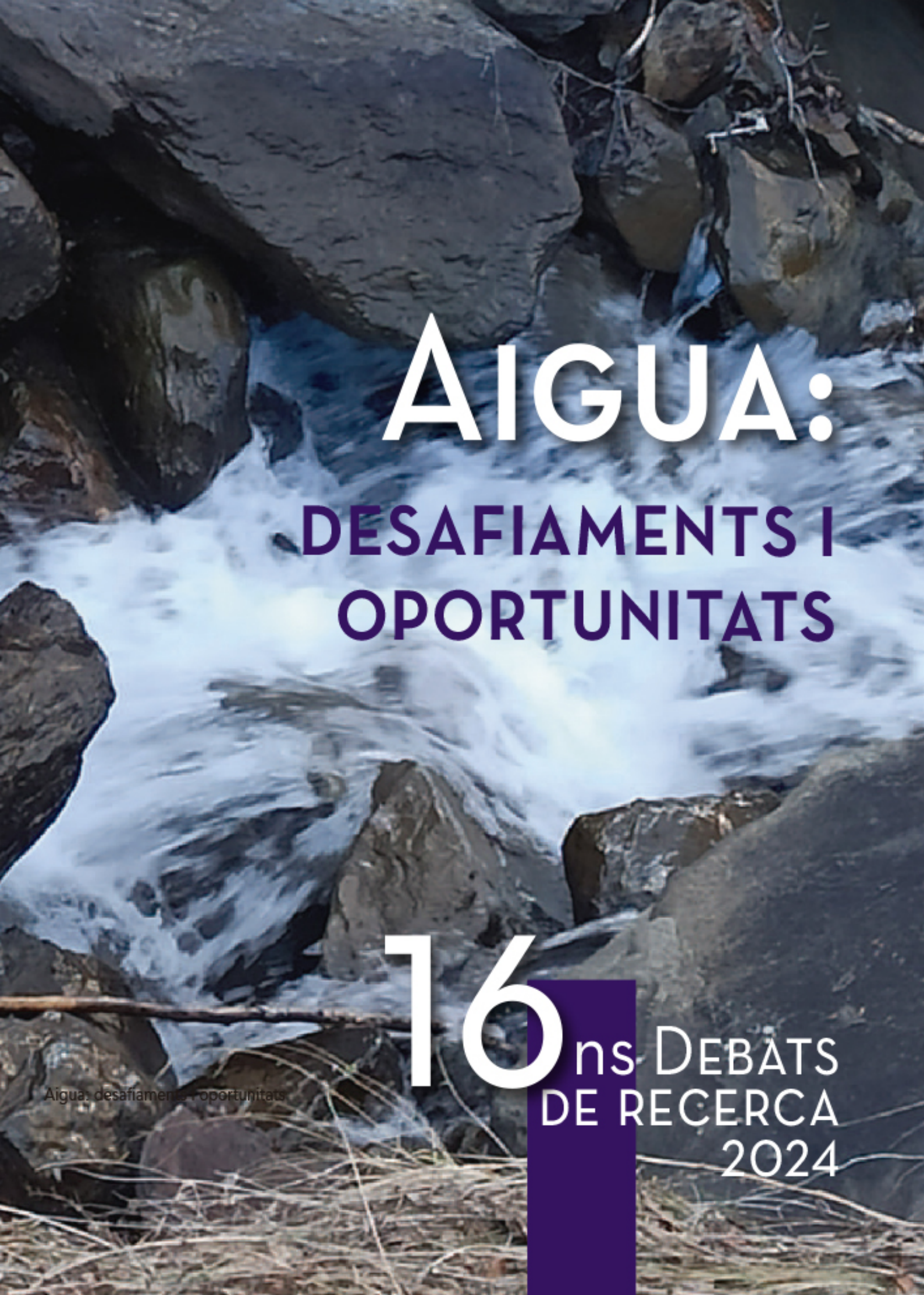




AIGUA:

DESAFIAMENTS I OPORTUNITATS

16^{ns} DEBATS
DE RECERCA
2024

AIGUA:

DESAFIAMENTS I OPORTUNITATS

16^{ns} DEBATS
DE RECERCA
2024

©Dels seus autors els escrits, imatges i fotografies
©Societat Andorrana de Ciències
Primera edició, maig 2025

Amb l'ajut de:
Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats
Andorra Recerca + Innovació
MoraBanc
Institut d'Estudis Catalans

Revisió lingüística: Servei de Política Lingüística d'Andorra
Foto de portada: Riu de Montaup (AMB), inclinada 90°
Realització gràfica: ARA Disseny® (ADEMG)
Disseny i maquetació: Pilar Monge i Gómez
Impressió: Impremta Envalira
DL: AND.149-2025
ISBN: 978-99920-61-75-6

Sumari

Benvinguda

Sr. Wiro Martín i Piquet, director de màrqueting i comunicació de MoraBanc 5

Presentació dels Debats de Recerca

Sra. Àngels Mach i Buch, presidenta de la Societat Andorrana de Ciències 7

Salutació

Dra. Marta Domènech i Ferrés, gerenta d'Andorra Recerca + Innovació 9

Inauguració oficial

Il·ltre. Sr. Josep Anton Bardina Pau, Secretari d'Estat d'Educació i Universitats 11

Introducció

Dra. Marta Fonolleda i Riberaigua, coordinadora dels 16ns Debats de recerca 15

L'aigua, motor i essència de la vida

Dr. Narcís Prat i Fornells, catedràtic emèrit d'Ecologia de la Universitat de Barcelona 17

Reptes per protegir la biodiversitat d'aigua dolça a múltiples escales

en un context de canvis globals accelerats

Dr. Ivan Paz i Viñas, doctor en Ecologia, Biodiversitat i Evolució, professor associat al Laboratori d'Ecologia dels Hidrosistemes Naturals i Antropitzats de la Universitat Claude Bernard Lyon 1 i membre del grup de treball sobre la composició genètica de la xarxa d'observacions de biodiversitat global GEO BON 29

El paper de la recerca marina en l'assessorament i la gestió de les pesqueries del Mediterrani

Dr. Marc Farré i Foix, doctor en Biologia per la Universitat de Barcelona, investigador al Centre Oceanogràfic de les Illes Balears, Instituto Español de Oceanografía del Consejo Superior de Investigaciones Científicas 41

Estudi i conservació dels cetacis del Mediterrani. TURSMED: exemple d'un projecte

de conservació del dofí mular

Sra. Andrea Antich i Gabriel, biòloga, màster B2E parcours Bioressources Aquatiques en Environnement Méditerranéen et Tropical a la Universitat de Montpellier, TURSMED2 MIRACETI-étude et conservation des cétacés 51

Anàlisi de les sèries hidromètriques andorranes

Sr. Gerard Grande i Bartumeu, físic, màster en Física, Medi Ambient i Procediments de la Universitat Paris-Saclay i tècnic d'Andorra Recerca + Innovació 57

Projeccions de canvi climàtic a Andorra: anàlisi i càlcul d'indicadors climàtics

Sr. Alexandre Quintana i Clarà, geògraf, màster en Geofísica i Meteorologia de la Universitat de Granada
Dra. Laura Traperó i Bagué, Sr. Gerard Grande i Bartumeu 73

Escenaris de canvi climàtic sobre el riu Valira	
Dra. Marta Domènech i Ferrés, doctora en Forests per la Universitat de Lleida i investigadora d'Andorra Recerca + Innovació	83
Noves metodologies andorranes, basades en la natura, per millorar la gestió tècnica del recurs hídric, en condicions de canvi climàtic i creixement poblacional	
Sr. Jordi Deu i Pujal, enginyer agrònom a Silvagrina, SL	89
De les antigues glaceres als cicles P a Andorra	
Dr. Valentí Turu i Michels, doctor en Geologia per la Universitat de Barcelona i investigador principal de la Fundació Marcel Chevalier	113
El paper de les glaceres i la neu en el cicle de l'aigua de les zones de muntanya	
Dr. Marc Pons i Pons, doctor en Ciència i Tecnologia per a la Sostenibilitat per la Universitat Politècnica de Catalunya, investigador a Computational Ecology Group i Universitat de Saskatchewan, Canadà	117
Característiques de la intensitat pluviomètrica al Pirineu andorrà durant les tempestes i els xàfecs estivals. Una comparació amb sectors d'una influència més marítima	
Sr. Joan Estrada i Mateu, geògraf i climatòleg, llicenciat en Geografia i Història per la Universitat de Barcelona	123
La sostenibilitat d'Andorra des d'una perspectiva metabòlica	
Dr. Juan Jesús Larrabeiti i Rodríguez, doctor per la Universitat d'Andorra, professor col·laborador a la Universitat Carlemany i col·laborador del grup de recerca Integrated Assessment: Sociology, Technology and the Environment de la Universitat Autònoma de Barcelona	135
Conclusions i cloenda	
Dra. Marta Fonolleda i Riberaygua, coordinadora dels 16ns Debats de recerca	147
Programa previst	149
Recull d'imatges	151
Recull de premsa	154

Benvinguda

Benvolguts i benvolgudes. Benvinguts a l'Auditori MoraBanc. És un plaer poder acollir aquest esdeveniment a l'auditori, que posem a disposició del públic, a diferents entitats, i aquest n'és un exemple.

No fa gaire temps estàvem presentant el llibre de la 15a edició dels Debats de Recerca i ja estem començant la 16a edició. N'estem molt orgullosos.

Vull començar agraint a la Societat Andorrana de Ciències per l'organització d'una nova edició dels Debats de Recerca. Ja fa anys que fem aquest camí plegats i per nosaltres és molt enriquidor participar en una iniciativa que contribueix de manera clara a la divulgació del coneixement a Andorra. Una tasca que creiem té una gran valor.

Estem en un moment on tenim un accés directe a una gran quantitat d'informació de manera ràpida. La bona notícia és que aquesta accessibilitat és una bona oportunitat; la dolenta és que, entre tota aquesta informació, no està avalada per ningú, i en aquests canals, el percentatge de continguts *fake*, esbiaixats i intencionats també és molt gran. Per això que hi hagi entitats com la SAC és vital per la confiança i el rigor que sabem que tenen.

Els Debats d'aquest any ens permetran explorar un tema de gran transcendència: l'aigua, amb els reptes i les oportunitats que presenta, tant a escala global com en el nostre context particular aquí a Andorra.

L'aigua és un recurs que defineix el nostre present i que donarà forma al nostre futur. Fa uns quants anys una de les pel·lícules de James Bond, *Quantum of Solace*, en la ficció exposava l'oportunitat d'un cop d'estat a Bolívia per a fer-se amb el control de l'aigua del país. Hores d'ara, a Etiòpia s'ha construït al riu Nil la gran presa del Renaixement Etíop a pocs quilòmetres de la frontera amb Sudan, i sembla ser que Egipte ha elaborat plans de destrucció de la presa per a poder quedar-se l'aigua. Són decisions geoestratègiques que impliquen el control de l'aigua. És un element absolutament vital pel dia a dia, però també en el món de la geoestratègia. Ens enfrontem a desafiaments profunds per a la seva preservació, la seva gestió sostenible i el seu impacte en la qualitat de vida. Però també ens trobem davant



Wiro Martín i Piquet

Director de màrqueting i comunicació de MoraBanc

d'oportunitats; la innovació, la tecnologia i la cooperació ens permeten albirar solucions que, amb un esforç comú, poden marcar una diferència real.

Us animo a aprofitar aquesta jornada per compartir idees, ampliar perspectives i explorar camins cap a una gestió sostenible i responsable d'aquest bé tan preuat.

A MoraBanc estem compromesos amb iniciatives que aportin valor a la societat, i creiem fermament en el poder d'aquests espais de diàleg per inspirar un canvi positiu.

Moltes gràcies a tots per la vostra participació i dedicació. Esperem que aquesta jornada sigui font d'inspiració i que les idees que compartirem contribueixin a un futur més sostenible per a tothom.

Benvinguts i que sigui una jornada profitosa.

Presentació

Distingides autoritats, amigues, amics

En primer lloc vull agrair a les institucions que han ajudat a confeccionar el programa d'aquesta 16a edició dels Debats de Recerca. L'Àrea de Recerca del Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats, Andorra Recerca +Innovació, i MoraBanc, que ens acull aquestes dues jornades i també col·labora en la seva publicació. Als ponents presencials i no presencials que presenten els resultats de les seves investigacions. I als assistents al Debats que ens acompanyen i poden participar en els espais de debat públic, i també els que consultaran aquest acte posteriorment al canal de la SAC a Youtube. Benvinguts tots.

En la primera reunió que vàrem dur a terme representants de la SAC, de l'Àrea de Recerca i de l'ARI ja es va constatar que la temàtica de la recerca sobre el recurs hídric en tots els seus estats era un àmbit rellevant per al país. Només teníem un dubte: si hi hauria prou investigadors que fessin recerca en aquest camp. I efectivament és un àrea molt dinàmica i canviant que engloba diferents disciplines i perspectives. Al febrer proveníem dels darrers anys de sequera i a l'octubre es produïen inundacions al País Valencià. L'aigua és important per a nosaltres perquè la temporada de neu és un puntal bàsic per a l'economia del país, però també per ser capçalera de rius i per ser bàsica per la vida humana i els ecosistemes.

No només és un tema d'interès per als coorganitzadors dels Debats de Recerca, sinó també per a l'entorn proper. Justament aquest cap de setmana passat participàvem amb el conferenciant plenari Dr. Narcís Prat al XIV Congrés de la Coordinadora de Centres d'Estudis de Parla Catalana a Tortosa sobre "Els rius: territori, societat i cultura".

Hi ha hagut uns antecedents:

1947, Salvador Llobet. *El medio y la vida en Andorra. Estudio geográfico*. CSIC Instituto Juan Sebastián Elcano- Estación de Estudios Pirenaicos, estudi del 1945, publicat el 1947.

1952 Ramon Margalef. *La vida en las aguas dulces de Andorra*. Primer Congrés Internacional del Pirineu, a San Sebastián.

1977 Bra. Adellach i Ramon Ganyet. *Estadísticas de les Valls d'Andorra*.

1979 Ramon Folch. *Patrimoni natural d'Andorra. Els sistemes*



Àngels Mach i Buch
*Presidenta de la Societat
Andorrana de Ciències*

naturals andorrans i llur utilització. Amb un equip amb la participació de Casí Arajol, Ferran Goya, Antoni Farràs, entre altres i també Narcís Prat.

L'Institut d'Estudis Andorrans als anys 80 i 90 en els seus *Annals* van publicar treballs de Martí Boada i Joan Becat, entre altres. La 24a Diada Andorrana a l'UCE el 2011 va tractar el tema monogràfic: L'aigua i Andorra. Alguns dels seus participants han seguit investigant i els tenim avui als Debats de Recerca. L'objectiu dels Debats de Recerca des dels seus inicis el 2006 ha estat donar a conèixer la recerca que realitzen els investigadors andorrans dins i fora d'Andorra, i altres investigadors que fan recerca sobre el país. I també posar-los en contacte, si s'ha perdut la pista en haver marxat a formar-se fora.

En aquests Debats de Recerca podrem gaudir de les explicacions de 3 investigadors andorrans a l'estranger: l'Ivan Paz que després d'obtenir el doctorat a la Universitat Paul Sabatier de Tolosa ara està a la Universitat Claude Bernard de Lyon, el Marc Farré amb un doctorat a la UB ara investiga a l'Institut Oceanogràfic de les Illes Balears del CSIC, i l'Andrea Antich que ha estat cap de missió de la fundació MIRACETI sobre la recerca i conservació de cetacis marins a Marsella. I en forma d'article directe a la publicació, de Marc Pons actualment al Canadà al Computational Ecology Group.

Com és evident a Andorra Recerca+Innovació s'investiga sobre els recursos hídrics i tenim la participació de Marta Domènech, Gerard Grande, i Alexandre Quintana, que hi ha estat vinculat. També consten al programa un doctorand, JJ Larrabeiti, i tres investigadors independents, Jordi Deu, Valentí Turu i Joan Estrada.

A tots ells agraïm el seu esforç per preparar la seva presentació i la rapidesa en enviar l'article, que fa que la publicació, que és el pas darrer que segueixen els Debats de Recerca, pugui arribar tan aviat com sigui possible i fixar el coneixement per al públic en general.

Us desitjo que pugueu gaudir dels resultats de les recerques que tenim la sort de poder escoltar i de preguntar el que no hagueu entès als protagonistes d'aquests Debats de Recerca que hem pogut reunir.

Moltes gràcies!

Salutació

És amb orgull i compromís que, des d'Andorra Recerca + Innovació, participem un any més com a coorganitzadors dels Debats de Recerca, que enguany arriben a la seva 16a edició i posen el focus en un dels reptes més transcendents del nostre temps: l'aigua.

L'aigua no només és un recurs vital per a la vida i la biodiversitat, sinó també un element clau en la resiliència i sostenibilitat de les societats actuals. La recerca esdevé un instrument essencial per a la comprensió i la presa de decisions ponderades, davant els efectes del canvi climàtic, l'augment de la demanda hídrica i la necessitat d'una gestió eficient i equitativa.

A Andorra, aquests reptes són especialment rellevants per l'entorn muntanyenc, amb recursos hídrics que cal preservar i optimitzar donats els impactes del canvi global. És per això que des d'AR+I impulsem, a través dels nostres eixos de treball en muntanya, sostenibilitat, societat, innovació i tecnologia, projectes orientats a analitzar i millorar la gestió de l'aigua, a fomentar solucions basades en la natura i a desenvolupar indicadors climàtics que ens permetin anticipar escenaris futurs. Els Debats de Recerca d'enguany no només aporten coneixement científic de gran valor, sinó que també són una mostra clara del potencial investigador que tenim al país, amb una gran representació de professionals que treballen des d'Andorra per donar resposta a reptes globals.

Cap procés d'investigació no transcendeix si no es divulga. Des d'Andorra Recerca i Innovació entenem, defensem i promovem la importància de transmetre el coneixement a través de tots els canals possibles. Per aquest motiu volem agrair a la Societat Andorrana de Ciències i al Ministeri d'Educació i Ensenyament Superior, per continuar fomentant aquest espai de trobada, intercanvi i divulgació científica. Per contribuir a fer la ciència entenedora i a dotar d'eines que ajudin en la presa de decisions no només els agents polítics sinó també la resta de la ciutadania. Finalment, volem reconèixer l'esforç de tots els investigadors i investigadores que hi participen, així com dels col·laboradors i patrocinadors que ho fan possible.

Confiam que aquest recull, a més de deixar constància dels debats i resultats presentats, inspiiri reflexió, acció i col·laboració al voltant d'un tema fonamental com és l'aigua.

Moltes gràcies i molt bon Debat.



Marta Domènech i Ferrés

Gerenta d'Andorra Recerca + Innovació

Inauguració oficial



**Il·ltre. Sr. Josep Anton
Bardina Pau**

Secretari d'Estat d'Educació i
Universitats

Bona tarda a tothom,

Primer de tot permeteu-me que excusi l'absència del ministre, ja que havia de ser ell l'encarregat d'inaugurar aquest acte, però per motius d'agenda li ha estat del tot impossible ser-hi. M'ha demanat que us faci arribar la seva salutació i felicitació per aquestes jornades. I jo, molt satisfet i content de participar en la inauguració dels setzens Debats de Recerca, que, amb el títol Aigua: desafiaments i oportunitats, pretenen divulgar la recerca entorn d'aquest recurs natural.

I quina millor manera de començar aquest acte que recuperant les paraules del GRAN i IMPORTANT discurs que va llegir el primer cap de Govern, el Sr. Òscar Ribas i Reig, en un dia històric com el 28 de juliol de l'any 1993, quan Andorra va ser admesa com a membre de l'Organització de les Nacions Unides. Al final del seu parlament, el Sr. Ribas, digué:

Som un país que no té riqueses naturals. No té cap altra força ni riquesa que la seva gent. Som un país del Pirineu, aquesta muntanya d'Europa que no separa, sinó que és un lloc de trobada.

En realitat som una vall. I la vall és una forma de vida. És casa, aigua i habitatge i, per tant, una comunitat a mida de la persona i de la família. Tal com les grans valls del Ganges o del Nil han estat bressol de grans civilitzacions, la nostra petita vall del Valira també ha decantat, a través de segles, una identitat nacional que no s'ha fet contra res ni contra ningú.

Com podeu intuir en el discurs, hi aflora un element comú i essencial a totes les valls, com és l'AIGUA. A Andorra som aigua, aigües termals, rius, conques hidrogràfiques, llacs i estanys, glaceres, aqüífers, fargues serradores i molins, som neu. Però l'aigua, tot i ser un element que ens identifica i caracteritza com a vall, no és només important i transcendent per a nosaltres; ho és per a tothom.

L'AIGUA és un element indispensable per al desenvolupament de l'individu i per al desenvolupament pràcticament de qualsevol tipus d'activitat. L'AGUA és VIDA.

Tales de Milet, primer filòsof de la Grècia clàssica, va voler trobar un principi bàsic de totes les coses; una cosa que pogués explicar allò que existeix. Aquest principi el va trobar a l'aigua. Tot està fet d'aigua, deia Tales, i "la terra descansa a l'aigua,

com en una illa". També, Leonardo da Vinci, pintor renaixentista, enginyer hidràulic i mestre de l'aigua, determinà en un dels seus manuscrits, dedicat a l'observació dels fenòmens naturals, que l'AIGUA és la força motriu de tota la natura; dit d'una altra manera, tots els éssers vius necessitem l'aigua.

Més enllà de citacions d'il·lustres personatges, també disposem de dades més empíriques i científiques. Així doncs:

El 70% del planeta està cobert d'aigua -principalment salada-, d'aquí que la Terra se l'anomeni també *planeta blau*; i, només un 0,025% d'aquesta aigua és potable.

L'aigua representa el 80% de la composició de la majoria d'organismes i intervé massivament i decisivament en la realització dels processos metabòlics. Desenvolupa, per tant, un important paper en la fotosíntesi de les plantes i serveix d'hàbitat a una gran part d'éssers humans.

La demanda d'aigua dolça no para de créixer. L'ONU assegura que per cada augment d'1 grau de temperatura, els recursos hídrics disminueixen d'una manera alarmant.

Prop de 700.000 persones moren cada any per malalties degudes a la manca d'accés a aigua potable, sanejament i higiene.

Territoris veïns, com ara Catalunya, han viscut recentment els pitjors episodis de sequera des que es existeixen registres fa més d'un segle; o, ben al contrari, València ha sofert recentment les conseqüències de la DANA.

Estem d'acord, doncs, que aquest element líquid té una valor fonamental tant per als ecosistemes com per a la societat. No obstant això, els canvis en el clima, la població, els patrons de consum, l'ús dels sòl i la urbanització, entre altres aspectes, afecten la seva qualitat i disponibilitat futura.

Davant d'aquest escenari que no voldria titllar de catastrofista, però sí de preocupant i inquietant, tenim el deure com a individus i societat d'abordar-lo i de mitigar-lo.

Globalment hi ha iniciatives com el desplegament de l'Agenda 2030 i els Objectius de desenvolupament sostenible de l'ONU. Quatre dels disset objectius tracten i treballen sobre l'aigua des de diferents mirades:

Objectiu 6: Garantir la disponibilitat d'aigua i la gestió sostenible i el sanejament per a tothom ja que representa la necessitat humana més bàsica per a la cura de la salut i el benestar.

Objectiu 12: Garantir modalitats de consum i producció. El

planeta s'està quedant sense recursos; en canvi, l'índex de població continua creixent.

Objectiu 13: Adoptar mesures urgents per combatre el canvi climàtic i els seus efectes. El canvi climàtic, com hem comentat anteriorment, ens afecta a totes les persones de tots els països i de tots els continents.

I finalment,

Objectiu 14: Conservar i utilitzar sosteniblement els oceans, els mars i els recursos marins atès que l'existència humana i de la vida en la terra depèn de tenir uns oceans i mars sans.

També, l'Assemblea General de les Nacions Unides va proclamar el Decenni internacional "Aigua per al desenvolupament sostenible, 2018-2028", que va començar el 22 de març del 2018, Dia mundial de l'Aigua, i acabarà aquella mateixa data de l'any 2028.

Aquests deu anys es dediquen a promocionar i accelerar iniciatives que solucionin els desafiaments que presenten els recursos hídrics del planeta: sequeres, inundacions, contaminació de l'aigua; i també, volen contribuir a conscienciar l'opinió pública sobre la importància de l'aigua en l'erradicació de la pobresa i la fam, i aconseguir un desenvolupament sostenible.

A Andorra, l'article 31 de la nostra Constitució determina que *és funció de l'Estat vetllar per la utilització racional del sòl i de tots els recursos naturals, amb la finalitat de garantir a tothom una qualitat de vida digna i de restablir i mantenir per a les generacions futures un equilibri ecològic racional en l'atmosfera, l'aigua i la terra i de defensar la flora i la fauna autòctones*. No cal dir que, d'ençà a avui, s'ha fet un esforç important per legislar sobre aquesta matèria.

Per tant, davant aquest desafiament global que requereix un esforç col·lectiu dels governs, de les organitzacions internacionals, de les empreses i de la societat civil, HEM D'ACTUAR com a país!

I quina millor manera de fer-ho que des del coneixement, la reflexió i el debat serà rigorós. I és per això que avui i aquí, a Andorra i en els Debats de Recerca, volem abordar aquesta temàtica i reflexionar-hi. Estic segur que les contribucions presencials o escrites dels investigadors i de les investigadores són, més que mai, necessàries i molt útils. El debat amb el públic contribuirà també a fer-nos més savis i menys vulnerables.

Des d'Andorra, petit país de la serralada pirinenca, hem

d'aportar el nostre granet de sorra amb dades i informació que puguin servir per mitigar les conseqüències del canvi climàtic, per trobar solucions i per actuar.

Per acabar, vull agrair molt sincerament l'esforç i la dedicació de la comunitat investigadora que, de forma rigorosa, pacient i sovint discreta, treballa dia a dia. I avui, especialment, als investigadors i a les investigadores que presentareu els resultats de la vostra recerca.

També dono les gràcies a MoraBanc per acollir-nos en aquesta sala renovada que convida al debat; a Andorra Recerca i Innovació, que per segon any participa en aquesta activitat; i, a la SAC, ferma impulsora, i segurament sense ells no hauríem arribat on som avui. Enhorabona pel treball conjunt i pel treball de país!

Així doncs, dono per inaugurada la setzena edició dels Debats de Recerca.

Moltes gràcies!

Introducció



Dra. Marta Fonolleda i Riberaygua

*Coordinadora dels 16ns
Debats de Recerca*

Bona tarda,
Il·lustre Secretari d'Estat, directora, presidenta, experts, investigadors, senyores, senyors i companys,
L'aigua és, avui més que mai, un tema de màxima actualitat. Des de fa un temps, ocupa titulars i portades, però sovint des d'una perspectiva alarmant. Malauradament, la seva presència als mitjans sol estar vinculada a situacions extremes: la recent DANA, la sequera persistent dels darrers tres anys o les pluges torrencials que, agreujades pel canvi climàtic, impacten cada cop més en el nostre dia a dia. En un escenari d'emergència climàtica i canvi global, la incertesa sobre la disponibilitat i la gestió d'aquest recurs essencial és més gran que mai, especialment en regions de muntanya com la nostra.
L'aigua ens enfronta a desafiaments colossals. És un bé escàs però imprescindible per a la vida. Alhora, pot ser altament destructiva i, quan en manca o es gestiona malament, posa en risc ecosistemes, activitats humanes i vides. És un element, per definició, ingovernable—els fets recents ho demostren—, però fins a cert punt, gestionable. I és precisament en com gestionar-la on rau un dels grans reptes del nostre temps.
Però l'aigua no és només un desafiament, sinó també una gran oportunitat. És la font mateixa de la vida: allà on va començar i on continua desenvolupant-se. La biosfera és majoritàriament aigua, igual que el nostre cos. Alberga una biodiversitat extraordinària i és un element essencial per a tots els ecosistemes i activitats humanes. Gaudim d'un accés privilegiat a aquest recurs, però això ens obliga a reflexionar sobre com garantir-ne la sostenibilitat en el futur.
En aquests 16ns Debats de Recerca, ens proposem aprofundir en la investigació sobre aquest element fonamental, explorant-ne tant els reptes com les oportunitats.
Com sempre, hem estructurat les jornades en dues sessions, amb una conferència plenària, diverses comunicacions breus i espais de debat per fomentar l'intercanvi de coneixement. A més, el programa inclou tres ponències escrites, que es publicaran posteriorment als annals.
Benvinguts als 16ns Debats de Recerca. Que aquestes jornades ens ajudin a entendre millor l'aigua i, sobretot, a trobar respostes als grans interrogants que ens planteja.



Dr. Narcís Prat i Fornells

Catedràtic emèrit
d'Ecologia de la
Universitat de Barcelona

Introducció

L'aigua s'ha considerat sempre un recurs clau per a la humanitat. Civilitzacions senceres han desaparegut perquè el seu creixement poblacional va esgotar els recursos d'aigua o per canvis en el clima. Fins ara pensàvem que l'aigua era un recurs limitant de forma local o regional que es podria solucionar tècnicament, però comença a intuir-se que l'aigua podria arribar a ser en algun moment un problema global, arribant a ser crítica per a la supervivència d'àmplies regions del planeta o capaç de produir una gran crisi d'abast mundial.

La idea que l'aigua podria ser, al costat d'altres recursos, un límit per al funcionament de la biosfera va ser expressada en el treball de Rockstrom *et al.* (2009). Es tracta de diversos cercles concèntrics on s'indica si un determinat recurs es considera crític perquè sigui un límit per al funcionament de la biosfera tal com la coneixem. Quan es va publicar el treball, de tots els recursos crítics, l'aigua no va ser considerada un recurs limitant a escala global. Apareix com a recurs amenaçat per primera vegada el 2023, tot i que sense arribar encara al punt crític a escala global, quan ja ho és fa temps a escala local o regional. Tant l'aigua blava, la que fem servir a casa nostra o la que és fa servir per regar, com l'aigua verda, la que es transpira per les plantes, comencen a arribar a uns nivells d'ús preocupants a escala global.

Del conjunt d'aigua blava que fem servir per a ús domèstic, la majoria retorna com a aigua líquida al medi més o menys depurada (*ús no consumptiu*). Cal recordar que un 15% de la humanitat no té accés a aigua potable segura segons l'ONU i que un terç no té un bon servei de sanejament. En canvi, quan reguem una planta o un camp de blat de moro, la major part de l'aigua s'evapora, es transpira i passa a vapor d'aigua a l'atmosfera; només una petita part retorna al medi com a aigua blava (menys del 20% segons el tipus de regadiu). A aquest ús l'anomenem *ús consumptiu*; és l'aigua verda.

L'aigua, essència de la vida

L'aigua és absolutament indispensable per a la vida, i a la biosfera en depenen més de quatre milions d'espècies, sense comptar bacteris i virus. De fet, al planeta Terra caldria anomenar-lo planeta Aigua, ja que les dos tercers parts del planeta estan cobertes d'aigua (Margalef, 1993; Rifkin, 2024).



Narcís Prat i Fornells

L'aigua, motor i essència de la vida

Un 97% de l'aigua es troba al mar, mentre que a la terra la major part es troba com a gel i només un 0,2% és aigua dolça que circula pels rius, en llacs i embassaments o s'emmagatzema com a aigua subterrània. Sense aigua la vida seria gairebé impossible, l'aigua és l'essència de la vida.

L'aigua, motor per a la vida

Independentment de l'aigua que necessitem per beure, l'aigua és un element necessari perquè funcioni la biosfera. L'entrada d'energia a la majoria dels ecosistemes es fa mitjançant la fotosíntesi, que amb l'aigua, l'anhidrid carbònic i l'energia del sol produeix sucres i oxigen. A més de l'anhidrid carbònic, per formar matèria orgànica, es necessita nitrogen, fòsfor i altres oligoelements, que es troben al sòl. Les fulles tenen estomes que obren per poder captar anhidrid carbònic i també per fer succió per tal que els elements nutritius del sòl pugin cap a les fulles (transpiració). L'aigua, juntament amb els nutrients, la saba, és transportada a través de vasos conductors que en ocasions tenen centenars de metres de longitud. Sense els milions de quilòmetres de vasos que transporten la saba, no hi hauria vida vegetal tal com la coneixem. L'aigua, a més d'un element essencial, és el medi que transporta els elements necessaris per fer funcionar el motor de la vida (Blanco, 2017).

El cicle de l'aigua

L'aigua transpirada per les plantes o la que s'evapora directament es troba com a vapor d'aigua a l'atmosfera. Aquest vapor d'aigua circula arrossegat pels corrents d'aire; quanta més aigua en l'aire més humitat. Però arriba un moment que si la temperatura de l'aire disminueix aquest vapor forma petites gotes d'aigua que acaben precipitant-se sobre el planeta en forma de pluja o neu (condensació). L'aigua condensada circula per llacs i rius i és la que utilitzem per beure, per regar i finalment se'n va cap al mar, on el cicle torna a començar. El 25% de l'energia del sol es fa servir per a aquest procés.

Aquest cicle ha estat modificat profundament per l'home, especialment per obtenir aliments que transformen l'aigua blava en aigua verda, però també per a usos industrials, domèstics o recreatius. Avui dia, una gran part de l'aigua que es transpira als boscos ho fa en plantacions forestals, mentre que l'aigua transportada pels rius al mar en alguns casos ha disminuït. Per això alguns rius, per exemple el Murray-Darling a Austràlia o el Segura a Espanya, ja no arriben al mar per l'ús

intensiu de l'aigua a les seves conques. Molts rius s'estan assecant i deixen de transportar aigua almenys part de temps. És el que anomenem *rius temporals*, dels quals cada dia n'hi ha més (Bonada et al., 2024).

Amb la tecnologia actual som capaços de canalitzar, desviar, usar, consumir i contaminar una gran part de l'aigua que circula per la biosfera. Els impactes ambientals produïts pels canvis en el cicle de l'aigua per l'home posen en perill milers d'espècies, algunes de les quals fins i tot desapareixen davant dels nostres ulls abans de ni tan sols descobrir-les. És per això que diem que l'aigua és un element crític per al funcionament de la biosfera, ja que sense ella o bé quan la contaminem, disminuïm la biodiversitat, especialment als ecosistemes aquàtics, on per a alguns organismes la pèrdua ha arribat al 40% de les espècies (The Living Planet Index, 2025).

A tot això hi cal afegir el profund impacte que el canvi climàtic produït per l'home està exercint sobre el cicle de l'aigua. Les glaceres estan desapareixent a un ritme mai conegut. Per exemple, les del Pirineu poden desaparèixer abans del 2050 si la temperatura continua pujant com fins ara. Les pluges, en alguns indrets, són cada vegada més escasses i quan cauen ho fan de forma violenta i en poc temps, cosa que incrementa les sequeres i les inundacions catastròfiques. Tenim una veritable revolució de la hidrosfera (Rifkin, 2024).

L'aigua, un recurs crític

Com que l'aigua s'ha considerat sempre un recurs escàs, l'objectiu de l'home ha estat regular-la per impedir que comprometés el desenvolupament de comunitats o regions. Perquè no falti el recurs hem construït embassaments per emmagatzemar l'aigua, especialment per regar (l'agricultura utilitza el 67% dels recursos de Catalunya, i a la conca de l'Ebre, el 90%) i per a ús domèstic, que podem fer servir també per produir electricitat. Hem desviat rius i construït transvasaments d'una conca a l'altra. Tot plegat ha deixat alguns rius secs i ha compromès el règim de cabals ambientals dels rius regulats. En alguns llocs, l'aigua avui dia és un recurs més crític fins i tot que el petroli i ha estat origen de conflictes entre nacions, per exemple l'ocupació dels alts del Golan per l'exèrcit israelià, que es va produir davant l'amenaça d'el país veí Síria de fer preses i desviar l'aigua que anava al llac Tiberíades cap a altres conques. O el conflicte que es podria originar entre Turquia i Iraq per l'aigua de l'Eufrates quan s'acabi la gran transformació agrària que el primer país està realitzant aigües amunt. El nombre de

conflictes relacionats amb l'aigua no fa més que créixer i s'estenen per tot el món (Pacific Institute, 2025).

Malgrat tots els esforços, hi ha 1.000 milions de persones que encara no tenen accés a aigua potable i que pateixen set i fam, ja que no poden conrear els camps. La disponibilitat d'aigua en algunes zones del planeta és un element de risc que pot encendre la terra sencera (Rifkin, 2024). La dotació mínima per viure dignament són uns 40 litres per persona i dia, però en alguns llocs se n'arriben a consumir 400, per exemple en urbanitzacions amb cases amb piscina i gespa. Una llar amb les mesures necessàries per fer la nostra vida confortable sense malgastar aigua hauria de fer servir menys de 100 litres per persona i dia.

Aquests valors són el que resulten del consum directe, però en realitat en el nostre dia a dia fem servir molta més aigua de forma indirecta. Per exemple, quan mengem una poma, en algun lloc s'han utilitzat 70 litres per produir-la, que han desaparegut del riu, aquífer o embassament d'on es van captar i han passat a formar part de l'atmosfera. Un altre exemple: quan comprem uns pantalons per utilitzar-los s'han fet servir 50 litres d'aigua, que en aquest cas han retornat al medi molt contaminats i tindran un efecte sobre la biodiversitat dels ecosistemes aquàtics, si l'aigua no es tracta correctament. Tot el que utilitzem en el nostre dia a dia té la seva quota d'ús o consum d'aigua. Estem parlant de l'aigua virtual o de la petjada hídrica. Els 100 litres per persona i dia que gastàvem segons el comptador de casa, es transformen en gairebé 5.000 que són els necessaris per produir els aliments que consumeixo i els béns que he anat comprant al llarg del temps i que faig servir cada dia (vestit, electrodomèstics...). Els que passen gana no passen de 200 o 300 litres d'aigua virtual al dia; pensem que per un plat d'arròs s'han fet servir 160 litres d'aigua per produir-lo. Els que tenen piscina i viatgen molt poden arribar a consumir més de 10.000 litres d'aigua virtual. Comprar productes de proximitat i consumir un nombre més petit de béns materials són maneres com podem contribuir a disminuir el nostre impacte ambiental sobre el cicle de l'aigua (The Water Calculator, 2025).

Impactes al cicle de l'aigua: contaminació

Un cop usat el recurs, què fem? L'aigua contaminada que retornem als rius, als aquífers o al sòl circula per la biosfera o l'antroposfera i després retornaria als rius i d'aquests a la mar. Els rius són com els ronyons que reben l'aigua amb la seva

contaminació i després la depuren, traient els contaminants que hi ha. Quan nosaltres depurem l'aigua imitem el que fan els rius al llarg de kilòmetres, les nostres EDAR (estacions depuradores d'aigües residuals) fan en dipòsits i amb temps el que els rius fan de forma natural. Però, com sabem si una depuradora realment funciona?

Per conèixer si realment una depuradora ha recuperat la qualitat original que el riu tenia abans d'ella, cal utilitzar indicadors, i els millors són els indicadors biològics. Mentre que quan mesurem diferents paràmetres físics o químics en una aigua és com si obtinguéssim una fotografia de la contaminació en aquell moment, la presència d'organismes en un ecosistema natural ve a ser com un vídeo que sintetitza com ha estat la qualitat de l'aigua durant un temps, que poden ser setmanes o fins i tot mesos. Si durant aquest temps hi ha hagut algun incident que ha eliminat els organismes i aquests no es troben al riu, encara que els paràmetres físics i químics ens indiquin que en aquell moment l'aigua no està contaminada, podem induir que alguna cosa ha passat. Els indicadors biològics ens donen una idea de l'estat ecològic de l'aigua, mentre que els indicadors físics ens informen de quins són els contaminants que originen la degradació de l'estat de les aigües i ens permeten, per tant, proposar-hi solucions.

La manera com hem de fer servir aquests indicadors ha estat regulada a Europa mitjançant la Directiva marc de l'aigua (DMA) amb la mesura de l'Estat Ecològic. L'Estat de les aigües es representa amb un codi de cinc colors, que va des del blau o estat molt bo, al vermell d'estat pèssim. La situació dels rius als Països Catalans pot trobar-se als webs de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA), la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre (CHE) i la Confederació Hidrogràfica del Xúquer (CHJ). A les conques internes de Catalunya, menys del 50% de les seves masses d'aigua es troben en estat bo o molt bo. El procés de com mesurar l'estat de les aigües és complex i qui hi pugui estar interessat ho pot trobar en els treballs de Mas-Pla et al. (2016) i Prat et al. (2008; 2019), entre d'altres. A la península Ibèrica o a Andorra la situació ha millorat molt gràcies a les depuradores, però no de forma suficient, ja que la situació dels indicadors biològics ens informa que menys del 50% de les aigües dels rius europeus estan en bon estat ecològic (European Environment Agency, 2024). El riu, d'altra banda, s'ha de considerar un ecosistema i, per tant, s'ha d'integrar en la seva avaluació la situació dels boscos de ribera. Molts rius s'han canalitzat i les riberes han estat recobertes de formigó de manera que això fa

que, tot i que la qualitat de l'aigua pugui ser bona, l'estat del sistema no ho sigui.

El sistema europeu obliga els estats a restaurar els rius que tenen una qualitat menys que bona i a proposar mesures i inversions per millorar-los. Cada sis anys els països europeus han de reportar a Brussel·les un informe en què s'exposi quina és la situació dels seus rius amb indicació de les mesures de restauració necessàries i el seu pressupost. Després de 24 anys de l'existència de la DMA, els progressos en general han estat minsos, de manera que hi ha encara molta feina a fer. També hem de tenir en compte l'estat químic, que s'avalua per la presència de substàncies tòxiques persistents, moltes de les quals han estat prohibides per la legislació europea i encara es troben en concentracions superiors a les permeses en el 20% de les masses d'aigua europees (European Environment Agency, 2024).

El canvi climàtic: una acceleració cap al punt crític?

Per l'ús intensiu per part de l'home del cicle de l'aigua, els problemes que això suposa per al futur de la biodiversitat i per l'home es poden veure accelerats per les previsions del canvi climàtic. Per desgràcia, les previsions fetes pels científics fa ja més de 30 anys, que les nostres emissions de gasos d'efecte hivernacle augmentarien de forma important la temperatura de la terra, s'han complert. Totes les nostres activitats, sigui l'agricultura intensiva, la creixent urbanització del territori o les transformacions del paisatge, han generat un escenari en què degut a les emissions de carboni ja hem superat l'1,5° de temperatura mitjana respecte a l'inici de l'època industrial. Durant molts anys, els sistemes naturals com els boscos i, especialment, el mar han acumulat part el carboni i de la calor i han suavitzat el creixement de la temperatura, però en aquests moments ni l'increment de biomassa dels boscos ni l'aigua de mar són capaços de retirar de l'atmosfera les grans quantitats de carboni i de calor que s'hi ha acumulat. En els últims tres anys, la temperatura del mar ha augmentat gairebé dos graus a escala mundial i tot això està afectant tots climes de la terra i els processos globals que se'n deriven, com per exemple l'oscil·lació de l'Atlàntic Nord o els fenòmens del Niño al Perú.

L'increment de temperatura té com a conseqüència que hi hagi hagut una veritable revolució en el cicle de l'aigua protagonitzada per la hidrosfera (Rifkin, 2024; ONU, 2025):

1. Un canvi en el règim de pluges, amb regions on la

precipitació augmentarà i d'altres on disminuirà molt (com la regió Mediterrània).

2. La disminució de la innivació i la fusió del gel de forma prematura, de manera que els cabals dels rius seran més irregulars i menys previsibles. On ploqui menys, els cabals disminuiran fins que grans rius arribin a assecar-se (com ja ha passat al Ganges), mentre que als llocs on hi hagi glaceres el major desglaç farà que el cabal dels rius primer augmenti per després disminuir dràsticament quan desapareguin les neus permanents. Les glaceres del Pirineu desapareixeran en 35 anys.

3. L'increment de la temperatura del mar ja ha fet que hi hagi un increment del contingut de vapor d'aigua de l'atmosfera i, per tant, més energia, amb la qual cosa augmenta la possibilitat de grans tempestes seguides per períodes extremadament secs. Això serà fins i tot pitjor, perquè com que l'altitud de la de condensació ha pujat, a més d'afavorir tempestes molt intenses, està fent que el vapor d'aigua acumulat a l'atmosfera sigui transportat d'unes regions a unes altres i mentre origina sequeres en uns llocs, provoca grans inundacions en d'altres. Per exemple, la sequera enorme de la conca del riu Amazones el 2024 ha provocat un increment de les precipitacions i de la innivació a Xile i Argentina. La temperatura del mar a la Costa Brava ha augmentat gairebé dos graus des de que se'n tenen registres històrics.

4. L'increment de temperatura i l'acumulació d'energia a l'atmosfera han afavorit els incendis forestals, de manera que àmplies zones de la terra han estat consumides entre el 2022 i el 2024, especialment al Canadà, els boscos tropicals i la zona mediterrània. L'efecte d'aquests focs a la humitat atmosfèrica i la contaminació que generen als rius provoquen canvis greus en tots els ecosistemes del planeta.

5. L'increment dels incendis està relacionat amb l'increment de la biomassa forestal en algunes regions. L'abandonament de terres de conreu o de les pastures en àmplies regions ha afavorit l'aforestació de les terres i l'extensió dels boscos amb un nombre d'arbres per hectàrea molt elevat. Això afavoreix la intensitat i les temperatures d'aquests incendis, que s'han anomenat de *sisena generació* i que són complicats d'extingir.

6. L'increment de biomassa dels boscos suposa també una disminució en les escorrenties d'aigua de les conques, ja que s'evapotranspira més aigua i en queda menys en el sòl. D'aquesta manera s'assequen les fonts que alimenten els rius i els seus cabals disminueixen. Això també origina que l'aigua disponible per regar o per a usos domèstics que s'acumula als

embassaments disminueixi. Per exemple, l'embassament de Sau ha experimentat una disminució de les seves entrades en un 7% per dècada des de 1960, de manera que en aquests moments hi entra un 35% menys d'aigua de la que hi entrava al principi. Això es pot comprovar comparant fotos antigues dels boscos dels anys 50 i 60 a la península Ibèrica amb fotos actuals, on es veu que les terres cultivades als marges de les muntanyes han deixat pas a boscos joves que s'incendien fàcilment. Així mateix, la superfície forestal ha augmentat un 20% a Catalunya, mentre que a les principals conques s'ha perdut entre el 20 i el 40% de l'aigua que circulava pels rius (Generalitat de Catalunya, 2025).

Tot això té un gran efecte en la biodiversitat aquàtica, que és la que més ha disminuït en els últims vint anys (The Planetary Living Index, 2025). Però també afecta moltíssims altres ecosistemes en els quals els canvis que es produeixen semblen en molts casos irreversibles. Això es veu agreujat per la presència d'espècies invasores que impedeixen la recolonització de les espècies pròpies de cadascuna de les conques.

Adaptació i mitigació dels canvis per no superar els límits crítics

Es pot revertir aquesta situació? Per mitigar l'increment de la temperatura només hi ha una solució, disminuir les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Per a això cal disminuir el consum de combustibles fòssils i també optar per un model de desenvolupament més sostenible, el que significa menys cotxes, menys viatges en avió, més energies que no emeten carboni, més agricultura regenerativa.... Vaja, un model de societat diferent, menys globalitzada i més basada en la proximitat en l'ús dels recursos i l'energia. A aquest model se l'ha anomenat *decreixement*, paraula que a molts els sembla que significa retornar la humanitat als temps de la prehistòria, cosa absurda, ja que el desenvolupament sostenible pretén mantenir la qualitat de vida de la humanitat i alhora la conservació de la biosfera en uns termes similars als que teníem fa només 50 anys. Una mitigació efectiva suposaria reduir en un 90% les emissions de carboni en els propers deu anys, cosa que difícilment s'assolirà. Molts països estan establint una estratègia de canvi climàtic; Catalunya també (Generalitat de Catalunya, 2025) però a una velocitat insuficient per l'acceleració dels canvis en els darrers anys.

Sense mitigació les temperatures seguiran augmentant. Farà

falta adaptar-nos a escala local i regional. En el cas de l'aigua seran necessàries adaptacions a la seva falta així com al seu excés. Per als períodes de sequera serà important augmentar l'eficiència en els diferents usos de l'aigua, de manera que amb menys aigua es puguin produir més aliments, i disminuir el consum domèstic a valors inferiors als 75 litres per persona i dia. Com que molts recursos convencionals, com els emmagatzemats en els embassaments, seran més irregulars i disminuiran, caldrà buscar fonts alternatives, com la dessalinització de les aigües marines o la reutilització de les aigües grises de les cases o de les que van a les depuradores (com ja es fa actualment a la depuradora del Prat de Llobregat). Tanmateix, no podem caure en la creença que aquestes fonts alternatives ens poden regalar quantitats gairebé infinites d'aigua per poder mantenir el nostre model de consum actual; aquestes fonts haurien de ser un complement a les fonts naturals.

Un altre aspecte important és la conservació de la quantitat i la qualitat d'aigua dels aquífers, que són els dipòsits més segurs que tenim i la situació dels quals a escala mundial és també preocupant pel consum excessiu que se'n fa per a diferents usos, especialment en agricultura. En aquests moments, hi ha tecnologies per cultivar els deserts i això pot fer-nos pensar que no estem exposats a cap límit en l'ús de l'aigua i que això compensarà la pèrdua de productivitat en altres llocs. Amb aquesta mentalitat, segur que en un futur molt proper l'aigua serà un límit tant per a la nostra vida com per a la conservació de la biosfera. Per mitigar els nostres problemes de recurs, farem que la pressió a què sotmetem els ecosistemes aquàtics sigui molt més intensa i acabem aconseguint que la major part d'aigua dels nostres rius no arribi al mar.

D'altra banda, l'excés d'aigua a causa de l'increment de la intensitat de les precipitacions i als canvis en els patrons climàtics pot produir més crescudes i més intenses, amb conseqüències tan dramàtiques com les de la gota freda que va solcar el País Valencià a l'octubre del 2024. Tot i que les gotes fredes són pròpies del clima mediterrani, el canvi climàtic n'està augmentant la intensitat i la freqüència. Molts dels nostres rius no estan preparats per a aquests canvis. Fins ara la resposta a les inundacions ha estat tractar de controlar-les tot aïllant els rius del seu entorn amb canalitzacions, motes i murs, una resposta derivada de la por a les avingudes. Hem intentat que l'aigua discorri ràpidament riu avall, cap al mar, però les nostres accions han estat una i altra vegada desafiades per la natura i

ara més amb el canvi climàtic. I molt més en els ambients mediterranis, on la manca de pluges que fa que els rius portin poca aigua o romanguin secs llargs períodes. Ens han fet pensar que un cop fet un embassament i canalitzat el riu, el que abans era la zona d'inundació del riu ara es podia transformar en ciutat o en camp de cultiu. Al llarg del segle xx i especialment el xxi, hem omplert els nostres paisatges de carreteres i autopistes que han crescut sense ordre ni concert ocupant el territori que anteriorment era inundable, trencant la connexió lateral i longitudinal del riu. Aquest tipus urbanisme i les grans canalitzacions són els culpables que els efectes de les avingudes dels rius, dels huracans o els tifons siguin cada vegada més intensos. És el que s'ha vist a la Ribera de València, on la intensitat de la pluja va originar una riuada d'un període de retorn que ningú s'imaginava (molt superior als 500 anys). La canalització del Túria que va "salvar" València capital de la inundació va ser la condemna de la Ribera, ja que l'aigua dels barrancs no va poder sortir al riu per culpa de l'autopista i va retornar cap a la ribera on, conjuntament amb l'embús que els cotxes van fer als carrers, va arribar a altures de fins a onze metres. I això podria passar demà mateix a qualsevol punt de la costa mediterrània.

L'adaptació serà clau en el futur, però cal deixar enrere les mesures estructurals, que sempre ens han dit que eren les que ens convenien (murs, preses...), per mesures més flexibles i que respectin la zona d'inundació. El repte social, polític i econòmic que això suposa i la necessitat de la coordinació de molts actors no ens fa ser gaire optimistes de cara al canvi necessari per tal que el canvi climàtic (que pot comportar grans migracions de sud a nord, el que s'ha considerat una emergència climàtica) no acabi sent l'element limitant de la vida en grans parts de la zona emergida del planeta Aigua.

I a Andorra, què?

A Andorra els rius principals han estat confinats en murs a llarg de molts quilòmetres i el risc que suposa que es puguin desbordar és enorme, a pesar que els murs donen una sensació de control total de les inundacions. No podem confiar que, com que la probabilitat que una avinguda molt extraordinària superi els murs és molt petita, no es produeixi demà mateix una avinguda "super extraordinària" que els superi. El risc pot ser petit, però Andorra és un territori molt vulnerable per totes les infraestructures i el continuïtat urbà que hi ha al llarg del riu. I ja

no hi ha boscos de ribera ni planes al·luvials que poguéssim fer servir per moderar la intensitat i la punta de les crescudes futures (Pons, 2021).

Tampoc hem de pensar que com que hi ha molta aigua mai faltaria recurs, especialment si se segueixen construint nous habitatges i fent que més i més gent visqui o visiti el principat (Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Ramaderia, 2024). Les grans sequeres també arribaran a Andorra, que és un país que no té pràcticament grans aqüífers. I la neu, que ha estat durant anys una assegurança per als estius, potser ja no ho serà en pocs anys. Tot i que els estudis existents no detecten una gran vulnerabilitat per al subministrament d'aigua, no diuen el mateix pel que fa al manteniment de temporades llargues d'esquí i de l'activitat econòmica que suporta. Quines mesures d'adaptació adoptarà Andorra? Seguirà el creixement infinit de tot?

L'estudi dels recursos i de la qualitat de l'aigua dels rius d'Andorra té una llarga tradició; no només se n'han analitzat els paràmetres físics i químics sinó també els biològics (Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Ramaderia, 2022). Hi ha a la web del Govern Andorrà molta informació al respecte. Ja el 1979 vàrem fer un primer estudi sobre la qualitat de l'aigua usant indicadors biològics (Prat et al 1979). L'estudi mostrava que una tercera part de la xarxa andorrana tenia molt mala qualitat –en aquell moment no hi havia depuradores–. Quaranta-quatre anys després, fent servir els mateixos indicadors la situació ha millorat una mica. La zona baixa dels rius, que ja estaven parcialment canalitzats, ha passat de qualitat molt dolenta a dolenta o moderada segons els indicadors biològics. Però encara no compleix totalment els requeriments de la DMA. En realitat l'estat de les aigües és menys que bo en un terç de la xarxa i si hi afegim els indicadors hidromorfològics, relacionats amb el bosc de ribera, la situació és dolenta en totes les zones més baixes, per la forta canalització del riu, ja que han desaparegut els pocs espais on s'hauria pogut restaurar un bosc de ribera. Andorra té molta por dels seus rius i no sembla haver avançat gaire en la cerca d'una manera en què la gent valori els serveis ecosistèmics que els hi proporcionen. Andorra hauria de substituir la cultura de la por (que vol fer fora l'aigua el més ràpid possible) per la del respecte pels ecosistemes fluvials. Si no, a la llarga el dia que l'aigua vulgui recuperar el seu espai les conseqüències seran molt pitjors.

Bibliografia

- BLANCO, J. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Ecosistemas*, 26(2): 1-9. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26.2.01
- BONADA, N., SÁNCHEZ MONTÓYA, M. M., CID, N. & PRAT, N. (2024). Retos y oportunidades para la evaluación del estado ecológico en ríos temporales. *Ecosistemas*, 33(1):2655. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2655>
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2024. *Europe's state of water. The need for improved water resilience. EEA Report 07/2024*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 110 p.
- GENERALITAT DE CATALUNYA, 2025. <https://canviclimatic.gencat.cat/ca/a mbits/adaptacio/estrategia-catalana-dadaptacio-al-canvi-climatic-2021-2030/index.html> Consultat el 11-2-2025.
- MARGALEF, R. (1993). *El Planeta Blau*. A: FOLCH R. (ed.). *Biosfera, 1 Planeta viu*. Enciclopèdia Catalana, p. 145-153.
- MAS-PLA, J. (coord.) (2006). *La Directiva marc de l'aigua a Catalunya. Conceptes, reptes i expectatives en la gestió dels recursos hídrics*. Generalitat de Catalunya, 144 p. https://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/CAT_Marc_de_l_aigua.pdf
- MIGUEL, C. & ROVIRA, N. (2014). *L'evolució del sanejament a Andorra*. Govern d'Andorra, 13 p.
- MINISTERI DE MEDI AMBIENT, AGRICULTURA I RAMADERIA. (2022). *Seguiment de la qualitat biòtica dels rius d'Andorra pel període 2018-2021. Adaptació de la metodologia a la normativa europea i determinació dels cabals ecològics dels rius principals. Projecte DMAS-1801568*. Govern d'Andorra, 59 p.
- MINISTERI DE MEDI AMBIENT, AGRICULTURA I RAMADERIA. (2024). *Resultats del balanç hídric del Principat d'Andorra*. Any 2023. Govern d'Andorra, 50 p.

ONU, 2025.

<https://www.unwater.org/water-facts/water-and-climate-change>
Consultat el 11-2-2025.

Pacific Institute, 2025.

<https://pacinst.org/water-conflict-chronology/>

Consultat el 11-2-2025.

PONS, C. (2021). «La sostenibilitat de l'aigua a Andorra: efectes a llarg termini del canvi climàtic i socioeconòmic en el recurs hídric». Tesi doctoral. Universitat d'Andorra, 268 p.

PRAT, N., BAUTISTA, I., GONZÁLEZ, G. & PUIG, M. A. (1979). Els cursos d'aigua, p 261-309. A: *El patrimoni natural d'Andorra*. R. Folch (ed.). Ketres Editora.

PRAT, N., PUÉRTOLAS, L., & RIERADEVALL, M. (2008). *Els espais fluvials. Manual de gestió ambiental*. Diputació de Barcelona, 118 p.

PRAT, N., ROS, J. D. & PETERS, F. (2015). *Ramon Margalef. El ecòlego de la biosfera: una biografía científica*. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona, 184 p.

PRAT, N. (2019). *Andanzas y desventuras de un ecólogo en los juzgados del "Reyno"*. Milenio, 127 p.

ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, Å. et al. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475 DOI 10.1038/461472a

RIFKIN, J. (2024). *Planeta Aqua. Repensar nuestro hogar en el Universo*. Paidós. Estado y Sociedad. 355 p.

The Living Planetary Index. https://wwf.panda.org/discover/knowledge_hub/all_publications/living_planet_index2/

Consultat el 11-2-2025.

THE WATER CALCULATOR. (2025). <https://watercalculator.org/footprint/what-is-virtual-water/>
Consultat el 11-2-2025.

Conclusions

Com hem vist l'aigua ja és un element limitant per a algunes nacions o conques i en grans superfícies de la Terra la seva manca o el seu excés suposa un canvi total en el funcionament dels ecosistemes associats. En el futur hem de considerar l'aigua com un element crític per a la conservació de la Biosfera tal com l'hem coneguda i per tant hauríem de buscar la manera que mitgant les nostres accions i adaptant-nos a la nova realitat, impedíssim arribar a un punt de no retorn, des d'on només podrem lamentar allò que no férem en el seu moment i, enrojolar entre els nostres fills i nets quan els contem el com era la Biosfera abans d'ells i com ells se la trobaran.



Ivan Paz i Viñas

Resum

Aquesta ponència aborda els reptes de la preservació de la biodiversitat d'aigua dolça en un context de canvis globals mitjançant exemples d'estudis de casos, com la conservació del cranc de riu de potes blanques en un rierol, la gestió d'espècies exòtiques invasores en una xarxa de llacs artificials o els impactes d'espècies introduïdes com el silur (*Silurus glanis*) en la biodiversitat aquàtica. Es destaca la importància d'enfocaments multidisciplinaris per abordar la degradació de la biodiversitat i desenvolupar estratègies de conservació eficaces.

Ponència

La biodiversitat és un concepte que reuneix la diversitat de totes les formes de vida. Segons la definició donada per la Convenció sobre la Diversitat Biològica, la biodiversitat es compon de tres nivells principals: (1) la diversitat ecosistèmica (és a dir, la varietat d'ecosistemes en un territori o regió, com ara els rius o els llacs en el cas dels ecosistemes aquàtics d'aigua dolça), (2) la diversitat específica, que representa la diversitat (o nombre) d'espècies i les seves abundàncies relatives, i (3) la diversitat genètica, que representa les variacions de la composició genètica dels individus dins d'una població, d'una espècie, o entre poblacions i espècies.

En reflexionar sobre com es distribueix la biodiversitat al planeta, és fàcil adonar-se que la distribució de la biodiversitat és heterogènia. Per exemple, no trobarem la mateixa diversitat al pic del Nevado Mismi, que s'eleva a 5.597 m i dona origen al riu Amazones, i a la seva part avall, que està envoltada de selva tropical. Però tot i que la biodiversitat està distribuïda de manera heterogènia, no està distribuïda de manera aleatòria. Una multitud de factors afecten aquesta distribució. Per exemple, la biodiversitat es distribueix sovint al llarg de gradients geogràfics, formant patrons espacials de biodiversitat particulars. Per exemple, existeix un patró de distribució de la biodiversitat general segons el qual hi ha més espècies a l'equador, i aquest nombre d'espècies disminueix a mesura que ens acostem als pols. També existeix un patró segons el qual el nombre d'espècies disminueix quan es puja en altitud. La distribució de la biodiversitat també està influenciada per factors ambientals i/o biogeogràfics. Per

Doctor en Ecologia, Biodiversitat i Evolució, professor associat al Laboratori d'Ecologia dels Hidrosistemes Naturals i Antropitzats (LEHNA) de la Universitat Claude Bernard Lyon 1 i membre del grup de treball sobre la composició genètica de la xarxa d'observacions de biodiversitat global GEO BON



Ivan Paz i Viñas

**Reptes per
protegir la
biodiversitat
d'aigua dolça a
múltiples escales
en un context de
canvis globals
accelerats**

Bibliografia

- BENAVIDES GUEDES, M., DALL'AGNOL, M., GRANDJEAN, F., PAZ-VINAS, I., & LIPEME KOUYI, G. (2024). "Interdisciplinary approach to manage a peri-urban creek: hydraulic and hydrological modeling of nature-based solutions to recharge the Razes creek while preserving a white-clawed crayfish population". Poster, SFE2 conference, Lyon.
- BOULÉTREAU, S., & SANTOUL, F. (2016). The end of the mythical giant catfish. *Ecosphere* 7, e01606. <https://doi.org/10.1002/ecs2.160>
- CASTAGNE, P., PAZ-VINAS, I., BOULÉTREAU, S., FERRIOL, J., LOOT, G. et al. (2023). Patterns of genetic variation in native and non-native populations of European catfish *Silurus glanis* across Europe. *Biodiversity and Conservation* 32, 2127-2147.
- CHANGEUX, T. (2003). Évolution de la répartition des écrevisses en France Métropolitaine selon les enquêtes nationales mensées par le conseil supérieur de la pêche de 1977 à 2001. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 370-371, 15-41.
- DUDGEON, D. (2019). Multiple threats imperil freshwater biodiversity in the Anthropocene. *Current Biology* 29, R960-967.
- FÜREDER, L., GHERARDI, F., HOLDICH, D., REYNOLDS, J., SIBLEY, P., & SOUTY GROSSET, C. (2010). *Austropotamobius pallipes*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- GARCIA, F., PAZ-VINAS, I., GAUJARD, A., OLDEN, J. D., & CUCHEROUSET, J. (2023). Multiple lines and levels of evidence for avian zoochory promoting fish colonization of artificial lakes. *Biology Letters* 19, 20220533.
- GRANDJEAN, F., ROQUES, J., DELAUNAY, C., PETRUSEK, A., BECKING, T., & COLLAS, M. (2017). Status of *Pacifastacus leniusculus* and its role in recent crayfish plague outbreaks in France: improving distribution and crayfish plague infection patterns. *Aquatic Invasions* 12, 541-549.

exemple, no trobarem la mateixa biodiversitat en un oasi al desert que en un llac situat en una zona temperada o tropical. La biodiversitat no només es distribueix de manera heterogènia i no aleatòria: també és variable en l'espai i en el temps. Per exemple, fa 6.000 anys, un ecosistema de tipus sabana verda ocupava el desert del Sàhara, amb un conjunt d'espècies molt diferent del d'avui. La biodiversitat és, per tant, dinàmica, especialment en els ecosistemes que són també molt dinàmics, com els ecosistemes aquàtics d'aigua dolça. Aquests ecosistemes, amb els seus hàbitats riberencs, són dels més rics en biodiversitat del planeta i presenten valors inestimables en els àmbits econòmic, sanitari, cultural, científic i educatiu. La qualitat i la quantitat d'aigua dolça influeixen en els processos biogeoquímics i les dinàmiques ecològiques que modelen la biodiversitat, la productivitat dels ecosistemes, així com la salut i el benestar dels humans a diferents escales (Hand et al., 2018). No obstant això, les activitats humanes afecten els llacs, els rius, els rierols, les zones humides i les aigües subterrànies provocant una reducció dràstica de la biodiversitat (Dudgeon, 2019).

La biodiversitat d'aigua dolça està en ràpid declivi en tots els continents i en les grans conques fluvials, i aquesta degradació és més ràpida que la dels ecosistemes terrestres (Dudgeon, 2019). En un context de canvis globals accelerats, la preservació de la biodiversitat d'aigua dolça presenta, per tant, diversos reptes que han de ser abordats mitjançant diversos enfocaments de manera integrativa, i això a diverses escales. Em resultarà impossible tractar tots els enfocaments que poden ser desplegats per preservar la biodiversitat d'aigua dolça a diverses escales durant aquesta ponència, però intentaré donar una visió general, presentant algunes de les investigacions multidisciplinàries que hem realitzat amb diversos companys aquests darrers anys en àmbits tant locals com regionals i globals.

La conservació del cranc de riu de potes blanques en el rierol de les Razes

El cranc de riu de potes blanques (*Austropotamobius pallipes*) és una espècie particularment amenaçada i vulnerable a escala europea (fig. 1). Des de finals dels anys 1990, les seves poblacions han experimentat disminucions dràstiques, amb extincions locals observades en diversos departaments francesos (Changeux, 2003). Aquesta tendència s'ha accentuat a partir dels anys 2000, amb una disminució del 50

al 80% de les poblacions en la seva àrea de distribució europea (Füreder et al., 2010). Si aquest ritme d'erosió es manté, aquesta espècie podria desaparèixer d'Europa en unes quantes dècades.

L'ensorrament de les poblacions d'*A. pallipes* és el resultat d'una combinació de factors, principalment la degradació del seu hàbitat i la introducció d'espècies de crancs de riu invasives originàries d'Amèrica del Nord (per exemple, *Procambarus clarkii*, *Pacifastacus leniusculus* o *Faxonius limosus*), més competitives, i que a més són portadores sanes d'un agent patògen (l'oomicet *Aphanomyces astaci*) responsable de la malaltia coneguda com a "pesta del cranc" (Grandjean et al., 2017). Un altre factor que limita la seva distribució és la temperatura de l'aigua, que no ha de superar els 21-22°C a l'estiu. La baixa tolerància a les altes temperatures i a la qualitat de l'aigua de l'*A. pallipes* la converteix en una espècie particularment vulnerable a les alteracions, fent-la molt sensible als canvis climàtics.

Al sud-est de Lió es troba el rierol de les Razes, un petit afluent del riu Yzeron que s'estén al llarg de 489 m. Aquest rierol, ubicat en una zona periurbana, presenta una conca altament impermeable que es divideix en dos seccions: una de "natural" i una altra de completament cimentada (fig. 2). Com a resultat, les pluges es recullen principalment pel sistema de drenatge municipal, fet que impedeix la recàrrega natural del riu i provoca l'esgotament d'aigua durant l'estiu. Aquest fenomen s'ha intensificat els darrers anys i representa una amenaça per al funcionament ecològic del rierol i per a la seva biodiversitat. Fa només deu anys, es va descobrir que aquest rierol alberga l'última població de cranc de riu de potes blanques de la conca de l'Yzeron, on les espècies de cranc de riu invasives proliferen. Pensem que aquesta població s'ha pogut mantenir gràcies al fet que el rierol està connectat a l'Yzeron a través d'una canonada de drenatge situada a més d'un metre d'altura. Aquesta infraestructura ha ajudat a evitar la colonització de les Razes per les espècies de cranc de riu invasores i, per consegüent, per la pesta del cranc, cosa que representa un dels pocs exemples d'efecte positiu de la fragmentació d'un curs d'aigua per a la seva biodiversitat.



Figura 1. Un cranc de riu de potes blanques a la part amunt del rierol de les Razes (Sainte-Foy-lès-Lyon, França). Les anàlisis genètiques ens han indicat que aquesta població no pertany a l'espècie *Austropotamobius pallipes* com es pensava fins ara, sinó a *A. italicus*, una altra espècie del grup de crancs de riu de potes blanques

- GUILLERAULT, N., BOULÉTREAU, S., & SANTOUL, F. (2019). Predation of European catfish on anadromous fish species in an anthropised area. *Marine and Freshwater Research* 70, 682.
- HAND, B. K., FUNT, C. G., FRISSELL, C. A., MUHLFELD, C. C., DEVLIN, S. P. et al. (2018). A social-ecological perspective for riverscape management in the Columbia River Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16, S23-S33.
- INSAVALOR i Sogreah. (1997). CANOE, logiciel d'hydrologie urbaine, conception et évaluation de réseaux d'assainissement, simulation des pluies, des écoulements et de la qualité des eaux, Manuel de l'utilisateur.
- LEIGH, D. M., VAN REES, C. B., MILLETTE, K. L., BREED, M. F., SCHMIDT, C. et al. (2021). Opportunities and challenges of macrogenetic studies. *Nature Reviews Genetics* 22, 791-807.



Figura 2. Rierol de les Razes (Sainte-Foy-lès-Lyon, França) a l'alçada (A) d'una zona "natural" (zona amunt) i (B) d'una zona cimentada i impermeable. La zona A és favorable a la presència del cranc de riu de potes blanques, al contrari de la zona B

1- Solucions basades en la naturalesa (SBN): accions per protegir, gestionar de manera sostenible i restaurar els ecosistemes naturals i modificats que aborden els reptes de la societat de manera efectiva i adaptativa, beneficiant simultàniament les persones i la natura.

Malgrat això, aquesta població de crancs s'enfronta a altres amenaces per a la seva supervivència, com el seu aïllament genètic (a causa de la seva desconexió total respecte d'altres poblacions a França), el risc d'escalfament de l'aigua i l'aparició de períodes de sequera durant els quals l'aigua pot deixar de fluir pel rierol. Per evitar-ho, i per petició del Syndicat d'Aménagement de Gestion de l'Yzeron, du Ratier et du Charbonnières (SAGYRC) hem dut a terme, amb companys de l'INSA de Lió i de la Universitat

de Poitiers, un estudi transdisciplinari amb l'objectiu de restaurar les capacitats hidrològiques del rierol de Les Razes sense comprometre les exigències ecològiques de la població de crancs (Benavides, Dall'Agnol et al., 2024). Ho hem fet mitjançant dos estratègies: (1) avaluant la distribució, l'estat de salut genètica i la tolerància de la població de crancs de riu a les variacions de paràmetres fisicoquímics del rierol, i (2) modelitzant hidràulicament la conca del rierol amb el programa CANOE (INSAVALOR i Sogreah, 1997) per simular escenaris de reinjecció d'aigües pluvials i implementar solucions basades en la naturalesa (SBN)¹ per infiltrar-les al rierol (Benavides, Dall'Agnol et al., 2024).

Sense entrar en detalls dels resultats, aquest estudi ha determinat que la població de cranc de riu de potes blanques de Les Razes no pertany a *A. pallipes* com s'esperava, sinó a una altra espècie del mateix grup anomenada *A. italicus*, i que aquesta població presenta nivells de diversitat genètica encara acceptables. La seva distribució al llarg del rierol també ha estat determinada amb precisió gràcies a mètodes d'ADN ambiental, i s'ha fet una proposta d'SBN al SAGYRC per reinjectar aigua de forma que les condicions fisicoquímiques del rierol es mantinguin tolerables per a aquesta espècie durant tot l'any. Aquest estudi interdisciplinari està ajudant el SAGYRC a implementar mesures concretes per millorar l'hàbitat de la població de crancs de riu. És un exemple de com disciplines com l'enginyeria hidrològica, la biologia i l'ecologia molecular

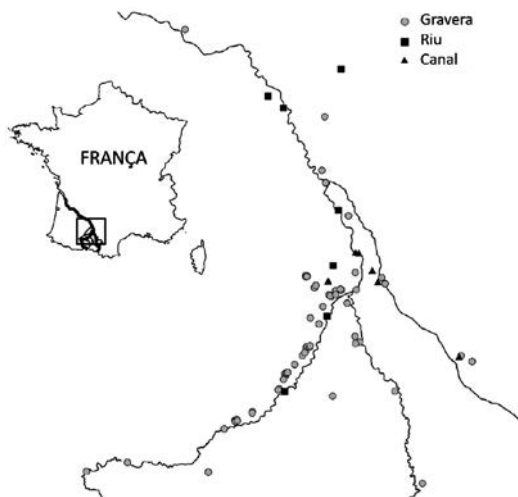
poden col·laborar per protegir la biodiversitat aquàtica d'aigua dolça a escales locals.

Estudiar les invasions biològiques en xarxes d'ecosistemes d'aigua dolça complexes: cas de les graveres al voltant del riu Garona

Identificar els vectors d'introducció d'espècies exòtiques invasores (EEI) és essencial per a la seva gestió efectiva. Els estudis genètics són molt útils per identificar aquests vectors a gran escala (nacional, mundial), però les anàlisis a escala local són encara poc freqüents, malgrat la seva importància en la gestió de les EEI (Paz-Vinas et al., 2021). Encara que els mètodes moleculars poden ajudar a identificar els principals vectors d'introducció, per si sols no poden determinar amb certesa si una introducció o un desplaçament d'individus d'EEI és causat per un vector antropogènic o natural. No obstant això, les eines genètiques són molt efectives per identificar els principals vectors d'introducció quan es combinen les dades genètiques amb informació provinent d'altres enfocaments (com qüestionaris sobre usos i pràctiques) i es valoren en funció de les característiques biològiques de les EEI, així com dels factors ecològics i socioeconòmics dels seus entorns.

Amb companys de la Universitat Paul Sabatier de Tolosa i del CNRS, vam dur a terme un projecte amb l'objectiu principal de generar coneixements que ajudin a optimitzar les mesures reglamentàries i de gestió de les espècies exòtiques invasores (EEI) aquàtiques d'escales locals a regionals, per minimitzar els seus impactes ecològics (Paz-Vinas, Loot i Cucherousset, 2022). Això s'ha aconseguit mitjançant dos estratègies: (1) determinant la contribució relativa dels vectors naturals i antropogènics implicats en la introducció de diverses EEI (peixos i crancs de riu) en una xarxa complexa d'ecosistemes aquàtics artificials, concretament en una xarxa de graveres (antigues mines d'extracció de grava a cel obert o pedreres que s'han transformat en llacs; fig. 3) situada

Figura 3. Situació geogràfica dels 72 indrets mostrejats per estudiar els vectors principals de dispersió de sis espècies exòtiques invasores i una espècie de peix autòctona (modificat a partir de Paz-Vinas, Loot i Cucherousset, 2022). Van ser mostrejats un total de 59 graveres, un embassament, sis indrets en rius i sis indrets situats en canals



LENOIR, J., BERTRAND, R., COMTE, L., BOURGEOUD, L., HATTAB, T. et al. (2020). Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nature Ecology and Evolution* 4, 1044-1059.

ORLOVA, E. L., & POPOVA, O. A. (1987). Age related changes in feeding of catfish, *Silurus glanis*, and pike, *Esox lucius*, in the outer delta of the Volga. *Journal of Ichthyology* 27, 54-63.

ORLOVA, E. L., & POPOVA, O. A. (1976). The feeding of predatory fish, the sheatfish, *Silurus glanis*, and the pike, *Esox lucius*, in the Volga Delta following regulation of the discharge of the river. *Journal of Ichthyology* 16, 75-87.

PAZ-VINAS, I., LANG, I., MILLET, P., VEYSSIÈRE, C., LOOT, G., & CUCHEROUSSET, J. (2021). Inference of local invasion pathways in two invasive crayfish species displaying contrasting genetic patterns. *Journal of Applied Ecology* 58, 2854-2865.

PAZ-VINAS, I., LOOT, G., BOULÉTREAU, S., CHIARELLO, M., & VEYSSIÈRE, C. et al. (2024). Genetic-based inference of densities, effective and census sizes of expanding riverine metapopulations of an invasive large-bodied freshwater fish (*Silurus glanis* L.). BiorXiv preprint doi: 10.1101/2024.04.05.588309.

PAZ-VINAS, I., & SANTOUL, F. (2018). Le silure glane (*Silurus glanis* L.): connaissances et estimation des stocks dans le bassin de la Garonne. Rapport technique UFBAG-AEAG. http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/61884/GED_00000003.pdf

al voltant dels rius Garona i Arieja; i (2) proposant estratègies per prevenir la introducció de noves EEI i gestionar les que ja estan presents.

Per assolir aquests objectius, vam fer qüestionaris per recollir dades sobre les pràctiques i percepcions relatives a les EEI entre gestors de graveres i pescadors. A més, vam dur a terme anàlisis genètiques de sis EEI en un total de 72 indrets diferents (fig. 3): el peix gat negre (*Ameiurus melas*), el peix sol (*Lepomis gibbosus*), el cranc de riu americà (*Procambarus clarkii*), el cranc dels canals (*Faxonius limosus*), la perca americana (*Micropterus salmoides*) i la gambúsia (*Gambusia holbrooki*), juntament amb una espècie nativa, la perca de riu (*Perca fluviatilis*). Totes aquestes dades van ser confrontades amb dades de monitoratge temporal de les comunitats aquàtiques d'aquests indrets, efectuades pels equips de Julien Cucherousset, del CNRS (laboratori CRBE).

Els qüestionaris van revelar diferències significatives en les percepcions entre gestors i pescadors. En particular, vam descobrir que la perca americana és l'única espècie introduïda de manera voluntària durant els repoblaments efectuats pels gestors dels llacs. A més, els pescadors van indicar que introdueixen voluntàriament individus de perca americana als llacs, així com crancs de riu americà i, de manera més anecdòtica, peixos sol, perques comunes i peixos gat negres.

Gràcies a l'anàlisi de marcadors genètics, hem caracteritzat els patrons espacials de variabilitat genètica de les set espècies i hem determinat les mides efectives de les seves poblacions i les migracions recents entre llacs. Hem observat patrons de variabilitat genètica distintius entre les espècies, que suggereixen una història de colonització complexa dins de la xarxa de graveres (vegeu Paz-Vinas et al., 2021, per un exemple detallat sobre els crancs de riu). A més, les anàlisis indiquen que aquesta xarxa és molt dinàmica, amb desplaçaments d'individus de totes les espècies, malgrat la desconexió aparent dels llacs i les diferències en la proporció d'individus migrants i les distàncies recorregudes (Paz-Vinas, Loot i Cucherousset, 2022).

La síntesi de tots els resultats obtinguts a partir de diversos enfocaments ens ha proporcionat una visió clara dels principals vectors d'introducció per a cadascuna de les espècies en aquesta regió (fig. 4). La perca americana sembla ser introduïda principalment de manera voluntària pels

gestors i els pescadors. Altres espècies, com el peix gat i el peix sol, semblen ser introduïdes principalment de manera involuntària per l'home, mentre que la gambúsia i el cranc de riu americà són introduïdes tant accidentalment com voluntàriament pels pescadors. El cranc dels canals també sembla utilitzar aquests mateixos vectors, però la seva baixa variabilitat genètica, juntament amb la possible confusió entre aquesta espècie i el cranc de riu americà per part dels pescadors i gestors entrevistats, dificulta treure conclusions definitives sobre la coocurrència d'aquests vectors (fig. 4). Dos espècies semblen dispersar-se de manera natural en la xarxa de llacs. El cranc de riu americà, per exemple, pot dispersar-se activament entre llacs gràcies a les seves capacitats innates per desplaçar-se fora de l'aigua, mentre que la perca de riu comuna sembla colonitzar els llacs mitjançant processos de zoocòria aviària, és a dir, la dispersió d'individus o d'ous per part d'aus (vegeu Garcia et al., 2023, per a més detalls sobre aquest fenomen).

Estudis com aquest poden servir de base per al desenvolupament futur d'un índex integrador que valori el potencial invasor de diverses espècies i poblacions, facilitant la prioritització d'accions sobre les espècies i poblacions més problemàtiques. Aquest índex podria tenir en compte indicadors genètics obtinguts en el nostre estudi, com la mida eficaç de les poblacions i la riquesa al·lèlica, així com la demografia de les poblacions, l'eficàcia de colonització (distància recorreguda pels migrants, percentatge de migrants de primera generació) i el grau de pertorbació que l'espècie infligeix als ecosistemes (Paz-Vinas, Loot i Cucherousset, 2022).

PAZ-VINAS, I., & SANTOUL, F. (2019). Estimation de la biomasse de migrateurs anadromes consommée par le silure glane (*Silurus glanis* L.) dans la partie aval de la Garonne: approche par couplage de modélisations génétiques et bio-énergétiques. Rapport technique SMEAG-AEAG. https://www.dropbox.com/s/a7m3f3rf12dqn2o/Paz-Vinas_Santoul_SMEAG_Silure_Migrateurs_rapport_Final_revised_bon.pdf?dl=0

PAZ-VINAS, I., LOOT, G., & CUCHEROUSSET, J. (2022). DISPERSINVA: Étude des patrons d'invasion des espèces exotiques envahissantes animales dans le réseau hydrographique de la Garonne. Rapport technique AEAG. https://www.dropbox.com/s/2tqx8wnrxhh2y6/Rapport_DISPERSINV_A.pdf?dl=0

SHEN, M., VAN KLINK, R., SAGOUIS, A., PETSCH, D. K., ABONG'O, D. A. et al. (2024). FRESHLANDIV: A global database of freshwater biodiversity across different land uses. *Global Ecology and Biogeography* e13917.

STOLYAROV, I. A. (1985). Dietary features of catfish, *Silurus glanis*, and pike-perch, *Stizostedion lucioperca*, in Kyzlyarsk Bay, northern Caspian Sea. *Journal of Ichthyology* 25, 140-145.

Espècie	Vector d'origen antròpic			Vector d'origen natural		
	Voluntària (oficial)	Voluntària (no autoritzada)	Accidental	Dispersió activa	Zoocòria aviària	
 <i>Micropterus salmoides</i>	SI	SI				
 <i>Amelurus melas</i>			SI			
 <i>Lepomis gibbosus</i>			SI			
 <i>Gambusia holbrooki</i>		SI	SI			
 <i>Procambarus clarkii</i>		SI	SI	SI		
 <i>Perca fluviatilis</i>						SI
 <i>Faxonius limosus</i>		(SI)	(SI)			

Figura 4. Principals vectors d'introducció i colonització identificats per a cadascuna de les espècies estudiades. Els parèntesis indiquen que no es poden treure conclusions definitives sobre aquests vectors, encara que alguns dels resultats suggereixen la seva la coocurrència (Paz-Vinas, Loot i Cucherousset, 2022)



Figura 5. Il·lustració d'un individu de silur (*Silurus glanis*) (Krüger, Bibliothèque Nationale de France)

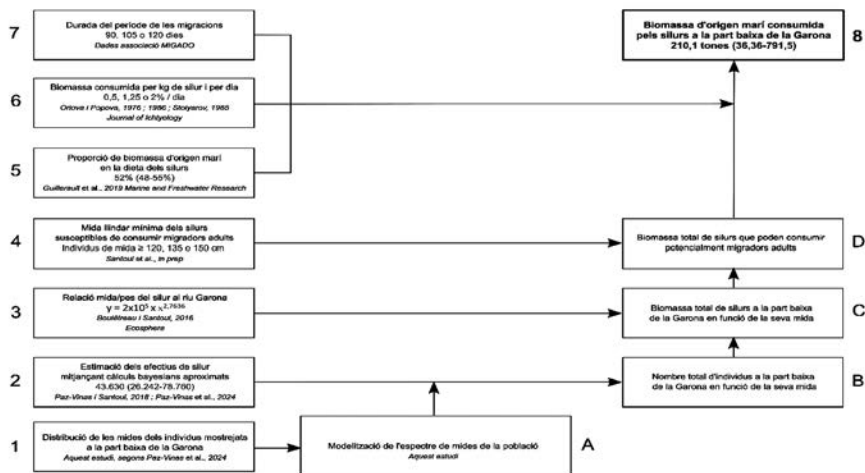
Impactes d'un peix introduït a escala regional i patrons de diversitat genètica a escala europea

El silur (*Silurus glanis*) és el peix d'aigua dolça més gran d'Europa (pot arribar a mesurar més de 2,70 m i pesar més de 130 kg; Boulêtreau i Santoul, 2016; fig. 5). A França, on s'ha introduït àmpliament, el silur pot superar dos vegades la mida dels depredadors d'aigua dolça nadius com el lluç de riu (*Essox lucius*). Aquesta situació incrementa la "mida refugi" de les preses, és a dir la mida màxima a partir de la qual les preses ja no són consumides per un depredador, convertint espècies protegides com les espècies migratòries anàdromes,² que fins ara escapaven de la depredació, en víctimes potencials del silur.

És llavors necessari estudiar els efectes que el silur pot tenir sobre aquestes espècies migratòries, algunes d'elles considerades en risc d'extinció a França. Per això, vam realitzar un estudi amb companys de la Universitat de Tolosa que tenia com a objectiu proporcionar una estimació de la quantitat de biomassa de migradors anàdroms (és a dir, d'origen marí) consumits anualment pels silurs a la part baixa del riu Garona (Paz-Vinas i Santoul, 2019). Per fer aquesta estimació, vam combinar dades provinents de diverses investigacions científiques relatives a la biologia d'aquesta espècie i a l'ecologia de la població de silurs de la Garona (Paz-Vinas i Santoul, 2019; Paz-Vinas et al., 2024). Així, van respondre diverses preguntes preliminars com ara quina és la proporció de biomassa d'origen marí a la dieta dels silurs o quants individus de silur prou grans per poder consumir espècies migratòries es troben a la part baixa de la Garona (fig. 6). La majoria d'aquestes preguntes ja estaven respostes en estudis anteriors, però per poder sintetitzar-les totes vam haver de dur a terme nous estudis, com ara mostres genètics per estimar la talla de la població (Paz-Vinas et al., 2024) i estudis demogràfics per determinar quina és la composició en classes de mides de la població de silurs de la part baixa de la Garona, ja que només els individus d'una certa mida (~135 cm, fig. 6) poden consumir migradors anàdroms.

Així, combinant els resultats dels diversos estudis, hem pogut estimar una quantitat de 210,1 tones de migradors anàdroms adults consumits pel silur cada any (interval de confiança = 36,3-791,5), que representa una quantitat molt important, de deu a vint vegades més que les quantitats que els pescadors professionals poden pescar per any en aquesta conca.

2- Espècies anàdromes: espècies que fan una part del seu cicle de vida al mar i una altra a l'aigua dolça, com ara les aloses, el salmó atlàntic o la llamprea de mar.

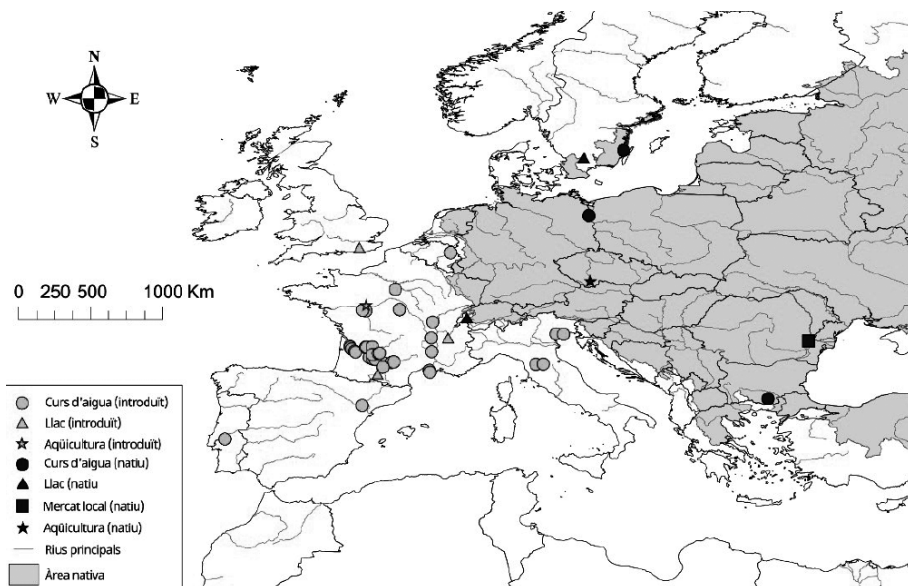


Cal destacar que aquestes estimacions només es refereixen a la biomassa derivada del consum de migradors anàdroms adults i no tenen en compte els impactes potencials sobre els juvenils. A més, els intervals de confiança són voluntàriament grans, ja que tenen en compte els graus d'incertesa propis de cada estudi i paràmetre representats en la fig. 6. Tanmateix, aquestes primeres estimacions suggereixen que el silur té un impacte significatiu sobre les poblacions d'espècies migratòries anàdromes adultes a la part baixa de la Garona i haurien d'incitar i ajudar a desenvolupar accions i polítiques adaptades a la gestió de les poblacions de silur i de les espècies migratòries.

Alguns països europeus on el silur ha estat introduït, com ara Portugal, Espanya o Itàlia, ja el consideren una espècie invasora i estan desplegant esforços importants per gestionar-la. Paradoxalment, algunes poblacions dins de l'àrea nativa han patit descensos demogràfics dràstics durant les darreres dècades (Castagné et al., 2023). El silur europeu representa, doncs, un model biològic interessant per estudiar simultàniament les poblacions natives, importants per a la conservació, i les poblacions introduïdes, potencialment invasores. Així, vam dur a terme un estudi genètic a escala europea per obtenir una instantània dels patrons espacials de variabilitat genètica i de les relacions genètiques entre les poblacions introduïdes i natives d'aquesta espècie (fig. 7,

Figura 6. Representació esquemàtica de les diferents etapes necessàries per a l'estimació de la biomassa total d'origen marí (i, per tant, de migradors anàdroms) consumida anualment per la població de silurs de la part baixa de la Garona (punt 8). Els punts 1 a 7 corresponen a les diferents etapes i informacions obtingudes a partir de diversos estudis sobre la biologia i l'ecologia del silur. Les lletres de la A a la D, representades en blau, corresponen a etapes de càlcul intermèdies (Paz-Vinas i Santoul, 2019)

Figura 7. Mapa de la ubicació de les mostres de silur europeu. Els cercles representen la ubicació de les mostres de rierols i rius, les estrelles, la ubicació de les mostres d'incubadores de peixos (aquicultura), els triangles, dels llacs, i el quadrat, d'un mercat local. Els llocs de mostreig situats en àrees on el silur ha estat introduït estan representats en verd, mentre que els llocs de mostreig situats en àrees on el silur és natiu estan representats en blau. L'àrea grisa representa l'àrea nativa actual del silur



Castagné et al., 2023). Vam utilitzar específicament eines genètiques per (1) descriure la diversitat genètica i l'estructura de poblacions de silur mostrejades a través d'Europa, (2) avaluar les relacions genètiques possibles entre les poblacions natives i no natives, i (3) avaluar l'estat genètic tant de les poblacions introduïdes com de les natives.

Així, hem confirmat que algunes poblacions natives (de Suècia i Suïssa) tenen una diversitat genètica limitada i que algunes poblacions introduïdes (sobretot les del sud-oest de França) tenen una forta diversitat genètica malgrat que són poblacions introduïdes. També hem determinat algunes relacions genètiques potencials entre algunes poblacions natives i no introduïdes. Per exemple, els individus mostrejats a la Gran Bretanya s'assemblen molt des d'un punt de vista genètic als individus mostrejats a la República Txeca i a Romania (Castagné et al., 2023). Aquest resultat és coherent amb els registres històrics, que assenyalen una introducció de silurs procedents de la Valàquia (un antic principat que ara correspon a Romania) a l'abadia de Woburn l'any 1880. D'altres poblacions introduïdes, com ara les de Portugal i

Espanya, també estan vinculades des d'un punt de vista genètic, i hem identificat almenys quatre orígens genètics diferents per les poblacions de silur franceses, encara que no hem pogut identificar totes les poblacions originàries. Així doncs, és necessari un major esforç de mostreig, especialment en àrees natives, per ampliar els coneixements sobre els patrons actuals de variació genètica de les poblacions de silur europeu i per caracteritzar més precisament les rutes d'introducció (fig. 7).

Conclusions i perspectives

La preservació de la biodiversitat d'aigua dolça és fonamental per al benestar humà i la salut dels ecosistemes. Les investigacions demostren que un enfocament integrador, adaptat a les característiques locals i regionals, pot millorar les condicions per a les espècies amenaçades i gestionar eficaçment les espècies invasores. La col·laboració interdisciplinària és essencial per afrontar els reptes que presenta la degradació de la biodiversitat en un context de canvi ambiental accelerat. Encara que poc esmentades durant aquesta ponència, la macroecologia, la biogeografia i noves disciplines emergents com la macrogenètica (Leigh *et al.*, 2021) poden contribuir significativament a la preservació de la biodiversitat d'aigua dolça a escala global. Aquestes disciplines poden ajudar a identificar patrons de riquesa i distribució d'espècies, facilitant la localització de zones clau per a la conservació i la creació d'àrees protegides. A més, permeten preveure l'impacte dels canvis climàtics i de l'ús del sòl en la biodiversitat aquàtica (Shen *et al.*, 2024, Lenoir *et al.*, 2020), facilitant la planificació d'accions de conservació. També són necessàries per promoure una gestió sostenible dels recursos hídrics que equilibri les necessitats humanes amb la preservació ecològica, i per fomentar la divulgació de coneixements per influir en polítiques de conservació a escala global.



Resum

L'aigua és un recurs essencial per a la vida en el planeta Terra, el qual està representat en un 97% en forma d'aigua salada en els mars i oceans. D'entre les seves múltiples propietats, en destaca la gran diversitat de serveis ecosistèmics que ofereix. En l'àmbit marí, una de les seves principals qualitats és que representa una font d'aprovisionament de recursos alimentaris, de la qual l'ésser humà es beneficia mitjançant activitats com la pesca comercial. No obstant això, el gran impacte que està tenint aquesta activitat sobre els ecosistemes i recursos aquàtics en les darreres dècades, causant una evident regressió de les seves poblacions biològiques i una degradació del seus hàbitats, ha provocat que sigui necessària la creació i implementació de mesures de regulació i gestió pesquera per tal de mantenir i preservar el bon estat de salut dels ecosistemes marins, de les seves poblacions i de la seva biodiversitat. Per tal de poder fer una gestió eficient i sostenible en matèria de pesca per part de les administracions públiques, és imprescindible que els esforços vagin destinats al fet que la comunitat científica pugui elaborar estudis de seguiment i recerca marina que contribueixin a millorar el coneixement sobre l'estat de les pesqueries. Una de les eines més utilitzades en recerca marina a l'hora d'analitzar l'estat dels recursos pesquers es l'aplicació de models d'avaluació dels estocs pesquers, ja que permeten obtenir paràmetres essencials sobre l'estructura i l'estat de les poblacions que poden servir com a referència a l'hora de proporcionar assessorament científic en matèria de regulació i gestió pesquera.

Ponència

L'aigua és un dels compostos més abundants i preuats del planeta Terra, el qual representa més d'un 70% de la superfície del planeta (Hossain, 2015; Kiliç, 2020). A més, és un recurs que té la capacitat, de manera natural i constant, d'autoregular-se mitjançant una sèrie de processos físics ambientals (com són l'evaporació, la condensació, la precipitació, la infiltració, l'acumulació, la escorrentia superficial o el flux subterrani) que garanteixen la seva renovació, evolució i constant disponibilitat (Cui et al., 2018).

Marc Farré i Foix

Doctor en Biologia per la Universitat de Barcelona, investigador al Centre Oceanogràfic de les Illes Balears, Instituto Español de Oceanografía del Consejo Superior de Investigaciones Científicas



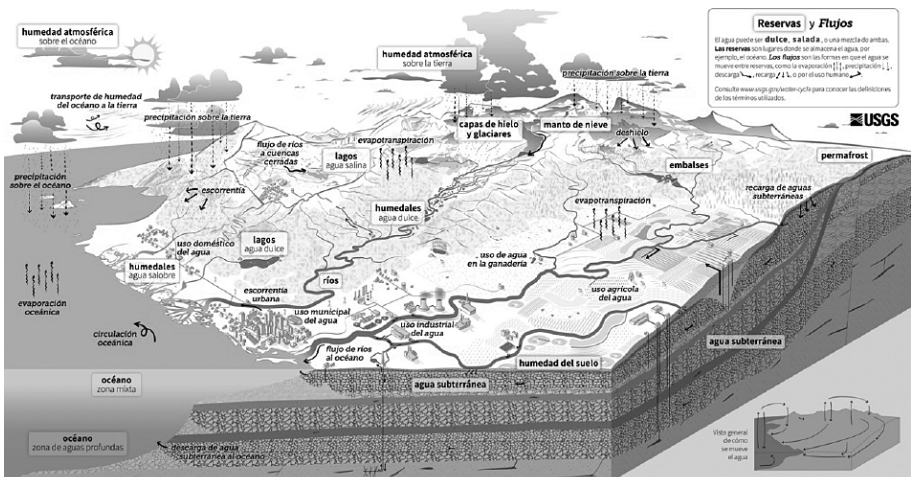
Marc Farré i Foix

El paper de la recerca marina en l'assessorament i la gestió de les pesqueries del Mediterrani

Aquest conjunt de processos i fenòmens es coneix com a **cicle de l'aigua** (figura 1).

El paper de l'aigua és essencial des de molts punts de vista, en primer lloc per al desenvolupament i manteniment de la vida, però també per a la caracterització i definició de paisatge, ambient i meteorologia del planeta, així com per a l'ús que l'ésser humà en fa per tal de satisfer les seves necessitats i cobrir els serveis ecosistèmics que demanda (Owens, 2001). Aquest ús antropogènic de l'aigua afecta de manera decisiva el seu cicle i dinàmica, com també a la seva qualitat i quantitat disponible, i els hàbitats, biota i comunitats biològiques que hi habiten. Dins els diferents usos que l'ésser humà fa de l'aigua s'hi inclouen tant els 1) usos domèstics i públics necessaris per garantir el manteniment i el benestar de la societat com els 2) usos directament relacionats amb activitats econòmiques, com per exemple els usos comercials, en indústria (generació de fonts d'energies o manteniment de plantes generadores), en activitats tant del sector primari (agricultura, ramaderia, mineria o pesca) com del sector terciari (producció de productes, alimentació, purificació de l'aigua o ús relacionat amb el sector turístic). També s'hi poden incloure usos de caràcter tradicional, cultural, recreatiu i simbòlic (Grizzetti et al., 2016).

Figura 1. Representació gràfica dels estats, reservoris i processos que defineixen el cicle de l'aigua. Adaptat de <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.htm>



L'aigua dolça terrestre (*freshwater*) és el recurs natural més essencial del planeta, ja que garanteix gairebé totes les activitats humanes bàsiques que permeten un desenvolupament sostenible de les societats, com ara l'accés a la beguda i al sanejament de manera segura i viable. També és clau en altres activitats humanes de caràcter econòmic, com ara activitats relacionades amb la indústria, l'alimentació o el sector turístic esmentades anteriorment (Douville et al., 2021). Les capes de gel, glaceres i la neu acumulada representen fins a un 96% de tota l'aigua dolça del planeta, mentre que només el 4% es considera aigua dolça fàcilment accessible i disponible per al funcionament sostenible dels ecosistemes i per a l'abastiment de les necessitats de les societats humanes; aquesta fracció està continguda principalment en rius, llacs aigües subterrànies (Abbott et al., 2019). No obstant això, l'aigua terrestre només representa un 2% de l'aigua de tot el planeta, mentre que gairebé el 97% és aigua salada provinent dels mars i oceans, que evidentment també té un impacte i uns efectes evidents i significatius en tots els ecosistemes i ambients del planeta, com també en l'ús antropogènic. Per aquest motiu, l'estudi dels dominis marins i oceànics és clau i necessari per entendre la dinàmica, l'evolució i la importància de l'aigua en el nostre planeta, així com de les oportunitats que pot oferir en els seus ecosistemes.

Dins l'ampli ventall de serveis que ofereixen els ecosistemes marins, un dels que tenen més impacte econòmic, cultural i ecosistèmic és el servei de producció o aprovisionament, és a dir, el de subministrament de recursos, entre els quals hi ha els alimentaris (figura 2). I el principal actor relacionat amb aquest servei, juntament amb la indústria relacionada amb l'aqüicultura, és el sector de la pesca (Barbier, 2017; Beaumont et al., 2007; Muntadas et al., 2015). La pesca és una de les activitats antropogèniques vinculades a l'aigua salada més importants tant des del punt de vista econòmic com de la funció que té, però també és reconeguda com una de les principals fonts de pertorbació i impacte que han alterat històricament i crònicament els ecosistemes marins. De fet, diversos estudis demostren que les captures pesqueres estan disminuint constantment a escala mundial en les darreres dècades (Pontecorvo and Schrank, 2014; Pauly and Zeller, 2016), fet que demostra que és necessari crear i implementar estratègies i plans de gestió i regulació d'aquesta activitat per tal de garantir que es pugui continuar mantenint la prestació dels serveis ecosistèmics que ofereix el mar.

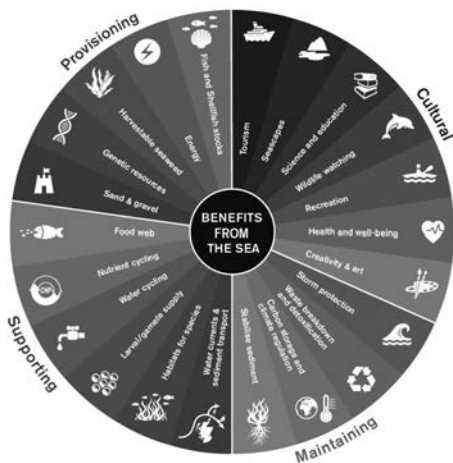
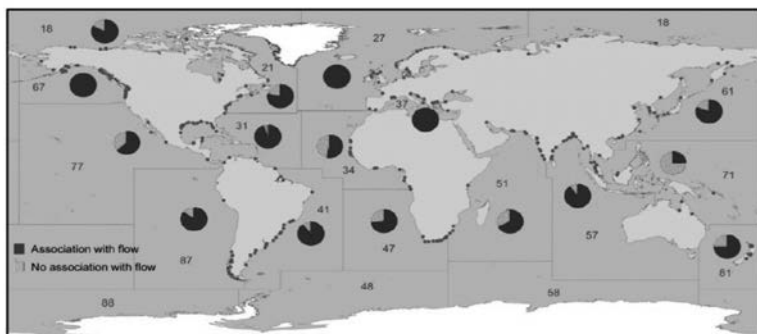


Figura 2. Representació gràfica dels serveis ecosistèmics que ofereixen els ecosistemes marins. Adaptat de <https://water.usgs.gov/edu/waterycycle.htm>

Figura 3. Mapa mundial on es representa, en els gràfics circulars i per a les principals zones pesqueres d'arreu del món, el percentatge de captures de les deu espècies més capturades de cada zona que estan relacionades amb l'aigua dolça (en blau) i les que no n'estan (en vermell). Adaptat de Broadley et al., 2022



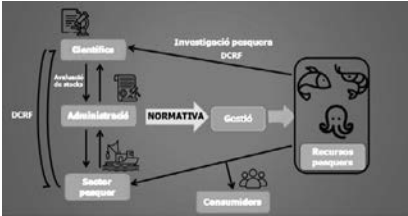
Tot i que la pesca se sol vincular directament als ecosistemes marins, i per tant a l'aigua salada, també té una forta relació amb l'aigua dolça continental. Està demostrat que els fluxos d'aigua dolça i sediments que aporten els rius i estuaris a les regions costaneres del mar contribueixen a la modificació i a la recirculació dels nutrients en l'àmbit costaner, fet que estimula la productivitat marina (Milliman and Farnsworth, 2013). Aquests processos poden afectar l'abundància i distribució de la majoria d'espècies marines, ja sigui de manera directa, mitjançant variacions en la temperatura o salinitat, o indirecta, mitjançant canvis en la disponibilitat d'aliments o d'hàbitats. De fet, estudis

demostren que fins a un 72% de les espècies capturades per les pesqueries arreu del món (i representant un 77% del volum total de captures mundial) estan directament relacionades amb els cabals d'aigua dolça proporcionats pels rius o estuaris en almenys alguna de les seves fases vitals (Broadley et al., 2022). De fet, al mar Mediterrani, les deu espècies més capturades per la flota pesquera tenen totes una relació directa amb el subministrament d'aigua dolça per part dels rius (figura 3).

En l'àmbit del mar Mediterrani, la Unió Europea (UE) és l'organització responsable de legislar i regular les polítiques i mesures de gestió pesqueres a escala regional. Per tal de dur a terme les tasques en aquest aspecte, una de les mesures

Aigua: desafiaments i oportunitats

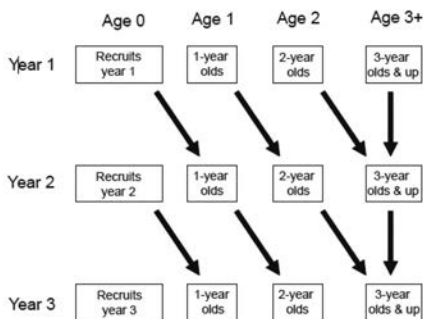
Figura 4. Esquema explicatiu dels actors implicats en la gestió dels recursos marins, en què destaca el paper del DCRF i de l'avaluació d'estocs a l'hora de proporcionar assessorament científic



multiespecífics o ecosistèmics, socioeconòmics, de projeccions i simulacions, etc.; Smith and Addison, 2003). Els més utilitzats a l'hora d'avaluar l'estat dels recursos marins més importants en l'àmbit pesquer solen ser els monoespecífics, ja que s'enfoquen a avaluar en profunditat l'estat d'un estoc particular en una zona determinada (per exemple, la gamba vermella a les Illes Balears). Dins d'aquests tipus de models, n'existeixen de diferents tipus en funció del tipus i riquesa de dades que es tinguin. Els models que permeten una avaluació més completa són els que disposen de sèries de dades llargues i que tenen informació sobre l'estructura demogràfica poblacional de les espècies (distribucions de talles dels individus), així com informació biològica de les espècies (per exemple, per conèixer les seves èpoques de reproducció, el percentatge de mascles i femelles en la població, el percentatge d'individus en estat de maduració sexual o l'edat dels individus). El DCRF que implementa l'IEO en el Mediterrani espanyol permet la recopilació de tots aquests tipus de dades, de manera que es poden aplicar aquests tipus de models per fer les avaluacions. Com a dades d'entrada per a aquest tipus de models, es necessiten principalment dos tipus de dades. En primer lloc, dades dependents de la flota comercial, que s'obtenen mitjançant el programa de seguiment DCRF, que executa l'IEO gràcies a mostrejos a bord en les barques comercials, a mostrejos en les llotges de venda i a mostrejos biològics fets en el laboratori. Aquestes dades són de gran importància i qualitat per als models, ja que permeten tenir una imatge completa del comportament de les poblacions de manera regular i al llarg de tot l'any. No obstant això, tenen l'inconvenient que són dependents del comportament de la flota comercial, és a dir, no permeten focalitzar el seguiment en un estoc concret, ja que es depèn dels objectius que tingui la flota comercial. Per tal de compensar aquest factor, els models necessiten incorporar un segon tipus de dades que siguin independents de la flota comercial. Aquestes dades s'obtenen mitjançant la realització de campanyes oceanogràfiques amb vaixells especialitzats, que permeten obtenir dades focalitzant l'esforç en els estocs objectiu i mitjançant l'aplicació de protocols estandarditzats. Aquestes dades també són de gran importància, però tenen l'inconvenient que només s'obtenen en moments concrets de l'any donant una imatge puntual de l'estat dels estocs (no

tenen la cobertura del seguiment anual de la flota pesquera), així que s'utilitzen només per calibrar i balancejar els models. Per aquest motiu, és necessària la combinació dels dos tipus de dades per fer una correcta avaluació d'un determinat estoc.

Considerant el conjunt de dades que permet recopilar el DCFR, el tipus de models d'avaluació més complexos i complets que es poden utilitzar són els models estructurats per talles o edats. La majoria de models d'assessorament pesquer parteixen de la premissa bàsica que l'evolució d'un estoc o població determinada d'un any a l'any següent (en termes de volum o biomassa) depèn del balanç entre les variables d'entrada (és a dir, el nombre d'individus que neixen aquell any i que per tant s'incorporen a l'estoc, fracció anomenada *reclutament*, i també del creixement dels individus que ja pertanyien a l'estoc) i les variables de sortida (els individus que abandonen l'estoc per mortalitat natural o per la mortalitat provocada per la pesca). Els models estructurats per talles o edats utilitzen sèries de dades llargues de captures (abundància i biomassa) caracteritzant l'estructura demogràfica de les poblacions per edats per cada any. D'aquesta manera, per a cada any i mitjançant l'aplicació de models matemàtics, a partir de les dades totals de captures poden calcular el nombre d'individus pertanyents al reclutament (edat 0) i el nombre d'individus d'edat 1 o superior, i que per tant ja formen part de la fracció adulta o reproductora (coneguda com Spawning Biomass, SB). I a mesura que s'incorporen dades d'anys nous, parteixen de la base que els individus d'edat 0 d'un any determinat esdevenen individus d'edat 1 l'any següent, i així successivament per al total d'edats de l'espècie (figura 5).



Bibliografia

- ABBOTT, B. W., BISHOP, K., ZARNETSKY, J. P., MINAUDO, C., CHAPIN III, F. S., KRAUSE, S., HANNAH D.M., CONNER L., ELLISON D., GODSEY S.E., PLONT S., MARÇAIS J., KOLBE T., HUEBNER A., FREI R.J., HAMPTON T., GU S., BUHMAN M., SAYEDI S.S., URSACHE O., CHAPIN M., HENDERSON K.D., & PINAY, G.(2019). Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12(7): 533-540.
- BARBIER E. B. (2017). Marine ecosystem services. *Current Biology*, 27(11): R507-R510.
- BEAUMONT N.J., AUSTEN M.C., ATKINS J.P., BURDON D., DEGRAER S., DENTINHO T.P., DEROU S., HOLM P., HORTON T., VAN IERLAND E., MARBOE A.H., STARKEY D.J., TOWNSEND M., & ZARZYCKI T. (2007). Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: implications for the ecosystem approach. *Marine Pollution Bulletin*, 54(3): 253-65.
- BROADLEY A., STEWART-KOSTER B., BURFORD M.A., & BROWN C.J. (2022). A global review of the critical link between river flows and productivity in marine fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 32(3): 805-825.
- CUI Y., CHEN X., GAO J., YAN B., TANG G., & HONG Y. (2018). Global water cycle and remote sensing big data: overview, challenge, and opportunities. *Big Earth Data*, 2(3), 282-297.

Figura 5. Esquema explicatiu del funcionament i premisses bàsiques de les quals parteixen els models d'avaluació d'estocs pesquers estructurats per talles o edats

DOUVILLE H., RAGHAVAN K., RENWICK J., ALLAN R.P., ARIAS P.A., BARLOW M., CEREZO-MOTA R., CHERCHI A., GAN T.Y., GERGIS J., JIANG D., KHAN A., POKAM MBA W., ROSENFELD D., TIERNEY J., & ZOLINA O., (2021). Water Cycle Changes. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055-1210. GFCM, 2018. GFCM Data Collection Reference Framework (DRCF). Version 20.1.

A més, a part del càlcul dels valors demogràfics de la població (reclutament i SB), també permeten el càlcul, considerant els valors de les captures i l'evolució d'aquestes últimes al llarg de la sèrie temporal, dels valors de la mortalitat provocada per la pesca (F), que representa l'índex de mortalitat dins la població provocat per la pesca. El reclutament, l'SB i la mortalitat per pesca (F) són els principals resultats de sortida que proporcionen els models, i l'anàlisi i interpretació d'aquestes variables són les permeten extreure conclusions sobre l'estat dels estocs, i d'aquesta manera poder proporcionar assessorament científic. En la figura 6 es mostren els resultats obtinguts per les avaluacions fetes els anys 2022 i 2023 per als estocs de lluç (*Merluccius merluccius*) i de la gamba blanca (*Parapenaeus longirostris*), dos de les espècies comercials

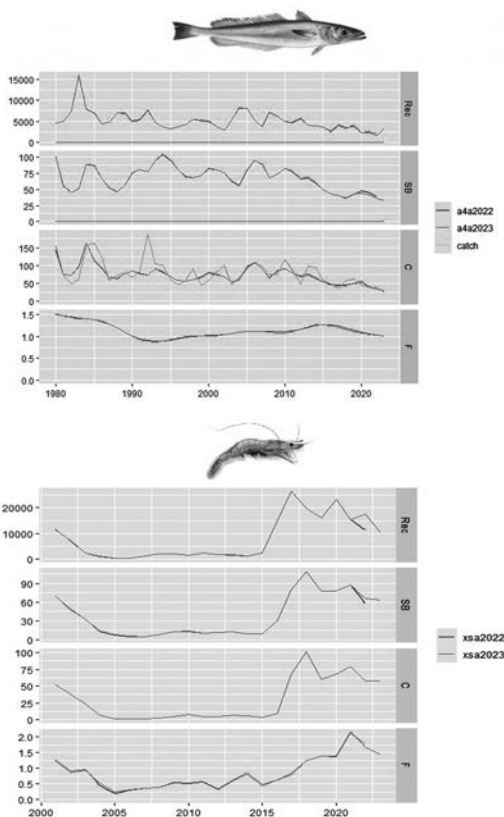


Figura 6. Comparació dels resultats de les avaluacions dels estocs del lluç (*Merluccius merluccius*, esquerra) i de la gamba blanca (*Parapenaeus longirostris*, dreta) de les Illes Balears fetes al 2022 (en vermell) i al 2023 (en verd per al lluç i blau per a la gamba), en què es poden observar els valors del reclutament (Rec), la biomassa reproductora (SB), les captures (C) i la mortalitat per pesca (F). Per al lluç, la sèrie de dades va des del 1980 fins al 2023, mentre que per a la gamba blanca les dades són des del 2001 fins al 2023

econòmicament més importants del Mediterrani espanyol, a les Illes Balears.

En la ciència relacionada amb l'avaluació d'estocs pesquers, l'assessorament científic s'acostuma a proporcionar mitjançant la definició del que es coneix com a *punts de referència*, que són valors estimats a partir de models estadístics d'avaluació d'estocs que permeten determinar l'estat de salut en què es troba una població o estoc concret, i que per tant s'utilitzen com a guia en la gestió i assessorament pesquer. Aquests valors poden estar basats en dos de les variables comunament calculades per als models d'avaluació d'estocs: en valors de biomassa de les captures o en valors de mortalitat per pesca. D'aquesta manera, els models, amb tot el conjunt de dades temporals que utilitzen, són capaços de calcular 1) uns punts de referència objectiu, que serien els valors que defineixen l'estat desitjable o ideal del recurs, com també 2) punts de referència límit, que defineixen els llindars a partir dels quals es considera que el recurs està en perill i que per tant requereix una acció immediata per a la seva recuperació. Per tant, un cop s'obtenen els resultats del model per al darrer any analitzat, la comparació entre els valors obtinguts pel model per al darrer any i els valors dels punts de referència és el quocient que permet proporcionar assessorament científic (figura 7).

En el cas de punts de referència basats en biomassa:

- Si el valor de la biomassa del darrer any o actual (B_c) és superior al valor de biomassa referència objectiu ($B_{0.1}$) = no hi ha senyal de sobreexplotació de l'estoc, i per tant es pot considerar que es troba en situació d'explotació sostenible.
- Si el valor de la biomassa del darrer any o actual (B_c) es troba entre el valor de biomassa referència objectiu ($B_{0.1}$) i el valor de biomassa referència límit (B_{lim}) = es considera que la biomassa de l'estoc està en nivells baixos i vulnerables.
- Si el valor de la biomassa del darrer any o actual (B_c) és inferior al valor de biomassa referència límit (B_{lim}) = situació de col·lapse de l'estoc, que requereix mesures immediates per tal de recuperar el recurs.

En el cas de punts de referència basats en la mortalitat per pesca:

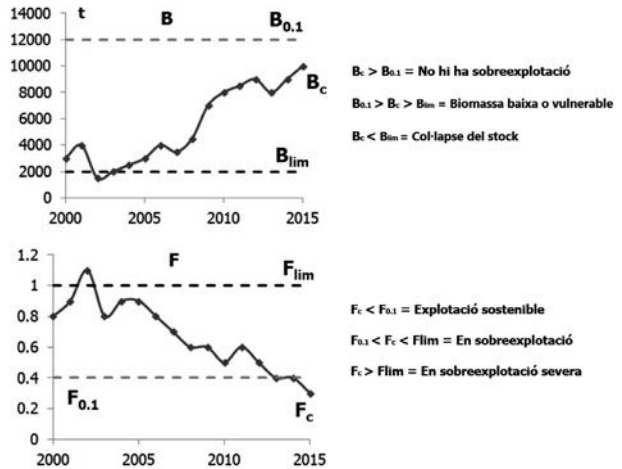
- Si el valor de la mortalitat del darrer any o actual (F_c) és inferior al valor de mortalitat referència objectiu ($F_{0.1}$) = l'estoc es troba en situació d'explotació sostenible.
- Si el valor de la mortalitat del darrer any o actual (F_c) es troba entre el valor de mortalitat referència objectiu ($F_{0.1}$) i el valor

- GRIZZETTI B., LANZANOVA D., LIQUETE C., REYNAUD A., & CARDOSO A. C. (2016). Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*, 61: 194-203.
- HOSSAIN M. Z. (2015). Water: The most precious resource of our life. *Global Journal of Advanced Research*, 2(9): 1-11.
- KILIÇ Z. (2020). The importance of water and conscious use of water. *International Journal of Hydrology*, 4(5): 239-241.
- MILLIMAN J.D., & FARNSWORTH K.L. (2013). River discharge to the coastal ocean: a global synthesis. Cambridge University Press, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511781247>.
- MUNTADAS A., DE JUAN S., & DEMESTRE M. (2015). Integrating the provision of ecosystem services and trawl fisheries for the management of the marine environment. *Science of the Total Environment*, 506: 594-603.
- OWENS J.W. (2001). Water resources in life-cycle impact assessment: considerations in choosing category indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 5(2): 37-54.
- PAULY D., & ZELLER D. (2016). Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nature Communications* 7: 10244.
- PONTECORVO G., & SCHRANK W.E. (2014). The continued decline in the world catch of marine fish. *Marine Policy*, 44: 117-119.
- Reglamento (UE) 2017/1004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2017, relativo al establecimiento de un marco de la Unión para la recopilación, gestión y uso de los datos del sector pesquero y el apoyo al asesoramiento científico en relación con la política pesquera común y por el que se deroga el Reglamento (CE) n° 199/2008 del Consejo.
- SMITH M.T., & ADDISON J.T. (2003). Methods for stock assessment of crustacean fisheries. *Fisheries research*, 65(1-3): 231-256.

de mortalitat referència límit (F_{lim}) = l'estoc es troba en situació de sobreexplotació.

- Si el valor de la mortalitat del darrer any o actual (F_c) és superior al valor de mortalitat referència límit (F_{lim}) = l'estoc es troba en situació de sobreexplotació severa, que requereix acció immediata per tal de revertir la situació.

Figura 7. Gràfics explicatius de l'evolució fictícia dels punts de referència basats en valors de biomassa (a dalt) o basats en valors de mortalitat per pesca (a baix) i el seu significat a l'hora de proporcionar assessorament científic sobre l'estat de salut d'estocs pesquers. B_c i F_c (línies lila) són els valors de biomassa i mortalitat actuals, $B_{0.1}$ i $F_{0.1}$ (línies discontinues verdes) són els punts de referència objectiu i B_{lim} i F_{lim} (línies discontinues vermelles) són els punts de referència límit





I. Introducció

El Mediterrani nord-occidental, una regió situada entre les costes de França, Espanya i Itàlia, constitueix un ecosistema marí de gran riquesa biològica i ecològica. Aquesta zona no només és un punt de trobada migratori per a moltes espècies marines (PSSA aprovat per l'OMI durant la MEPC80), sinó que també acull diverses poblacions residents de cetacis. Hi ha vuit espècies de cetacis residents, set d'elles odontocets (cetacis amb dents): el dofí mular (*Tursiops truncatus*), el dofí comú (*Delphinus delphis*), el dofí ratllat (*Stenella coeruleoalba*), el cap d'olla gris (*Grampus griseus*), el cap d'olla negre (*Globicephala melas*), el catxalot (*Physeter macrocephalus*) i el zifid de Cuvier (*Ziphius cavirostris*). També hi trobem un representant de la família dels misticets (cetacis amb barbes), el rorqual comú (*Balaenoptera physalus*), el segon mamífer més gran del món després de la balena blava. Totes aquestes poblacions de cetacis s'enfronten a un conjunt d'amenaques creixents, principalment degudes a les activitats humanes. La contaminació marina, el soroll submarí, les col·lisions amb embarcacions i la degradació del seu hàbitat dificulten la seva supervivència i reproducció.

Entre aquests cetacis, el dofí mular és l'espècie més observada. Es caracteritza per un cos hidrodinàmic que pot arribar als quatre metres de longitud i un pes d'aproximadament 500 kg. La seva intel·ligència destacada es manifesta en comportaments socials complexos i en l'ús d'un sofisticat sistema d'ecolocalització per orientar-se i caçar. Té pulmons adaptats a la immersió, que li permeten romandre sota l'aigua diversos minuts abans de tornar a la superfície per respirar a través de l'espiracle. Carnívor, s'alimenta principalment de peixos i cefalòpodes, que captura gràcies a tècniques de caça cooperativa. El seu cicle reproductiu és relativament lent, amb una gestació d'uns dotze mesos i una lactància que pot durar diversos anys, fet que el converteix en una espècie vulnerable a les pressions ambientals. A la Mediterrània, és l'única espècie costera; el seu hàbitat preferent és la plataforma continental, entre 0 i 200 metres de profunditat. A causa de la seva proximitat a la costa, aquesta espècie és especialment vulnerable a les molèsties, al soroll

Andrea Antich i Gabriel

Biòloga, màster B2E
parcours Bioressources
Aquatiques en
Environnement
Méditerranéen et Tropical
a la Universitat de
Montpellier, TURSMED2
MIRACETI-étude et
conservation des cétacés



Andrea Antich i Gabriel

**Estudi i
conservació dels
cetacis del
Mediterrani.
TURSMED:
exemple d'un
projecte de
conservació del
dofí mular**

submarí i a la captura accidental a les xarxes de pesca (Dhermain F., 2024; Chazot J., 2020).

Des del 2014, l'associació MIRACETI ha dut a terme diversos projectes d'estudi sobre la població de dofí mular i la seva conservació mitjançant la xarxa d'àrees marines protegides (AMP). L'últim projecte ha estat TURSME2, desenvolupat entre el 2021 i el 2024 amb l'objectiu d'afavorir la implementació d'una gestió integrada i sostenible del dofí mular a la costa mediterrània francesa mitjançant la valorització de la xarxa d'AMP (font: web miraceti.org). Per a això, es van definir dos subaccions:

- Caracterització i seguiment de la població de dofí mular que habita la plataforma continental de la Mediterrània francesa.
- Avaluació dels reptes de conservació dels cetacis dins les AMP.

Aquests projectes han estat tots finançats en gran part per l'Oficina Francesa de la Biodiversitat (OFB).

II. Material i mètodes

Zona d'estudi i protocol

La zona d'estudi és la plataforma continental fins a la isòbata dels 200 m a tota la façana de la Mediterrània francesa. Els límits estan definits per les fronteres territorials i per la profunditat (plataforma continental). S'han definit tres subzones: el golf del Lleó, la Provença i Còrsega.

Les campanyes marítimes de TURSME2 han estat de 30 setmanes, distribuïdes al llarg dels tres anys del projecte (2021-2023) amb onze setmanes per any: sis a l'hivern i cinc a l'estiu a la plataforma continental de tota la façana mediterrània francesa. Les estacions es defineixen de la manera següent: el període hivernal s'estén de l'1 de desembre al 30 de març i el període estival va de l'1 de juny al 30 de setembre. L'exploració de la zona d'estudi es fa en condicions d'esforç, és a dir: vent inferior a 3 Beaufort, velocitat del vaixell entre 5 i 6 nusos, i observadors cobrint un angle de 270° a la part davantera del vaixell. Les rutes de prospecció han estat definides de manera aleatòria en funció de la zona i de les condicions meteorològiques, per tal d'assegurar una cobertura homogènia de tota la zona d'estudi.

El protocol de recollida de dades és el protocol Cetacés AMP-Med, accessible amb una tauleta iPad amb l'aplicació ObsEnMer mode expert. A l'aplicació, es registren les dades següents: sortides, posicions GPS, esforç, composició del

grup (adults, joves, nounats), comportament i interaccions amb activitats humanes. Les dades recollides amb ObsEnMer es centralitzen automàticament i s'emmagatzemen a la base de dades mirall de l'OFB. (Jourdan J. *et al.*, 2020).

Durant les missions marítimes, la missió principal era dur a terme la fotoidentificació, una tècnica basada en la hipòtesi que les aletes dorsals dels dofins mulars presenten una forma distintiva i marques permanents, formant una combinació única per a cada individu (Würsig i Würsig, 1977).

L'acostament als cetacis sempre s'ha fet pels costats (mai per davant o per darrere), amb maniobres delicades i una velocitat limitada per minimitzar la pertorbació del grup i obtenir imatges de qualitat suficient (nitidesa, exposició, angle de presa de vista) per a la fotoidentificació.

Recollida de dades a les AMP i base de dades comuna

En el marc de la implementació d'un seguiment harmonitzat dels cetacis a escala de la façana, es proposen formacions als gestors d'AMP sobre la implementació d'un seguiment i la gestió dels cetacis: una formació teòrica de dos dies i una formació pràctica embarcada d'una setmana. El personal format té posteriorment accés al protocol Cetacés AMP-Med a través de l'aplicació ObsEnMer i pot fer el seguiment a la seva zona.

Totes les dades recollides amb aquest protocol es centralitzen en una base de dades mirall de ObsEnMer, que està allotjada a l'OFB. Les dades de la base de dades ObsEnMer se sincronitzen amb la base de dades mirall vinculada al protocol Cetacés AMP-Med.

Anàlisi de dades

Totes les dades han estat centralitzades i analitzades per MIRACETI. Per a aquest estudi, les dades només concerneixen les campanyes en mar de TURSMED2, així com les dades recollides per les AMP en els mateixos períodes.

Totes les dades han estat analitzades i cartografiades amb el programa QGIS 3.16.15, així com amb Microsoft Excel.

La taxa de trobada (TR) s'ha calculat a l'interior d'una malla 3x3 de la graella Carpediem i correspon al nombre d'observacions per malla per quilòmetre d'esforç recorregut dins la malla. El nombre d'individus observats correspon a la suma dels nombres d'individus estimats de cada grup trobat a l'interior de la malla. La TR també s'ha calculat a tota la zona d'estudi, per subzones i per estacions.

Bibliografia

CHAZOT, J., CHARRIER, E., LABACH, L. & LESEIGNOUX, L. (2020). *Étude de l'impact des activités de whale-watching sur les populations de cétacés en Méditerranée française et de la mise en œuvre du label High Quality Whale-Watching®*. (2018-2020). 72 p. + annexos.

DERMAIN, F. et les correspondants méditerranéens du Réseau National Echouages i els corresponents mediterranis de la Xarxa Nacional d'Encallaments. (2024). *Suivi des échouages sur les côtes méditerranéennes françaises. Années 2020-2023. Rapport MIRACETI, convention 21-030 pour le Parc national de Port-Cros*. 149 p.

JOURDAN, J., JURET, L., ANTICH GABRIEL, A., MAZIÈRE, H. & LABACH, H. (2020). *TURSMED 1 (2018-2020)*. 51 p. + annexos.

LABACH, H., GIMENEZ, O., BARBIER, M., JOURDAN, J., DAVID, L. ET DI-MÉGLIO, N., ROUL, M., AZZINARI, C., ROBERT, N. & TOMASI, N. (2015). *Etude de la population et de la conservation du Grand Dauphin en Méditerranée française. Projet GDEGeM Grand Dauphin Etude et Gestion en Méditerranée 2013-2015. Rapport GIS3M*. 54 p. + annexos.

WÜRSIG, B. & WÜRSIG, M. (1977). The photographic determination of group size, composition, and stability of coastal porpoises (*Tursiops truncatus*). *Science* 198: 755-56.

III. Resultats i discussió

Les primeres dades d'aquest estudi han estat analitzades i es presenten a continuació.

Observacions i taxa de trobada del dofí mular

En primer lloc, les observacions de dofí mular fetes durant les campanyes TURSMED2 de 2021 a 2023 han estat agrupades en un mapa. Podem observar que el nombre més gran d'observacions s'ha fet a Còrsega (n=42), seguit pel golf del Lleó (n=34) i la Provença (n=9). Per a les tres subregions, les observacions són més nombroses a l'hivern que a l'estiu.

Aquesta tendència també es reflecteix en les taxes de trobada calculades: Còrsega té la taxa més elevada (0,0108) i la Provença té la taxa més baixa (0,0036). La taxa de trobada hivernal és més elevada que l'estival en les tres subregions.

Aquest resultat és coherent amb les característiques de l'entorn i la superfície de la plataforma continental, ja que s'observen més dofins mulars al golf del Lleó (plataforma continental molt àmplia) que a la Provença (plataforma continental molt petita). El mateix passa a Còrsega, on les observacions són més freqüents a la costa est, que té una plataforma continental més extensa, en comparació amb la costa oest.

Es conclou que Còrsega presenta la taxa de trobada més alta, tot i que la seva plataforma és més petita que la del golf del Lleó. Això podria explicar-se pel fet que hi ha molt pocs intercanvis entre Còrsega i les costes continentals franceses o italianes (Labach et al., 2015).

Observations de Grand dauphin en effort pendant les missions TURSMED2 de 2021 à 2023 (protocole "Cétacés AMP-Med")

MIRACETI
Observatoire
de la Méditerranée

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
OFB
Observatoire
français
de la biodiversité

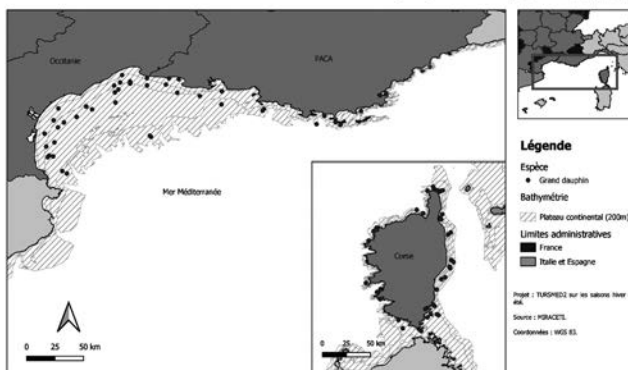


Figura 1. Mapa de les observacions de dofí mular en esforç de prospecció durant les campanyes TURSMED2

	Golfe du Lion			Provence			Corse		
	Total	Hiver	Été	Total	Hiver	Été	Total	Hiver	Été
Observacions de Dofi mular	34	19	15	9	5	4	42	30	12
Esforç de prospecció (km)	2905	1320	1585	2655	1668	1168	3267	1168	2098

Taula 1. Nombre acumulat d'observacions de dofi mular efectuades durant les campanyes TURSMED2 en funció de la subzona i de l'estació

TR du Grand dauphin	Total	Hiver	Été
Golfe du Lion	0,0088	0,0068	0,0061
Provence	0,0036	0,0033	0,0022
Corse	0,0108	0,0182	0,0058
Global	0,0080	0,0077	0,0050

Taula 2. Taxa de trobada del dofi mular en funció de la subzona i de l'estació

Presència de nounats

Durant les campanyes al mar, es va registrar la composició dels grups de dofi mular, fet que va permetre estudiar el nombre de nounats observats per estació i per zona. Aquesta vegada, els nounats han estat principalment observats a l'estiu i només cinc individus van ser observats a l'hivern durant tres observacions.

El golf del Lleó és la subzona on s'han registrat més observacions (n=82), la majoria a l'estiu (n=77). El nombre d'observacions és el mateix entre Còrsega i Provença, amb una desena de nounats observats, tots en període estival (figura 2).

Aquestes observacions, que tenen lloc principalment a l'estiu, són coherents amb la literatura, ja que s'estima que el dofi mular pareix a final de primavera/principi d'estiu i que els nounats conserven els plecs fetals durant aproximadament sis setmanes (Kastelein *et al.*, 1990).

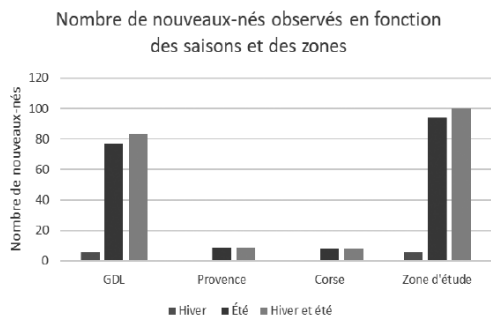
Connectivitat entre les AMP

Les dades de fotoidentificació recollides durant les campanyes TURSMED2 encara estan en procés d'anàlisi. Una primera anàlisi de les dades de fotoidentificació centralitzades

de les AMP ha permès posar en evidència els desplaçaments dels dofins mulars i la seva freqüentació en diferents AMP. Així, es pot veure que els individus observats al golf de Lleó sovint es tornen a veure en altres AMP d'aquesta zona i tenen pocs intercanvis amb la Provença.

Les anàlisis s'han d'aprofundir, però fins ara aquests resultats concorden amb els trobats per Labach *et al.* (2015), que mostren que hi ha dos grups socials

Figura 2. Histograma del nombre de nounats observats en esforç de prospecció durant les campanyes TURSMED2



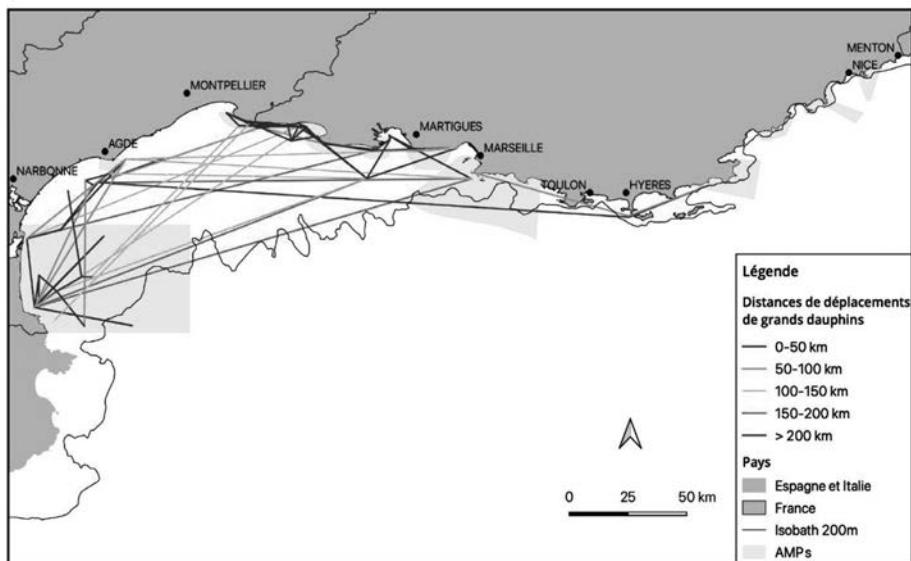


Figura 3. Mapa de les distàncies de desplaçament dels dofins mulars entre les AMP (font: Aliénor Scrizzi)

vinculats cadascun a una subzona geogràfica i que pocs individus es desplacen entre les dos zones.

Conclusió

La totalitat de les dades recollides per aquest estudi encara estan essent estudiades i analitzades. Tanmateix, el que ja podem dir és que els resultats sobre l'estat de la població de dofí mular i la seva evolució en el temps, així com els resultats de l'avaluació del grau d'impacte de cada pressió humana dins de les àrees marines protegides, permetran aportar arguments sòlids a les institucions polítiques amb l'objectiu d'impulsar la creació de mesures de protecció per a les espècies de cetacis.

També permetrà contribuir a diversos estudis i seguiments poblacionals a diferents escales, com per exemple la DCSMM a escala europea.



Gerard Grande i Bartumeu

Físic, màster en Física, Medi Ambient i Procediments de la Universitat Paris-Saclay i tècnic d'Andorra Recerca + Innovació

Resum

La xarxa hidromètrica d'Andorra afronta desafiaments significatius derivats del canvi climàtic, incloent-hi l'augment de temperatures, els esdeveniments extrems i les sequeres. La disponibilitat de dades de cabal fiables és essencial per a la modelització hidrològica, la regulació dels cabals ambientals i l'adaptació als impactes climàtics. Aquest estudi analitza les sèries hidromètriques disponibles a Andorra i n'avalua la consistència i la idoneïtat per a aplicacions científiques i de gestió.

S'ha dut a terme una anàlisi comparativa de les sèries de cabals de les estacions A402 (Pont dels Escalls) i A403 (Borda Sabaté) respecte a l'estació A022 (La Seu d'Urgell). L'anàlisi de regressió ha revelat més correlació en cabals elevats, mentre que en cabals baixos s'observa una variabilitat significativa i baixos sistèmics.

Per corregir aquestes discrepàncies, s'ha aplicat una metodologia basada en regressions segmentades, que ha permès millorar la robustesa del model diferenciant entre règims hidrològics. La sèrie corregida derivada de l'estació A403 ha presentat un nombre més baix d'inconsistències i s'ha identificat com la més adequada per establir una sèrie de cabals de referència per a Andorra. Addicionalment, s'ha desenvolupat una versió alternativa de la sèrie sense la influència del turbinatge de la central hidroelèctrica de FEDA (Forces Elèctriques d'Andorra).

Aquest estudi subratlla la importància del monitoratge continu, el calibratge rigorós i la disponibilitat de dades obertes en xarxes hidromètriques, especialment en conques sotmeses a una pressió antròpica elevada i a una elevada variabilitat climàtica. Aquest estudi constitueix una base sòlida per a futures recerques sobre la gestió dels recursos hídrics, incloent-hi l'estimació de cabals ambientals i la planificació hidrològica. Així mateix, la metodologia adoptada proporciona un model replicable per millorar la fiabilitat de les dades hidromètriques en altres conques fluvials de muntanya.



Gerard Grande i Bartumeu

Anàlisi de les sèries hidromètriques andorranes

Paraules clau: hidrometria, consistència de cabals, correcció de corbes de tarat, regressió segmentada, Andorra, adaptació al canvi climàtic, modelització hidrològica.

Introducció

Les conques d'Andorra afronten desafiaments significatius derivats del canvi climàtic, incloent-hi l'augment de temperatures, episodis extrems i sequeres. Aquests fenòmens, combinats amb la pressió turística i demogràfica, accentuen la necessitat d'una gestió acurada dels recursos hídrics. Aquest context fa imprescindible disposar de dades hidrològiques vàlides per estudiar i modelitzar els diferents escenaris hidrològics futurs i per donar suport a les inversions destinades a l'adaptació al canvi climàtic, així com per a la possible regulació dels cabals ambientals en el context de transició energètica. Arran del projecte Piragua (Beguería et al., 2019), Andorra Recerca + Innovació va estudiar les dades de cabals disponibles a Andorra per poder utilitzar-les en la modelització realitzada (AR+I, 2022). En aquesta recerca, es van detectar incongruències en les sèries de dades de les estacions d'aforament d'Andorra i una mancança en la disponibilitat de dades acurades sobre cabals baixos, necessàries per a l'estudi de períodes de sequera, i dels cabals ambientals i generadors del riu.

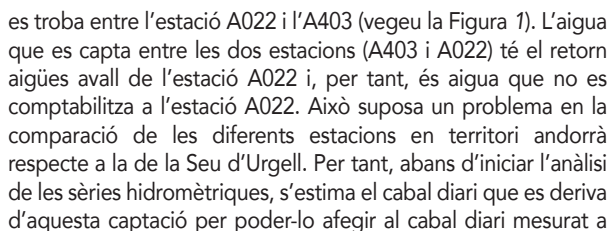
L'objectiu d'aquest document és analitzar les sèries hidromètriques amb els històrics més llargs disponibles a Andorra, identificar-ne la més adequada per a la realització d'estudis hidrològics i prospectar la possibilitat de corregir-la a fi de disposar d'una sèrie de cabals de referència.

Anàlisi de les estacions hidromètriques

Actualment es disposa de diverses estacions, algunes d'elles estacions pròpiament d'aforament i d'altres que són marcs de control per a la gestió d'emergències, en les quals es registren dades relacionades amb el cabal. La majoria són estacions propietat de Protecció Civil amb històrics de dades curts, que tenen com a finalitat la detecció de calats alts per a la gestió d'emergències en situació d'avingudes. La major part d'aquestes són de llera mòbil i presenten dificultats en l'estimació dels cabals baixos.

Per utilitzar les sèries de cabal de les estacions hidromètriques en estudis hidrològics cal que aquestes sèries siguin mínimament llargues (almenys de deu anys, preferentment 30), a més de consistents (completes) i fiables (manteniment i validació regular de la corba h/Q). La fiabilitat dels cabals és normalment més alta si els cabals es deriven d'estacions hidromètriques de llera fixa, on les condicions hidràuliques són estables. En aquest sentit, set de les estacions de la conca andorrana disposen de llera fixa, però només tres disposen de

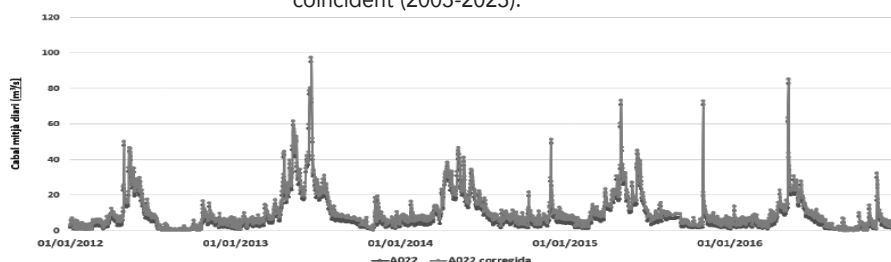
Figura 1. Ubicació de les estacions hidromètriques de mesura de calat i/o cabal a la conca del Valira propera a Andorra



Aigua: desafiaments i oportunitats

l'estació A022 i així fer més acurada la comparació entre les estacions andorranes de la CHE i l'estació A022. A continuació, s'analitzen les sèries de cabals de les estacions A402 (vegeu la secció 01) i A403 (vegeu la secció 0) respecte a la sèrie de l'estació A022, per tal d'avaluar la consistència i robustesa de les dites sèries. Finalment, en la secció 2 es corregeix la sèrie analitzada més consistent respecte a la sèrie A022 per tal d'obtenir una sèrie de cabals de referència a Andorra.

Figura 2. Evolució de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de les estacions A402 i A022 (2003-2023)⁴ (només es representa aquí les dades corresponents al període 2012-2016)

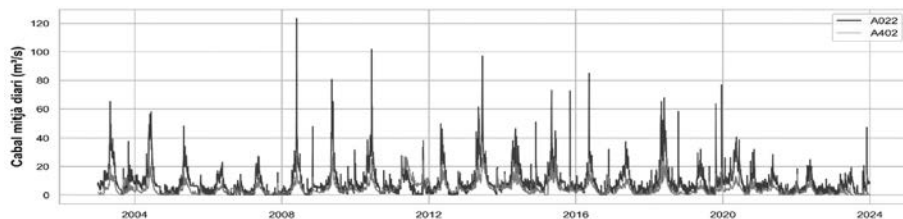


Anàlisi de l'estació A402 respecte a l'estació A022

A continuació es presenta la sèrie de cabals mitjans diaris de l'estació SAIH Valira del Nord-A402, situada al pont dels Escalls (vegeu la Figura 12), respecte a la sèrie de cabals mitjans diaris de l'estació A022 per al període històric màxim coincident (2003-2023).

Analitzant les sèries històriques de cabals de les dos estacions, es detecta un patró estacional comú en el qual els valors augmenten de forma generalitzada i transitòria durant els mesos de primavera (degut al desgel, principalment, i a les precipitacions) i durant els mesos de tardor (degut a les precipitacions). No obstant això, el cabal de l'estació A022 presenta unes oscil·lacions setmanals que no presenta l'estació A402 (vegeu la Figura 3). Això és degut al fet que l'estació A402, que representa la conca del Valira del Nord (vegeu la Figura 1), no té el règim alterat per la captació i el turbinatge de l'estació hidroelèctrica d'Encamp, situada al Valira d'Orient. Per contra, el cabal de l'estació A022 sí que presenta les oscil·lacions, ja que recull l'aigua també del Valira d'Orient. En teoria, la magnitud dels cabals associats a l'estació A022, que es troba aigües avall de l'estació A402, hauria de ser superior a la magnitud dels cabals d'aquesta última. No obstant això, en certs períodes, aquesta premissa no es compleix (vegeu la Figura 3). A continuació s'analitzen amb detall aquestes inconsistències.

4- Accés al gràfic interactiu https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/A402_A022.html



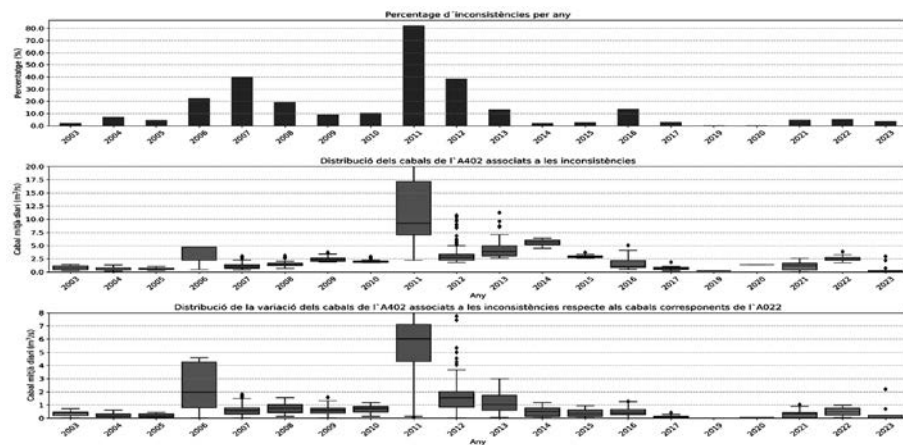
Inconsistències de la sèrie A402 respecte a la sèrie A022

En aquest apartat, es defineix una inconsistència quan el cabal de la sèrie A402 supera el cabal corresponent de la sèrie A022 situada aigües avall (és a dir, quan $A022 - A402 < 0$). S'han analitzat exclusivament els cabals inconsistents d'ambdós sèries i s'ha calculat el percentatge d'inconsistències respecte al nombre total de cabals anuals (vegeu la Figura 4a), la distribució dels cabals inconsistents de l'A402 per any (vegeu la Figura 4b) i la variació absoluta dels cabals de l'A402 associats a inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022 (vegeu la Figura 4c).

El percentatge d'inconsistències varia segons els anys. Assoleix un màxim del 80% el 2011, mentre que en altres períodes es redueix per sota del 10%. A excepció de l'any 2006 i del període 2011-2015, les inconsistències tendeixen a concentrar-se en cabals (de l'A402) inferiors o propers als 2,5 m³/s. La diferència entre els cabals de l'A402 i l'A022 associats a les dites inconsistències sol ser inferior a 1 m³/s.

Figura 3. Detall en l'interval temporal (2011- 2013) sobre l'evolució de les sèries de cabal mitjà diari (m³/s) de les estacions A402 i A022

Figura 4. a) Percentatge del nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A402 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022 respecte al total de cabals anuals. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A402 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A402 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A402 associats a les inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022



5- Els residuals estandarditzats s'obtenen a partir dels residuals (diferència entre els valors observats i els estimats pel model) dividits per la desviació estàndard dels dits residuals.

Anàlisi de regressió lineal

Un cop identificades i analitzades les inconsistències, es modelitza la sèrie de cabals de l'A402 (variable dependent) en funció de la sèrie de l'A022 (variable explicativa) mitjançant una regressió lineal definida pels paràmetres β i α (vegeu la Figura 5).

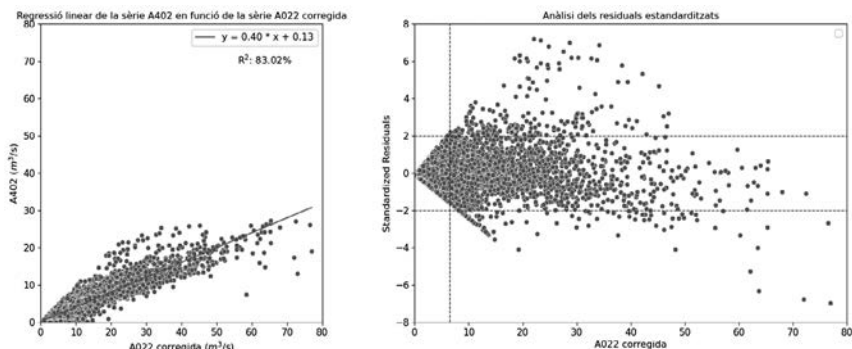
$$\text{Cabal mitjà diari}_{A402} = \beta * \text{Cabal mitjà diari}_{A022} + \alpha$$

En aquesta modelització no es consideren els cabals associats a les inconsistències, ja que podrien donar peu a un biaix significatiu. El model explica el 83% de la variància de la sèrie de cabals de l'estació A402. Malgrat la solidesa de la relació lineal entre les variables, els residuals estandarditzats⁵ no segueixen una distribució normal. Tampoc presenten una distribució homocedàstica (variància constant) en funció dels valors de la variable explicativa. Això significa que el model no aconsegueix capturar correctament tots els patrons subjacents de les dades.

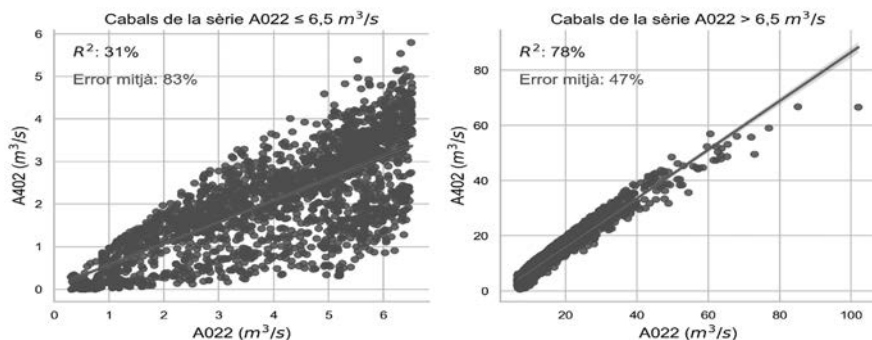
No obstant això, la variància dels residuals augmenta de manera molt accentuada per cabals baixos de la sèrie A022 fins a 6,5 m³/s aproximadament (mediana de la sèrie A022 en el període 2003-2023). Per cabals de la sèrie A022 superiors a 6,5 m³/s, els residuals presenten una distribució normal (p-valor > 5% pel test Kolgomorov-Smirnov) i una distribució homocedàstica (p-valor > 5% pel test Breusch-Pagan) respecte als valors de l'eix horitzontal (a partir de 18 m³/s).

Així doncs, el model no aconsegueix capturar els patrons subjacents de les dades per al rang de cabals baixos de la sèrie A022 però sembla adequar-se millor per a cabals alts (superiors a 6,5 m³/s).

Figura 5. Dispersió de les sèries de cabal mitjà diari (m³/s) de les estacions A402 i A022 considerant tot el període 2003-2023 (a l'esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandarditzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió de la sèrie de cabals de l'estació A402 en funció de la sèrie de l'estació A022 (2003-2023) (a la dreta). La línia vertical blava correspon a la mediana de la sèrie A022 del període 2003-2023 (6,5 m³/s)



Si es modelitzen (per separat) els cabals de la sèrie A402 en funció de la sèrie A022 per a dos rangs diferenciats —cabals baixos (inferiors o iguals a $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$) i cabals alts (superiors a $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$)—, es poden identificar clarament diferents règims hidrològics (vegeu la Figura 6). En el rang de cabals baixos, la correlació lineal entre ambdós sèries és baixa (30%), cosa que dificulta l'aplicació d'una regressió lineal en aquest interval, amb un error mitjà elevat del 80%. En canvi, en el rang de cabals alts, la correlació lineal és molt significativa (al voltant del 80%), fet que indica que la regressió lineal és més adequada en aquest interval, amb un error mitjà reduït al 47%.



A continuació, es fa la mateixa anàlisi per a l'estació A403 per tal de veure si la sèrie de cabals es pot modelitzar en funció de la sèrie A022 d'una manera més robusta, sobretot per a cabals baixos.

Anàlisi de l'estació A403 respecte a l'estació A022

A continuació s'analitza la sèrie de l'estació andorrana de la conca del riu Valira situada a la borda del Sabaté (A403) respecte a l'estació de referència A022 en el període temporal màxim en què existeixen dades per a ambdós estacions (2009-2023). L'estació A403 és l'estació andorrana més propera a l'estació A022 i ambdós estan afectades per l'activitat de la central hidroelèctrica de FEDA, ja que recullen aigua de la conca del Valira d'Orient. Tal com es pot observar a la Figura 7, l'evolució de les sèries temporals dels cabals de les estacions A022 i A403 presenta els mateixos patrons periòdics al llarg de cada any:

Patró setmanal en el qual els cabals de les dos estacions, que es troben aigües avall del desguàs de la central hidroelèctrica

Figura 6. Gràfics de dispersió de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de les estacions A402 i A022 considerant tot el període 2003-2023 per a cabals baixos (esquerra) i alts (dreta)

d'Encamp, segueixen una evolució que reflecteix el model d'explotació del llac d'Engolasters per part de FEDA durant la major part de setmanes del període estudiat.

Patró estacional en el qual els valors augmenten de forma generalitzada i transitòria durant els mesos de primavera (degut al desgel, principalment, i a les precipitacions) i durant els mesos de tardor (degut a les precipitacions). Aquest patró també s'observa a la sèrie de cabals de l'estació A402 estudiada prèviament.

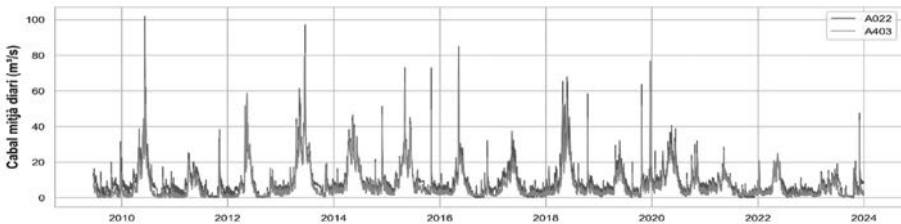


Figura 7. Evolució de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de les estacions A403 i A022 (després de la correcció per afegir el canal de Rec dels Quatre Pobles) (2009-2023)⁶

No obstant això, la sèrie de cabals de l'estació A403, a l'igual que la sèrie de cabals de l'estació A402, presenta inconsistències significatives, amb períodes en què els cabals mitjans diaris superen els de l'estació A022, situada aigües avall. A continuació, s'analitzen en detall aquestes inconsistències.

Inconsistències de la sèrie A403 respecte a la sèrie A022

De la mateixa manera que per a l'anàlisi de les inconsistències de la sèrie A402, en aquest apartat es defineix una inconsistència quan un cabal de la sèrie A403 presenta un valor superior al cabal corresponent de la sèrie A022 (és a dir, quan $A022 - A403 < 0$). Analitzant exclusivament els cabals inconsistents d'ambdós sèries, s'ha calculat el percentatge d'inconsistències respecte al nombre total de cabals anuals (vegeu la Figura 8a), la distribució dels cabals inconsistents de l'A402 per any (vegeu la Figura 8b) i la variació (en termes absoluts) dels cabals de l'A403 associats a inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022 (vegeu la Figura 8c).

A l'igual que per la sèrie A402, el percentatge d'inconsistències associades a la sèrie A403 és altament variable i segueix un patró semblant, però, en aquest cas, no supera el 20% durant el període 2009-2023. Exceptuant l'any 2022 i el període 2010-2015, les inconsistències tendeixen a concentrar-se en cabals inferiors a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ i pràcticament mai superen els $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (vegeu la Figura 9). Tanmateix, la variació

6- Accés al gràfic interactiu https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/A403_A022.html

dels cabals de la sèrie A403 respecte als cabals de la sèrie A022 associats a les inconsistències és inferior a 1 m³/s pràcticament sempre excepte l'any 2010, la qual cosa indica una certa consistència durant els anys.

Figura 8. a) Percentatge del nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A403 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022 respecte al total de cabals anuals. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A403 associats a les inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022

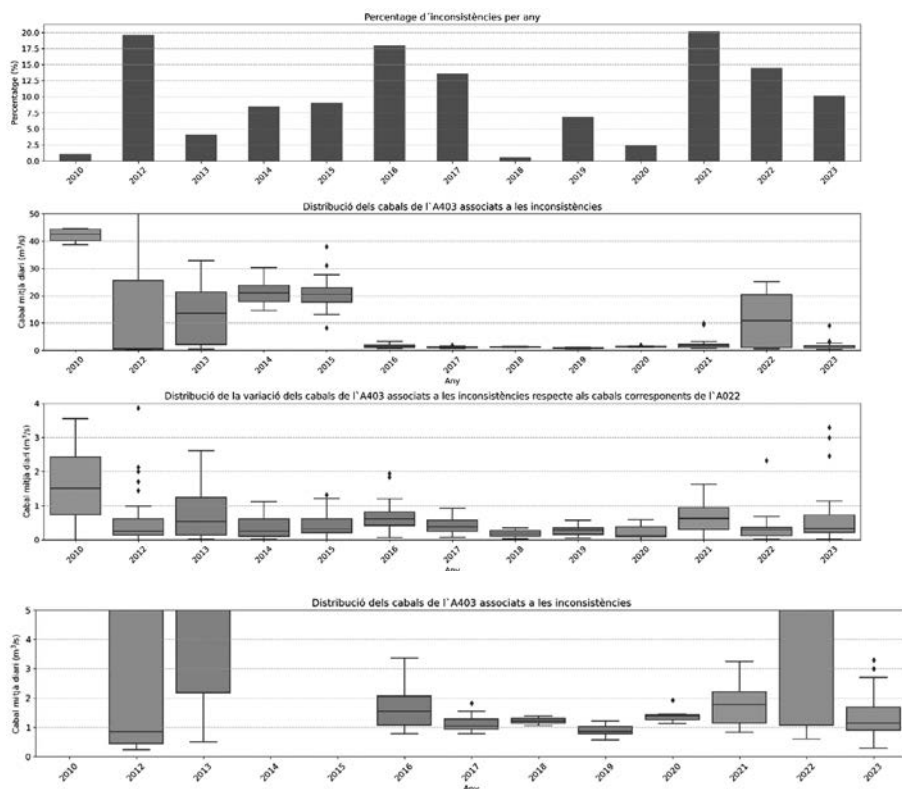


Figura 9. Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$) per un rang inferior a 5 m³/s

7- Els residuals estandarditzats s'obtenen a partir dels residuals (diferència entre els valors observats i els estimats pel model) dividits per la desviació estàndard de dits residuals.

Anàlisi de regressió lineal

Un cop identificades i analitzades les inconsistències, es modelitza la sèrie de cabals de l'A403 (variable dependent) en funció de la sèrie de l'A022 (variable explicativa) mitjançant una regressió lineal definida pels paràmetres β i α (vegeu la Figura10):

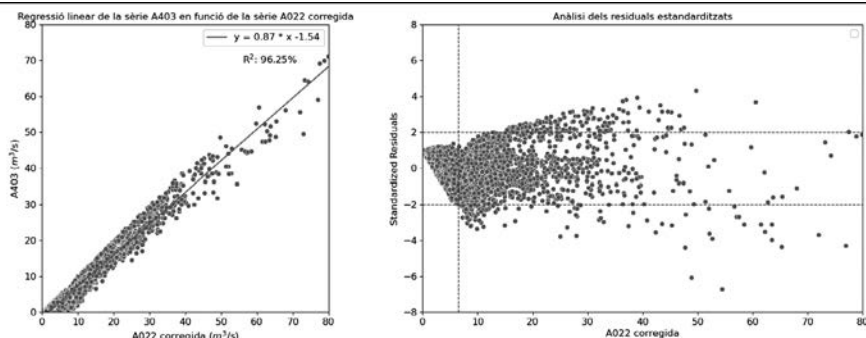
$$\text{Cabal mitjà diari}_{A403} = \beta * \text{Cabal mitjà diari}_{A022} + \alpha$$

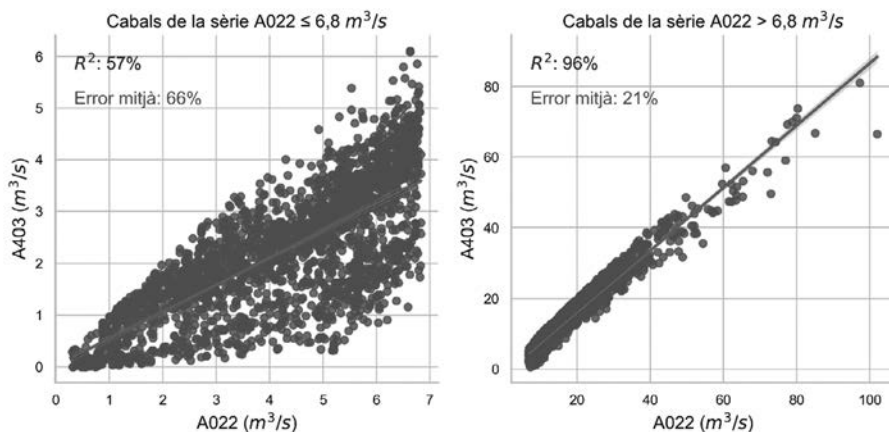
En aquesta modelització tampoc es consideren els cabals associats a les inconsistències, ja que podrien donar peu a un biaix significatiu. En aquest cas, el model explica el 96% de la variància de la sèrie de cabals de l'estació A403. No obstant això, malgrat la solidesa de la relació lineal entre les variables, els residuals estandarditzats⁷ tampoc segueixen una distribució normal ni presenten una distribució homocedàstica (variància constant) en funció dels valors de la variable explicativa. Globalment, el model tampoc captura correctament tots els patrons subjacents de les dades.

La variància dels residuals augmenta de manera pronunciada en el rang de cabals baixos de la sèrie A022, fins a aproximadament 6,8 m³/s, que correspon a la mediana de la sèrie per al període 2010-2023 (vegeu la Figura 10). Tanmateix, a diferència del comportament observat en el cas de la sèrie A402, el model aplicat a la sèrie A403 subestima els cabals quan els valors de l'A022 són propers a 0 m³/s (generant residuals positius) i els sobreestima quan els valors de l'A022 s'acosten a 6,8 m³/s (generant residuals negatius).

Figura 10. Gràfic de dispersió de les sèries de cabal mitjà diari (m³/s) de les estacions A403 i A022 considerant tot el període 2009-2023 (esquerra).

Gràfic de dispersió dels residuals estandarditzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió de la sèrie de cabals de l'estació A403 en funció de la sèrie de l'estació A022 (2009-2023) (dreta). La línia vertical blava correspon a la mediana de la sèrie A022 del període 2009-2023 (6,8 m³/s)





Aquest patró indica que el model mostra un biaix sistemàtic en aquest rang de cabals. A partir de 7 m³/s, el biaix ja no és tan aparent. La mitjana dels residuals tendeix a 0 i a partir de 20 m³/s i fins a 60 m³/s els residuals presenten una distribució pràcticament homocedàstica (p-valor > 5% pel test Breusch-Pagan).

Si es modelitzen (per separat) els cabals de la sèrie A403 en funció de la sèrie A022 per a dos rangs diferenciats —cabals baixos (inferiors o iguals a 6,8 m³/s) i cabals alts (superiors a 6,8 m³/s)—, es poden identificar també diferents règims hidrològics (vegeu la Figura 11). Per a cabals baixos, s'observa una correlació lineal significativa (57%) entre ambdós sèries i un error mitjà (66%) inferior a l'error obtingut en el cas de la sèrie A402 (83%). Aquesta anàlisi suggereix que el biaix identificat es deu a la influència dels cabals superiors a 6,8 m³/s en el model general. Per a cabals alts, els resultats també són millors que en el cas de la sèrie A402.

Correcció de les inconsistències

Un cop analitzades les sèries hidromètriques de les estacions andorranes A402 i A403 respecte a la sèrie de referència de la Seu d'Urgell A022, en aquesta secció procedim a elaborar les sèries hidromètriques que serviran de referència a Andorra. Aquestes sèries de referència s'han elaborat a partir de la sèrie A403, ja que:

- Hi ha un 9% d'inconsistències a la sèrie A403 (2009-2023),

Figura 11. Gràfics de dispersió de les sèries de cabal mitjà diari (m³/s) de les estacions A403 i A022 considerant tot el període 2009-2023 per a cabals baixos (esquerra) i alts (dreta)

mentre que a la sèrie A402 n'hi ha un 14% si es considera el període complet 2003-2023 i un 13% si es considera només el període 2009-2023.

- El percentatge d'inconsistències de la sèrie A403 no supera en cap any del període el 20% mentre que sí que ho fa la sèrie A402, per exemple l'any 2011, amb un 80% d'inconsistències.
- La distribució dels cabals de la sèrie A403 associats a les inconsistències és menys variable d'any a any (durant el període 2015-2023, sobretot) que en el cas de la sèrie A402.
- La relació lineal és més robusta entre la sèrie A403 i la sèrie A022 tant per a cabals baixos com per a cabals alts.

A continuació s'han corregit les inconsistències detectades en la sèrie A403 per tal d'obtenir una sèrie més robusta i fiable que es podrà utilitzar com a sèrie de referència de les conques andorranes. Tenint en compte que els cabals de les estacions A403 i A022 estan influenciats per la central hidroelèctrica d'Encamp, s'ha implementat un tractament relatiu al turbinatge de la central hidroelèctrica de FEDA per tal d'obtenir, addicionalment, una sèrie de referència sense la influència de la hidroelèctrica. Ambdós sèries de referència poden descarregar-se des del web d'Andorra Recerca + Innovació.⁸ L'elecció d'una o altra sèrie en estudis hidrològics dependrà de la ubicació de cada cas d'estudi.

Tal com s'ha mostrat en la secció 1, en funció del rang de cabals de l'estació A022, la relació lineal entre els cabals de l'A403 i l'A022 varia significativament i s'identifiquen dos règims hidrològics diferents, per a cabals baixos i per a cabals alts. Per tal d'ajustar el model amb major precisió per a cada rang específic, es planteja modelitzar per separat els cabals baixos i els cabals alts mitjançant una regressió segmentada (*piecewise regression*) dels cabals de l'A403 en funció dels cabals de l'A022. Aquesta tècnica permet ajustar diferents models lineals a diferents intervals d'un conjunt de dades. És especialment útil quan la relació entre les variables no és uniforme en tot l'interval de dades, sinó que presenta "canvis de tendència" o punts de trencament (*breakpoints*) a partir dels quals la relació entre les variables canvia.

Per dur a terme la regressió segmentada, es modelitza la sèrie de cabals de l'estació A403 a partir del model següent (Pilgrim, 2021):

8- Sèries disponibles a https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/series_a403_referencia.csv

$$y = \alpha x + c + \beta (x - \psi) H(x - \psi) + \zeta$$

on:

y: cabal estimat de l'A403 a partir del model.

x: cabal observat de l'A022 corregit.

α : coeficient de regressió del primer segment (corresponent als valors de l'A022 compresos entre 0,8 m³/s i el punt de trencament, sense incloure aquest darrer).

c: constant d'intersecció amb l'eix y del primer segment.

β : diferència entre el coeficient de regressió del primer segment i el segon ($\alpha_2 - \alpha_1$) (és a dir, el canvi de pendent entre els dos segments).

ψ : cabal de l'A403 que defineix el punt de trencament.

$H(x - \psi)$: funció de Heaviside (*Heaviside step function*), que pren el valor 1 si x és superior o igual a ψ , i 0 si x és inferior a ψ .

ζ : error associat a x, que segueix una distribució normal $N(0,1)$.

Aquest enfocament permet modelitzar la transició entre diferents règims de cabals amb precisió, capturant tant la variació en la tendència com en la dispersió. Tenint en compte que el nombre d'inconsistències i el rang de cabals de la sèrie A403 associat a les inconsistències varia en funció dels anys (sobretot durant els primers anys de període), es decideix fer la modelització per a cada any de forma independent.

A continuació, es presenten els resultats de la regressió segmentada (considerant tots els cabals en un mateix model) per dos anys en concret: un any humit, el 2020, marcat per unes precipitacions notablement superiors a la mitjana, amb un hivern plujós segons l'SPI,⁹ i un any sec, el 2022, que es va registrar com un dels més càlids a l'estació central de FEDA des de 1950, amb precipitacions per sota de les del període de referència.¹⁰

En el cas de l'any humit, la regressió segmentada no presenta un biaix significatiu en el rang de cabals baixos (de la sèrie A022) i els residuals presenten una distribució normal i una

9- Standardized Precipitation Index o índex de precipitació estàndard. En trobareu més detalls a <https://ari.ad/projectes/butlleti-recurs-hidric>

10- Més informació a <https://ari.ad/noticies/tanquem-2022-calid-lestacio-central-fed>

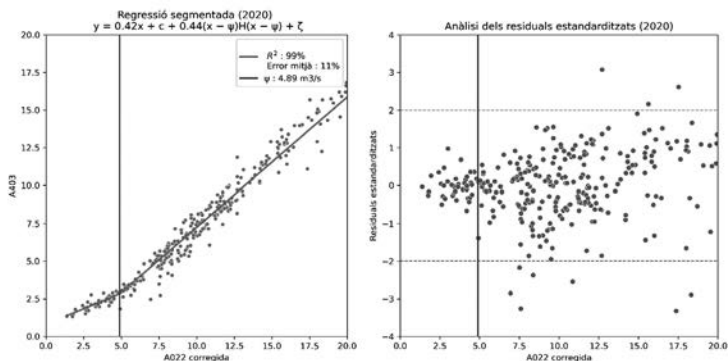


Figura 12. Regressió segmentada de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de l'estació A403 en funció de l'estació A022 considerant només l'any humit 2020 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residualls estandaritzats (residuals / desviació estàndard dels residualls) obtinguts a partir de la regressió segmentada presentada (dreta)

distribució pràcticament homocedàstica tant per als cabals baixos com per als alts (vegeu la Figura 12).

En el cas de l'any sec, es pot dir el mateix que s'ha mencionat en el paràgraf anterior, amb la diferència que la distribució dels residualls presenta una certa heterocedasticitat (vegeu la Figura 13).

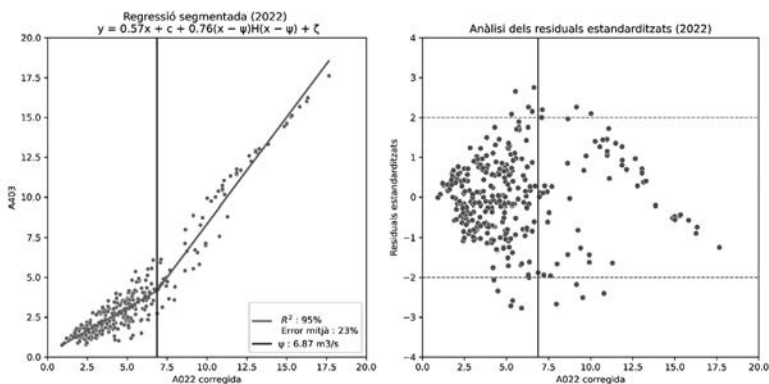
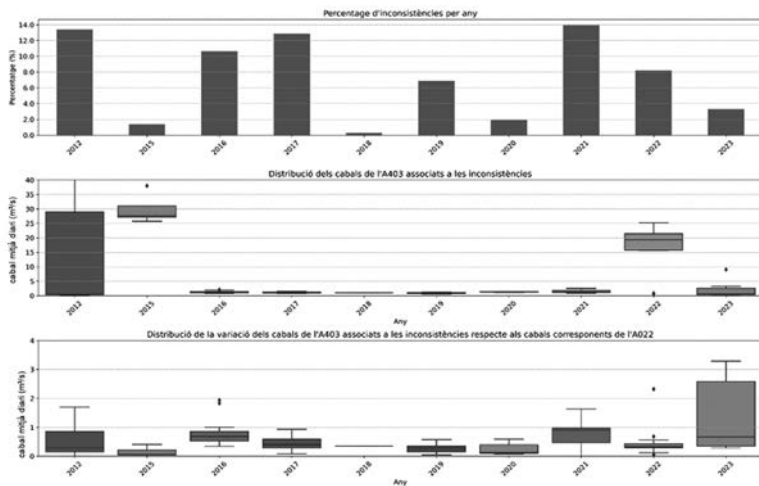


Figura 13. Regressió segmentada de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de l'estació A403 en funció de l'estació A022 considerant només l'any 2022 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residualls estandaritzats (residuals / desviació estàndard dels residualls) obtinguts a partir de la regressió segmentada presentada (dreta)

Globalment, es pot afirmar que la regressió segmentada ofereix resultats més robustos que la regressió lineal i que, per tant, és més òptima per corregir les inconsistències de la sèrie de referència.

La correcció de les inconsistències es fa amb l'estimació dels cabals de la sèrie A403 a partir dels cabals de la sèrie A022 (que estan associats a les inconsistències) mitjançant el model

de regressió segmentada per any. Un cop fetes les correccions, la proporció d'inconsistències totals durant el període 2009-2023 baixa del 9 al 5%, dels quals el 4,1% corresponen a cabals baixos de l'A022 (inferior o igual a 6,8 m³/s). Els resultats de la correcció per any es presenten a la Figura 14. El nombre d'inconsistències baixa a 0% en els anys 2009-2011 i 2013-2014, i es redueix per sota del 14% en els anys 2012 i 2015-2023.



Conclusions

Aquest estudi ha proporcionat una anàlisi exhaustiva de les sèries hidromètriques de la conca del Valira a Andorra, que ha abordat les inconsistències detectades en les estacions amb un registre de dades històric més llarg (A402 i A403). Els resultats obtinguts han permès desenvolupar dos sèries de referència¹¹ robustes i consistents per a la conca del Valira a Andorra, basades en l'estació hidromètrica A403. Aquestes sèries esdevenen una eina clau per a l'anàlisi hidrològica en contextos científics i de gestió. L'aplicació d'una metodologia de correcció basada en regressions segmentades ha permès minimitzar els biaixos i les inconsistències de la sèrie de dades, la qual cosa ha reduït significativament les discrepàncies observades entre la sèrie A403 i la sèrie de referència A022. Les troballes d'aquest estudi evidencien la importància d'un calibratge rigorós i d'un seguiment continu de les estacions

Figura 14. a) Percentatge corresponent al nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A403 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022, respecte al total de cabals anuals després d'aplicar la correcció. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A403 associats a les inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022

11- Sèries disponibles a https://ari.ad/images/proyectos/observacions_cabals/series_a403_referencia.csv

Referències bibliogràfiques

AR+I (2022). *Millora de les dades d'observacions de cabals de les conques fluvials d'Andorra*. https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/informe_observacions_cabals.pdf

BEGUERÍA, S., SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M., ANTIGÜEDAD, I., CABALLERO, Y., LAMBÁN, L. J., QUINTANA-SEGÚI, P., LLASAT, C., PESADO, C., VIDAL, J.-P., & JÓDAR, J. (2019). Evaluation of water resources of the Pyrenees in a context of climate change and adaptation strategies. *Geophysical Research Abstracts*, 21 (April), 1. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=140494002&site=ehost-live>

PILGRIM, C. (2021). Piecewise-regression (aka segmented regression) in Python. *Journal of Open Source Software*. <https://doi.org/10.21105/joss.03859>

hidromètriques, especialment en conques sotmeses a una pressió antròpica elevada i a impactes del canvi climàtic, com és el cas d'Andorra. Les noves sèries de referència serviran com a base per a futures recerques sobre els recursos hídrics a la regió, incloent-hi l'estimació de cabals ambientals i l'adaptació al canvi global. En definitiva, aquest estudi no només aporta solucions tècniques per a la gestió hidrològica d'Andorra, sinó que també constitueix un model metodològic replicable en altres conques amb característiques similars. L'adopció d'aquest enfocament contribuirà a millorar la resiliència hídrica del territori, alineant-se amb els reptes actuals de sostenibilitat i transició energètica.



Alexandre Quintana i Clarà

Geògraf, màster en
Geofísica i Meteorologia de
la Universitat de Granada

Resum

Les muntanyes i les regions de gran altitud són especialment sensibles al canvi climàtic, amb nombrosos impactes potencials que afecten pràcticament tots els nivells, tant naturals com econòmics i socials. El present estudi proposa utilitzar les projeccions de canvi climàtic d'alta resolució (5 km x 5 km) obtingudes en el marc del projecte Poctefa Climpy (Amblar-Francés *et al.*, 2020) per al territori andorrà, per tal de contextualitzar l'evolució del clima sota diferents escenaris futurs possibles d'emissions (RCP4.5 i RCP8.5). A més de les projeccions de temperatura i precipitació a diferents horitzons de pronòstic, s'han calculat diversos índexs que poden ser utilitzats dins l'estratègia nacional d'adaptació al canvi climàtic per caracteritzar el clima d'Andorra i fer un seguiment històric per detectar canvis. Fruit d'aquest procediment, es fa una reflexió sobre com utilitzar la informació disponible a alta resolució a partir de la sectorització d'aquesta informació per dues franges altitudinals. Els resultats indiquen que, per a la temperatura, les tendències positives ja detectades actualment es mantindran durant aquest segle, i seran més marcades per la temperatura màxima que per la temperatura mínima. Les projeccions climàtiques també mostren com l'augment de la temperatura serà proporcional a l'increment de les emissions de GEH per cada un dels dos escenaris analitzats (RCP4.5 i RCP8.5). A diferència de la temperatura, les projeccions futures de precipitació no mostren una tendència clara. Així doncs, l'escenari socioeconòmic cap a on avanci el nostre futur pròxim definirà com s'intensificarà l'escalfament global i l'impacte que el canvi climàtic tindrà en els recursos naturals dels quals Andorra disposa i els riscos naturals amb què convivim.



Alexandre
Quintana i Clarà



Laura Trapero i
Bagué



Gerard Grande
i Bartumeu

Projeccions de canvi climàtic a Andorra: anàlisi i càlcul d'indicadors climàtics

Paraules clau: canvi climàtic, projeccions climàtiques, variabilitat, adaptació, Andorra.

1. Introducció

Els territoris de muntanya són molt sensibles als efectes del canvi climàtic (Hock *et al.*, 2019; OPCC, 2018). L'increment de les temperatures i de la variabilitat de les precipitacions en són conseqüències directes. Per tant, el fet de poder mantenir la qualitat de vida pròpia d'aquests territoris s'està veient amenaçat pels efectes del canvi climàtic i la conseqüent pèrdua de gran part d'aquesta confortabilitat de la qual disposen la major part dels territoris de muntanya, com és el cas d'Andorra.

Les activitats humanes, principalment a través de les emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH), han provocat inequívocament l'escalfament global, amb un augment de la temperatura de la superfície global que ha assolit els 1,1 °C durant el període 2011-2020 respecte a la mitjana del període preindustrial 1850-1900 (IPCC, 2023). S'ha de tenir en compte que molts riscos relacionats amb el clima són més elevats que en avaluacions anteriors, i això provoca que els impactes projectats a llarg termini són fins i tot diverses vegades superiors als observats actualment (IPCC, 2023), fet molt preocupant si tenim en compte que les zones de muntanya són un dels ambients més fràgils del planeta (Díaz *et al.*, 2003).

Diferents estudis valoren, a partir de l'ús de projeccions climàtiques, l'exposició al canvi climàtic que tindran les zones de muntanya (Nogués-Bravo *et al.*, 2007), però hi ha una mancança de treballs que abordin amb detall l'evolució recent del clima a partir de dades observades en estacions situades a altituds mitjanes i altes a causa de la dificultat de disposar de llargues sèries de dades (Esteban *et al.*, 2012).

Malgrat aquestes limitacions, tal com defineix l'informe de l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic (2018), s'han fet nombrosos estudis del clima dels Pirineus on s'ha inclòs Andorra, en especial sobre les precipitacions i les temperatures (entre altres treballs, els de Creus, 1983; Gottardi, 2009; Pérez Zanón *et al.*, 2017), la variabilitat i el canvi climàtic (Bücher i Dessens, 1991; López Moreno i Vicente Serrano, 2007; Esteban *et al.*, 2012; Buisán *et al.*, 2015) i referents a projeccions climàtiques (López Moreno *et al.*, 2011; Verfaillie *et al.*, 2017 i 2018). En aquest context, els escenaris de canvi climàtic constitueixen un fonament imprescindible per fer estudis sobre els possibles impactes, les vulnerabilitats i les estratègies d'adaptació més adients (UNDP-UNEP-GEF, 2009). Els models climàtics globals (MCG)

proporcionen escenaris de projeccions climàtiques futures i aspectes de la variabilitat climàtica i extrems que poden ser rellevants per als estudis d'impacte i a l'hora de planificar l'adaptació dels territoris davant d'aquesta realitat. Concretament, s'han utilitzat tècniques de reducció d'escala estadística (*downscaling*), pel fet que tenen l'avantatge de permetre obtenir informació climàtica detallada en llocs on les dades observades són limitades, amb l'objectiu de proporcionar informació climàtica a escales més fines, com una estació meteorològica específica (Kitoh et al., 2016).

Quan s'analitzen les projeccions climàtiques s'ha de tenir present quines són les principals fonts d'incertesa que interactuen en la cadena de càlculs, els forçaments naturals del sistema climàtic, les emissions de GEH, les seves concentracions, els aerosols, els mateixos models globals i les tècniques de *downscaling* utilitzades, ja que aquestes últimes es van acumulant en cada pas del procés de *regionalització* estadística. Per tant, s'ha de tenir en compte que tot i la contínua millora en models, metodologies i escenaris cada cop més realistes, l'existència d'incerteses a l'hora d'establir projeccions climàtiques és inevitable (Amblar-Francés et al., 2020), com en tot procés predictiu.

2. Projeccions climàtiques per Andorra basades en models climàtics regionals de CMIP5

Per a aquest treball, s'han utilitzat els resultats obtinguts en el projecte Climpy, que es basen en simulacions derivades de models climàtics globals de la cinquena fase del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). Els models climàtics globals (GCM), tot i que són útils per comprendre les grans tendències del canvi climàtic, tenen una resolució espacial insuficient per analitzar regions muntanyoses complexes com Andorra.

Per tant, a Amblar-Francés et al. (2020) es va utilitzar com a punt de partida un conjunt de simulacions de diferents models climàtics regionals (RCM) d'alta resolució del programa Eurocordex, i posteriorment se'ls va aplicar tècniques de regionalització estadística per adaptar els resultats al territori pirinenc, on la variabilitat altitudinal i les condicions orogràfiques afecten fortament la climatologia local.

Aquestes regionalitzacions permeten obtenir projeccions climàtiques específiques per a la regió d'Andorra amb una resolució espacial de 5 km x 5 km, i els patrons locals de

temperatura i precipitació s'hi detallen amb més precisió, la qual cosa és essencial per captar els efectes locals del canvi climàtic, especialment en un territori muntanyós. Els escenaris analitzats inclouen els escenaris d'emissions RCP4.5 i RCP8.5, que representen diferents trajectòries de concentracions de gasos d'efecte hivernacle, tal com observem en la taula següent:

Temperatura i Precipitació		
Escenaris	Models CMIP5	Institució
RCP4.5 / RCP8.5 17 models	BNU-ESM (T°, PP)	Global Change and Earth System Science (GCESS) Beijing University, China
	Bcc-csm1.1 (PP)	Beijing Climate Center, China
	CanESM2 (T°)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada
	CMCC-CM (T°, PP)	CMCC, Italy
	CNRM-CM5 (PP)	Centre National de Recherches Météorologiques
	GFDL-ESM2G (T°, PP)	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA
	HadGEM2-CC (PP)	Met Office, UK
	IPSL-CM5A-LR (T°, PP)	Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France
	IPSL-CM5A-MR (T°, PP)	IPSL, France
	IPSL-CM5B-LR (T°, PP)	IPSL, France
	INM-CM4 (T°, PP)	Institute of Numerical Mathematics, Russia
	MIROC-ESM (PP)	AORI NIES JAMSTEC, Japan
	MIROC-ESM -CHEM (PP)	AORI NIES JAMSTEC, Japan
	MIROC5 (T°, PP)	AORI NIES JAMSTEC, Japan
	MPI-ESM-LR (T°, PP)	Max-Planck-Institut (MPI) for Meteorology, Germany
	MPI-ESM-MR (T°, PP)	Max-Planck-Institut (MPI) for Meteorology, Germany
	MRI-CGCM3 (T°, PP)	Meteorological Research Institute, Japan

Taula 1. Llista de models CMIP5 utilitzats per generar les projeccions regionalitzades executades en el marc del projecte Poctefa Climpy (Amblar-Francés et al., 2020)

2.1. Canvis projectats en el valors climàtics mitjans

En el conjunt de simulacions s'ha analitzat la projecció futura de les variables següents:

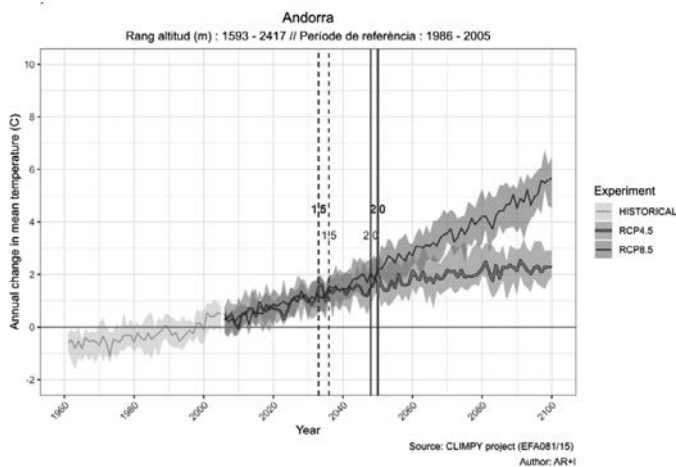
- Temperatura màxima
- Temperatura mínima
- Temperatura mitjana
- Precipitació

El conjunt de simulacions treballat cobreix diversos horitzons temporals, seguint els criteris marcats pel sisè informe de

l'IPCC (IPCC, 2023). Aquests horitzons s'han dividit de la manera següent: període històric de referència (1986-2005), curt termini (2021-2040), mitjà termini (2041-2060) i llarg termini (2081-2100), analitzats per identificar possibles tendències i extrems climàtics futurs sota els escenaris d'emissió RCP4.5 i RCP8.5.

En el cas d'Andorra, el valor mitjà de la temperatura mitjana anual mostra un augment progressiu al llarg del segle XXI sota tots els escenaris analitzats, molt significatiu a finals de segle i sota l'escenari RCP8.5. Fins aproximadament la primera meitat del segle, l'elecció de l'escenari RCP té un impacte més baix en els resultats de les projeccions, ja que en els primers anys les concentracions de GEH a l'atmosfera són relativament similars entre els escenaris RCP, en no haver-se produït una reducció significativa de les emissions de GEH.

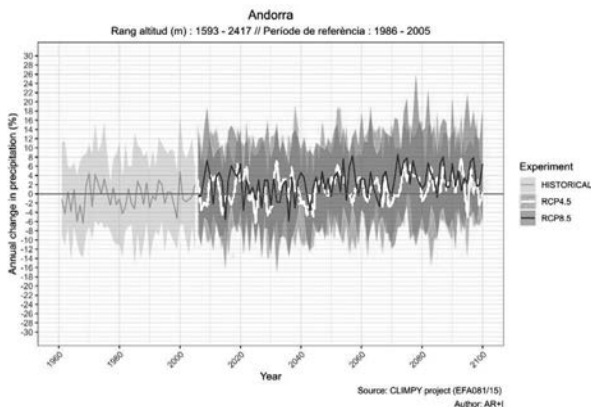
No obstant això, a la segona meitat del segle, les estimacions pels diferents RCP divergeixen notablement, especialment l'escenari RCP8.5 respecte de l'escenari menys emissiu (RCP4.5).



Deixant de banda les variables de temperatura, ja ens podem centrar en l'evolució de les anomalies pluviomètriques d'Andorra. S'observa com el valor mitjà de precipitació anual mostra un comportament molt diferenciat respecte a la temperatura, en què les projeccions futures de precipitació no mostren una tendència clara (figura 2).

Figura 1. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mitjana diària (°C) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83

Figura 2. Evolució del valor mitjà anual de precipitació diària (%) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83



3. Canvis projectats en els extrems climàtics

Finalment, també s'han analitzat les projeccions de diferents extrems climàtics, utilitzant la mateixa base de dades de simulacions de CMIP5. S'han avaluat les variacions en la temperatura i les precipitacions extremes, prenent com a referència els mateixos escenaris climàtics (RCP4.5 i RCP8.5) i horitzons temporals (curt, mitjà i llarg termini). Les variables analitzades inclouen indicadors d'extrems com:

- Dies d'estiu (*SU25*)

Nombre de dies en què la temperatura màxima > 25 °C

- Dies glaçats (*ID0*)

Nombre de dies en què la temperatura màxima < 0 °C

- Dies freds (*TX10p*)

Percentatge de dies en què la temperatura màxima < percentil 10.

- Índex de durada de ratxa càlida (*WSDI*)

Nombre de dies en què, com a mínim hi ha sis dies consecutius amb una temperatura màxima < percentil 90

- Dies de glaçada (*FD0*)

Nombre de dies en què la temperatura mínima < 0 °C

- Nits tropicals (*TR20*)

Nombre de dies en què la temperatura mínima > 20 °C

- Nits fredes (*TN10p*)

Nombre de dies en què la temperatura mínima < percentil 10

- Dies de PPT ≥ 10mm (*R10*)

Nombre de dies en un any en què PPT és igual o superior a 20 mm

A continuació, es presenten els resultats de les projeccions dels extrems climàtics més rellevants, utilitzant els indicadors descrits prèviament. En primer lloc, l'índex Dies d'estiu (SU25) segueix una tendència d'increment força destacada, tal com mostra la figura 3.

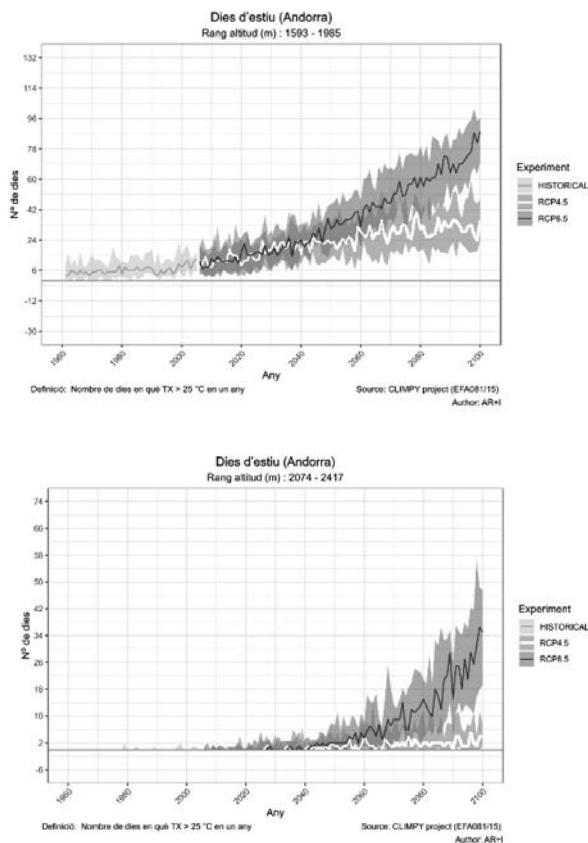


Figura 3. Evolució del nombre de dies d'estiu (SU25) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83

L'indicador SU25 mostra com en els darrers anys s'ha incrementat notablement el nombre de dies en què la temperatura màxima supera els 25°C; durant el 2022 es van registrar fins a 84 dies, el màxim de la sèrie. En la projecció de l'evolució de l'SU25 es mostra un augment progressiu al llarg

del segle XXI per als dos escenaris analitzats del conjunt d'Andorra. Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura màxima mostrats anteriorment, en què a finals de segle, pel que fa a tot el territori andorrà, s'espera que el nombre de dies d'estiu arribi a augmentar en gairebé 50 dies per a l'escenari més emissiu respecte al període de referència, i en 15 dies respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5.

Per a alguns índexs climàtics té especial interès identificar també el seu comportament estacional. Aquest és el cas dels dies d'estiu SU25. S'identifica que, a banda de l'estiu, l'augment de les temperatures màximes serà especialment rellevant a la tardor i es manifesta amb un magnitud superior a la projectada a la primavera.

El canvi projectat per aquest índex també es interessant observar-lo segons el seu comportament diferenciat amb l'altitud, de manera que els píxels a fons de vall (<2.000 m) mostren un increment superior als que se situen per sobre dels 2.000 m.

En segon lloc, l'índex Dies de glaçada (FD0) segueix una tendència descendent molt marcada.

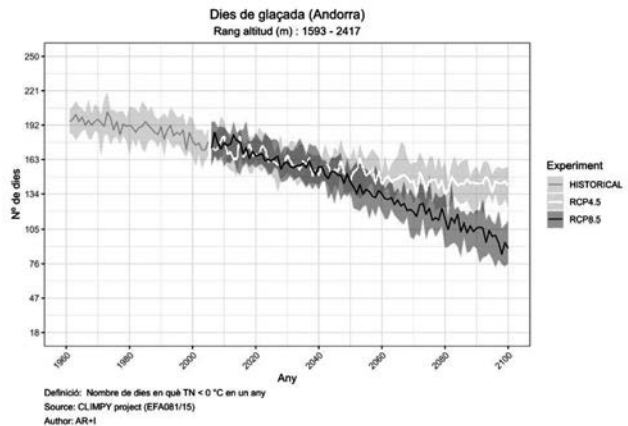


Figura 4. Evolució del nombre de dies de glaçada (FD0) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83

Pel que fa als índexs de temperatures mínimes, mostren una tendència totalment oposada a la temperatura màxima. Per tant, els dies de glaçada (FD0) han disminuït notablement;

l'any 2022 se'n van registrar 38 dies, quan la mitjana per al període de referència és de 80 dies a l'any. A finals de segle s'espera que el nombre de dies de glaçada disminueixi en gairebé 90 dies i de manera constant per a l'escenari més emissiu RCP8.5 respecte al període de referència, i en aproximadament 35 dies respecte a l'escenari d'estabilització RCP4.5, encara que la disminució que es produeix en aquest darrer escenari es manté de manera estable la segona meitat del segle, patint petites oscil·lacions interanuals. Pel que fa a la precipitació, l'evolució projectada del nombre de dies amb una precipitació diària superior a 10 mm no mostra cap tendència (R10).

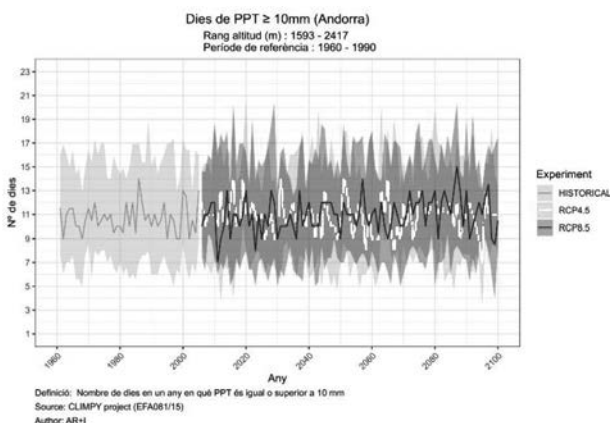


Figura 5. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 10 mm (R10) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83

Referències

- AMBLAR-FRANCÉS, M. P., RAMOS, P., SANCHIS, J., HERNANZ, A., PERAL, M. C., NAVASCUÉS, B., DOMÍNGUEZ, M., PASTOR, M. A., & RODRÍGUEZ, E. (2020). *High resolution climate change projections for the Pyrenees region, Advances in Science and Research*, 17, 191–208, doi:10.5194/asr-17-191-2020.
- AR+I, Andorra Recerca + Innovació (2022). *Observatori de la Muntanya d'Andorra. Índex Climàtics*. [En línia a: <https://www.oma.ad/ca/index-climatic>]
- BRUNET, M., CASADO, M. J., CASTRO, M., GALÁN, M., LÓPEZ, P., MARTÍN, J., PASTOR, J., PETISCO, A., RAMOS, E., RIBALAYGUA, P., RODRÍGUEZ, E., & TORRES, L. (2007). *Generación de Escenarios Regionalizados de Cambio Climático para España. Primera Fase*.
- CUADRAT, J. M., SERRANO-NOTIVOLI, R., LLABRÉS, A., PROHOM, M., SÁNCHEZ, M. A., TEJEDOR, E., CUNILLERA, J., TRAPER, L., PONS, M., COPONS, R., LÓPEZ-MORENO, J. I., LUNA, Y.,

L'evolució en el nombre de dies en què la precipitació és igual o superior a 10 mm mostra una estabilitat al llarg del segle XXI per als dos escenaris analitzats. Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de precipitació mostrats a l'apartat anterior. En els altres indicadors, com la ratxa seca o en la ratxa humida, es mostra molta variabilitat interanual i la tendència no és marcada.

4. Conclusions

En aquest treball s'han utilitzat els resultats generats en el marc del projecte Climpy, basat en simulacions regionals derivades de CMIP5, per obtenir projeccions climàtiques específiques per a Andorra. Aquestes dades ens han permès

RODRÍGUEZ, E., GASCOIN, S., & SOUBEYROUX, J.M. (2020). *Creación de un sistema de indicadores para la caracterización del clima de los Pirineos. Desafíos y oportunidades de un mundo en transición: una interpretación desde la Geografía*. ISBN 978-84-9133-305-0, p. 53-66, doi:10.5281/zenodo.3611127

DIFFENBAUGH, N. S., SINGH, D., MANKIN, J. S., HORTON, D. E., SWAIN, D., TOUMA, D., CHARLAND, A., LIU, Y., HAUGEN, M., TSIANG, M., & RAJARANAM, B. (2017). *Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events*, doi:10.1073/pnas.1618082114

DOMÈNECH, M., TRAVESSET, O., ALBALAT, A., TRAPERO, L., & PONS, M. (2022). *Identifying water supply tensions between competing users in extreme future scenarios: a case study from the Pyrenees - International Mountain Conference. Synthesize Mountains of Knowledge*.

ESTEBAN, P., PROHOM, M., & AGUILAR, E. (2012). Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra, Pirineos (1935-2008). *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, vol. 167, p. 87-106, doi:10.3989/Pirineos.2012.167005

ESTEBAN, P., PROHOM, M., CUNILLERA, J., & TRAPERO, L. (2017). Tendencias recientes del clima a Andorra (1950-2010): Resultats del projecte acció clima – OPCC. *Revista del CENMA*, 9.

IPCC. (2023). *Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Longer Report*. [En línia a: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>] LRECC, 2018. Llei 21/2018 d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic.

OPCC, 2018: *El canvi climàtic als Pirineus: impactes, vulnerabilitats i adaptació*. [En línia a:

<<https://www.opcc-ctp.org/>>]

TRAPERO, L., ALBALAT, A., & LEMUS-CANOVAS, M. (2021). *AR+I, Andorra Recerca + Innovació* (2022). *Climate setting in Andorra*. Document intern.

analitzar les tendències projectades de temperatura i precipitació, així com diversos indicadors d'extrems climàtics. L'anàlisi ha estat aplicada a 14 punts representatius del territori andorrà, cobrint diferents altituds i condicions geogràfiques. Els resultats obtinguts indiquen un augment significatiu de la temperatura mitjana anual per als propers anys, especialment sota l'escenari d'emissions elevat (RCP8.5). En concret, es preveu un increment de la temperatura màxima que oscil·la entre 2,2 °C i 5,1 °C a llarg termini (2071-2100). Les projeccions també mostren que els mesos d'estiu seran els més afectats, amb augments més intensos en la temperatura màxima, que arribaran fins als 6 °C en l'escenari més extrem. Pel que fa a les precipitacions, les projeccions no són tan concloents. Tot i que no es preveu cap tendència clara en el total anual de precipitacions, els canvis estacionals varien segons l'escenari i especialment en els mesos d'estiu.

A partir d'aquestes dades, s'han calculat també indicadors d'extrems climàtics, en què destaca un augment significatiu dels dies d'estiu i de les nits tropicals, així com una reducció progressiva dels dies gèlids. Aquestes tendències d'extrems climàtics subratllen la necessitat de planificar estratègies d'adaptació, especialment en sectors com la salut, el turisme i la gestió de l'aigua.

En conclusió, les projeccions climàtiques indiquen que Andorra experimentarà un escalfament progressiu al llarg del segle XXI, amb augments de temperatura més accentuats durant els mesos d'estiu. Les precipitacions no mostren una tendència clara, però es preveu un increment de les temporades seques.

Aquest treball ha permès identificar les àrees geogràfiques més vulnerables d'Andorra en funció de les variables climàtiques analitzades. Així mateix, s'han pogut establir diferències altitudinals importants entre fons de vall i alta muntanya, amb tendències més marcades en les zones elevades (> 2.000 m). Els resultats proporcionen una visió més detallada sobre els impactes futurs del canvi climàtic a Andorra i faciliten la planificació de mesures d'adaptació efectives per mitigar-ne els efectes sobre la societat i el medi natural.



Marta Domènech i Ferrés

Doctora en Forests per la
Universitat de Lleida i
investigadora d'Andorra
Recerca + Innovació

Resum

Andorra, igual que la resta de conques dels Pirineus, s'enfronta a una sèrie de reptes motivats per l'augment de les temperatures i dels períodes de sequera, així com probablement un augment del episodis climàtics extrems. Alhora, el país té ja més de 80.000 habitants i una pressió turística remarcable, la qual cosa fa que sigui una de les conques pirinenques amb més pressió antròpica. Aquest context fa que es consideri imprescindible disposar de coneixement sobre el funcionament hidrològic dels seus sistemes fluvials i en especial dels possibles impactes en ells del canvi global.

Mitjançant el model WEAP-Andorra, aquest estudi analitza la sostenibilitat futura dels recursos hídrics, considerant variables climàtiques i socioeconòmiques, incloent-hi un escenari de sequera extrema. Els resultats preveuen una disminució del cabal anual del 5,3 al 8,5% en escenaris de canvi global, que arriba fins al 65,4% en una sequera extrema. Els escenaris de sequera mostren vulnerabilitats tant per assegurar el recurs hídic com per garantir la conservació dels espais fluvials.

Introducció

El canvi global és un dels grans reptes mundials. L'augment generalitzat de les temperatures, juntament amb els canvis socioeconòmics i en l'ús del sòl, afecta el cicle hidrològic modificant règims i alterant la disponibilitat d'aigua. A més, les sequeres, probablement més intenses, freqüents i de durada més llarga (Lemus Casanovas, 2021), poden agreujar els efectes sobre la reducció dels cabals fluvials, entre altres impactes esperats. Per tot, les regions de muntanya, com els Pirineus, són especialment vulnerables, amb impactes en la gestió de l'aigua i en sectors com la generació hidroelèctrica. Els efectes sobre els sistemes hidrològics són coneguts a les nostres latituds: més evaporació i evapotranspiració i, per tant, menys disponibilitat d'aigua als rius. Per tant, el recurs hídic, finit per naturalesa, esdevé ara més que mai un recurs que ha arribat a ser escàs al nostre entorn i que en un futur podrà veure's compromès.



Marta Domènech i Ferrés

Escenaris de canvi climàtic sobre el riu Valira

Aquest estudi utilitza un model integrat per analitzar els efectes físics i socioeconòmics sobre els recursos hídrics de la conca del riu Valira, a Andorra, generant escenaris de disponibilitat d'aigua i identificant sectors vulnerables en cas d'escassetat.

Objectiu

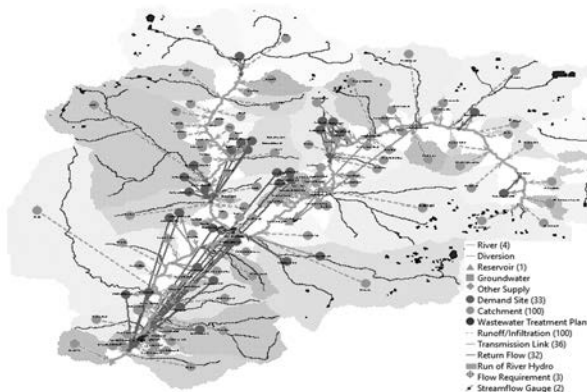
En aquest treball l'objectiu és avaluar els impactes de diferents escenaris climàtics i socioeconòmics sobre el recurs hídric del riu Valira i, en especial, els efectes de la sequera.

Metodologia

El document presenta un model hidrològic integrat desenvolupat mitjançant l'eina Water Evaluation and Planning (WEAP)¹ (Yates et al., 2005) que inclou la demanda d'aigua així com el recurs hídric disponible. Aquest model estima el balanç hídric a la conca andorrana des de l'any 2015 al 2050, amb una àrea total de 475 km².

L'algoritme principal de WEAP és un balanç hídric amb resolució espacial, calculat mensualment, que equilibra l'oferta i la demanda d'aigua a cada node i enllaç del sistema. La figura 1 mostra l'estructura de WEAP amb 100 subconques, 33 punts de demanda, un embassament amb generació hidroelèctrica, enllaços de transmissió i requisits de cabal per garantir els cabals ecològics. Els nodes representen els punts de demanda de diferents sectors socioeconòmics (punts vermells) i les aportacions d'aigua procedents de les conques (punts verds), mentre que els enllaços connecten amb els rius.

Figura 1. Vista esquemàtica del model WEAP amb la xarxa hidrogràfica (en blau), els nodes de demanda (punts vermells) i les aportacions a les conques (punts verds)



1- <https://www.weap21.org/>

El model és alimentat amb dades climàtiques uniformes per cada una de les 100 subconques andorranes. Aquestes dades climàtiques han estat la temperatura i la precipitació² calculades per a cada subconca amb una resolució de 90x90 m en el període de referència 1981-2010, i la humitat relativa i el vent³ amb una resolució de 2,5x2,5 km pel mateix període. Igualment s’han incorporat les cobertes del sòl, així com la demanda d’aigua dels principals sectors socioeconòmics del país (turisme, domèstic, agricultura, estacions d’esquí i producció hidroelèctrica).

El model s’ha projectat fins al 2050, guiat per factors climàtics i socioeconòmics que representen diversos escenaris de canvi global (vegeu la taula 1). L’escenari actual serveix d’any de base, que vindria a representar un any “normal” en termes climàtics i de demanda. Els escenaris de referència i de canvi global incorporen escenaris de canvi climàtic i augment de la demanda d’aigua en els diferents sectors, essent el de referència el que pateix canvis més suavitzats respecte al de canvi global. L’escenari de sequera històrica és el mateix que el de canvi global però afegint una reducció de la precipitació equivalent a l’any més sec detectat al país (2007). Finalment s’ha volgut projectar un darrer escenari representant l’últim episodi de sequera esdevingut a Andorra, que correspon a l’any 2022. Per tant, aquest darrer escenari anomenat “Any 2022 i canvi global”, es projecta a partir de les dades de precipitació del 2022 (any sec) amb l’escenari de canvi global (vegeu la taula 1).

Aquests diferents escenaris permeten quantificar els impactes sobre el cabal a la sortida de la conca andorrana.

Escenari	Canvi climàtic (anomalia al 2050)			Canvis socioeconòmics als principals sectors (2050)			
	RCP	T (°C)	Pp (%)	Domèstic	Turisme	Agricultura	Estacions d’esquí
Referència	4.5	T ₁	P ₁	▲Demografia: 1,18%/any	▲Allotjaments: 1,18%/any		
Canvi global	8.5	T ₂	P ₂	▲Demografia: 1,62%/any	▲Allotjaments: 1,62%/any Ocupació: 70%	▲Demanda de reg 10%*	▲Cultiu de neu 15%
Any històric sec	8.5	T ₁	P ₂₀₀₇	▲Demografia: 1,62%/any	▲Allotjaments: 1,62%/any Ocupació: 70%	▲Demanda de reg 10%*	▲Cultiu de neu 15%
Any 2022 i canvi global	8.5	T ₁	P ₂₀₂₂	▲Demografia: 1,62%/any	▲Allotjaments: 1,62%/any Ocupació: 70%	▲Demanda de reg 10%*	▲Cultiu de neu 15%

Taula 1. Resum dels escenaris implementats fins al 2050. T1, T2, P1, P2 i P3 representen les distribucions mensuals projectades de temperatura i precipitació en cada escenari extretes del projecte CLIMPY⁴

2 -<http://www.acda.ad/>
3- <http://hdl.handle.net/10261/271111>
4- <https://www.opcc-ctp.org/en/climpy>

El model ha estat calibrat (2015–2017) i validat (2018–2019) per al cabal mensual al punt de mesura de cabal més representatiu de la conca andorrana, situat a la sortida del riu Valira des d'Andorra.

Resultats

Els resultats mostren una disminució significativa del cabal anual en tots els escenaris modelitzats (vegeu la figura 2) per al 2050, fet que implica una reducció explícita dels recursos hídrics totals a Andorra, on la major part provenen de rius i llacs, i una part més petita, de les aigües subterrànies. En l'escenari de referència, s'estima que el cabal anual disminuirà un 5,3%, mentre que en l'escenari de canvi global la reducció serà del 8,5%. Malgrat això, durant els períodes hivernals, en els escenaris de referència i de canvi global, el cabal podria augmentar lleugerament, excepte al gener, quan podria incrementar-se encara més (40-55%). Això s'explica per un canvi de les precipitacions de neu a pluja, en línia amb les projeccions de canvi climàtic.

No obstant això, la reducció més notable del cabal es dona en l'escenari de sequera històrica. Mentre que en l'escenari de canvi global es perd gairebé un 10% del cabal anual, en el de sequera històrica la pèrdua arriba al 65,4%. L'augment de temperatures i els anys secs intensifiquen aquesta reducció, que fa disminuir els recursos hídrics de la conca.

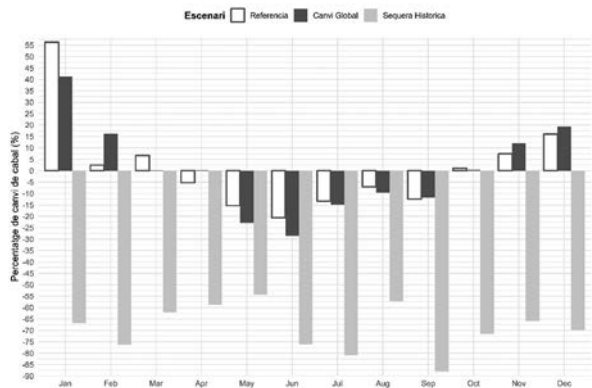


Figura 2. Variació del cabal en els diferents escenaris simulats el 2050 en comparació amb l'any actual, considerat l'any base

Tot seguit s'observen les projeccions de cabal (m^3/s) durant tots les mesos de l'any al 2050 (vegeu la figura 3). En aquest

cas s'hi ha afegit un darrer escenari de sequera "Any 2022 i canvi global", atès que recentment Andorra n'ha patit un episodi. Aquest episodi queda ben il·lustrat en les publicacions del butlletí de seguiment de recurs hídric.⁵

Si comparem els cabals mensuals modelitzats dels diferents escenaris amb el cabal mensual projectat amb la precipitació de l'any 2022 i les variables de canvi global (vegeu la taula 1), es pot observar que l'efecte de la sequera sobre el cabal és efectivament molt significatiu (vegeu la figura 3) en els dos escenaris de sequera. En aquest sentit, l'últim episodi de sequera ocorregut a Andorra, molt recent, ens permet identificar de nou un impacte sever al riu.

Com es veu en els resultats, en cap dels escenaris de sequera hi ha un mes on el cabal sigui superior, a diferència dels altres escenaris, que semblen ajudar a augmentar el cabal en alguns mesos hivernals.

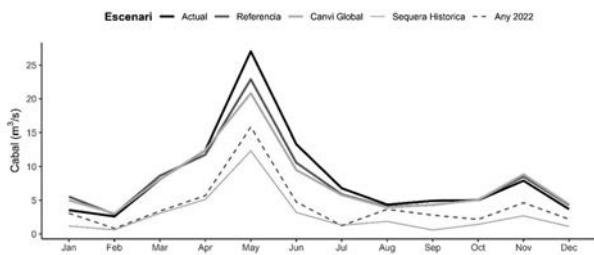


Figura 3. Cabals mensuals modelitzats a la sortida de la conca andorrana (estació d'aforament A403) en els diferents escenaris per al 2050

Les reduccions significatives de cabal es tradueixen directament en una disminució del recurs hídric fluvial i alhora tenen un impacte negatiu sobre el conjunt de l'ecosistema del riu i les seves funcions ecosistèmiques. Aquest impactes són especialment rellevants a finals d'estiu, quan la temperatura de l'aigua és més elevada, i poden resultar-ne afectats la qualitat fisicoquímica de l'aigua i l'hàbitat d'algunes espècies autòctones, com és el cas de la truita de riu.

Conclusions

En general, el canvi futur previst en l'hidrogràfic de les conques d'Andorra es caracteritza per un avançament del desgel amb el conseqüent augment de cabal a l'hivern i una reducció a la primavera i l'estiu. Encara que les fluctuacions de règims de cabals interanual siguin elevades en capçaleres i

5- <https://www.govern.ad/ca/tematiques/medi-ambient-i-sostenibilitat/aigua/el-recurs/butlleti-de-seguiment-del-recurs-hidric>

Referències bibliogràfiques

LEMUS CASANOVAS, J. L. B. (2021). Assessing internal changes in the future structure of dry-hot compound events: the case of the Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(6), 1721–1738.

YATES, D. N., SIEBER, J., PURKEY, D. R., & HUBER-LEE, A. (2005). WEAP21 – A demand-, priority-, and preference-driven water planning model part 1: model characteristics. *Water International*, (4), 487–500. <http://cabyregion.org/Members/yates/yates-et-al-part-1.pdf>

zones de muntanya, aquest canvi podria afectar el règim de les espècies adaptades a l'hidrogràfic actual. Tot i així, sembla que en els propers anys fins al 2050, i quan no s'esdevinguin sequeres intenses, les reduccions de cabal no superaran el 10%.

L'impacte més sever s'observa en els escenaris de sequera. Efectivament, l'efecte sobre de les reduccions de precipitació juntament amb el canvi global en el cabal és realment molt elevat. En aquest sentit, cal estudiar més a fons els impactes en altres trams fluvials de la conca andorrana, tant per assegurar el recurs hídric en tots els sectors del país com per garantir la conservació dels espais fluvials.



Jordi Deu i Pujal

Enginyer agrònom,
Silvagrina SL

Resum

Es proposen noves solucions basades en la natura (NBS),¹ desenvolupades a Andorra, d'utilitat per a la gestió del recurs hídric, tant des del punt de vista qualitatiu com quantitatiu.

Les que tenen relació amb la protecció en front de l'entorboliment de l'aigua per erosió hídrica intensa estan fonamentades en l'aplicació de mesures correctores per controlar l'erosió en indrets afectats per laves torrencials (*debris flow*) i consisteixen a efectuar treballs d'ovinoremeiació² per regularitzar xaragalls i per fertilitzar el sòl per apletat de ramat d'ovelles, construir microdics de ramatge per contenir les laves torrencials, i sembrar *Festuca eskia* per recobrir el sòl estèril i controlar l'erosió.

En referència a la gestió de l'aigua des del vessant quantitatiu, es proposa una nova metodologia que anomenem l'"Hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava infiltrada", que es basa en el tractament de dades dels aforaments (mesures de cabal) a les captacions d'aigua de rius i fonts, per estimar el cabal a llarg termini (entre 300 i 400 dies des del màxim) de què es podria disposar en condicions d'estrès hídric sever, sense pluja ni fosa de neu que puguin alimentar l'aqüífer. Això permetria abordar amb molta anticipació la presa de decisions en l'aplicació de mesures adaptatives per a la gestió del recurs hídric, quan és escàs.

Paraules clau: Control erosió, xaragall, *debris flow*, microdic, ovinoremeiació, restauració ambiental, NBS, revegetació, *Festuca eskia*, Pirineus, hidrograma, aigua blava, aigua potable, aqüífer, modelització, dèficit hídric.

1- NBS: Nature Based Solutions.
2- Ovinoremeiació: ús de ramat d'ovelles per a tasques de prevenció de riscos i de restauració ambiental.



Jordi Deu i Pujal

**Noves
metodologies
andorranes,
basades en la
natura, per
millorar la gestió
tècnica del
recurs hídric, en
condicions de
canvi climàtic i
creixement
poblacional**

1. Introducció

Fruit de l'experiència professional de l'empresa andorrana d'enginyeria Silvagrina, tot seguit passem a exposar una sèrie de casos en què hem hagut de donar una solució tècnica a determinades qüestions que afecten la producció qualitativa i quantitativa d'aigua, des de les conques que proveeixen els aqüífers de vessant del Pirineu andorrà. En tots els casos, sense realment saber-ho en aquell moment, ens havíem inspirat en la natura per cercar aquestes solucions, NBS Nature-Based-Solutions (Cohen-Shacham et al., 2016).

1.1. Sobre la millora de la qualitat de l'aigua

Respecte de les solucions basades en la natura que permeten millorar la qualitat de l'aigua, farem referència als treballs efectuats a la part alta de la conca del riu de Claror, arran de la torrentada que tingué lloc en les immediacions del calm de Claror el 21 de juliol del 2015. Per al lector interessat en aquesta part del document, us recomanem llegir la publicació *Restauració ambiental a la conca del riu de Claror* (Deu et al., 2018).

Resumidament, cal comentar que amb aquella torrentada es van arribar a acumular 71 l/m² en una hora. La forta pluja va afectar les capçaleres dels rius Llueneres, Aixirivall i Auvinyà pel vessant de Sant Julià de Lòria, i el riu Claror pel que fa a la conca de Perafita a la Vall del Madriu-Perafita-Claror.

A conseqüència d'aquesta forta tempesta en uns vessants de fort pendent i pobres en vegetació, es van produir fenòmens erosius a les capçaleres de les conques i es van formar laves torrencials al vessant de Sant Julià de Lòria, que van baixar fins al poble. A la conca del riu de Claror també es van generar laves torrencials per erosió dels terregalls negres de la zona (vegeu la foto 1), que van donar lloc a la formació de xaragalls amb deposició del sediment en el primer con de dejecció de la part alta de la conca. Tot això va provocar una forta terbolesa del riu (>500 NTU), i que les aigües captades no fossin aptes per al consum humà, i que es produïssin talls de diversos dies de durada en el subministrament d'aigua potable a la parròquia d'Escaldes-Engordany. Noves pluges de molta menys intensitat i quantitat, ocorregudes entre finals de juliol i principis d'agost, van generar nous episodis erosius a la conca del riu de Claror, que van incrementar inusualment la terbolesa de l'aigua captada, un enterboliment que, en ser de llarga durada, va ocasionar nous talls en el

subministrament. A partir de les inspeccions sobre el terreny i les anàlisis sedimentogràfiques, es va arribar a la conclusió que els processos erosius ocorreguts en els terregalls havien arrencat la crosta protectora superficial, consistent en uns 10~30 cm de pedra llosenca menuda (5~15 cm de Ø major), i que havien deixat al descobert materials fins a base de graves, sorres, llims i argiles, que van quedar a lliure disposició de l'escorrentiu superficial fins que no es torni a formar la capa protectora superficial. En aquell moment es va veure la necessitat de consolidar els sediments acumulats a la zona i de frenar el procés erosiu dels xaragalls que conflueixen en el naixement del riu Claror, amb l'objectiu de reduir la magnitud i la freqüència d'episodis erosius posteriors. Pel fet de trobar-nos dins d'un paisatge cultural del patrimoni mundial, segons l'organització de les Nacions Unides per l'Educació, la Ciència i la Cultura (Unesco), la Vall del Madriu-Perafita-Claror és una zona on les intervencions antròpiques han de ser mínimes i han de respectar sempre el medi natural i el paisatge, sense perjudicar els recursos naturals de la vall. Per assolir aquest objectiu d'estabilitzar els sediments i reduir els episodis erosius de la manera més sostenible possible, es van planificar i dur a terme diversos treballs de restauració ambiental, però només ens centrarem en els més importants i originals:

- Compactació i regularització dels terregalls
- Apletat i xafoteig amb ramat d'ovelles
- Construcció de microdics de ramatge
- Revegetació
- Prova en blanc

1.2. Sobre la millora en el coneixement del comportament quantitatiu del recurs hídric en condicions de secada

Ateses les limitacions d'espai per a la publicació d'aquest article, ens centrarem a fer una breu descripció de la Metodologia per predir la producció d'aigua blava infiltrada en condicions de secada mitjançant l'hidrograma sintètic de recés, que considerem que pot ser de molta utilitat per a la gestió del recurs hídric en petites conques hidrogràfiques sense preses reguladores, i que, per tant, aprofiten el recurs d'acord amb el cabal fluent, com és el cas de les captacions d'aigua potable d'Andorra.

Hem investigat els patrons de funcionament hidrològic dels aqüífers de vessant, inspirats en com ho fa la natura, i hem modelitzat el seu comportament quan funciona en condicions

de secada (manca de pluja o per gel) per sintetitzar un hidrograma³ de recés que extrapola aquest comportament al voltant d'un any vista sense aportacions noves a l'aqüífer des del màxim cabal de les fonts o rius que es presenta després de períodes humits o de fosa de neu abundant. És una eina de molta utilitat per anticipar estratègies de gestió del recurs en condicions d'estrès hídric, així com per establir el límit poblacional de les ciutats en funció del recurs hídric de què s'estima que poden disposar com a mínim amb garanties de sostenibilitat.

2. Material, mètodes i resultats

2.1. Noves tècniques de control de l'erosió

2.1.1. Ovinoremeiació



Foto 1. Estat de la capçalera del riu de Claror després de la torrentada del 21 de juliol del 2015

2.1.1.1. Compactació i regularització dels terregalls

OBJECTIU: compactar el sòl i suavitzar la secció dels xaragalls a la zona dels terregalls negres mitjançant tècniques d'ovinaremeiació, que hem definit com: l'ús de ramats d'ovelles per a tasques de prevenció de riscos i de restauració ambiental.

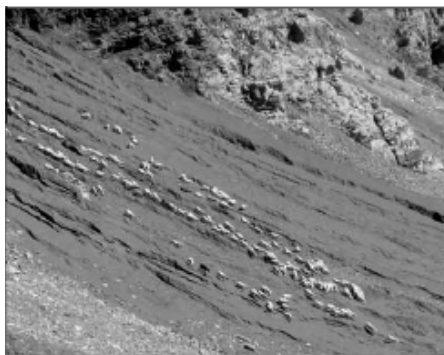
PROCEDIMENT: es van fer diversos passatges en sentit descendent del ramat d'ovelles per la zona dels terregalls aixaragallats. Aquest procediment es va dur a terme entre els mesos d'agost i octubre del 2015 (experimental) i 2016 (vegeu les fotos 2). Cal destacar el gran paper del pastor en aquesta tasca de portar el ramat a indrets on les ovelles normalment no volen anar, ja que perden pes i corren el risc d'estimar-se.

3- Els hidrogrames són els gràfics de l'evolució del cabal de la font o el riu amb el temps. Quan no hi ha aportacions hídriques a l'aqüífer, llavors l'hidrograma és sempre descendent, i aquesta part del gràfic s'anomena *hidrograma de recés*.

RESULTATS: amb el pas del ramat, es va accelerar el procés de consolidació natural deixant els xaragalls més còncaus, en comptes de rectangulars amb parets verticals (morfològia després de la torrentada), a més de compactar les terres superficials. Els resultats foren espectaculars. Tot això va fer els terregalls més estables, i va limitar que hi hagués material fi fàcilment a disposició dins del tàlveg dels xaragalls, ja que aquest és el màxim responsable de l'increment de la terbolesa al riu de Claror.

En les parts més baixes, on hi va haver deposició del sediment, el pas del ramat va regularitzar i compactar la superfície, clavant la grava en el sòl i deixant més terra superficial, fet que va facilitar la germinació de la sembra amb gèspit (*Festuca eskia*).

2.1.1.2. Apletat i xafoteig amb ramat d'ovelles



Fotos 2. Treballs d'ovinare i compactació amb el ramat d'ovelles, que mitjançant el xafoteig van compactar, regularitzar i suavitzar els xaragalls produïts per la torrentada del 2015 als terregalls negres

OBJECTIU: apletat del ramat d'ovelles a la zona on es preveu fer la revegetació, amb l'objectiu de bogar-la abans de la sembra per fertilitzar el substrat mineral estèril. Al mateix temps, el xafoteig del ramat ajuda a compactar i estabilitzar el sòl. L'apletat s'aplica tant a la zona que ha estat objecte de l'erosió (amb els horitzons subsuperficials exposats), com en el con de dejecció on aquest material erosionat ha estat dipositat (vegeu la foto 3). Es tracta d'enriquir uns sòls orfes de matèria orgànica i fertilitat mineral.

PROCEDIMENT: apletat del ramat en diverses parcel·les durant les nits, des de finals d'agost fins a principis de novembre, a la zona de sòls estèrils neoformats. En intervals de quatre a sis dies, es va anar canviant la pleta de lloc, amb



Foto 3. Apletat del ramat d'ovelles per fertilitzar el sòl nu i estèril, abans de la sembra

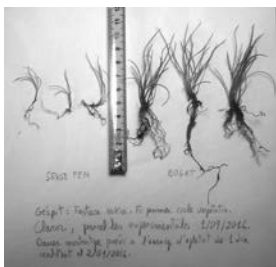


Foto 4. Comparació del creixement de *Festuca eskia* en una parcel·la sense apletat (esquerra), i l'altra fertilitzada per apletat del ramat (dreta). La producció de biomassa a la fi del primer cicle vegetatiu es va multiplicar per vuit

l'objectiu que el xerri i els orins de les ovelles fertilitzessin el substrat que calia revegetar. El ramat, durant el període d'apletat, va constar d'entre 1.450 i 1.300 ovelles. Amb l'objectiu d'homogeneïtzar millor el repartiment de la fertilitat, la densitat d'apletament emprada fou de mitjana a baixa (entre 0,85 i 0,35 ovins/m²). Aquesta variabilitat ha estat generada a propòsit, amb caràcter experimental, per tal de poder detectar quines densitats poden ser més eficients en la restauració ambiental dels diferents sectors encara pendents de tractament, així com per a d'altres indrets que en el futur es vulguin reconquerir per al control de l'erosió, ja que no s'han pogut trobar experiències assimilables en la bibliografia.

RESULTATS: mitjançant l'apletat del ramat s'aconsegueix una aportació de nitrogen, fòsfor, potassi i micronutrients vital per al creixement dels vegetals. Els resultats que es desprenen de la comparativa entre dos parcel·les experimentals de 16 m² cadascuna, sembrades durant la tardor del 2015, l'una bogada i l'altra no, en el control de la fi del primer cicle vegetatiu, parlen per si sols (vegeu la foto 4).

2.1.2. Construcció de microdics de ramatge

OBJECTIU: construir microdics de ramatge a la zona dels terregalls fortament aixaragallada (vegeu la foto 1), amb l'objectiu de contenir el transport massiu dels sediments que s'hi vehiculen, principalment en forma de lava torrencial amb matriu de llim i argila, o de flux hiperconcentrat, i controlar-ne així l'erosió.

PROCEDIMENT: els microdics de ramatge es construeixen amb branques d'avellaners helitransportades. Els microdics s'executen perpendicularment a l'eix del xaragall i a equidistàncies en relació inversa amb el pendent del vessant. Les rames petites es disposen en forma de filtre vegetal, i els troncs s'aprofiten per fer els pals de subjecció, col·locats en forma de V i també verticalment, clavats fins a una fondària d'aproximadament 1 metre (vegeu la foto 5). La brancada i els troncs es lliquen amb corda vegetal, de manera que els microdics són totalment biodegradables i, a partir de la fi de la seva vida útil (5 a 7 anys), s'aniran descomponent. La coronació dels microdics es deixa sensiblement per sota de la rasant del terregall, per tal d'evitar el desbordament lateral de la lava cap a altres zones del terregall no erosionades. També cal destacar que la realització d'aquest tipus de microdics ha

estat experimental, ja que no es va trobar bibliografia relativa a aquesta tècnica de restauració ambiental.

RESULTATS: els microdics, per efecte de barrera, han retingut les laves torrencials que hi circulen durant les tempestes estivals i durant la fosa de la neu, i, per efecte de filtre, també han retingut els arrossegaments menors del tipus flux hiperconcentrat (fluid no newtonià) i avinguda d'aigua (fluid newtonià) en maximitzar la pèrdua d'energia per fricció del fluid, evitant així que els xaragalls es fessin encara més profunds. Fins avui, el funcionament ha estat molt bo, sense desbordament lateral dels xaragalls així protegits, i molts ja han estat reblerts de material i es mantenen estables (vegeu la foto 5), fins a l'extrem que en els xaragalls més grans se n'ha hagut de construir per sobre una segona tongada. Tampoc no s'han constatat interferències entre les estructures i el ramat mentre es duïen a terme les tasques d'ovinoremeiació a la zona dels xaragalls (vegeu la foto 2).

2.1.3. Revegetació dels sediments dipositats

OBJECTIU: la revegetació del sòl nu té per objectiu establir els sediments i el material erosionat de recent exposició superficial. Mitjançant l'establiment d'una coberta herbàcia, es pretén donar protecció davant l'impacte directe de les gotes de pluja sobre el sòl (*splash erosion*), i també per causa de l'increment de cohesió en el sòl que proporcionen les arrels i la matèria orgànica, això sense menystenir l'increment de rugositat hidràulica que proporcionen les fulles del gèspit que, fent de filtre, limiten l'erosió laminar. S'estima que l'erosionabilitat d'un sòl nu és 150 vegades (factor C de l'equació universal de pèrdua de sòl segons criteris universals *soil loss equation*) superior al del mateix sòl totalment recobert (>95%) amb herbàcies, *ceteris paribus* (Cárdenas de Llano et al., 1998). L'espectacularitat d'aquestes xifres fa que aconseguir una ràpida revegetació de zones ermes sigui vital per poder controlar l'enterboliment de l'aigua.

PROCEDIMENT: per qüestions de màxim respecte ambiental, i per limitar els riscos de deriva genètica, es va optar per renunciar a les típiques fórmules de pradenques a base de llavor comercial d'espècies domesticades destinades a la revegetació d'espais degradats en altitud (en general, pistes d'esquí), a la utilització de fertilitzants de síntesi, i als fixadors de llavor. Quant a la llavor, ens vam arriscar amb el monoconreu de gèspit (*Festuca eskia*), ja que és la planta més

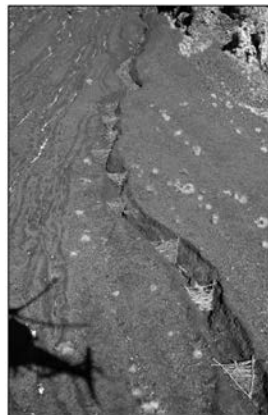


Foto 5. Microdics de ramatge per a la contenció de laves torrencials

predominant a les pastures del voltant de la zona que calia estabilitzar, i pràcticament l'única que colonitza amb elevat recobriment els sòls més pobres i amb més pendent (observada en configuració esglaonada en vessants de fins a 34°). A més a més, es tracta d'una planta rústica, poc apreciada pel bestiar, de reproducció vegetativa predominant, i molt ben adaptada al rigor del clima de l'alta muntanya. De fet, es tracta d'un endemisme pirinenc. Tenint en compte la inexistència de llavor comercial d'aquesta espècie, durant el mes d'agost es recull manualment llavor local de gèspit. També hem assajat la recollida mecanitzada, però amb resultats controvertits per causa de la gran quantitat d'impropis que cal separar a posteriori, fet que rebaixa el rendiment inicial de la recollida mecanitzada. Després de la collita cal procedir a l'assecat i la purificació de la llavor. La sembra es fa manualment a final del mes d'octubre, just abans de les primeres nevades. Per poder cobrir més superfície, es fan franges de sembra d'un metre d'amplada cada dos metres (metre sembrat - metre erm), i les llavors, si l'indret no és gaire ventós, es poden cobrir amb jaç protector (*mulch*) de palla per protegir-les de l'erosió hídrica i eòlica, del fred durant la germinació i, sobretot, de la dessecació del sòl durant les sequeres de l'estiu. No obstant això, en les zones molt ventades també és possible efectuar una sembra directa amb aplicació de *mulch* de la mateixa grava superficial que obtenim per rasclejat previ, sembra, i rasclejat en contra direcció per colgar lleument la llavor.

RESULTATS: s'observa una gran taxa de germinació en condicions de camp de les llavors de gèspit (fins a un 20%) i de supervivència de les plàntules (fins a un 50% després de l'estiu), però és molt variable en funció del tipus de sòl, orientació i climatologia de l'any en qüestió. És fonamental fertilitzar durant els primers 3 a 5 anys postsembra per pilotar el desenvolupament inicial fins que el sistema radicular estigui prou desenvolupat. Ens ha donat molt bons resultats l'aportació del fem d'ovella previ a la sembra per apletat del ramat. Uns resultats molt bons per a una revegetació amb llavors d'una planta autòctona, no domesticada, i a una altitud d'entre 2.300 i 2.600 m. En aquest sentit, val a dir que el fem d'ovella, amb les dosis aplicades per apletat del ramat, aporta nutrients fins al tercer any, i després cal continuar fent-ne el seguiment per si cal complementar amb fertilització. En alguns casos, quan la meteorologia acompanya, els resultats són

espectaculars, de manera que a finals del segon cicle vegetatiu s'aconsegueix un aspecte "assimilable" a les pastures de gésper de l'entorn, amb les primeres mates espigades, tancant ja el cicle vegetatiu amb la ressembrança natural. És un resultat francament inesperat pels tècnics d'aquest projecte de restauració ambiental, i sense parangó amb els resultats obtinguts a la parcel·la sense bogar.

Va ser tal l'èxit obtingut (vegeu la foto 6), que els tècnics del projecte Montclima es van fixar en la publicació a la revista del CENMA (Deu et al., 2018), i possiblement també en algunes ponències que havíem fet al respecte els autors Benjamin Komac i Jordi Deu, i van contractar a Silvagrina, SL la redacció d'una guia metodològica per al control de l'erosió en alta muntanya (Deu, 2022), en què vam aprofundir en la descripció tècnica dels treballs efectuats, quantificant els costos econòmics de les diferents tècniques innovadores de control de l'erosió emprades, perquè, com a avantprojecte, puguin ser utilitzades per d'altres enginyers especialitzats en restauració ambiental.

En aquest sentit cal destacar que vam desenvolupar un nou mètode de sembra raonada a partir de plantes/m², que hem anomenat Mètode Claror (Deu, 2022, p. 35-51), i que permet optimitzar el procediment de revegetació aplicat a zones inaccessibles amb maquinària emprant un helicòpter per transportar la palla, el personal, els materials, i realitzant la sembra manualment, inclosos els treballs d'ovinoremeiació (apletat i regularització del terreny), a un preu de cost total de 2,5 €/m² (any 2016). Aquest preu resulta competitiu, comparat amb els preus del mercat d'hidrosembra comercial, amb la diferència fonamental que amb el Mètode Claror se sembra l'espècie corresponent a la vegetació clímax, amb llavor local. No hi ha comparació possible amb les hidrosombres convencionals des del punt de vista ambiental. A més, les anàlisis de sòl ens han revelat que aquesta espècie pot fixar unes 460 t CO₂eq/ha, fet que podria comportar per a aquests projectes de restauració la possibilitat d'autofinançament parcial mitjançant crèdits de carboni (uns 2 €/m²).

2.1.4. Prova en blanc

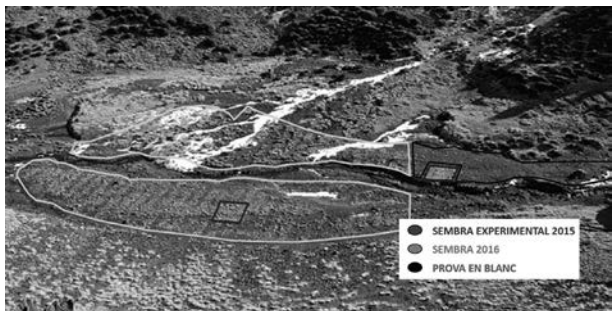
OBJECTIU: atès el caràcter netament experimental dels treballs de revegetació duts a terme, la majoria dels quals no compten amb experiències prèvies conegudes, ni referències bibliogràfiques, es va considerar oportú, a efectes de poder

contrastar resultats i obtenir aprenentatge, reservar una zona de prova en blanc, afectada per la torrentada del 2015, on no es va apletar ni sembrar.

PROCEDIMENT: la zona escollida per a la prova en blanc se situa a l'inici del primer con de dejecció que travessa el riu de Claror, de dimensions aproximades 35 m x 25 m (vegeu la foto 6).

RESULTATS: a efectes pràctics, aquesta zona es pot considerar nua de vegetació. El recobriment de la superfície destinada a la prova en blanc set anys després d'haver fet les sembres a la resta del terreny era encara inferior al 5%; per tant, no tenia capacitat de control de l'erosió.

Foto 6. Resultat de la revegetació al con de dejecció (comparar-lo amb l'estat inicial, foto 3). Cal fixar-se en les bandes de sembra (metre sembrat, metre erm), que estaven amb un recobriment de gèspit del 70% a la zona sembrada, i del 20% a la zona no sembrada cinc anys després de la sembra, sense haver-hi fet cap manteniment posterior. La parcel·la deixada com a prova en blanc continuava erma set anys després de la catàstrofe



2.2. Metodologia per a la generació i l'aplicació pràctica de l'hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava infiltrada, en condicions de manca de pluja i de fosa de neu

Amb algunes excepcions puntuals, o potser no tant, ja han passat a la història les corporacions i les mútues privades que subministraven aigua potable sense comptadors ni a les captacions, ni a la sortida de dipòsits, ni tampoc als abonats, ja que per facturar els consums usaven el sistema arcaic de les plomes d'aigua, consistent en un fort constrenyiment en forma d'orifici de petit diàmetre a l'escomesa que alimenta l'edifici de l'abonat, que genera unes grans pèrdues de càrrega i que limita el cabal màxim que es pot servir. Era una època en què no importaven el malbaratament i les fuites a la xarxa, perquè la disponibilitat del recurs era tan evident que no era necessària una gestió tècnica acurada.

Amb vistes a un futur, per qüestions de canvi climàtic, i sovint també per l'increment de la demanda d'aigua potable a causa

del creixement poblacional, la gestió de l'aspecte quantitatiu del recurs hídic haurà de ser més acurada per poder fer front als riscos d'escassetat, que cada cop són més evidents.

Efectivament, per al cas andorrà, l'anàlisi de l'històric de les dades de precipitació a les estacions meteorològiques més antigues del país, propietat de FEDA (Encamp, Engolasters i Ransol), amb 88 anys de registres (des de 1935 fins l'any 2023), ens mostra un descens preocupant de les precipitacions a partir del canvi de segle, i aquesta reducció de les precipitacions és especialment notable a l'estació de Ransol (la que té més altitud). Mitjançant una anàlisi de regressió polinòmica, en aquesta estació es constata que les precipitacions anuals mitjanes estimades s'han reduït en un preocupant 37%, ja que han passat de ser de 1.128 mm en el màxim del període a la dècada dels anys 1970, a ser de 709 mm de mitjana en els darrers 5 anys (vegeu la figura 1). La tendència a les estacions d'Engolasters i d'Encamp és similar, si bé a Encamp el descens de precipitació no és tan acusat. Cal depurar dades i aprofundir en l'estudi amb indicadors de secada, però hi ha una tendència preocupant sobre la qual caldria centrar l'atenció i desenvolupar amb urgència mesures preventives.

Per mitigar els efectes lligats a la manca de recurs hídic, Silvagrina disposa d'una metodologia pròpia per a la

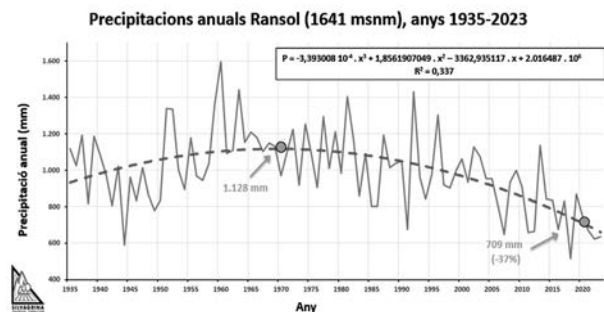


Figura 1. Precipitacions de l'estació de Ransol (FEDA). Anàlisi tendencial per regressió polinòmica

modelització del comportament dels aqüífers de vessant. Es tracta d'un mètode sobre com evoluciona el cabal de fonts i captacions superficials que creiem que podria ser de molta utilitat per als organismes amb competències en la gestió de l'aigua dins la conca hidrogràfica, per a una gestió acurada del recurs, i també per a la planificació urbanística.

A l'empresa hem dut a terme aforaments de cabal de captacions d'aigua per a diversos clients durant força anys, de manera que, treballant les dades dels hidrogrames resultants d'aquests aforaments (vegeu les figures 4 i 5), vam aconseguir trobar una estratègia de realització de la sistemàtica d'aforaments, així com de resolució gràfica i analítica, que ens permet modelitzar l'hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava⁴ infiltrada en condicions de manca d'aportacions hídriques (secada provocada per absència de precipitacions líquides o de fosa de neu). En alguns casos dels estudis que hem efectuat es poden fer prediccions de fins a més de 300 dies vista des del cabal màxim registrat a posteriori de període humit, és a dir, de precipitacions abundants i continuades que recarreguen l'aquífer, o post fosa de neu equivalent (vegeu la figura 4).

Es tracta d'una modelització empírica del comportament hidrològic de cada captació que, en conseqüència, permet fer previsions de manca de recurs hídric, i alhora ajustar les potencialitats de suportar població amb garanties de subministrament, i per tant cercar recursos hídrics addicionals, o bé ajustar el sostre poblacional en condicions de sostenibilitat. Per desgràcia, massa sovint el sostre poblacional en relació amb el recurs hídric és totalment mancat de realisme i base tècnica.

Ho plantejem com una eina de gestió que es pot implementar amb certa facilitat si es disposa de dades d'aforaments de les captacions.

2.2.1. Aplicació pràctica de la metodologia. Etapes

2.2.1.1. Condicionament de la captació

Si no està condicionada, cal preparar la captació per poder fer aforaments sistemàtics al llarg de l'any. Aquests aforaments es farien segons les regles de l'art de la hidràulica de canals oberts, és a dir, en règim de làmina lliure. En el disseny de l'aforador (punt de mesura de cabal) caldrà analitzar la metodologia d'aforament més apropiada segons el cas, d'entre les diverses tècniques i estratègies disponibles, tenint en compte que la precisió ha de ser elevada per a cabals baixos, i que pot ser més laxa per a cabals elevats, propis de moments amb excedents i menys limitatius en la gestió del recurs.

2.2.1.2. Realització d'aforaments

Un cop condicionada la captació, es fan els aforaments

4- L'aigua blava es correspon amb la que procedeix de la pluja, de la fusió de la neu o del desgel i que s'escorre superficialment fins a rius, llacs i embassaments, o que s'infiltra en el subsòl fins als aquífers, i que finalment acaba brollant per les fonts que alimenten el riu.

sistemàtics del cabal total que aporta el recurs, ja sigui d'una font o bé d'un curs d'aigua superficial com un riu. El tècnic responsable dels aforaments ha de vetllar perquè es facin en moments específics en què no hi hagi escolament superficial dins de la conca, o en què sigui insignificant; altrament, les dades no serien vàlides per a l'aplicació d'aquesta metodologia. Per tant, a l'hora de mesurar cabals, cal esperar un temps prudencial després de les pluges o dels períodes amb fosa de neu; típicament entre mig dia i un dia un cop finalitzat l'escolament superficial, després d'un episodi de pluja i/o desgel.

Si per qualsevol motiu se sospita que hi pot haver escolament superficial, s'ha d'anotar en la llibreta de camp, atès que això facilitarà la interpretació dels resultats obtinguts a l'hora d'usar-los en la modelització. Quan les precipitacions són aïllades i poc rellevants (típicament, de menys de 15 mm), especialment a l'estiu (en moments amb forta evapotranspiració i sòl sec), i no es preveu escolament superficial ni infiltració profunda, llavors no cal fer l'aforament, ja que la precipitació únicament produeix aigua "verda", que és evapotranspirada per la coberta vegetal (vegeu la figura 2). Per aquests motius, els tècnics responsables de les lectures han de disposar d'un mínim de coneixements en hidrologia per poder decidir els moments idonis per mesurar cabals. Segons la nostra experiència al Pirineu, cal comptar com a terme mitjà amb la realització d'uns 18 aforaments anuals, tot

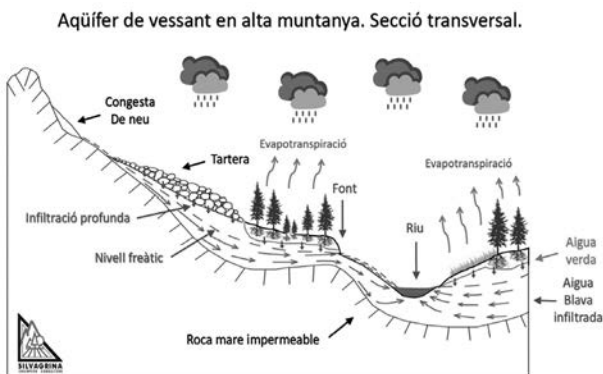


Figura 2. Esquema simplificat del funcionament d'un aqüífer de vessant en alta muntanya, per a la producció d'aigua blava infiltrada, que és la que estima el model de l'hidrogràfic sintètic de recés proposat

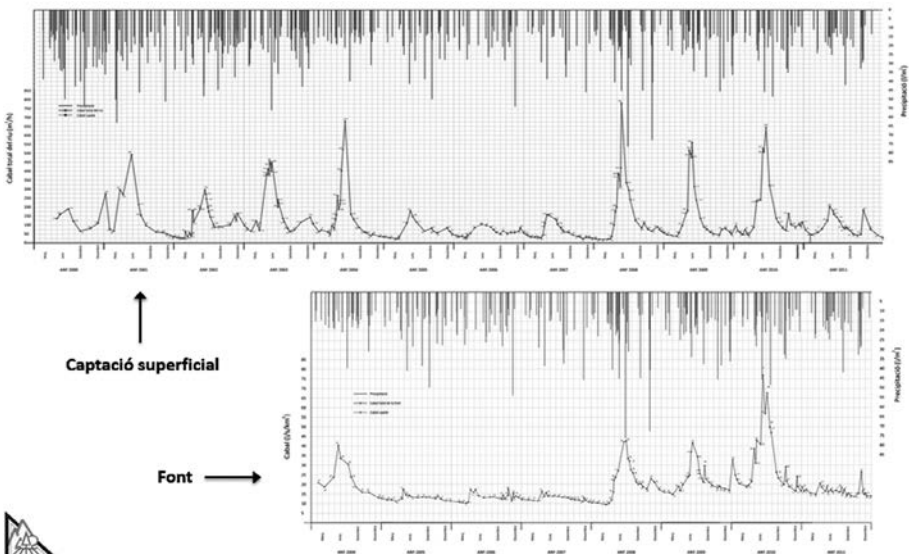
i que alguns anys en cal fer 24, i d'altres, amb 12 n'hi hauria prou. En períodes sense pluges i amb gelades, es recomana fer lectures de cabals de com a mínim una al mes, però si hi ha disponibilitat i se'n fan cada 15 dies, millor. Cal remarcar que la mesura de cabals també és imprescindible per a la gestió de la metodologia proposada, atès que, després dels períodes humits amb increment de cabal, cal fer un aforament per poder actualitzar les dades de cabal i relançar l'hidrograma sintètic de recés de l'aigua blava infiltrada.

2.2.1.3. Representació gràfica dels aforaments

Un cop es disposa de prou dades, es representen gràficament en doble eix d'ordenades els aforaments efectuats (hidrograma) i les precipitacions ocorregudes (hietograma) durant el mateix període a l'estació més propera o representativa (vegeu la figura 3). És a partir d'aquestes dades que es podrà abordar l'obtenció de l'hidrograma sintètic de recés per produir aigua blava infiltrada del punt de captació en qüestió.

2.2.1.4. Obtenció de l'hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava infiltrada

Figura 3. Hidrograma i hietograma d'exemple de dues captacions de comportament molt diferent. Davant les mateixes precipitacions, es constata que la captació superficial registra puntes de cabal més elevades, i descensos més acusats respecte de una captació de font. Es pot doncs esperar diferències importants en cabals segons el tipus d'aqüífer i les característiques de la conca



Un cop es disposa de l'hidrograma i el hietograma (vegeu la figura 3), es fa un tractament de les dades amb mètodes de resolució gràfica que es complementen amb tractaments estadístics i ajustaments matemàtics, per generar l'hidrograma sintètic de recés⁵ per obtenir aigua blava infiltrada, en condicions d'absència d'aportacions hidriques a l'aquífer, i aconseguir la corba d'ajustament per regressió i l'equació que modelitza el comportament mitjà del cabal que podem esperar en un futur en situacions hipotètiques pessimistes, és a dir, en condicions de secada (vegeu la figura 4).

Per als casos que hem treballat amb prou quantitat de dades, l'R2 de l'equació de regressió s'ajusta a valors superiors al

5- L'hidrograma el sintetitzem emprant únicament els registres obtinguts en condicions de secada; per tant, el cabal sempre és decreixent, d'aquí el nom d'hidrograma sintètic de recés.

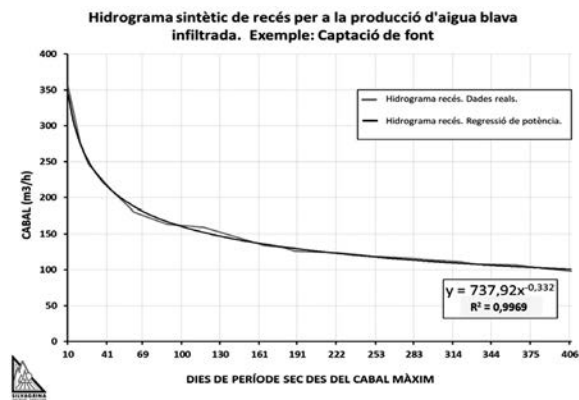


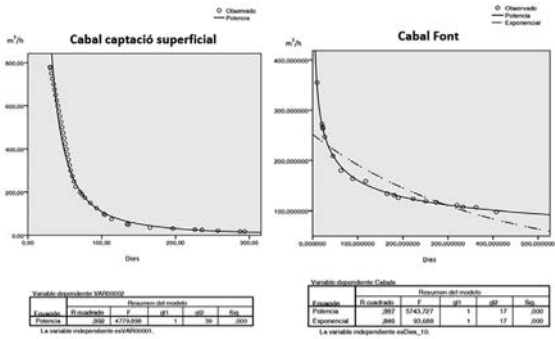
Figura 4. Exemple d'hidrograma sintètic de recés. Cal destacar la bondat de l'ajustament entre dades reals i la regressió

99% de la variabilitat observada que és explicada pel model. Cal tenir en consideració que, des del punt de vista de l'enginyeria, molt sovint se sol considerar satisfactòria l'obtenció de valors de R²>70%.

Com a exemple dels resultats finals del tractament de dades, presentem dos gràfics en format esborrany, obtinguts amb un programa de tractament estadístic (vegeu la figura 5).

Cal destacar les grans diferències que s'aprecien tant a la banda alta com a la banda baixa de cabals, segons el tipus

Figura 5. Comparació entre hidrogrames sintètics de recés d'una font i d'una captació superficial. Al gràfic de la font hi hem afegit la corba de la regressió exponencial, que és la que usen altres investigadors considerant la producció d'aigua blava, inclòs l'escolament superficial, a diferència de nosaltres, que l'eliminem de l'equació



d'aquífer que es tracti, molt diferents en aquest exemple entre una font i un curs superficial, però en què també influeix molt el tipus de conca hidrològica d'acord amb la seva altitud, orientació, tipus de sòl, geomorfologia, vegetació, etc. Per aquest motiu, és molt important disposar de dades empíriques que puguin validar els resultats de la modelització. Una altra observació pertinent que cal tenir en compte és el fet que el gràfic que s'obté (vegeu les figures 4 i 5) és una entelèquia, ja que no es reproduirà mai en la realitat en la seva totalitat, ja que, com és lògic, poc o molt, sempre hi haurà aportacions a l'aquífer que en faran créixer el cabal. Únicament té interès a efectes de gestió abstracta del recurs hídric, perquè ens prediu el pitjor dels escenaris possibles a llarg termini.

2.2.1.5. Calibratge i validació continuada

Val a dir que el procediment de modelització es compon de dos etapes temporals, la de calibratge del model i la de validació. Un cop es disposa de prou dades, es fa el calibratge del model i, amb aquesta corba, vistos els valors d' R^2 que s'obtenen, ja es pot treballar amb una confiança considerable. Per millorar l'ajust del model es recomana anar fent una validació continuada durant diversos anys, especialment durant els moments de secada, però sobretot per verificar la variància. Amb un banc de dades més gran, es pot treballar la resolució analítica (que ja hem assajat amb resultat satisfactori), obtenint a més una corba envoltant als valors mitjans de valors factibles.

S'aprofitaran les dades dels aforaments que cal anar fent durant els anys posteriors a la implementació de la metodologia, perquè millori així la fiabilitat i l'abast de les prediccions.

2.2.1.6. Aplicació pràctica del model

Un cop es disposa de l'equació definitiva de cada captació que alimenta la xarxa d'aigua, cal tenir en consideració que, per qüestions hidrològiques, aquests gràfics són sumatius i, per tant, es pot saber el recurs hídric total de què es disposarà en un termini determinat senzillament sumant els valors obtinguts als gràfics de les diferents captacions que alimenten la mateixa xarxa. Així doncs, aplicant aquesta metodologia a conques petites, atès que els gràfics són sumatius, també es pot modelitzar una conca més gran en direcció aigües avall. Tanmateix, cal fer un aclariment: els pous no es poden modelitzar amb aquesta metodologia; cal fer assajos de

bombeig, o bé obtenir la potencialitat de bombeig segons l'alçària del nivell freàtic, a partir de la informació empírica equivalent que tingui el gestor del pou. Un cop es disposi d'aquesta informació, també es pot incorporar el cabal aportat pel pou sumativament al mètode general a què ens referim (vegeu la figura 6).

Mitjançant la consideració dels dos paràgrafs anteriors, es genera la corba de l'oferta en condicions de secada del recurs hídric mínimament disponible. Confrontant aquesta oferta amb la corba de la demanda (de la qual el gestor hauria de disposar), obtenim la data en l'horitzó en què si l'aqüífer no es recupera amb noves aportacions hídriques, llavors s'han de començar a aplicar restriccions.

L'aplicació pràctica de la metodologia, un cop es disposa de la modelització de cada captació i de la corba de la demanda, consisteix a generar l'algorisme corresponent i preparar un programa informàtic. Es pot començar amb un full de càlcul de tipus Excel, i més endavant millorar-lo preparant un programari (*software*) específic que pugui complementar la presentació en pantalla al panell de control del qual se suposa que disposarà la gestora de conca.

Un cop obtinguda l'equació de regressió bijectiva del tipus $f(t)=Q$ (vegeu la figura 4), es calcula la funció inversa del tipus $f^{-1}(Q)=t$, que és la que s'utilitzarà amb la metodologia proposada per calcular a partir d'un aforament concret de valor Q el valor del dia (t), expressat en termes relatius dins la corba.

Posteriorment es reprèn la primera funció per generar les parelles de valors de dia-cabal, i establint un calendari obtenim les parelles de valors data-cabal fins a la fi del domini empíric de la funció, entre 300 i 400 dies des de l'origen de coordenades (vegeu les figures 4 i 5). Val a dir, però, que, si és necessari, el bon ajust de la regressió ens permet anar fins i tot més enllà del domini empíric de dades disponibles contrastades amb força confiança.

Periòdicament, especialment després de les temporades amb precipitacions abundants o fosa de neu que hagin pogut recarregar l'aqüífer, cal fer un nou aforament de les captacions per actualitzar les previsions, posant al dia el sistema, de manera que entrant les dades de cabal recents es tornaria a generar l'escenari futur més desfavorable, amb dates concretes i cabals mínims esperables, amb els que cal comptar en l'horitzó pessimista de gestió (vegeu la figura 6).

Efectivament, casant aquestes dades amb les de la corba de la demanda (consums de la xarxa d'aigua, variable segons època de l'any), es pot saber com de lluny es troba la fatídica data en què començarà a faltar aigua a la població si no hi ha recàrrega, i així poder anticipar-se amb molta antelació i planificar les decisions de gestió a curt i mitjà terminis més escaients, com ara:

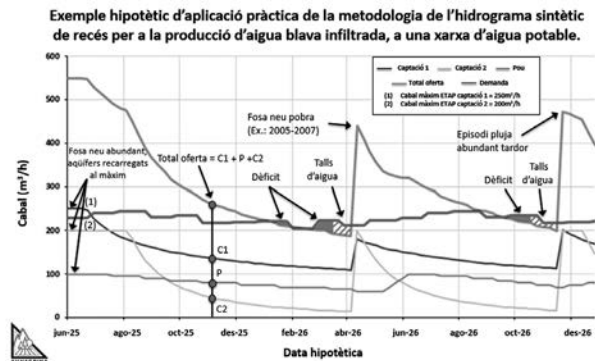
Reducció de la demanda:

- Campanyes de sensibilització enfocades a l'estalvi d'aigua.
- Increment tarifari segons els diferents usos de l'aigua.
- Campanya de detecció de fuites i millora de l'eficiència de la xarxa.
- Imposició de restriccions en determinats usos o activitats.
- Talls programats en el subministrament per sectors, si cal.

Increment de l'oferta:

- Aportació d'aigua amb cisternes des d'altres conques.
- Activació de captacions existents en desús, de pitjor qualitat.

Figura 6. Exemple hipotètic d'aplicació pràctica de la metodologia a una xarxa d'aigua potable. Per obtenir el moment a partir del qual cal aplicar restriccions en el subministrament mitjançant talls d'aigua als abonats, s'ha considerat un volum de la reserva als dipòsits equivalent al consum mitjà de la xarxa en 24 h



2.2.2. Beneficis addicionals de la metodologia

- Aquesta metodologia podria servir per fixar i gestionar el cabal ecològic que cal respectar pel que fa a la captació.
- Permet simular els cabals esperables als rius en condicions de manca d'aportacions hidriques de conques regulades amb preses, com si no existissin, en el seu estat natural. És d'interès per simular potencials ecològics de fauna i flora de ribera, entre altres.
- La modelització també pot ser de molta utilitat quan s'han de fer obres de reparacions, millora o manteniment en alguna

captació o ETAP⁶ associada, que per les característiques dels treballs s'hagi de deixar fora de servei, i sigui necessari saber quant de temps pot deixar-se la xarxa d'aigua potable sense aquest recurs, i alimentar-la amb les captacions restants aprofitant moments amb excedents d'aigua, a fi de planificar les actuacions, i, si fos el cas, fixar el termini màxim que cal indicar en la licitació de les obres, per tal que no es pugui posar en risc el subministrament.

- Una altra de les utilitats de la modelització, potser la més important, és que permet avaluar amb coneixement de causa la necessitat de buscar nous recursos, d'acord amb el creixement poblacional de determinats indrets o noves demandes que calgui atendre. Ens permetrà, doncs, determinar la capacitat de càrrega màxima de la població, i fixar el límit poblacional sostenible, amb un nivell controlat i acceptable dels riscos assumibles tenint en compte els recursos hídrics disponibles. El límit poblacional sostenible es podria fixar d'acord amb els criteris de període de retorn, procedint similarment a com es fa en urbanisme amb la hidrologia torrencial.

- La metodologia, en millorar el coneixement dels cabals disponibles en un futur, incorpora una dosi de diligència en la gestió que permet optimitzar la monetització del turbinatge en centrals hidroelèctriques, i també l'emissió de GEH.⁷

- En cas que arribi un període de secada extrem, en què la zona servida es quedi sense prou aigua potable i s'hagin de fer talls en el subministrament als abonats, llavors, des del punt de vista de la comunicació, el titular del servei podrà argumentar davant dels usuaris que s'ha gestionat el recurs amb una metodologia avançada i validada científicament,⁸ deixant clar que no s'ha improvisat prenent decisions intuïtives, tal com succeeix en l'actualitat. Aquests arguments tenen importants conseqüències des del punt de vista jurídic per poder capejar, o directament aturar, les demandes judicials de responsabilitat civil contra l'oficina de gestió del recurs, així com contra els tècnics responsables de la gestió. Això també pot limitar les conseqüències polítiques, si es pot argumentar davant d'una catàstrofe natural de secada extrema que s'ha actuat amb diligència.

- Mitjançant aquesta manera de procedir hi podria haver una millora de la comunicació amb els usuaris i, en conseqüència, un augment de la confiança en la gestió.

6- ETAP: Estació de tractament d'aigua potable.

7- GEH: Gasos d'efecte hivernacle.

8- Estem treballant en la preparació d'un article científic de revisió per parells per a una revista especialitzada en hidrologia conjuntament amb l'UDL.

2.2.3. Aplicació del model sense disposar de dades històriques d'aforaments

En el supòsit que no es disposi de les dades d'aforaments de les captacions per iniciar la modelització, llavors caldrà dur a terme una campanya d'aforaments fins que es disposi d'un banc de dades suficient que permeti encetar la modelització de cada captació. Tenint en compte que el model que proposem emprar és de base empírica, la durada de la realització d'aforaments per poder efectuar la modelització i la validació posterior no es pot determinar a priori, atès que dependrà de la fortuna que es tingui amb la coincidència de la realització dels aforaments de les captacions durant períodes de forta secada. En una primera aproximació, cal comptar que, pel cap baix, caldrà disposar almenys d'uns 3-5 anys de dades per començar a tenir informació suficient sobre com es comporta l'aqüífer de vessant, per poder configurar l'hidrograma de recés amb prou fiabilitat com per poder començar a usar-lo en la gestió.

No obstant el que s'ha esmentat, Silvagrina disposa d'una base de dades confidencial de diverses fonts i cursos d'aigua superficials aforats en bona part del territori andorrà en moments de secada intensa durant un dels períodes més secs dels darrers 88 anys, és a dir, entre 2004 i 2008 (vegeu la figura 1). Aquestes dades, mitjançant l'aplicació de la tècnica dels escenaris comparats, poden servir per començar a generar un hidrograma sintètic de recés orientatiu, un cop es disposi d'un mínim de punts de l'hidrograma per a la captació que permetin marcar tendències amb un mínim de fiabilitat. Alguns aforaments s'haurien de fer simultàniament també a la conca de referència assimilable escollida per similituds de la qual es coneix l'hidrograma o els cabals crítics, per poder fer ajustaments per comparació.

Complementàriament, val a dir que el bon ajustament de la regressió (vegeu les figures 4 i 5) facilita molt el procés d'inferència amb poques dades, sempre que estiguin prou separades entre si. Cal fer notar que precisament la part més interessant de l'hidrograma sintètic és la que representa els cabals baixos, a partir del moment en què tenim en general més de 200 dies de secada acumulada, i en aquest tram de la corba, el comportament és gairebé rectilini, fet que en facilitaria l'extrapolació.

D'entre les dades de què disposa Silvagrina, caldrà veure quines es poden adaptar millor segons condicions assimilables de la conca hidrològica: superfície, pendent mitjà,

orientació, altitud, tipus de sòls, coberta vegetal, geomorfologia, etc. La gràfica s'aniria millorant progressivament a mesura que es vagi disposant de més aforaments reals. D'aquesta manera, el gestor del servei d'aigua podria disposar en pocs anys d'una gràfica provisional, que podria ser de gran ajuda per anticipar la gestió del recurs amb molt de temps abans que hi hagi algun episodi de secada especialment complicat, el qual, paradoxalment, serviria per millorar el model per al futur, ja que permetria allargar la representació real de l'hidrograma a un termini predictiu més gran.

2.2.4. Limitacions de la metodologia

- El model únicament estima l'aigua blava infiltrada que drenarà per la conca. Som incapaços d'estimar l'increment de cabal per recàrrega de l'aqüífer amb pluja o fosa de neu amb un mínim de precisió comptant únicament amb dades de temperatura (màxima i mínima) i pluviometria acumulada en 24 h. Cal fer aforaments.
- A principis d'hivern, si arriba un període amb fortes glaçades, sense que la neu hagi recobert els cursos superficials d'aigua (els protegeix davant el glaç), s'arriben a formar cordons de gel a l'interior i al voltant dels torrents, que retenen una part important del cabal drenat. En aquestes condicions, el model sobreestima el cabal fins que el curs superficial d'aigua no es recobreix amb neu.
- Pronostiquem possibles limitacions d'aplicació en zones amb glaceres, per alliberament brusc d'acumulacions d'aigua internes, i també en massissos càrstics per eventuais fenòmens de sifonat.
- L'anisotropia de les precipitacions sobre el territori fa que la metodologia s'hagi d'aplicar a conques relativament petites. Per a una conca gran, si no es vol perdre precisió, cal fer el sumatori de les subconques que la componen.
- Variacions importants en els usos del sòl de la conca de recepció que afectin la infiltració relativa entre zones o la recàrrega de l'aqüífer poden fer que s'hagi de recalibrar l'hidrograma de recés.
- Obtenim l'hidrograma de recés a partir dels valors mitjans dels períodes de secada analitzats, amb regressions molt vàlides. No obstant això, en determinats trams de l'hidrograma s'observen desviacions que caldria tenir en consideració marcant una envoltant.

- Aquesta metodologia és encara incipient; ha funcionat molt bé en els pocs casos en què l'hem aplicat al Pirineu andorrà en conques petites. Caldria, però, assajar-la en més casos, i aplicar-la en d'altres condicions a més baixa altitud, on la innivació sigui menys rellevant.

3. Conclusions

Els treballs d'ovinoremeiació aplicats en les mesures correctores a la conca de Claror han donat resultats molt satisfactoris, en harmonia amb el medi ambient, i demostren les potencialitats d'integrar l'activitat pastoral per aconseguir sinergies amb les necessitats de qualitat ambiental que la societat actual demana. Efectivament, la compactació i la suavització dels xaragalls no hauria estat possible d'abordar amb maquinària o manualment amb operaris en condicions de seguretat (vegeu les fotos 1 i 2). Cal destacar també el fet que la revegetació amb gèspit sobre sòl estèril prèviament bogat amb el ramat per apletat ha estat realment espectacular si el comparem amb la prova en blanc (vegeu la foto 6).

Quant als microdics de ramatge col·locats dins dels xaragalls, de moment es comprova que els han estabilitzat i que ja han retingut laves torrencials de certa consideració, sense crear interferències amb el bestiar.

Amb els diferents treballs de restauració ambiental –alguns d'ells pioners en el paper d'estabilització de terrenys malmesos per processos erosius intensos– duts a terme a la zona afectada per la torrentada, és important tenir en consideració que, segons la nostra experiència, són necessaris com a mínim de tres a cinc anys de seguiment postseembra, continuar amb l'aplicació de mesures correctores per completar i mantenir els microdics i, sobretot, per aconseguir fixar la vegetació fins al punt que el recobriment vegetal es pugui considerar reeixit i, en conseqüència, l'erosió estigui controlada als nivells d'abans de la torrentada, o que estigui fins i tot millor. Aquests treballs acceleraran força la fixació de gran part dels sediments més fins que causen gran terbolesa a l'aigua del riu de Claror i minimitzaran el risc de talls en el subministrament d'aigua a la població d'Escaldes-Engordany. Val a dir que, en aquest sentit, des del moment en què es van construir els microdics, i un cop germinat el gèspit sembrat, no hi ha hagut cap més tall en el subministrament d'aigua potable per terbolesa extrema a la parròquia d'Escaldes-Engordany, tot i que des del 2017 hi ha hagut diverses

tempestes a la zona, alguna de fins a 100 mm/24 h i amb un total acumulat de 200 mm en una setmana, com l'any 2023.

La revegetació de sòls degradats en altitud mitjançant la llavor local de *Festuca eskia* per aplicació del Mètode Claror és molt prometedora. Efectivament, a banda de controlar eficaçment l'erosió d'aquestes zones de sòls fràgils, altament erosionables, es fixen al sòl grans quantitats de carboni atmosfèric, amb un efecte embornal a llarg termini innegable, i a un cost econòmic baix, atès que el preu/m² d'aquestes sembres es troba al mateix nivell que les hidrosembres que es fan a les pistes d'esquí amb espècies comercials, no autòctones, que especialment a les zones de més altitud i amb sòls pobres no acaben de reeixir, i deixen amb el pas dels anys el sòl desprotegit i gairebé sense haver fixat carboni en el sòl. Entenem que, essent una metodologia pionera a escala internacional i d'origen andorrà, el Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra hauria de valorar aquests recursos per, si escau, fomentar la utilització del Mètode Claror intervenint-hi normativament, de manera que els treballs de revegetació que es fan als camps de neu, abocadors i talussos de carreteres, especialment a les parts altes i en les zones més erosionables, es facin aplicant el mètode Claror. Cal tenir en consideració que els resultats d'aquesta restauració ens avalen, ja que han estat valorats com de gran utilitat per part d'experts de la UE, atès que mitjançant el programa de recerca Montclima es va contractar a Silvagrina la redacció d'una guia metodològica per al control de l'erosió en alta muntanya (Deu, 2022), document que neix amb la vocació de servir com a referència a la zona Sudoe (sud-oest d'Europa) per a la restauració en altitud de sòls malmesos per fenòmens erosius intensos.

La gestió quantitativa del recurs hídic, per causa de l'increment dels períodes de secada extrema motivats pel canvi climàtic, s'enfronta a un gran repte de sostenibilitat. Pel que fa al cas andorrà, la reducció del 37% de la precipitació mitjana anual respecte de la que teníem als anys 70 (vegeu la figura 1) és un avís seriós, contundent i preocupant. El repte és encara més gran per a les poblacions que no disposen de preses reguladores, i que, per tant, han de ser gestionades d'acord amb la disponibilitat de cabal fluent del moment, com és el cas del subministrament d'aigua potable a Andorra.

Preocupada pel desafiament que suposa aquest perillós escenari de futur per a la nostra societat, Silvagrina ha

Referències

- LÓPEZ CÁRDENAS DE LLANO, F. [et al.] (1998). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Ed. Tragsa, Tragsatec, Ministerio de Medio Ambiente, Ediciones Mundi-Prensa, 945 p.
- COHEN-SHACHAM, E., WALTERS, G., JANZEN, C., & MAGINNIS, S. (eds.). (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN International Union for Conservation of Nature.
- DEU, J., DOMINGO, D., KOMAC, B., & ROQUET, M. (2018). Restauració ambiental a la conca del riu de Claror. *Revista del CENMA*, (9), 40-51.
<https://www.iea.ad/images/CENMA/revista/09/11.pdf>
- DEU J. (2022). *Guía de actuación. Mitigación del impacto del cambio climático en alta montaña Pirenaica: Control de la erosión hídrica mediante soluciones basadas en la naturaleza*. Proyecto INTERREG-SUDOE-MONTCLIMA. NEIKER | Guías Montclima - Control erosión 1.0.indd
<https://www.montclima.eu/en/file/381>
https://www.montclima.eu/sites/default/files/info_material/docs/guias_montclima_control_erosion_es_br.pdf

desenvolupat una metodologia pròpia, de base empírica, amb poques limitacions d'aplicació pràctica, que permet una gestió proactiva del recurs hídic a partir de modelitzar en condicions de secada el comportament dels aqüífers lliures de vessant, com ara els que alimenten majoritàriament les captacions d'aigua potable del Pirineu.

Concretament, es planteja la generació de l'hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava infiltrada en condicions de manca d'aportacions hídriques significatives a l'aqüífer, de manera que per aplicació d'aquesta metodologia d'elevada precisió predictiva (vegeu la figura 4) es posa en relleu la pitjor de les hipòtesis de disponibilitat del recurs, i s'ofereixen previsions de cabal d'entre 300 a 400 dies vista des del màxim. Aquests valors de disponibilitat del recurs hídic es confronten mitjançant l'aplicació d'un programa informàtic amb la corba de la demanda per trobar la data a partir de la qual, si no hi ha recàrrega de l'aqüífer, caldrà aplicar racionaments d'aigua (vegeu la figura 6). Aquest fet suposa importants implicacions pràctiques en una gestió diligent del recurs que anticipa la cerca de solucions davant la manca d'aigua que el model albira en l'horitzó.

Conèixer el comportament de l'hidrograma de recés comporta utilitats addicionals, d'entre les quals potser la més destacable sigui el fet que permet determinar el límit poblacional sostenible a partir de criteris de període de retorn, similarmet a com es fa en urbanisme amb la hidrologia torrencial.

La natura, per selecció natural, és resiliència en estat pur. Cercar solucions als problemes de l'home inspirant-nos en com la natura els ha afrontat (NBS) ens proporcionarà la resiliència necessària per adaptar-nos i superar els efectes adversos del canvi climàtic.



Valentí Turu i Michels

Doctor en Geologia per la Universitat de Barcelona i investigador principal de la Fundació Marcel Chevalier

En el decurs de la darrera glaciació, les valls d'Andorra, com la resta de les valls pirinenques, van ser ocupades per llengües de glaç amb naixement als circs glacials que voregen l'extrem nord i oriental del país. S'observen al paisatge nombrosos exemples de la seva pretèrita existència i acció erosiva, però també dipòsits sedimentaris associats a les darreres etapes de la glaciació. Cal destacar-ne tres en concret pel volum i qualitat, que són el fons de vall d'Andorra la Vella i Escaldes-Engordany, les valls de la Massana i Ordino i el complex morrènic d'Engolasters.

1. Les condicions subglacials

Moltes zones de muntanya foren recobertes per les glaceres durant el plistocè i amb el seu pes van consolidar els sediments que es trobaven sota el gel. Un cop desaparegudes les glaceres de les nostres valls, encara som capaços de recrear les condicions originals basant-nos en l'estat de consolidació dels sediments, que amb les evidències geomorfològiques permeten recrear quines foren les condicions subglacials de les nostres glaceres. Cal pensar que una glacera és un reservori d'aigua que pot anar canviant d'estat en funció dels canvis en el clima. L'aigua de fusió del glaç s'acumula en les esquerdes de les glaceres fins a assolir la zona basal a centenars de metres de la superfície. Les propietats de l'aigua permeten que pugui ser líquida si augmenta la pressió o, el que és el mateix, amb l'augment de la profunditat. Això últim fa que l'aigua de fusió pugui acumular-se al fons d'una glacera i trobar-se a importants pressions. En funció de com sigui d'important aquesta pressió, la base de la glacera forma cavitats on l'aigua s'acumula. Quan aquestes cavitats es comuniquen les unes amb les altres, generen una xarxa de canals subglacials que arriben a homogeneïtzar les pressions de l'aigua sota la glacera. Tard o d'hora les ramificacions es concentren en un únic túnel subglacial que assoleix el front de la glacera i desguassa l'aigua. El dinamisme de les glaceres de vall rau precisament en com d'eficient és la dissipació de la pressió de l'aigua subglacial. Si el sistema és eficient dissipant les pressions, hi haurà més fricció entre la base de la glacera i el substrat geològic, aquesta avançarà poc i erosionarà molt. Per contra, si el sistema és ineficient i la pressió s'acumula indefinidament, la glacera pot entrar en un estat de flotació i avançar sobtadament en no existir fricció subglacial. És el que en anglès s'anomena un *surging*



Valentí Turu i Michels

De les antigues glaceres als cicles P a Andorra

glacier. La glacera de la Valira d'Orient va experimentar diversos avenços sobtats de tipus *surge* al darrer cicle glacial, i això ho sabem pels múltiples estudis geològics-geotècnics fets al fons de vall d'Andorra la Vella i Escaldes-Engordany entre 1997 i 2018, quan s'implementa al país la tècnica de prospecció coneguda com a *sondeig pressiomètric*. Les dades sobre l'estat de consolidació dels sediments són el testimoni dels canvis de pressió subglacial que va experimentar la glacera d'Andorra iniciat fa uns 32.000 anys.

2. Les condicions subaèries

Un nombre important de valls tributàries al Pirineu van quedar negades d'aigua per obturació glacial del seu exutori natural. Això fou el que va experimentar la vall de la Valira del Nord per part de la glacera principal, la de la Valira d'Orient, per formar el que es coneix com l'antic llac d'obturació juxtaglacial de la Massana. Les vores d'aquest llac encara són reconeixibles en el paisatge; es corresponen amb els plans d'Escàs, el Pui i l'Aldosa de la Massana. El centre de la vall, on hi ha la vila de la Massana, es correspon amb el fons del llac. Aquí van ser dipositats gran quantitat de llims i argiles laminades juntament amb altres dipòsits glacials. Aigües amunt, aquest llac limitava amb el front glacial d'Arinsal, situat a Erts, així com el front de la glacera d'Ordino, situada a Santa Caterina. Com si d'un joc de pica paret es tractés, les dos glaceres avançaven sobre el llac fins a assolir la glacera principal per retirar-se ràpidament. Aquests ritmes d'avenç i retrocés de les glaceres eren producte de sobtats canvis globals que afectaven el clima al tram mitjà-final de la darrera glaciació. A cada retrocés glacial, una important quantitat de sediments eren dipositats al fons de vall, que eren parcialment erosionats al següent episodi d'avenç glacial. Atès que cada avenç de les glaceres era inferior al de l'anterior pulsació glacial, el còmput general va jugar a favor de l'acumulació sedimentària, essent els sediments més recents també els més abundants. Tot aquest procés d'acumulació sedimentària relacionada amb la presència directa dels fronts glacials a la Massana va quedar truncat ara fa 17.500 anys, quan la glacera de la Valira d'Orient va retrocedir definitivament. Com si es tractés d'un gran trencaclosques, el seguiment de les obres i les excavacions efectuades a la Massana i Ordino entre 1990 i 2015 han permès obtenir una visió de conjunt amb més de 275 perfils estratigràfics recolzats per anàlisis de laboratori atenent les necessitats d'altres objectius científics i tècnics. Aquest important nombre d'afloresaments directes, juntament amb el

tractament metodològic d'estudi basat en els principis de l'estratigrafia seqüencial, ens permet disposar d'un marc cronoestratigràfic i d'interpretació paleoambiental d'alta resolució de més de 15.000 anys de desglaciació.

3. Els efectes visibles avui

En el decurs de la darrera glaciació, una important generació de morrenes dibuixa els límits de la ocupació del glaç, sobretot als vessants obacs, essent els vessants solans menys propensos a la conservació, tot i que hi ha alguns exemples emblemàtics, com el de Montaup o Mereig a Canillo, que mereixen una atenció especial. Són la morrena de Grau Roig, que entapissa el vessant obac fins a Soldeu i el Tarter; la morrena de Sant Jaume dels Cortals, producte de la confluència de la glacera dels Cortals amb la dels Agols a Encamp; la morrena d'Engolasters, que es pot resseguir des de la confluència de la glacera de la Coma dels Llops amb la glacera principal (Valira d'Orient). Les morrenes de la Plana, així com la confluència de la glacera de Prat Primer a la Comella amb la glacera d'Andorra, són clars exemples de l'empremta glacial sobre el paisatge. Però de totes aquestes cal destacar la construcció morrènica d'Engolasters, que neix de la confluència entre la glacera del Madriu i la glacera principal. En aquest indret, l'acumulació de glaç fou de més de 500 metres i van ser formades diverses generacions de cordons morrènics. El més extern de tots és seguit pel camí dels matxos d'Engolasters a Ràmio, el cordó intermedi és sobre el que s'assenta l'antic conjunt de bordes d'Engolasters, al davant de l'església de Sant Miquel, i se segueix fins a solc de la Molina a Encamp, mentre que el cordó més intern i recent correspon al que allotja les antenes de Ràdio Andorra, i va facilitar la construcció de l'embassament d'Engolasters a la primera meitat del segle xx.

Com si es tractés d'un rellotge, la maquinària glacial va funcionar coordinadament al Principat tres cops abans dels seu esvaïment. Tres són els nivells de morrena de fons existents al subsol d'Andorra la Vella i Escaldes-Engordany. Tres són els cicles d'avenç més important de les glaceres d'Arinsal i d'Ordino sobre l'antic llac glacial de la Massana. Tres són les generacions de morrenes laterals que conformen Engolasters. Tres cops les glaceres del Principat van ballar al so del bateig climàtic, entre els 32.000 i els 17.500 anys, és a dir, un cop cada 4.800 anys. De forma més detallada s'ha determinat que la ciclicitat és de 4.500 ± 500 anys, que és la diferència entre el moment que més avancen les glaceres i el moment en el qual retrocedeixen ràpidament, coincidint amb una important aridesa. La pregunta

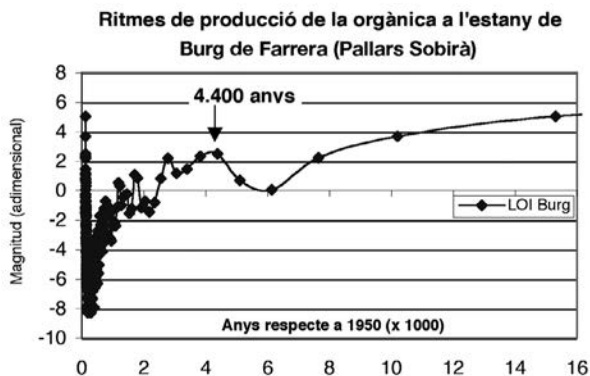
Bibliografia

TURU, V. 2023. Mid-Late Pleistocene glacial dynamics in the Valira valleys (Principality of Andorra). Asymmetries within the Pyrenees and correlation across the westernmost European mountain ranges. Phd Thesis Barcelona University, 550 p.
<https://www.10.13140/RG.2.2.2115.4.40649>
 TURU, V. 2023. Mid-Late Pleistocene glacial dynamics in the Valira valleys (Principality of Andorra). Asymmetries within the Pyrenees and correlation across the westernmost European mountain ranges (Resume). *Quaternaire*, 34 (3), 205-211.
<https://www.doi.org/10.4000/quaternaire.18188>

Transformada ràpida de Fourier (FFT) del contingut en matèria orgànica dels sediments de fons de llac i torbera de l'Estany de Burg (Pèlachs et al., 2011) en el decurs dels darrers 15.000 anys. Un cop tractat el senyal, s'observa un alt de magnitud amb un període $T = 4.400$ anys. Els cicles P tenen una influència major en els ritmes vegetatius d'aquesta vall propera al Principat d'Andorra, durant el final del darrer cicle glacial però també a l'Holocè.

PÉLACHS, A.; JULIÀ, R.; PÉREZ-OBÍOL, R.; SORIANO, J.M.; BAL, M.C.; CUNILL, R., & CATALAN, J. (2011) Potential influence of Bond events on mid-Holocene climate and vegetation in southern Pyrenees as assessed from Burg lake LOI and pollen record, *The Holocene*, 21(1), 95-104.

que ens hem de fer és si aquests cicles de 4.500 ± 500 anys es produeixen de forma sobtada o regular, si són locals o globals, si són particulars dels períodes glacials o són generals i si els efectes són igual d'intensos o depenen del context climàtic del moment. Algunes respostes a aquestes preguntes són inequívokes i d'altres no. Respecte a la primera pregunta, val a dir que el registre geoquímic dels sediments andorrans permet afirmar que els canvis entre el clímax d'humitat i el de sequera és abrupte, de l'ordre de dos cops la desviació estàndard d'una datació radiocarbònica (80 anys), mentre que la recuperació del clímax precedent requereix 4.500 ± 500 anys. Respecte a la segona pregunta, es pot afirmar que són canvis globals, i han estat descrits com a cicles P a la literatura anglosaxona en matèria de canvis globals del nivell del mar, malgrat que fins ara eren desconeguts en els registres sedimentaris continentals. Respecte a la tercera pregunta, es pot afirmar que en els sediments marins del Mar d'Alborán els cicles P han estat identificats durant el darrer cicle glacial però també al darrer cicle interglacial; per tant, són independents del fet glacial. Respecte a la quarta i última pregunta, es pot afirmar que els seus efectes no són igual d'intensos en tot l'hemisferi nord: hi ha pols climàtics secs i humits al mateix moment a diferents llocs geogràfics. Les respostes a aquestes preguntes en generen de noves, i esperem que els decisors posin en marxa les estructures de país necessàries per fomentar la ciència des d'un ministeri propi. Trenta anys més sense efectuar cap acció concreta com fins ara no sembla ser una acció responsable.





Marc Pons i Pons^{1,2}

Doctor en Ciència i Tecnologia per a la Sostenibilitat per la Universitat Politècnica de Catalunya, investigador a Computational Ecology Group i Universitat de Saskatchewan, Canadà

1. La neu com a component vital del cicle hidrològic

La neu representa un component essencial del cicle hidrològic en les zones muntanyoses, exercint un paper fonamental com a estoc natural d'aigua que es va alliberant gradualment a mesura que es fon. Les regions muntanyoses d'arreu del món, sovint anomenades *torres d'aigua*, proporcionen recursos hídrics vitals a més de la meitat de la humanitat (Immerzeel et al., 2020). La neu, juntament amb les glaceres, són característiques distintives d'aquestes regions, i cobreixen respectivament el 40 i el 2% de la superfície muntanyosa global (Wrzesien et al., 2019; Pfeffer et al., 2014).

La importància hidrològica de la neu resideix principalment en dos aspectes. En primer lloc, actua com un emmagatzematge temporal d'aigua, retenint les precipitacions hivernals i alliberant-les durant la primavera i l'estiu, quan les temperatures augmenten. Aquest procés proporciona un efecte d'amortiment contra la variabilitat meteorològica, subministrant aigua durant els períodes més càlids i secs de l'any, quan la demanda d'aigua és més elevada. En segon lloc, la neu contribueix significativament a la recàrrega d'aigües subterrànies, amb estimacions que indiquen que entre el 40 i el 80% de la recàrrega d'aigües subterrànies en les regions muntanyoses prové del desglaç de la neu (Jasechko et al., 2014; Lucianetti et al., 2020).

2. La importància de la neu a Andorra i els Pirineus

Als Pirineus, i especialment a Andorra, la neu constitueix un recurs hídric primordial. Estudis recents com el del projecte POCTEFA PIRAGUA-PIREAU demostren que el règim hidrològic d'Andorra és típic d'una zona de muntanya d'influència mediterrània amb règim nival, que presenta cabals alts a la primavera i baixos a l'estiu, amb una lleugera aportació procedent de les precipitacions a la tardor (Travesset et al., 2021).

Segons les dades de l'*Estudi per a l'elaboració anyal del recurs hídric d'Andorra* (Govern d'Andorra, 2021), el recurs hídric mitjà anual disponible a escala nacional es quantifica en 262 hm³/anuals. La variabilitat d'aquest recurs en l'any més sec es tradueix en una disminució del 45,7%, mentre que l'any més humit s'incrementa el recurs en un 77,2%. Aquesta variabilitat natural es veurà agreujada pels efectes del canvi



Marc Pons i Pons

El paper de les glaceres i la neu en el cicle de l'aigua de les zones de muntanya

1- Coldwater Laboratory, Centre for Hydrology, University of Saskatchewan, Canmore, Alberta, Canada.

2- Computational Ecology Group, Canmore, Alberta, Canada

Bibliografia

- CARROLL, R. W., DEEMS, J. S., NISWONGER, R., SCHUMER, R., & WILLIAMS, K. H. (2019). The importance of interflow to groundwater recharge in a snowmelt-dominated headwater basin. *Geophysical Research Letters*, 46, 5899-5908.
- COCHAND, M., CHRISTE, P., ORNSTEIN, P., & HUNKELER, D. (2019). Groundwater storage in high Alpine catchments and its contribution to streamflow. *Water Resources Research*, 55, 2613-2630.
- DOCHARTAIGH, B. E., MACDONALD, A. M., BLACK, A. R., EVEREST, J., WILSON, P., DARLING, W. G., & RAINES, M. (2019). Groundwater-glacier meltwater interaction in proglacial aquifers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 4527-4539.
- EARMAN, S., CAMPBELL, A. R., PHILLIPS, F. M., & NEWMAN, B. D. (2006). Isotopic exchange between snow and atmospheric water vapor: estimation of the snowmelt component of groundwater recharge in the southwestern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111, D09302.
- EVANS, S. G., GE, S., & LIANG, S. (2015). Analysis of groundwater flow in mountainous, headwater catchments with permafrost. *Water Resources Research*, 51, 9564-9576.
- FARINOTTI, D., HUSS, M., FÜRST, J. J., LANDMANN, J., MACHGUTH, H., MAUSSON, F., & PANDIT, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12, 168-173.
- GASCOIN, S., GRIZONNET, M., BOUCHET, M., SALGUES, G., & HAGOLLE, O. (2019). Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*, 11, 493-514.
- GOVERN D'ANDORRA. (2018). *Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra*. Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat.
- GOVERN D'ANDORRA. (2019). *Estudi per a l'elaboració anyal del recurs hídic d'Andorra*. Any 2019. Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat.
- GOVERN D'ANDORRA. (2020). *Estudi per a l'elaboració anyal del balanç hídic del Principat d'Andorra*. Any 2019. Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat.

climàtic i especialment pels canvis futurs en la quantitat i estacionalitat de la coberta de neu del país (Pons et al., 2015). L'anàlisi realitzat a Andorra mostra que la recàrrega d'aigües subterrànies procedent de la neu és especialment significativa. El balanç hídic positiu de 678,46 mm, amb una precipitació mitjana de 988,35 mm i una evapotranspiració de 309,88 mm, demostra la important contribució nival al sistema hidrològic. Això és especialment rellevant a les conques de més altitud i més septentrionals del país (figura 1).

El Principat d'Andorra, amb una superfície de 468 km² i una altitud mitjana elevada (1.996 metres), és particularment sensible als canvis en el règim de precipitacions nivoses. Segons les modelitzacions del projecte PIRAGUA, s'espera que en l'escenari de canvi climàtic per a l'any 2050 es produeixi un canvi significatiu en l'hidrogràma, amb una disminució del cabal anual concentrada especialment entre finals de primavera i estiu. Es preveu una reducció del volum d'aigua en forma de neu (*snow water equivalent*) de fins a un 52,86%, que pot afectar especialment les conques del fons de vall i les meridionals (Travesset et al., 2021).

Les projeccions climàtiques mostren que l'increment de temperatura en el futur produirà un augment de la proporció aigua/neu, un avançament del desglaç i, en definitiva, un augment de l'escorrentia superficial als mesos d'hivern. Durant aquests mesos augmentarà el cabal en detriment del cabal a finals de primavera i estiu, que serà significativament menor. Això tindrà importants implicacions tant per a la disponibilitat d'aigua per als diversos usos humans com per al manteniment dels cabals ambientals necessaris per a la conservació de les funcions ecosistèmiques dels rius.

Actualment, els usos consumptius d'aigua a Andorra són d'aproximadament 21,63 hm³ a l'any, distribuïts entre el sector domèstic (72,29%), turístic (11,48%), agrícola (9,31%), de producció de neu (6,67%) i ramader (0,22%). Els usos no consumptius, principalment destinats a la producció hidroelèctrica, suposen uns 75 hm³ a l'any. La modelització feta demostra que, tot i que en termes generals Andorra disposarà de suficient recurs hídic per satisfer les demandes d'aigua previstes dels principals sectors destinats a ús humà fins a l'any 2050, en ocasions i localitzacions puntuals, les elevades demandes en diferents sectors poden entrar en competència i provocar un conflicte de prioritats entre usos, especialment per mantenir les funcions ecosistèmiques dels rius.



Figura 1. Volum d'aigua en forma de neu (snow water equivalent) a Andorra el 26 de març del 2023. Font: Andorra Recerca + Innovació

3. Connectivitat entre la neu i les aigües subterrànies

Estudis recents han posat en relleu la importància de la connectivitat entre la criosfera (incloent la neu) i les aigües subterrànies, identificant-la com un enllaç poc conegut del cicle hidrològic de muntanya (Van Tiel et al., 2024). La recàrrega d'aigües subterrànies procedent de la neu i les glaceres és sovint preferencial, és a dir, una major proporció de l'aigua provinent del desglaç de la neu tendeix a infiltrar-se al subsòl en comparació amb la pluja. Aquest fenomen s'explica per la curta durada i el gran volum del desglaç de la neu, juntament amb les baixes taxes d'evaporació durant el període de desglaç, que afavoreixen la percolació cap a capes més profundes i una recàrrega d'aigües subterrànies consistent (Carroll et al., 2019).

En un context de canvi climàtic, en què s'espera que la coberta de neu disminueixi tant en durada com en profunditat, la nostra comprensió d'aquesta connectivitat esdevé crucial. La reducció de la neu podria alterar significativament els patrons de recàrrega d'aigües subterrànies, la qual cosa afectaria no només el volum d'aigua disponible sinó també la temporalitat del seu alliberament als rius i rierols.

4. Escales espacials i temporals de la connectivitat criosfera - aigües subterrànies

Un aspecte particularment rellevant és l'anàlisi de les diferents escales espacials i temporals en què opera la connectivitat

GOVERN D'ANDORRA. (2021). *Estudi per a l'elaboració anyal de l'inventari i quantificació de la despesa hídrica per usos del Principat d'Andorra. Any 2019*. Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat.

HAMMOND, J. C., HARPOLD, A. A., WEISS, S., & KAMPF, S. K. (2019). Partitioning snowmelt and rainfall in the critical zone: effects of climate type and soil properties. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 3553-3570.

HOOD, J. L., & HAYASHI, M. (2015). Characterization of snowmelt flux and groundwater storage in an alpine headwater basin. *Journal of Hydrology*, 521, 482-497.

HUGONNET, R., McNABB, R., BERTHIER, E., MENOUNOS, B., NUTH, C., GIROD, L., & KÄÄB, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592, 726-731.

IMMERZEEL, W. W., LUTZ, A. F., ANDRADE, M., BAHL, A., BIEMANS, H., BOLCH, T., & BAILLIE, J. E. M. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577, 364-369.

JASECHKO, S., BIRKS, S. J., GLEESON, T., WADA, Y., FAWCETT, P. J., SHARP, Z. D., & WELKER, J. M. (2014). The pronounced seasonality of global groundwater recharge. *Water Resources Research*, 50, 8845-8867.

LILJEDAHN, A., GÄDEKE, A., O'NEEL, S., GATESMAN, T., & DOUGLAS, T. (2017). Glacierized headwater streams as aquifer recharge corridors, subarctic Alaska. *Geophysical Research Letters*, 44, 6876-6885.

LUCIANETTI, G., PENNA, D., MASTRORILLO, L., & MAZZA, R. (2020). The role of snowmelt on the spatio-temporal variability of spring recharge in a dolomitic mountain group, Italian Alps. *Water*, 12, 2256.

MACKAY, J. D., BARRAND, N. E., HANNAH, D. M., KRAUSE, S., JACKSON, C. R., EVEREST, J., & BLACK, A. (2020). Proglacial groundwater storage dynamics under climate change and

glacier retreat. *Hydrological Processes*, 34, 5456-5473.

MARKOVICH, K. H., MANNING, A. H., CONDON, L. E., & MCINTOSH, J. C. (2019). Mountain-block recharge: a review of current understanding. *Water Resources Research*, 55, 8278-8304.

MILNER, A. M., KHAMIS, K., BATTIN, T. J., BRITTAIN, J. E., BARRAND, N. E., FUREDER, L., & BROWN, L. E. (2017). Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 9770-9778.

MÜLLER, T., LANE, S., & SCHAEFLI, B. (2022). Towards a hydrogeomorphological understanding of proglacial catchments: an assessment of groundwater storage and release in an Alpine catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 6029-6054.

PEFFER, W. T., ARENDT, A. A., BLISS, A., BOLCH, T., COGLEY, J. G., GARDNER, A. S., & RANDOLPH CONSORTIUM. (2014). The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*, 60, 537-552.

PONS, M., LÓPEZ-MORENO, J. I., ROSAS-CASALS, M., & JOVER, E. (2015). The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. *Climatic Change*, 131(4), 591-605.

<https://doi.org/10.1007/s10584-015-1400-8>

ROGGER, M., CHIRICO, G. B., HAUSMANN, H., KRAINER, K., BRÜCKL, E., STADLER, P., & BLÖSCHL, G. (2017). Impact of mountain permafrost on flow path and runoff response in a high alpine catchment. *Water Resources Research*, 53, 1288-1308.

SCHILLING, O. S., GERBER, C., PARTINGTON, D. J., PURTSCHERT, R., BRENNWALD, M. S., KIPFER, R., & BRUNNER, P. (2021). Quantifying groundwater recharge dynamics and unsaturated zone processes in snow-dominated catchments via on-site dissolved gas analysis. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028479.

SOMERS, L. D., GORDON, R. P., MCKENZIE, J. M., LAUTZ, L. K., WIGMORE, O., GLOSE, A. M., & CONDOM, T. (2016). Quantifying groundwater-surface water interactions in a proglacial valley, Cordillera Blanca, Peru.

entre la criosfera i les aigües subterrànies. Comprendre aquestes escales és fonamental per avaluar correctament la importància i la vulnerabilitat dels recursos hídrics de muntanya (Van Tiel *et al.*, 2024).

A escala petita, com és el cas d'Andorra (conques <10 km²), els dipòsits superficials no consolidats com morrenes, tarteres i al·luvions són els principals responsables de l'emmagatzematge i alliberament de l'aigua de fusió. Els temps de residència en aquestes vies de flux superficial generalment són de l'ordre de dies a mesos.

A mesura que augmenta la mida de la conca (10-100 km²), canvien les propietats, tipus i vies de flux dels aqüífers dominants. Els dipòsits al·luvials i el llit rocós fracturat guanyen importància en comparació amb les tarteres i les morrenes. Els aqüífers al·luvials en zones muntanyoses poden tenir temps de residència de mesos a uns pocs anys, mentre que el llit rocós pot presentar un ampli rang de temps de residència, des de diversos mesos fins a molts anys.

A escales més grans (conques de 100-10.000 km²), la recàrrega del bloc muntanyós i la recàrrega del front muntanyós poden proporcionar recursos hídrics importants a zones situades lluny aigües avall (per exemple, a 10-100 km). Aquestes escales més àmplies sovint suposen un repte per a la comprensió i la modelització hidrològica, ja que els models a gran escala generalment no poden resoldre característiques petites, com morrenes i tarteres, que poden ser crucials per retardar l'aigua de fusió.

5. Conclusions i implicacions per a la gestió dels recursos hídrics

La neu i les glaceres representen molt més que simples elements paisatgístics o turístics a les zones muntanyoses; constitueixen components essencials del cicle hidrològic, que afecten directament la disponibilitat d'aigua, tant superficial com subterrània. Ignorar la connectivitat entre la criosfera i les aigües subterrànies pot tenir implicacions crucials per a la nostra comprensió actual del cicle hidrològic de muntanya i, en particular, per a l'avaluació de canvis futurs deguts al canvi climàtic.

Des de la perspectiva de la criosfera i el cabal fluvial, les contribucions d'aigua de fusió podrien ser subestimades si només s'observen les dinàmiques de cabal de resposta ràpida. La connectivitat entre l'aigua de fusió i les aigües subterrànies

retarda el subministrament d'aigua de fusió, estenent potencialment el paper de l'aigua de fusió en les regions aigües avall en l'espai i el temps. Especialment durant sequeres, és fonamental entendre on i quan s'emmagatzema i s'allibera l'aigua per a una gestió eficaç dels recursos hídrics (Van Tiel et al., 2024).

En un context de canvi climàtic i de creixent demanda d'aigua, la comprensió dels processos que connecten la criosfera amb les aigües subterrànies i la temporalitat de la descàrrega de l'aigua superficial esdevé fonamental per a una gestió sostenible dels recursos hídrics. A mesura que les glaceres retrocedeixen i la coberta de neu disminueix tant en quantitat com en temporalitat, el paper relatiu de les aigües subterrànies de muntanya s'espera que augmenti. No obstant això, la recàrrega reduïda d'aigua de fusió pot conduir a una disminució general de la recàrrega total, un canvi en la temporalitat dels processos de recàrrega i interaccions alterades entre les aigües subterrànies i les superficials.

D'altra banda, el retrocés de les glaceres, els estocs hivernals de neu i el desglaç del permafrost poden canviar la capacitat d'emmagatzematge del subsòl i, per tant, la connectivitat entre les aigües superficials i les subterrànies. Una comprensió integral d'aquests canvis en el futur subministrament d'aigua és crítica per gestionar eficaçment els recursos hídrics per als sistemes socioecològics cada vegada més dependents de les aigües subterrànies en les zones de muntanya així com en regions aigües avall.

Això és especialment cert en regions com Andorra i els Pirineus, on la neu ha modelat no només el paisatge sinó també l'economia i la forma de vida dels seus habitants, i on la gestió adaptativa dels recursos hídrics serà clau per afrontar els reptes del canvi climàtic en les properes dècades.

Hydrological Processes, 30, 2915-2929.

SOMERS, L. D., MCKENZIE, J. M., MARK, B. G., LAGOS, P., NG, G. H. C., WICKERT, A. D., & SILVA, Y. (2019). Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed—but not forever. *Geophysical Research Letters*, 46, 13016-13026.

THORNTON, J. M., MARIETHOZ, G., & BRUNNER, P. (2018). A 3D geological model of a structurally complex Alpine region as a basis for interdisciplinary research. *Scientific Data*, 5, 180238.

TRAVESSET-BARO, O., DOMÈNECH, M., PESADO, C., & PONS, M. (2021). «Evolución de los usos de los recursos hídricos y posibles tensiones bajo escenarios de cambio climático en Andorra». Proyecto PIRAGUA (EFA210/16), Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Andorra Recerca + Innovació.

VAN TIEL, M., AUBRY-WAKE, C., SOMERS, L., ANDERMANN, C., AVANZI, F., BARAER, M., & YAPIYEV, V. (2024). Cryosphere-groundwater connectivity is a missing link in the mountain water cycle. *Nature Water*.

<https://doi.org/10.1038/s44221-024-00277-8>

VAN TIEL, M., VAN LOON, A. F., SEIBERT, J., & STAHL, K. (2021). Hydrological response to warm and dry weather: do glaciers compensate? *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 3245-3265.

VMIROU, D., KUMMU, M., MEYBECK, M., KALLIO, M., & WADA, Y. (2020). Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, 3, 917-928.

WALVOORD, M. A., & KURYLYK, B. L. (2016). Hydrologic impacts of thawing permafrost—a review. *Vadose Zone Journal*, 15, vzj2016.01.0010.

WRZESIEN, M. L., PAVELSKY, T. M., DURAND, M. T., DOZIER, J., & LUNDQUIST, J. D. (2019). Characterizing biases in mountain snow accumulation from global data sets. *Water Resources Research*, 55, 9873-9891.



Joan Estrada i Mateu

Geògraf i climatòleg.
Llicenciat en Geografia i
Història per la Universitat
de Barcelona

Resum

En aquest estudi examinem algunes característiques rellevants de la intensitat de la precipitació al Pirineu andorrà durant les tempestes i els xàfecs de l'estiu, amb una anàlisi quantitativa en què tractem la intensitat pluviomètrica andorrana de l'època estival a tres escales temporals: la subhorària, l'horària i la diària. La comparació del Pirineu andorrà amb les intensitats pluviomètriques d'altres àrees més obertes a la influència marítima permetrà de desvelar aspectes fins ara inèdits de la pluviometria andorrana, alhora que farà possible de destacar aquells trets que resulten particularment singulars de la formació de precipitacions intenses a l'estiu a casa nostra. Tot això amb la perspectiva posada, sempre, en l'ordenament territorial i la tasca del gestor de l'espai, una perspectiva necessària per salvaguardar el nostre col·lectiu dels riscos que suposen els episodis tempestuosos d'una pluviometria especialment elevada o sobtada.

1. La intensitat subhorària

1.1. Unes consideracions introductòries

Per començar, a fi d'introduir aquest apartat de les intensitats subhoràries de la precipitació, assenyalarem que, al Pirineu andorrà, una de les característiques més singulars de la precipitació que cau torrencialment durant les tempestes i els xàfecs d'estiu la constitueix el fet que, d'una manera predominant, aquesta precipitació té una duració breu. Com a tònica majoritària, plou a bots i barrals, s'abat un autèntic diluvi, durant 5-10 minuts, entre un quart i dos quarts d'hora a tot estirar. Després la tempesta s'apaga, deixa pràcticament de ploure o plou amb molta menys intensitat, i els núvols acaben dissipant-se en un moment o altre.

Aquest fet s'explica probablement pel caràcter força continentalitzat del clima de les valls del Valira, un territori encerclat per relleus importants que l'aïllen de la influència marítima, tant de l'Atlàntic com de la Mediterrània. En no tenir el territori valirenc un mar a prop ni una obertura franca a les fonts d'aire marítim que permetin una alimentació continuada en vapor d'aigua de les cèl·lules convectives, la humitat s'allibera i es consumeix ràpidament i fa que la fase de pluja intensa no hi duri gaire.

I també hi influeix l'altitud del territori andorrà, que limita el



Joan Estrada i Mateu

**Característiques
de la intensitat
pluviomètrica al
Pirineu andorrà
durant les
tempestes i els
xàfecs estivals.
Una comparació
amb sectors
d'una influència
més marítima**

que hom anomena tècnicament CAPE (*convection available potential energy*), és a dir, l'energia disponible per a la convecció. Com més alt ens trobem, menys àrea de CAPE hi ha en un radiosondatge i menys energia tindrem per a la convecció.

Moltes de les cèl·lules convectives que, d'una manera local, afecten Andorra consisteixen en nuvolades efímeres que descarreguen ràpid en pocs minuts o en poca estona, producte sobretot de la calor acumulada i activades pel relleu enèrgic. No tenen generalment un reflex a les capes altes, on la situació resta bàsicament anticiclònica.

Aquestes tempestes, que són fruit bàsicament de les altes temperatures i que es veuen afavorides pel relleu contrastat, estan molt relacionades amb les anomenades brises de vall o ascendents i la seva efectivitat per donar lloc a la formació de núvols prou potents que, depenent de les condicions atmosfèriques, desemboquen en ruixats intensos.

Les brises de vall o ascendents, pròpies de les àrees amb una orografia fortament irregular i que tenen lloc particularment a les hores diürnes, sobretot de l'època càlida de l'any, en resposta a un escalfament més ràpid i més intens dels vessants respecte dels fons de vall, generen sovint nuvolades convectives importants en els flancs de les muntanyes. En aquests flancs més exposats a la insolació l'aire esdevé menys dens i s'hi poden produir forts ascensos de l'aire, amb un efecte d'aspiració de l'aire que prové del fons de vall i que alimenta els mateixos corrents ascendents.

Al vessant sud pirenaic, i per tant també a la conca del Valira, aquest mecanisme resulta especialment efectiu, ja que la direcció en què s'estableix el descens de la pressió atmosfèrica local per l'escalfament desigual dels flancs de la muntanya i dels fons de vall coincideix amb la direcció de les valls en sentit ascendent. Això fa que la força ascensional dels corrents aeris al llarg de l'eix de les valls tingui més vigor. La rampa ascendent que proporciona el relleu actua de llançadora per a l'aire, que és atret des dels vessants superiors de la muntanya sotmesos a un escalfament solar més intens. Dins d'Andorra, un sector on pot fer-se especialment palesa aquesta efectivitat de les brises de vall per produir precipitacions és la vall d'Ordino, a la conca del Valira del Nord. En aquesta vall, és molt probable que la marcada linealitat sud-nord del recorregut per a les brises de vall (en condicions anticiclòniques) acabi afavorint el desenvolupament vertical de grans cúmulus i de cumulonimbus a la zona del

Serrat, on la muntanya de Besalí els faria de rampa final (Estrada, 2021).

Les brises de vall poden ser un factor decisiu en la formació de precipitacions especialment intenses quan venen reforçades per factors com l'aportació d'humitat en superfície o l'arribada d'aire fred en altura (Estrada, 2021).

Les tempestes de calor, també anomenades per algun autor "de bon temps" (Thillet, 1997), són típiques de l'estiu i sovint esclaten molt localment, a causa, sobretot, dels ascensos tèrmics, i majorment a la tarda o al vespre, quan la calor diürna ja ha ultrapassat el seu punt màxim, ja que la formació dels cumulonimbus té lloc, essencialment, després que s'hagi assolit la temperatura màxima (Keidel, 1981).

Tanmateix, podem observar que aquí, al nostre país, Andorra, no resulta infreqüent que les tempestes de bon temps ja puguin tenir lloc molt poc després de sobrepassar-se el migdia solar, sense que calgui esperar, per tant, a la tarda o al vespre perquè esclatin. Aquest fet s'explica pel que hem comentat més amunt: el mateix relleu, concretament per l'efecte de trampolí que exerceix i que accelera la formació de nuvolades convectives. I també accentua sobretot aquest efecte de trampolí la mateixa configuració de les valls pirinenques andorranes, orientades d'una manera general de nord a sud, la qual cosa fa, tal com ja hem explicat, que les brises de vall o ascendants, fortament activades per la insolació important, adquireixin més força.

Ja hem comentat al començament que la major part dels xàfecs tempestuosos estivals tenen a Andorra una durada no superior als quinze o trenta minuts. Sí que es produeixen al Principat tempestes que poden durar més temps, fins i tot unes hores, amb unes quantitats totals de precipitació importants, però no són les més habituals. Un exemple d'aquestes situacions en què l'activitat tempestuosa es manté durant força estona el constitueixen els anomenats tálvegs d'altura (configuracions depressionàries en altura en forma de V), molts dels quals responen a sistemes convectius organitzats que afecten la serralada pirinenca a través de línies successives de cumulonimbus (en general més d'una línia).

Amb les tempestes estivals, els corrents d'aigua poden vehicular puntualment cabals molt importants i adquirir un grau de torrencialitat molt elevat. Podem posar un exemple concret d'aquesta torrencialitat. Agafem la conca del torrent d'Enclar (Santa Coloma), que té una àrea de 4.470.000 m² (4,47 km²), i suposem una acumulació mitjana aproximada de

pluja sobre aquesta conca de 30 mil·límetres en 30 minuts. Atès que l'àrea estricta del torrent d'Enclar és només d'uns 15.000 m², gairebé la totalitat de l'aigua caiguda en aquesta conca en 30 minuts (134.100.000 litres) haurà de circular per una superfície aproximada de tan sols 15.000 m², en un lapse de temps molt petit. En conseqüència, tota aquesta aigua (134,1 milions de litres) assolirà en el segment que correspon al torrent unes alçades considerables. I com podem veure també, la major part d'aquesta aigua es concentrarà a la part final del torrent d'una manera molt sobtada.

1.2. Exposició d'alguns registres concrets

Al Pirineu andorrà, els valors de la intensitat instantània de la precipitació estival poden arribar a ultrapassar els 2 mm per minut. De fet, les intensitats sisminutals, que són les d'interval més curt de temps per al qual s'anota, al web meteorològic del Govern d'Andorra (meteo.ad/manager), precipitació registrada a les estacions meteorològiques del país, indiquen l'existència de pluges superiors als 12 mm en sis minuts.

Tenim, per exemple, present en la memòria la forta tempesta del primer d'agost del 2008, que provocà el desbordament del riu Runer, la inundació del pas fronterer hispanoandorrà i el tancament de la Duana Andorrana, així com incidents greus en altres llocs de la parròquia de Sant Julià de Lòria, com Bixessarri i, sobretot, Fontaneda. Durant aquest episodi, l'estació de la borda del Vidal, emplaçada allí mateix, a tocar de la duana andorrana, mesurà una intensitat màxima de la pluja de 15,2 mm/6 min i de 24,2 mm/12 min. En mitja hora, l'estació enregistrà 37,6 mm (Servei Meteorològic Nacional).

Molt més recentment, i durant un altre episodi de xàfecs tempestuosos severs que afectaren Andorra, el 27 d'agost del 2022 l'estació del bony de les Neres, a 2.080 m d'altitud i en el sector central del país, mesurà una intensitat sisminutal de la pluja de fins a 17,7 mm i una dotzeminutal de fins a 25,6 mm. En trenta minuts s'hi varen atènyer els 48,1 mm.

Altres registres subhoraris de la precipitació estival que destaquen especialment per la seva torrencialitat són el de l'aiguat del 26 d'agost del 2008 a l'estació d'Aixàs (Sant Julià de

Foto 1. Amuntegament de sediments i de materials de diversa mena a la Duana Andorrana pel desbordament del riu Runer



Lòria), quan s'hi totalitzaren 76 mm, amb una intensitat màxima de 20,6 mm en deu minuts (Estrada, 2022). I, l'any passat mateix, l'episodi del 27 de juny del 2023 a l'estació de Perafita, a 2.402 m d'altitud en el sector meridional d'Andorra, quan s'hi assolí una pluja màxima de 13,0 mm/6 min, de 25,9 mm/12 min i de 49,1 mm/30 min (Servei Meteorològic Nacional).

Podem comparar tots aquests registres andorrans amb els que es donen en el nostre veí del sud, i encara que les puntes d'intensitat màxima de la pluja estival poden

ser a casa nostra cridaneres, és gairebé improbable que assoleixin les de molts episodis torrencials que, a l'estiu, tenen lloc a Espanya. Així, per exemple, en sectors de Catalunya més oberts que Andorra a la influència que pot arribar de la Mediterrània, amb les seves masses d'aire càlides i humides, hi ha constància d'intensitats minutals de la precipitació en època estival que superen els 4 mm/min, i, en algun cas, els 5 mm/min. Tenim, en aquest sentit, el testimoni d'un registre de Sant Pau de Segúries, al Ripollès, al Pirineu gironí, en què es mesurà una vegada una intensitat instantània de 5,2 mm/min. I per a Gurb (Osona), per tant també en un punt de l'àrea nord-oriental del territori català, hi ha un registre de fins a 6,1 mm/min (XEMA). Al País Valencià, Manuel visqué un episodi de pluja molt intensa en què es totalitzaren 119 mm en una hora, el primer de juliol de 1993, sense que la intensitat no baixés dels 4 mm/min durant 20 minuts seguits (Estrada, 2020). I per a la ciutat de València hom mesurà, el primer d'agost de 1982, fins a 28 mm en sis minuts (Grimalt, Martín-Vide i Mauri, 1995). La major proximitat d'aquests espais a les fonts de vapor d'aigua marítimes, per tant potencialment inestables, explicaria probablement, en gran manera, aquesta intensitat subhorària encara més forta que la del Pirineu andorrà. A més, es tracta de llocs moltes vegades més baixos que Andorra, que tindrien, per tant, una àrea de CAPE més gran, això és, més disponibilitat d'energia per a la convecció.

En àrees pirinenques que, com les valls del Valira, formen part de la conca de l'Ebre però que es troben més obertes que el nostre país a les masses d'aire de procedència marítima, el grau de concentració de la pluja en intervals subhoraris pot atènyer un paroxisme extrem. Aquest és el cas de la recordada riada de Biescas, de trista memòria, al Pirineu



Foto 2. Incidents a la carretera de Fontaneda tot just quan arriba a la carretera general a Sant Julià de Lòria el primer d'agost del 2008

aragonès, el 7 d'agost de 1996. Durant aquest episodi, amb un temps de concentració de 30 minuts, s'haurien pogut assolir, segons estimacions fetes, els 161 mm en mitja hora al barranc d'Aràs, en concret a la conca de Betés.

En el cas del petit sector de la conca mitjana de Betés, hom ha estimat una precipitació màxima de fins a 69 mm en 8 minuts i de 118 mm en 22 minuts, la qual cosa donaria en 30 minuts la impressionant quantitat de 187 mm (García Ruiz, White, Martí, Valero, Errea i Gómez Villar, 1996).

2. La intensitat horària

Les intensitats horàries màximes de la precipitació de l'època estival resulten, al Pirineu andorrà, també elevades, tot i que no assoleixen les puntes que poden atènyer en altres sectors de la península Ibèrica. Acabem d'esmentar, en aquest sentit, els 119 mm/hora de Manuel (València), del primer de juliol de 1993. I a la conca de Betés, durant l'episodi de l'aiguat de Biescas del 7 d'agost de 1996, haurien pogut caure més de 250 mm/hora (García Ruiz, White, Martí, Valero, Errea i Gómez Villar, 1996).

En algunes àrees del vessant atlàntic, els registres pluviomètrics estivals en seixanta minuts són també superiors als de la conca del Valira. Així, per exemple, fora de l'àmbit climàtic mediterrani, en la franja de clima temperat oceànic del nord de la península Ibèrica, Elgoibar (Guipúscoa) registrà, el 19 de juliol de 1988, 150 mm/hora (Martín-León, 1989).

D'acord amb els registres pluviomètrics horaris disponibles al nostre país, les intensitats màximes de la precipitació assolides en seixanta minuts se situen al Principat en els 70 mm aproximadament. Aquests registres, encara que poden semblar discrets en comparació als de molts sectors de l'Espanya mediterrània o als del País Basc, veuen tanmateix incrementats enormement llur grau de torrencialitat i llur capacitat erosiva pel fet de la mateixa orografia accidentada d'Andorra, amb els seus forts pendents. D'aquesta forma, els diversos cursos torrencials que, en episodis concrets de precipitació horària estival intensa, poden vehicular cabals molt importants d'aigua que davallen pels vessants amb una gran força es converteixen en uns agents de risc elevat.

El rècord històric de precipitació atesa en seixanta minuts per al trimestre juny-juliol-agost a Andorra correspon a l'episodi del 21 de juliol del 2015, en què una tempesta de tipus convectiu estacionari afectà l'àrea del calm de Claror (al costat del pic Negre), on varen arribar a acumular-se, segons la dada

facilitada pel Servei Meteorològic Nacional corresponent a una làmina d'aigua de Météo-France, uns 70 mm/hora. A conseqüència de la intensitat de precipitació, es produïren fenòmens erosius intensos a les capçaleres de les conques dels rius de Llueneres, d'Aixirivall, d'Auvinyà i de Claror. Al poble de Sant Julià de Lòria, les torrentades provocades per l'aiguat haurien pogut tenir conseqüències molt greus. A la conca de Claror, dins del sistema hidrogràfic del Madriu-Perafita, però també a prop del port Negre i de la collada de Prat Primer, l'aixaragallament dels terregalls negres de la zona provocà un enterboliment del riu de Claror que va fer que les aigües captades avall no fossin aptes per al consum humà i que es produïssin talls en el subministrament d'aigua a Escaldes-Engordany (Deu, Domingo, Komac i Roquet, 2018). És obvi que la focalització de la tempesta en un lloc concret com és el calm de Claror durant molta estona, de manera que sobrecarregava de cabal i de sediment els torrents adjacents, agreujà la perillositat del fenomen.

Altres quantitats seixantaminutals dignes de destacar a Andorra per al trimestre juny-juliol-agost són els 57,2 mm/hora de la borda del Vidal o els 61,6 mm/hora del bony de les Neres corresponents als episodis, ja esmentats més amunt, del primer d'agost del 2008 i del 27 d'agost del 2022, respectivament.



Foto 3. Desbordament del riu d'Aixirivall al poble de Sant Julià de Lòria



Foto 4. Plugues torrencials excepcionals del 29 de juny del 2023 al sector més baix d'Andorra

3. La intensitat diària

La quantitat rècord de precipitació registrada a Andorra en 24 hores al trimestre juny-juliol-agost, des que es fan al nostre país observacions pluviomètriques, supera els 100 mm. En concret, són els 105,8 mm recollits a la borda del Sabaté, a 861 m d'altitud a la part més baixa d'Andorra, el 29 de juny del 2023, durant una tongada de tempestes intenses que afectaren Andorra i, molt en particular, la parròquia de Sant Julià de Lòria. Aquell mateix dia, la borda del Vidal (864 m d'altitud) registrà 89,3 mm (Servei Meteorològic Nacional). Durant l'episodi esmentat més amunt del 21 de juliol del 2015, hom ha assenyalat que, al calm de Claror, la precipitació acumulada durant les 24 hores associades a l'episodi fou de 96 mm (Deu, Domingo, Komac i Roquet, 2018).

Per a les tres estacions meteorològiques de l'empresa hidroelèctrica del país (FEDA; FHASA abans de 1988), Ransol, Engolasters i la central hidroelèctrica, que proveeixen les sèries més llargues que hi ha a Andorra sobre precipitació (les sèries diàries d'aquest paràmetre es remunten al setembre de 1934), les intensitats pluviomètriques màximes registrades a l'època estival en un període de 24 hores se situen, amb dades concretes de l'arxiu original de FEDA, en els 80 mm (en concret, el valor rècord diari per al conjunt d'aquestes tres estacions són els 79,9 mm de Ransol, mesurats el 10 de juny del 2000).

Ens mantenim en un objectiu molt interessant i que ha de permetre de descobrir aspectes ara per ara inèdits de la pluviometria del nostre àmbit geogràfic com és el de comparar les precipitacions diàries del Pirineu andorrà amb les



Foto 5. Torrents crescuts i riscs a la xarxa viària el 29 de juny del 2023

d'altres àrees més exposades a la humitat marítima. En aquest sentit, resulta eloqüent la comparació d'una estació de la conca andorrana del Valira com és la de la central hidroelèctrica de FEDA amb una altra del Pirineu oriental com és Campdevàrol, al Ripollès. Podem fer-ho amb les dades del període de quaranta anys, dels dos observatoris meteorològics, que va de 1984 al 2023 (FEDA, Govern d'Andorra i Estrada) (SMC).

L'estació de la central de FEDA ofereix un emplaçament idoni per a l'estudi de la intensitat pluviomètrica al territori andorrà, i això gràcies a tres factors bàsics: a) la forta activitat termicoconvectiva del sector on es troba la central, emplaçada a 1.135 m d'altitud en un fons de vall de la meitat meridional d'Andorra, on el caldejament del terreny i de les capes d'aire que s'hi troben en contacte resulta acusat; b) l'encaixament topogràfic del sector, que propicia per si mateix una convecció acusada (disparament vertical de les masses d'aire a causa del relleu, que actua de trampolí), i c) la localització de la central en un tram de la vall del Valira d'Orient que mira al sud, per tant, ben exposat als fluxos inestables de procedència sud, els més actius a Andorra per donar lloc a precipitacions intenses. A més, la central de FEDA és l'estació meteorològica que compta a Andorra amb les sèries més coherents de precipitació d'una gran amplitud temporal.

L'estació de Campdevàrol, situada a 738 m d'altitud, és representativa de l'àrea que hom ha anomenat el "niu de tempestes estival" del Pirineu i Prepirineu oriental català. En aquesta àrea es produeix a l'estiu una forta activitat tempestuosa associada no solament a la presència de relleu, sinó a la proximitat de la font de vapor d'aigua de la Mediterrània, un mar que genera en època estival una massa d'aire càlida i humida, per tant inestable en contacte amb relleus propers més exposats.

Com a dada preliminar, direm que la precipitació mitjana del trimestre juny-juliol-agost de Campdevàrol en el quarantenni 1984-2023 és de 291,8 mm, mentre que a la central de FEDA és de 223,7 mm. La precipitació estival de Campdevàrol representa, en aquest quarantenni, un 130,5% de la de l'estació andorrana i és, per tant, sensiblement superior. Aquesta diferència en favor de l'estació ripollesa resulta encara més remarcable si tenim en compte que Campdevàrol es troba a 397 m menys d'altitud que la central de FEDA.

Probablement, si haguéssim pogut disposar de les dades d'un punt del Ripollès encara més elevat que Campdevàrol hauríem

Bibliografia

- ANDORRA DIFUSIÓ.
<https://m.andorradifusio.ad/noticies/sant-julia-va-patir-un-desbordament-del-riu-molt-similar-2008;del-21-de-juliol-del-2015>.
ANDORRA DIFUSIÓ.
<https://m.andorradifusio.ad/noticies/es-desborda-riu-daixirivall-sant-julia-de-loria;del-21-de-juliol-del-2015>.
ALTAVEUDIGITAL.
https://www.altaveu.com/actualitat/parroquies/sant-julia-torna-tremolar-temporal-torna-convertir-en-rius-mo-lts-carrers_49506_102.html; del 29 de juny del 2023.
- DEU, J., DOMINGO, D., KOMAC, B., & ROQUET, M. (2018). Restauració ambiental a la conca del riu de Claror. A: *Revista del CENMA*, núm. 9, pàg. 40-51. Institut d'Estudis Andorrans.
- ESTRADA, J. (2020). Una característica molt important del clima mediterrani: la gran irregularitat espacial i temporal de la precipitació. L'exemple de l'Espanya mediterrània. A: *Sabieu que...? Algunes qüestions de meteorologia i climatologia*, del web www.pirineuandorra.net. En línia, consultat el juliol del 2024.
- ESTRADA, J. (2021). Comparació entre les valls del Valira del Nord i del Valira d'Orient pel que fa a l'eficàcia de les brises de vall en la possibilitat de desenvolupament d'inestabilitat i de precipitacions. A: *Sabieu que...? Algunes qüestions de meteorologia i climatologia*, del web www.pirineuandorra.net. En línia, consultat el juliol del 2024.
- FHASA i FEDA, ESTRADA, J. *Dades de precipitació mensual i diària del trimestre juny-juliol-agost de la central hidroelèctrica corresponents als períodes 1984-1990 i 2009-2023*.
- GARCÍA RUIZ, J. M., WHITE, S. M., MARTÍ, C., VALERO, B., ERREA, M. P., & GÓMEZ VILLAR, A. (1996). *La catàstrofe del barranco de Arás (Biescas, Pirineo aragonés) y su contexto espacio-temporal*. CSIC i Instituto Pirenaico de Ecología (Saragossa).

pogut constatar una diferència fins i tot més alta entre el valor mitjà d'aquest nou punt i el de l'estació del Pirineu andorrà.

Si entrem en l'anàlisi de les intensitats podem examinar, en primer terme, el percentatge que aporta, respecte del volum pluviomètric total de l'estiu, la precipitació diària igual o superior a 15,0 mm, a 30,0 mm i a 50,0 mm del trimestre juny-juliol-agost, per a l'esmentat quarantenni 1984-2023. A la central de FEDA, aquests percentatges són del 53,4, del 24,1 i del 5,5%, respectivament. A Campdevàrol, la precipitació diària estival igual o superior a 15,0 mm, a 30,0 mm i a 50,0 mm representa el 66,4, el 34,3 i el 15,0% del total de la precipitació estival, respectivament. Ens trobem, doncs, que a l'estació catalana del Pirineu oriental les precipitacions estivals copioses tenen més pes percentual que a l'estació andorrana. Les precipitacions copioses registrades en 24 hores en període estival també són més freqüents a Campdevàrol que a la central de FEDA. Així, tenim que, per al trimestre juny-juliol-agost, la freqüència de dies de precipitació de 15,0 a 29,9 mm, de 30,0 a 49,9 mm i igual o superior a 50,0 mm és, a la central de FEDA, en el període 1984-2023, de 129, 44 i 8 dies, respectivament, mentre que a l'estació del Ripollès aquestes freqüències són de 176, 60 i 26 dies, respectivament. A més, els episodis de pluja estival extrema en 24 hores són més acusats a Campdevàrol que a l'estació andorrana. Així, la quantitat màxima de pluja diària a l'estiu de la central de FEDA en el quarantenni 1984-2023, que és de 76,2 mm, ha estat ultrapassada en molt pels tres episodis de pluja màxima, també en 24 hores, de l'observatori del Ripollès, en què s'hi han assolit els 96,8, els 120,5 i els 156,8 mm, també dins del referit quarantenni. Això encara que el valor mitjà de la precipitació per dia de precipitació igual o superior als 50,0 de Campdevàrol en període estival, de 67,2 mm, supera en molt poc el de la central de FEDA, de 61,8 mm.

Altres registres estivals de la pluviometria diària que, per la seva copiositat, destaquen a Catalunya en el quarantenni 1984-2023, en sectors més exposats a la influència marítima que Andorra, són els següents: Breda (la Selva), 182,7 mm; Esparreguera (el Baix Llobregat), 160,0 mm; Berga (el Berguedà), 140,2 mm; Amposta (el Montsià), 127,2 mm (SMC). I hem de fer notar, a l'últim, per cloure aquest subapartat, que fins i tot en àmbits del litoral peninsular ibèric que no pertanyen al vessant mediterrani la intensitat pluviomètrica diària pot ultrapassar a l'època estival la que té lloc al Pirineu andorrà. Aquests àmbits costaners del vessant atlàntic

peninsular són afectats també per aigües càlides i, en conseqüència, són àrees potencialment inestables. Així, com a exemple eloqüent, tenim que, dins del domini del clima marítim de les latituds mitjanes que correspon a la franja cantàbrica, Larrasquitu (Biscaia) registrà, el 26 d'agost de 1983, 503 mm (Martín-Vide, 1996), en el decurs d'un episodi d'inundacions catastròfiques a la conca del Nerbión. Tenim, així mateix, els 170 mm registrats a la localitat guipuscoana d'Elgoibar el 19 de juliol de 1988 esmentat (Martín-León, 1989).

3.1. Evolució de la intensitat pluviomètrica diària: els períodes de retorn

Podem examinar, com a complement final del nostre article, com ha evolucionat a Andorra la intensitat de la precipitació diària estival en el darrer quarantenni 1984-2023, amb canvi climàtic, respecte del quarantenni precedent, 1944-1983, sense canvi, i podem fer-ho a partir de la comparació de les precipitacions màximes esperades en 24 hores a l'estació de la central hidroelèctrica de FEDA en diferents períodes de retorn.

El concepte de període de retorn fa referència al nombre d'anys que per terme mitjà ha de passar perquè torni a produir-se un fenomen d'una magnitud igual o superior a l'ocorregut, o, donant la volta al concepte, i en el cas de la variable de la precipitació, a la quantitat de pluja que s'espera assolir cada x anys.

Hem ajustat les sèries estivals de la precipitació màxima diària de cada any de la central de FEDA a la distribució de probabilitat GEV (*general extreme value*), la més emprada per ajustar sèries climàtiques, a fi d'obtenir les quantitats màximes estivals esperades en 24 hores per a un període de retorn de 5, 10, 20, 50, 100, 200 i 500 anys. Els resultats apareixen recollits a la taula 1.

Pel que podem observar a la taula, els valors d'un quarantenni i de l'altre són estadísticament iguals. O sigui, no sembla que les intensitats pluviomètriques estivals en 24 hores s'hagin incrementat els darrers quaranta anys respecte del període 1944-1983. Seria interessant poder conèixer l'evolució que ha experimentat al Pirineu andorrà la intensitat pluviomètrica a escala horària o subhorària i veure si el canvi climàtic, amb el conegut escalfament global, hi ha tingut una petjada, amb una possible intensificació de les pluges en intervals molt curts de temps, fruit en gran manera, probablement, d'una virulència

Període de retorn (anys)	A	B
5	56,2	53,7
10	64,8	62,7
20	72,5	70,6
50	81,7	80,7
100	88,0	87,8
200	93,9	94,4
500	101,1	101,2

Taula 1. Quantitats màximes estivals esperades (en mm) en 24 hores en el quarantenni 1944-1983 (A) i en el quarantenni 1984-2023 (B) per a diferents períodes de retorn

GRIMALT, M., MARTÍN VIDE, J., & MAURI, F. (1995). *Els núvols. Guia de camp de l'atmosfera i previsió del temps*. Col·lecció El Mèdol-Guies, núm. 4. Tarragona: Edicions El Mèdol.

KEIDEL, C. G. (1981). *Pequeña guía de meteorología*. Barcelona: Ediciones Omega.

MARTÍN LEÓN, F. (1989). Situación tormentosa del día 19 de julio de 1988. A:

repositorio.aemet.es/bitstream/20.5 00.11765/3786/1/Sim_Pred_07.pdf. En línia; consultat l'agost del 2024.

MARTÍN VIDE, J. (1996). Decálogo de la pluviometría española. A: *Clima y agua: la gestión de un recurso climático*, pàg. 15-24. Marzol, M. V., Dorta, P., Valladares, P. (editors). La Laguna.

SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA. Dades de precipitació diària de Campdevànol i d'altres estacions meteorològiques de Catalunya del trimestre juny-juliol-agost en el quarantenni 1984-2023. A:

www.meteo.cat/wpweb/climatologia/a/dades-i-productes-climatic. En línia; consultat el juliol del 2024.

SERVEI METEOROLÒGIC NACIONAL. Dades de precipitació diària i dades de la intensitat pluviomètrica horària i subhorària corresponents als mesos de juny, de juliol i d'agost de la xarxa d'estacions meteorològiques del Govern d'Andorra. Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Ramaderia - Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic.

SERVEI METEOROLÒGIC NACIONAL. Dades de precipitació mensual i diària de l'estació de la central de FEDA del trimestre juny-juliol-agost corresponents al període 1991-2008. Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Ramaderia - Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic.

THILLET, J. J. (1997). *La météo de montagne*. Col·lecció Les Guides du Club Alpin Français. Paris: Éditions du Seuil.

XEMA. Valors minuts de la precipitació de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques de Catalunya. A:

www.meteo.cat/wpweb/climatologia/a/dades-i-productes-climatic/anuari-de-dades/estacions-meteorollogiques

més gran de les tempestes a causa de les temperatures més altes. Però aquesta anàlisi requereix unes dades i una formulació que escapen ja de l'abast del nostre estudi.

4. Conclusions

A l'època estival, les intensitats subhoràries, horàries i fins i tot diàries dels xàfecs tempestuosos més intensos resulten al Pirineu andorrà elevades i, tanmateix, constitueixen episodis de la precipitació recollida per unitat de temps menys copiosos que els de sectors més exposats a la influència marítima, com, per exemple, el Pirineu oriental, un sector més proper a la font de vapor d'aigua de la Mediterrània, que genera en període d'estiu una massa d'aire càlida i humida, per tant, potencialment inestable en contacte amb relleus propers. I, així mateix, les intensitats màximes de la precipitació estival són, al nostre país, menys acusades que en moltes àrees litorals de la península Ibèrica, afectades per aigües superficials càlides.

Les altes intensitats que pot assolir la pluja a Andorra durant alguns episodis, i que es veuen agreujades pel component afegit de la forta inclinació del terreny, ens porten a incidir en la necessitat d'un seguiment precís dels fenòmens tempestuosos estivals a casa nostra, indispensable per dur a terme una gestió correcta del territori que permeti d'evitar efectes desastrosos provocats per aquests fenòmens sobre el col·lectiu humà. Sabem que les tempestes d'estiu poden ser causa de crescudes violentes dels rius i torrents, encara que generalment tenen, al nostre país, una duració més o menys breu. No solen afectar globalment el territori com ho fan els temporals copiosos de la tardor, però sí que, puntualment, en sectors focalitzats, poden generar molt enrenou i molts maldecaps. La planificació urbanística i de les infraestructures ha de prendre en consideració totes aquestes variables. Perquè les tempestes d'estiu, a banda de constituir un fenomen espectacular susceptible de provocar la fascinació entre els entusiastes de la meteorologia, són també una bèstia negra que cal conèixer i tenir a ratlla, a fi que després no haguem de doldre'ns.



Resum

L'actual crisi multidimensional requereix enfocaments holístics i sistèmics que generin representacions útils en l'esfera científica sobre l'encaix dels sistemes humans en els sistemes naturals. En aquesta ponència es presenta l'enfocament del metabolisme social i, més concretament de l'anàlisi MuSIASEM (acrònim de *Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism*), com a mitjà per dur a terme robustes anàlisis de sostenibilitat. La metodologia seleccionada s'aplica al cas d'Andorra centrant-se en un diagnòstic dels requisits d'energia i aigua que fan possible el manteniment i la reproducció d'Andorra, així com la seva especialització funcional. A més, donada l'elevada dependència del país respecte de les importacions, es mostren els resultats d'una anàlisi d'externalització que compara les necessitats de diferents atributs biofísics del sector energètic i agrícola d'Andorra amb la quantitat d'aquests atributs que estan incorporats en les importacions de productes energètics i aliments, la qual cosa remarca l'elevada dependència d'Andorra d'altres territoris.

1. Introducció

La crisi climàtica continua agreujant-se després de més de cinc dècades de governança ambiental global, iniciada en la Cimera de la Terra d'Estocolm de 1972. En el moment d'escriure aquest text, les concentracions de diòxid de carboni en l'atmosfera sobrepassen les 420 parts per milió (ppm) (Scripps Institution of Oceanography, 2024), lluny del valor de 350 ppm considerat segur per a l'estabilitat climàtica (Hansen et al., 2008). Considerant la tendència actual d'emissions de gasos d'efecte d'hivernacle (GEI), Hansen et al. (2023) adverteixen que l'escalfament global superarà els 1,5 °C en la dècada de 2020 i els 2 °C abans de 2050, amb la creixent possibilitat de desencadenar múltiples i perillosos punts d'inflexió climàtica (McKay et al., 2022). Les emissions de GEI, d'altra banda, lluny d'aplanar-se, continuen creixent (haurien de caure en picat com més aviat per evitar els pitjors escenaris) i el 2023 van assolir un nou rècord de 40.900 tones (Greenpeace, 2024), havent-se quadruplicat des de 1960 (Osaka, 2022).

No obstant això, l'escalfament global només és el símptoma més evident d'un problema de fons que es pot resumir en una situació d'extralimitació (*overshoot*), de xoc contra els límits

Juan Jesús Larrabeiti i Rodríguez

Doctor per la Universitat d'Andorra, professor col·laborador a la Universitat Carlemany i col·laborador del grup de recerca Integrated Assessment: Sociology, Technology and the Environment de la Universitat Autònoma de Barcelona



Juan Jesús Larrabeiti i Rodríguez

La sostenibilitat d'Andorra des d'una perspectiva metabòlica

biofísics del planeta (Riechmann, 2024). Així, en un recent informe de salut planetària (Caesar et al., 2024), es posa de manifest que ens enfrontem a una alarmant crisi multidimensional, una *policrisi* (Lawrence et al., 2024), de problemes interconnectats com el canvi climàtic, la pèrdua de biodiversitat o la contaminació. L'informe mostra que s'ha traspassat la zona de seguretat de sis dels nou límits planetaris considerats –el que respecten a la contaminació, el clima, la biodiversitat, l'ús de la terra, l'aigua i els nutrients– alhora que s'està prop de sobrepassar el límit segur en acidesa dels oceans i càrrega d'aerosols.

En el context esmentat, comprendre l'insostenible encaix de les societats industrials en els ecosistemes i millorar la qualitat del debat sobre la possibilitat d'una ordenació entre humans i naturalesa més sostenible requereix enfocaments holístics i sistèmics que generin representacions útils en l'esfera científica que acompanyin polítiques efectives en l'esfera política i canvis significatius en les pràctiques socials (Sorman i Giampietro, 2011). Aquesta aproximació sistèmica ha de complementar i matisar enfocaments unidimensionals basats en la gestió d'un sol recurs (p. ex. aigua o energia) o centrats en determinats processos (p. ex. reduir les emissions o el consum de recursos a una determinada escala), que poden tenir efectes no desitjats en una escala més gran (p. ex. el dany irreversible en la biodiversitat produït per les activitats mineres necessàries per produir dispositius de captació d'energia renovable com plaques solars o aerogeneradors). En aquesta ponència s'introdueix el paradigma del metabolisme social per donar resposta a l'esmentada necessitat d'aquests enfocaments holístics. Així, la resta del document té l'estructura següent. La següent secció sintetitza les idees bàsiques d'aquest paradigma (2.1) i d'una de les seves principals metodologies l'anàlisi MuSIASEM. La secció 3 ofereix al lector una lleugera pinzellada de com la metodologia es pot aplicar al cas d'estudi d'Andorra per analitzar els seus requeriments energètics (3.1) i d'aigua (3.2) i considerar la dependència del metabolisme del país de processos externs (3.3). La ponència tanca amb unes consideracions finals (secció 4).

2. El metabolisme social i MuSIASEM

2.1. Metabolisme social

El concepte de *metabolisme social* va néixer de l'observació que tant els sistemes biològics (p. ex. organismes,

ecosistemes) com els socioeconòmics (p. ex. llars, empreses, economies nacionals) depenen d'un flux continu d'energia i materials per mantenir la seva estructura interna. Més específicament, el metabolisme social al·ludeix a la necessitat d'estabilitzar un conjunt de transformacions d'energia i materials que ocorren dins d'un determinat sistema social i entre aquest sistema i el seu medi ambient. Aquests complexos processos de transformació determinen l'estructura funcional del sistema, n'asseguren la reproducció, mantenen i reparen els seus elements estructurals i permeten l'adaptació del sistema davant canvis en el medi ambient (Giampietro et al., 2012).

El paradigma del metabolisme social ofereix un marc analític per comprendre l'apropiació humana de la naturalesa (Toledo, 2008). En aquest sentit, les relacions que els éssers humans estableixen amb la naturalesa són sempre dobles. A escala individual, els éssers humans extreuen de la naturalesa quantitats suficients d'oxigen, aigua i biomassa per sobreviure alhora que excreten calor, aigua i substàncies mineralitzades. D'altra banda, a escala social el conjunt d'individus s'organitza a través de nexes i institucions de diferent tipus, extraient energia i materials de la naturalesa per mitjà d'estructures metaindividus o artefactes per garantir la seva subsistència i reproducció social i excreta tota una gamma de residus o deixalles. Aquests dos nivells corresponen al que s'ha anomenat *energia endosomàtica* i *exosomàtica*¹ (Lotka, 1922), una distinció teòrica bàsica dels fonaments de l'economia ecològica (Martinez-Alier i Roca-Jusmet, 2013).

El paradigma del metabolisme social reconeix explícitament la dependència de les nostres economies del sistema natural i el fet que una relació sostenible amb la naturalesa implica un ús de materials i energia en els sistemes humans compatible amb les capacitats regeneratives i d'absorció de residus dels ecosistemes. Així estableix una definició clara de sostenibilitat a llarg termini (Haberl et al., 2019).

2.2. Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM)

MuSIASEM és un dels principals enfocaments dins de la recerca sociometabòlica (Gerber i Scheidel, 2018). La metodologia posseeix uns fonaments teòrics heterodoxos basats en les ciències de la complexitat (Giampietro, 2021) que la fan adequada per a l'estudi dels problemes de sostenibilitat. El lector interessat pot consultar una recent

1- L'energia endosomàtica és l'energia usada internament per un organisme per mantenir les seves funcions i estructura, mentre que l'energia exosomàtica prové de fonts externes, com la tecnologia, per donar suport a activitats dutes a terme fora del cos humà com conduir un tractor o escalfar aigua. Aquesta distinció ajuda a explicar com l'energia és utilitzada per diferents organismes i societats.

discussió sobre els principals pilars teòrics de la metodologia, les diferents eines que disposa per a la caracterització de la sostenibilitat juntament amb la seva il·lustració a partir de diferents exemples pràctics a Larrabeiti-Rodríguez i Velasco-Fernández (2022). La metodologia integra diferents dimensions (p. ex. econòmica, demogràfica i biofísica) i escales d'anàlisi (el sistema que estudia com un tot, els diferents compartiments del sistema estudiat i la relació entre el sistema d'estudi i altres sistemes) la qual cosa facilita una anàlisi multidimensional i multiescalar que escapa al reduccionisme d'altres anàlisis que utilitzen una sola dimensió (moltes vegades la monetària) i una sola escala d'anàlisi.

Conforme a la perspectiva de la metodologia, una anàlisi robusta de la sostenibilitat implica considerar un sistema socioeconòmic com un sistema socioecològic (Holling, 2001) determinat per les activitats expressades per un conjunt d'ecosistemes —en l'*ecosphere* (Rees, 1999)— i un conjunt d'actors socials i institucions —en l'*anthroposphere* (Kuhn i Heckeley, 2010). Així, la metodologia sosté que l'estudi de la sostenibilitat ha d'integrar els aspectes següents:

1. Una visió externa relacionada amb el concepte de *feasibility* que examina els processos fora de control humà en l'*ecosphere*. Aquesta visió externa valora la compatibilitat de la sostenibilitat d'una societat determinada en relació amb l'existència de limitacions externes generades per la naturalesa tant des del costat de l'obtenció de recursos naturals (com l'abundància d'aigua o l'existència de combustibles fòssils) com des del costat de l'absorció de residus (com les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle o els residus plàstics). Aquesta visió s'expressa a partir d'una anàlisi quantitativa associada amb la matriu de pressió ambiental (*environmental pressure matrix*, EPM).

2. Una visió interna relacionada amb el concepte de *viability* que examina els processos sota control humà en la *anthroposphere*. Aquesta visió interna estudia les limitacions biofísiques i econòmiques internes a les quals està subjecte qualsevol sistema econòmic i està relacionada amb una anàlisi quantitativa dels inputs secundaris (p. ex. productes energètics i aliments produïts a partir de recursos naturals, com la benzina o la farina) i elements fons² sota control humà (p. ex. hores d'activitat humana o determinats usos del sòl) associats amb la matriu d'usos finals (*end-use matrix*, EUM).

2- Per a Georgescu-Roegen (1971), els elements fons mantenen la seva identitat durant la durada d'una anàlisi. Exemples d'aquests elements són les persones, la terra o un aqüífer que és gestionat de manera sostenible i no es degrada. Per contra, els elements de flux canvien la seva identitat durant l'anàlisi (apareixen i desapareixen), com passa amb l'energia, el menjar o els residus.

3. Aplicació inicial a Andorra

En aquesta secció es mostren alguns resultats i reflexions que es poden obtenir en aplicar la metodologia seleccionada al cas d'estudi d'Andorra focalitzant-se en la quantificació dels requeriments energètics i d'aigua. També, donat l'alta dependència dels sistemes energètic i agrícola d'Andorra de les importacions, es mostren els resultats d'una anàlisi d'externalització en què es comparen diferents necessitats d'elements biofísics dels sistemes energètic i agrícola andorrans amb les quantitats d'aquests elements que es troben incorporades en les importacions de productes energètics i alimentaris que fa Andorra per mantenir el seu consum endosomàtic i exosomàtic d'energia. Per a una discussió més detallada, així com per obtenir informació metodològica sobre com s'han produït els diferents valors numèrics, recomano al lector interessat consultar la tesi doctoral de pròxima publicació *Sustainability through MuSIASEM nexus analysis: the case of Andorra* (Larrabeiti-Rodríguez, 2024).

3.1. Energia

Per fer un diagnòstic dels requeriments energètics d'Andorra, tant per cobrir el seu consum exosomàtic com endosomàtic d'energia cal fer els passos següents:

1. Definir Andorra en diferents compartiments funcionals. Per això s'han considerat el *household sector* (HH) –el sector residencial–, el *paid work sector* (PW) –els diferents sectors econòmics– i la categoria d'altres usuaris (*other users*), que engloba l'activitat de turistes i visitants. Al seu torn, el PW s'ha dividit en l'*agricultural sector* (AG), l'*industry, construction and manufacturing sector* (ICM) i el *service and government sector* (SG), això és, els sectors primari, secundari i terciari.³

2. Obtenir informació quantitativa per als compartiments funcionals definits anteriorment en relació amb: (i) el consum de diferents productes energètics sota els epígrafs de *electricity* (electricitat), *heat* (fuel per escalfar), *fuel* (fuel per a transport) i *food* (menjar); (ii) *human activity* (hores d'activitat humana per a cada nivell funcional), i (iii) ràtios metabòliques d'ús d'energia per hora d'activitat humana, definides com a *exosomatic metabolic rate* (Exo MR) i *endosomatic metabolic rate* (Endo MR).

La informació comentada prèviament és expressada en la corresponent *end-use matrix* (taula 1). Andorra depèn d'elements biofísics externs a les seves fronteres. Així, la

3- Demano al lector disculpes per l'abundant ús d'anglicismes en aquesta ponència. La metodologia MuSIASEM es va concebre i desenvolupar en anglès i crec més adequat preservar els termes originals de les diferents variables utilitzades.

Taula 1.
Requeriments del
metabolisme
exosomàtic i
endosomàtic
d'Andorra

Compartiments funcionals	Metabolisme exosomàtic						Metabolisme endosomàtic	
	Human activity (Mh) ¹	Electricity (GWh) ²	Heat (TJ) ³	Fuel (TJ)	GER ⁴ (TJ)	Exo MR (MJ/h) ⁵	GFS ⁶ (TJ)	Endo MR (kcal/h) ⁷
N (Andorra)	969	567	1.939	2.604	11.061	11,4	314	77
N-1								
Household (HH)	650	186	634	2.116	5.371	8,3	314	77
Paid work (PW)	85	381	1.305	488	5.690	66,9	n. a. ⁸	n. a.
Other users	234							
N-2 (PW)								
Agriculture (AG)	1	Negl.	Negl.	1	1	1,5	n. a.	n. a.
Industry (ICM)	11	26	35	39	336	30,5	n. a.	n. a.
Services (SG)	73	355	1.270	448	5.353	73,1	n. a.	n. a.

¹ Megahores; ² Gigawatts hora; ³ Terajoules; ⁴ Gross energy requirements (necessitat d'energia bruta) a partir de Giampietro et al. (2013); ⁵ Megajoules per hora; ⁶ Gross food supply (subministrament brut d'aliments); ⁷ Quilocalories per hora; ⁸ not available (no disponible). Elaboració pròpia a partir del Departament d'Estadística (2019), Miquel et al. (2021) i Govern d'Andorra (2007). Dades per a l'any 2019

Referències

ARENAS, L., NAREDO, J. M. & RIECHMANN, J. (2022). *Bioeconomía para el siglo XXI. Actualidad de Nicholas Georgescu-Roegen*. Los Libros de la Catarata, Madrid.

CADILLO-BENALCAZAR, J. J., RENNER, A. & GIAMPIETRO, M. (2020). A multiscale integrated analysis of the factors characterizing the sustainability of food systems in Europe. *Journal of Environmental Management*, 271, 110944. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110944>

CAESAR, L., SAKSCHEWSKI, B., ANDERSEN, L. S., BERINGER, T., BRAUN, J., DENNIS, D., GERTEN, D., HEILEMANN, A., KAISER, J., KITZMANN, N. H., LORIANI, S., LUCHT, W., LUDESCHER, J., MARTIN, M., MATHESIUS, S., PAOLUCCI, A., TE WIERIK, S. & ROCKSTRÖM, J. (2024). *Planetary Health Check Report 2024*. Potsdam.

DEPARTAMENT D'ESTADÍSTICA (2019). *Demographic, social and economic statistics*. <https://www.estadistica.ad/portal/apps/sites/#/estadistica-en> En línia; consultat 6-6-2023.

GERBER, J. F. & SCHEIDEL, A. (2018). In Search of Substantive Economics: Comparing Today's Two Major Socio-metabolic Approaches to the Economy – MEFA and MuSIASEM. *Ecological Economics*, 144, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.012>

informació sobre *human activity* mostra que la categoria d'*other users*, que recull hores d'activitat humana de turistes i visitants representa un 24% del total de l'activitat humana. També és possible observar com el sector serveis té els requisits energètics exosomàtics per hora de treball més alts en el sector (73,1 MJ/h). Pel que fa al consum energètic exosomàtic total, el sector residencial (HH) utilitza principalment fuel per a mobilitat (fuel) –81% del total de consum de fuel per a aquesta categoria– mentre que el conjunt de sectors econòmics (PW) usa de manera principal electricitat (*electricity*) i fuel per a calor (*heat*) –67% del consum total per a totes dos categories–. Els requeriments exosomàtics totals (GER) es distribueixen de manera bastant equitativa entre el sector residencial (HH) –48%– i el conjunt de sectors productius (PW) –52%–. Andorra té una ràtio de metabolisme exosomàtic en el sector residencial excepcionalment alta (8,3 MJ/h), considerat un valor de referència del nivell material de vida, comparable amb països com el Canadà (8,8 MJ/h) i els EUA (10 MJ/h) i que sobrepassa la mitjana europea de 6,4 MJ/h. A escala de país (nivell N), la ràtio de metabolisme exosomàtic (11,4 MJ/h) és lleugerament inferior a la mitjana dels països europeus (17 MJ/h) (Larrabeiti-Rodríguez, 2021). Finalment, només ha estat possible calcular els requeriments de metabolisme ensodomàtic per al conjunt del país, extrapolant els valors del sector residencial. Així, la seva ràtio de metabolisme endosomàtic és aproximadament de 1.854 kcal/dia (equivalent al valor mostrat en la taula de 77 kcal/h), i és similar al de països com Espanya, amb un consum endosomàtic de 1.810 kcal/dia (Ruiz et al., 2015).

3.2. Aigua

Per analitzar el consum d'aigua a Andorra s'ha utilitzat principalment el Govern d'Andorra (2016). El consum d'aigua és classificat en ús consumptiu i no consumptiu i els diferents valors són assignats als elements funcionals considerats per al cas de l'energia. L'ús consumptiu inclou l'extracció d'aigua i el seu posterior retorn al medi ambient amb una pèrdua de quantitat i qualitat. L'ús no consumptiu es refereix a l'extracció d'aigua i retorn al mitjà sense pèrdua de quantitat ni qualitat. Per al cas de l'anàlisi dels requeriments d'aigua per a la reproducció i funcionalitat dels diferents compartiments socials es requereix informació quantitativa de: (i) *water throughput* (consum total d'aigua), diferenciant entre *consumptive use* (ús consumptiu) i *non-consumptive use* (ús no consumptiu); (ii) *human activity* (hores d'activitat humana per a cada nivell funcional), i (iii) la ràtio metabòlica d'ús d'aigua per hora d'activitat humana (calculada només per als usos consumptius). Aquesta informació és recopilada en una *end-use matrix* per a l'aigua (taula 2).

Compartiments funcionals	Human activity (Mh) ¹	Water throughput (Mm ³) ²	Consumptive use (Mm ³)	Non-consumptive use (Mm ³)	Water MR (m ³ /h) ³
N (Andorra)	893	90,150	13,177	76,973	0,015
N-1					
Household (HH)	600	5,547	5,547		0,009
Paid Work (PW)	75	84,603	7,630	76,973	0,102
Other users	218				
N-2 (PW)					
Agriculture (AG)	1	3,042	1,742	1,300	2,750
Industry (ICM)	9	74,502	0,021	74,480	0,002
Services (SG)	65	7,059	5,866	1,193	0,090

Per al cas d'Andorra, l'ús no consumptiu d'aigua inclou principalment la canalització d'aigua per a la generació d'electricitat (ICM) i per a la creació de neu artificial (SG). La distribució dels usos consumptius al nivell (N-1) mostra que les activitats econòmiques (PW) consumeixen al voltant del 58% del total d'aquesta categoria mentre que les activitats residencials són responsables del 42% del consum en usos consumptius. Dins de les activitats econòmiques, baixant jeràrquicament al nivell N-2, el sector serveis representa el 77% del consum en PW, seguit pel sector agrícola (23% del consum en PW, principalment per al cultiu del tabac). El sector

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press, London.

GIAMPIETRO, M. (2021). Implications of Complexity Theory. *Visions for Sustainability*, 16, 31-42. <https://doi.org/10.13135/2384-8677/5995>

GIAMPIETRO, M., MAYUMI, K., & SORMAN, A.H. (2013). *Energy Analysis for a Sustainable Future: Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism*. Routledge, London.

GIAMPIETRO, M., MAYUMI, K., & SORMAN, A.H. (2012). *The Metabolic Pattern of Societies: Where Economists Fall Short*. Routledge, London.

GOVERN D'ANDORRA (2020). *Andorra en xifres 2020*. Andorra la Vella.

Taula 2.
Requeriments d'aigua per al diferents compartiments funcionals d'Andorra

¹ Megahores; ² Mega metres cúbics; ³ metres cúbics per hora. Elaboració pròpia a partir del Departament d'Estadística (2019) i el Govern d'Andorra (2016). Dades per a l'any 2015

GOVERN D'ANDORRA (2016). *Estudi per a l'elaboració anyal de l'inventari i quantificació de la despesa hídrica per usos del Principat d'Andorra-Any 2015*. Andorra la Vella.

GOVERN D'ANDORRA (2007). *Avaluació de l'estat nutricional de la població d'Andorra 2004-2005*. Andorra la Vella.

GREENPEACE (2024). *2023, un año record de eventos climáticos extremos y de emisiones de CO2*. Madrid.

HABERL, H., WIEDENHOFER, D., PAULIUK, S., KRAUSMANN, F., MÜLLER, D. B. & FISCHER-KOWALSKI, M. (2019). Contributions of sociometabolic research to sustainability science. *Nature Sustainability*, 2(3), 173-184. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0225-2>

HANSEN, J., SATO, M., KHARECHA, P., BEERLING, D., BERNER, R., MASSON-DELMOTTE, V., PAGANI, M., RAYMO, M., ROYER, D. L. & ZACHOS, J. C. (2008). Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim?. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2(1), 217-231. <https://doi.org/10.2174/1874282300802010217>

HANSEN, J. E., SATO, M., SIMONS, L., NAZARENKO, L. S., SANGHA, I., KHARECHA, P., ZACHOS, J. C., VON SCHUCKMANN, K., LOEB, N. G., OSMAN, M. B., JIN, Q., TSELIODIS, G., JEONG, E., LACIS, A., RUEDY, R., RUSSELL, G., CAO, J. & LI, J. (2023). Global warming in the pipeline. *Oxford Open Climate Change*, 3(1). <https://doi.org/10.1093/OXFCLM/KGAD008>

HOLLAND, J. H. (2006). Studying complex adaptive systems. *J. Syst. Sci. Complex*, 19, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11424-006-0001-z>

HOLLING, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4, 390-405. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0101-5>

KUHN, A. & HECKELEI, T. (2010). Anthroposphere. In: *Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, p. 282-341. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12957-5_8

LARRABEITI-RODRÍGUEZ, J. J. (2024). *Sustainability through MuSIASEM nexus analysis: the case of Andorra*. University of Andorra, Sant Julià de Lòria. Tesi doctoral.

industrial (ICM) té un pes marginal en el consum d'aigua per a usos consumptius. No obstant això, aquest sector usa una fracció essencial de l'aigua pel que fa als usos no consumptius (per generar electricitat). El sector residencial (HH) té una ràtio d'ús d'aigua per hora d'activitat humana més de 10 vegades inferior a l'ús d'aigua per hora en el PW. Això es deu al fet que les activitats en el sector residencial cobreixen el 67% del pressupost total de temps a Andorra (uns 893 milions d'hores a partir d'una estimació de la població equivalent multiplicada per 8.760 hores per persona/any).

3.3. Anàlisi d'externalització

Com s'ha comentat prèviament en la secció 2, una de les característiques de la metodologia MuSIASEM consisteix en la necessitat de considerar diferents escales d'anàlisi. Donada la dependència dels requeriments metabòlics, tant d'energia exosomàtica com endosomàtica, d'importacions per al cas andorrà, una anàlisi d'externalització és rellevant per a una millor discussió sobre la sostenibilitat d'Andorra i sobre com aquesta sostenibilitat depèn d'altres territoris. El sector energètic d'Andorra només produeix al voltant del 20% de l'electricitat que el país consum dins de les seves fronteres (Miquel et al., 2021), mentre que el 80% restant és importat d'Espanya i França. Al seu torn, tots els productes derivats del petroli (per a les funcions de *heat* i *fuel*) són importats. Pel que fa al sector agrícola, excepte per una petita producció de carn, els requeriments del metabolisme endosomàtic d'Andorra depenen d'importacions de productes alimentaris tant d'origen vegetal com animal (Govern d'Andorra, 2020). En aquest apartat es presenten els resultats d'una anàlisi d'externalització que compara l'ús o la generació de diferents atributs biofísics dins de les fronteres d'Andorra pels seus sectors energètic i agrícola amb la quantitat d'aquests elements que han estat utilitzats per produir les importacions de productes energètics i de menjar que complementen les quantitats produïdes a l'interior del país i permeten mantenir els requeriments metabòlics expressats en la taula 1. En particular, els atributs considerats són: (i) *human activity* (hores de treball); (ii) *land use* (necessitats de terra); (iii) *water* (extracció d'aigua), i (iv) *emissions* (emissions de gasos d'efecte d'hivernacle). L'externalització és expressada usant els valors associats a dos *end-use matrix* (local i externa) caracteritzant la *viability* i comptabilitzant l'ús d'activitat humana i terra. Al seu torn, dos *environmental pressure matrix*

La figura 1 compara les necessitats de diferents elements biofísics utilitzats en el sector energètic d'Andorra amb les quantitats necessàries per produir els productes energètics importats, i. e. *electricity from France* (electricitat importada de França), *electricity from Spain* (l'electricitat importada d'Espanya) i *oil products* (productes derivats del petroli com gasolina, dièsel i fuel per a calefacció). Com a resultat, Andorra externalitza:

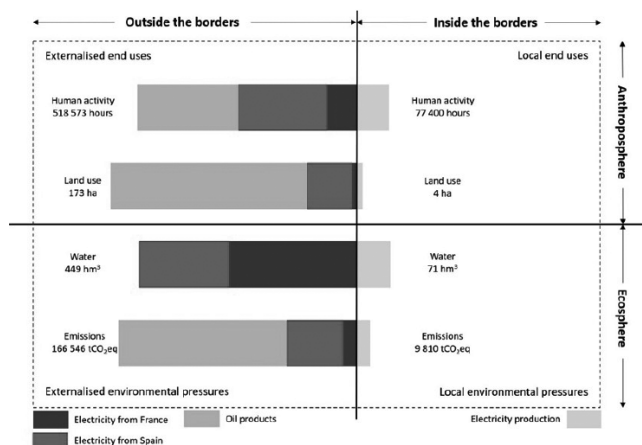
- 7 vegades les hores treballades en el sector energètic d'Andorra.
- 40 vegades la terra utilitzada per a la producció de l'electricitat local.
- 6 vegades l'aigua extreta localment per a la generació d'energia.
- 17 vegades les emissions generades pel seu sector energètic local.

Aquesta quantificació contrasta amb els resultats obtinguts per a un conjunt de països europeus en els quals es constata la baixa dependència de treball virtual en el sector energètic, excepte per als Països Baixos, que externalitzen tres vegades les hores invertides en el seu sector energètic local. A més, per al conjunt de països de la Unió Europea, de mitjana la comptabilitat de les emissions externalitzades augmenta les emissions totals en només un 60% (Ripa et al., 2021).

LARRABETI-RODRIGUEZ, J. J. & VELASCO-FERNÁNDEZ, R. (2022). Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism (MuSIASEM) revisited: synthesizing and updating the theoretical foundations. *Journal of Critical Economics*, 34, 44–68. <https://www.revistaeconomiacritica.org/index.php/rec/article/view/651>

LAWRENCE, M., HOMER-DIXON, T., JANZWOOD, S., ROCKSTÖM, J., RENN, O. & DONGES, J. F. (2024). Global polycrisis: the causal mechanisms of crisis entanglement. *Global Sustainability*, 7, e6. <https://doi.org/10.1017/SUS.2024.1>

Figura 1.
Valors locals i
externalitzats en el sector
energètic d'Andorra



LOTKA, A. J. (1922). Contribution to the energetics of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 8(6), 147–151. <https://doi.org/10.1073/pnas.8.6.147>

MARTINEZ-ALIER, J. & ROCA-JUSMET, J. (2013). *Economía ecológica y política ambiental*. Fondo de Cultura Económica, Ciudad de México.

McKAY, D. I. A., STAAL, A., ABRAMS, J. F., WINKELMANN, R., SAKSCHEWSKI, B., LORIANI, S., FETZER, I., CORNELL, S. E., ROCKSTRÖM, J. & LENTON, T. M. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science* (80), 377. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABN7950/SUPPL_FILE/SCIENCE.ABN7950_DATA_S1.ZIP

MIQUEL, C., CUYÀS, M. & BONETA, A. (2021). *Cuarto informe bianual de actualización de Andorra ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Andorra la Vella.

Pel que fa al sector agrícola, la figura 2 compara les necessitats de diferents elements biofísics utilitzats per generar la producció local d'aliments, amb les necessitats d'aquests elements per produir els productes d'origen vegetal (*plant-based products*) i els productes d'origen animal (*animal-based products*) importats i necessaris per al manteniment dels requeriments del metabolisme endosomàtic del país. En aquest sentit, Andorra externalitza:

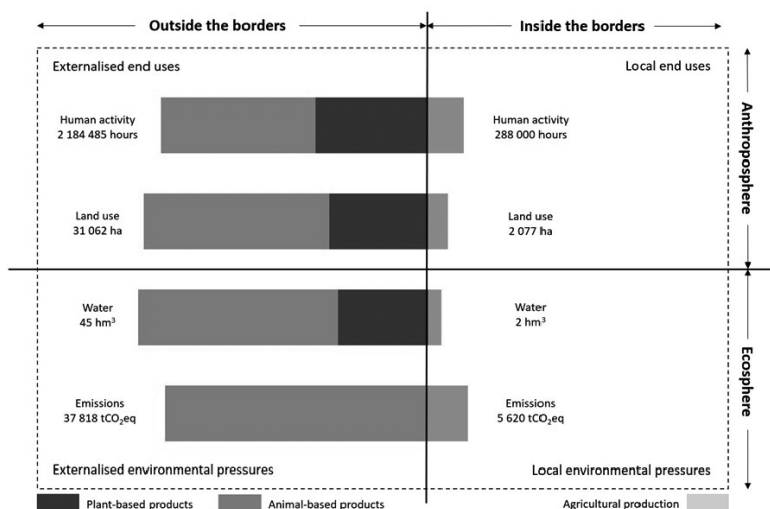
- 8 vegades les hores treballades en el seu sector agrícola.
- 15 vegades l'ús de la terra destinada a fins agrícoles.
- 22 vegades l'aigua consumida pel seu sector agrícola.
- 7 vegades les emissions generades en la producció local de carn.

Alguns d'aquests resultats estan en línia amb els valors per a altres països europeus. Així, els Països Baixos presenten uns valors semblants d'externalització en l'ús de la terra (14 vegades) i el treball agrícola (7 vegades) (Cadillo-Benalcazar et al., 2020).

4. Consideracions finals

Plans per a un desenvolupament més sostenible requereixen anàlisis biofísiques que generin un conjunt d'indicadors a partir dels quals es pugui diagnosticar la situació actual i que

Figura 2.
Valors locals i
externalitzats en el sector
agrícola andorrà



serveixin de base per a la discussió sobre les diferents solucions i la seva implementació. En aquesta ponència s'ha presentat la perspectiva metabòlica i, més concretament, l'anàlisi MuSIASEM, que ha proporcionat una representació multidimensional i sistèmica dels requeriments biofísics que permeten el manteniment i la reproducció d'Andorra, així com la seva especialització funcional, centrant-se en l'energia i l'aigua. Aquesta perspectiva metabòlica incideix en el fet que la transició cap a un model més sostenible, disminuint per exemple la quantitat de recursos energètics utilitzats o canviant les ràtios metabòliques, inevitablement afectarà el que Andorra és i fa. En general, els patrons metabòlics són difícils de canviar, com demostra la literatura sobre metabolisme (Arenas et al., 2022).

A més, l'anàlisi de l'externalització ha posat de manifest l'alta dependència d'Andorra d'altres territoris. Andorra és un clar exemple de sistema complex adaptatiu (Holland, 2006) que utilitza el comerç per mantenir la seva identitat. Així, Andorra pot especialitzar-se en el sector serveis i promoure una imatge de destinació turística associada a una naturalesa "prístina", només perquè externalitza quantitats massives de treball, terra, aigua i emissions. L'opció d'importar permet al país alliberar recursos econòmics (evitant invertir terra i treball per produir productes energètics i aliments) així com reduir l'ús de recursos naturals i la generació de residus (evitant usar l'aigua i la generació d'emissions en l'àmbit local).

Els resultats obtinguts obren una reflexió en relació a les polítiques de descarbonització que suggereix que les emissions que s'externalitzen no són en absolut menyspreables. Al seu torn, assenyalen qüestions ètiques, ja que els processos d'externalització desplacen el deteriorament i els conflictes ambientals fora de les fronteres d'Andorra cap a altres regions.

OSAKA, S. (2022). *Scientists thought carbon emissions had peaked. They've never been higher.* The Washington Post.

<https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2022/12/05/carbon-emissions-peak-record-2022/> En línia; consultat 22-10-2024.

REES, W.E. (1999). The built environment and the ecosphere: a global perspective. *Building Research & Information*, 27(4-5), 206-220

<https://doi.org/10.1080/096132199369336>

RIECHMANN, J. (2024). *Ecologismo: pasado y presente (con un par de ideas sobre el futuro)*. Los Libros de la Catarata, Madrid.

RIPA, M., DI FELICE, L. J. & GIAMPIETRO, M. (2021). The energy metabolism of post-industrial economies. A framework to account for externalization across scales. *Energy*, 214, 118943.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118943>

RUIZ, E., ÁVILA, J. M., VALERO, T., DEL POZO, S., RODRÍGUEZ, P., ARANCETA-BARTIRINA, J., GIL, Á., GONZÁLEZ-GROSS, M., ORTEGA, R. M., SERRA-MAJEM, L. & VARELA-MOREIRAS, G. (2015). Energy Intake, Profile, and Dietary Sources in the Spanish Population: Findings of the ANIBES Study. *Nutrients*, 7(6), 4739-4762. <https://doi.org/10.3390/NU7064739>

SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY (2024). «The Keeling Curve - Full Record». URL

<https://keelingcurve.ucsd.edu/> En línia; consultat 22-10-2024.

SORMAN, A. H. & GIAMPIETRO, M. (2011). Generating better energy indicators: Addressing the existence of multiple scales and multiple dimensions. *Ecological Modelling*, 223(1), 41-53.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOLMO.2011.10.014>

TOLEDO, V.M. (2008). Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 7, 1-26.

Conclusions i Cloenda

Els 16ns Debats de Recerca han estat una oportunitat única per reflexionar sobre l'aigua com a element essencial de la vida i com a repte ambiental en un món en canvi constant. A través de diverses ponències, s'ha explorat el paper fonamental de l'aigua en els ecosistemes, els impactes del canvi climàtic i la necessitat de desenvolupar estratègies innovadores per gestionar aquest recurs vital.

Totes les ponències han partit d'una idea fonamental: l'aigua és la base de la vida a la Terra, el motor que sustenta els ecosistemes i les activitats humanes. Aquest recurs, present tant en els ambients d'aigua dolça com en els marins, és imprescindible per mantenir la biodiversitat i els equilibris ecològics. Així ho ha posat de manifest la jornada inaugural, que ha començat amb una visió global sobre els límits planetaris i la necessitat d'una gestió sostenible de l'aigua. Aquesta perspectiva ha donat pas a una reflexió sobre la biodiversitat aquàtica, analitzant la fragilitat dels ecosistemes d'aigua dolça i salada davant de les pressions ambientals i les activitats humanes.

El canvi climàtic ha estat un eix central del debat. L'alteració del cicle de l'aigua ens situa en un escenari de fenòmens extrems, més incerts i amb riscos creixents. L'anàlisi de les dades hidromètriques d'Andorra ha permès entendre com ha evolucionat la disponibilitat d'aigua al territori, mentre que les projeccions climàtiques han ofert pistes sobre els desafiaments que caldrà afrontar en el futur. També s'ha posat en perspectiva la història climàtica d'Andorra, revelant com el clima ha influït en els recursos hídrics al llarg de mil·lennis.

Davant d'aquests reptes, la innovació en la gestió dels recursos hídrics s'ha presentat com una peça clau. S'han exposat noves metodologies basades en la natura per garantir un ús més eficient de l'aigua, especialment en un context de canvi climàtic i creixement poblacional. La necessitat d'estratègies més sostenibles i resilients ha estat un tema recurrent en el debat, posant en relleu com la recerca pot oferir solucions pràctiques i aplicables als problemes actuals.

Aquestes jornades han estat un espai enriquidor d'intercanvi de coneixements i perspectives. Més enllà de les dades i les



Dra. Marta Fonolleda i Riberaygua

*Coordinadora dels 16ns
Debats de Recerca*

anàlisi, els debats han posat de manifest que la gestió de l'aigua no és només un repte tècnic, sinó també ecològic i social, i que ens concerneix a tots.

Finalment, en nom de l'organització —la Societat Andorrana de Ciències, Andorra Recerca i Innovació i l'Àrea de Recerca del Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats del Govern d'Andorra—, voldríem expressar el nostre agraïment a tots els ponents que han compartit les seves recerques, tant als qui han participat presencialment durant aquests dos dies com als qui ens faran arribar les seves aportacions en format publicació. També volem donar les gràcies a MoraBanc pel seu patrocini i al públic assistent, que amb la seva participació ha enriquit i fet possible el debat. Fins l'any vinent!



SOCIETAT
ANDORRANA
DE CIÈNCIES



Govern d'Andorra



ANDORRA
RECERCA +
INNOVACIÓ



MORABANC

ISBN 978-99920-61-75-6



9 789992 061756

AIGUA: DESAFIAMENTS I OPORTUNITATS

16ns DEBATS DE RECERCA 2024

S A C

AIGUA: DESAFIAMENTS I OPORTUNITATS

16^{ns} DEBATS DE RECERCA 2024

- 2006
Àmbits de recerca per a Andorra:
La recerca mediambiental (1rs)
- 2007
Vers el canvi climàtic (2ns)
- 2008
Recerca mèdica i salut a Andorra (3rs)
- 2009
La recerca en llengua catalana
i Andorra (4ts)
- 2010
La recerca en el sector privat i la
transferència tecnològica (5ns)
- 2012
La recerca sobre el paisatge d'Andorra
(6ns)
- 2013
El talent humà en les organitzacions
andorranes: investigació i oportunitats
(7ns)
- 2014
Física i Química, investigant la realitat
(8ns)
- 2015
La recerca jurídica a Andorra (9ns)
- 2016
Recerca en biociències per a la salut
(10ns)
- 2017
Comportament i ment, la recerca en
psicologia (11ns)
- 2018
Energia i recursos naturals: treballant
pel futur (12ns)
- 2020
Instantànies històriques (13ns)
- 2021
Les noves tecnologies i la investigació
científica (14ns)
- 2022
La investigació en l'àmbit educatiu
(15ns)