

Les aigües subterrànies en el context d'una Catalunya assedegada

Discurs de presentació de Xavier Sanchez-Vila
com a membre numerari de la Secció de Ciències
i Tecnologia, llegit el dia 12 de maig de 2025



Institut
d'Estudis
Catalans

SECCIÓ
DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA

Les aigües subterrànies
en el context d'una
Catalunya assedegada

Les aigües subterrànies en el context d'una Catalunya assedegada

Discurs de presentació de Xavier Sanchez-Vila
com a membre numerari de la Secció de Ciències
i Tecnologia, llegit el dia 12 de maig de 2025

Barcelona, 2025



Institut
d'Estudis
Catalans

SECCIÓ
DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP

Xavier Sanchez-Vila, autor

Les Aigües subterrànies en el context d'una Catalunya assedegada. — Primera edició

Referències bibliogràfiques

ISBN 9788499657875

I. Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia. II. Títol

1. Aigües subterrànies — Catalunya 2. Recursos hidràulics — Explotació — Catalunya

3. Sequeres — Catalunya

556.32(460.23)

628.1(460.23)

551.577.38(460.23)

Aquesta publicació ha rebut un ajut de:



Diputació de Girona

© Xavier Sanchez-Vila

© 2025, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: maig de 2025

Edició: Flor Edicions, SL

Imprès a Sistemes

ISBN: 978-84-9965-787-5

Dipòsit Legal: B 9840-2025

DOI: 10.2436/10.2000.84.1



Aquesta obra és d'ús lliure, però està sotmesa a les condicions de la llicència pública de Creative Commons. Es pot reproduir, distribuir i comunicar l'obra sempre que se'n reconegui l'autoria i l'entitat que la publica i no se'n faci un ús comercial ni cap obra derivada. Es pot trobar una còpia completa dels termes d'aquesta llicència a l'adreça: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>.

1. INTRODUCCIÓ

Catalunya ha patit, pateix i seguirà patint sequeres, que s'aniran agreujant amb el temps en el context d'un canvi climàtic que ha passat de ser una amenaça a ser una realitat. La darrera sequera, de la qual encara no hem sortit quan escric aquestes línies, ha fet que tothom aixequi el cap i miri cap al cel, i fins i tot ha aconseguit el miracle de fer sentir la població verbalitzant que un dia de pluja és un bon dia.

Com diu en Raimon: «Al meu país la pluja no sap ploure; o plou poc o plou massa; si plou poc és la sequera; si plou massa és un desastre». Dins els fenòmens meteorològics extrems, avui ens centrarem en la part corresponent a la gestió dels recursos hídrics en un context de manca de recursos lligats a una sequera prolongada. Ens plantegem situacions d'estrès hídric del sistema, però a la vegada cal pensar com volem que sigui aquesta gestió dels recursos en el futur; és a dir, planificar com volem que sigui el país pel que fa a un tema tan important per a la vida de les persones i dels ecosistemes com és l'aigua, amb una repercussió extraordinària sobre el desenvolupament social i econòmic.

Moltes vegades el coneixement té aquell component de «si no ho veig, no hi és, o no m'hi fa pensar». Aquest és potser el motiu pel qual històricament en aquest país s'ha plantejat durant molt de temps que els únics recursos de què disposem són les aigües superficials, és a dir, l'aigua que trobem als rius i els volums que podem mesurar als embassaments. És evident la transcendència de les aigües superficials quan parlem d'inundacions. Tanmateix, avui dia, la informació sobre la sequera encara se centra a dir quanta aigua tenim acumulada als embassaments.

Ho podem veure al telenotícies cada dia. Per què? La meva resposta és simple: perquè es pot veure i comptabilitzar amb facilitat. Pitjor, les solucions que es plantegen ara mateix mantenen aquesta idea de la visibilitat. Davant la manca d'aigua, fem dessaladores, transvasaments (ara en diuen interconnexions de xarxes), i ens oblidem del volum d'aigua més important a escala de Catalunya i a escala planetària: les aigües subterrànies, de vegades anomenades aigües freàtiques, tot i que això suposa esmentar el subconjunt pel total.

Les aigües subterrànies formen part del cicle natural de l'aigua i, per tant, són essencials per a la gestió sostenible dels recursos hídrics arreu del món. Els recursos subterranis són ubics, però com que són reserves ocultes sota la superfície terrestre són sovint «invisibles», i per això, encara que ja des de l'antiguitat han estat aprofitades per les diferents civilitzacions per satisfer necessitats bàsiques com el consum humà, l'agricultura, la ramaderia i, posteriorment, la indústria, actualment continuen sent ignorades a molts indrets. Cal indicar que la UNESCO ha quantificat que el volum emmagatzemat als aqüífers a escala mundial és igual a cent vegades el volum d'aigua dolça, si sumem la que hi ha als llacs d'aigua dolça més la que es troba circulant pels rius o emmagatzemada en embassaments superficials. Al món, el volum d'aigua que es pot trobar al subsol és de més de cent vegades la que es pot trobar sumant tots el rius i els llacs; és a dir, una reserva quasi infinita. Dit d'una manera planera, si qualsevol de vostès m'indiqués un lloc del món on li agradaria ser en aquest moment, existeix una probabilitat molt alta, gairebé una certesa, que fent un forat a terra hi trobaríem aigua. En molts casos l'aigua es trobaria a una profunditat des de la qual es pot extreure amb la tecnologia existent, i també d'una qualitat prou bona per considerar-la un recurs. Tornant a la UNESCO, cal dir que va declarar el 2022 com l'any de les aigües subterrànies, amb el lema «Fer visible l'invisible». La mateixa UNESCO parla de la influència extraordinària de les aigües subterrànies sobre un nombre molt significatiu dels Objectius de Desenvolupament Sostenible.

El paper de les aigües subterrànies va molt més enllà del subministrament d'aigua per a les activitats productives; exerceixen una funció crítica en la regulació dels cabals base dels rius i en el manteniment d'aiguamolls i altres masses d'aigua superficial de caràcter permanent o semipermanent. La implicació immediata d'aquestes relacions és que les aigües subterrànies són les responsables directes del manteniment de la gran majoria dels ecosistemes aquàtics. Un altre exemple de la seva rellevància són les surgències naturals, aprofitades industrialment per embotellar aigua, o com a element turístic, incloent-hi la possible presència d'aigües termals.

I llavors, per què no les aprofitem? Qui diu que no! Amb dades de l'Agència Catalana de l'Aigua, a Catalunya s'aprofita prou aquest recurs, tant per a ús agrícola, el més important en termes de volums subministrats, com per a l'abastament

i l'ús industrial. Pel que fa a l'abastament, un 40 % de la demanda se satisfà amb aigües subterrànies. Més important, i tornant al territori, aquest percentatge és molt desigual, de manera que hi ha molts municipis de l'interior de Catalunya que s'abasteixen gairebé de manera exclusiva amb aigües subterrànies. A més, si parlem d'aprofitament, cal dir que la majoria de l'aigua que comprem a les botigues és aigua de font natural, és a dir subterrània.

Tot i així, existeix un desconeixement molt important en la població sobre aquest recurs. Pitjor, es tracta possiblement de l'únic element de les Ciències de la Terra on una part important de la població encara creu en elements sobrenaturals. Així, sentim massa vegades que quan es parla de buscar aigües subterrànies per abastir una població encara (compte!, que som en el segle XXI), es tendeix a recórrer a l'ús de mitjans típics de l'edat mitjana, com els pèndols o les varetes de fusta. Seria equivalent a voler saber sobre l'evolució de l'Euríbor preguntant a un bruixot, o a voler saber quin temps farà aquest cap de setmana consultant una tarotista. I, sorprenentment, se segueix fent, i donant a aquesta gent visibilitat en els mitjans de comunicació. Per deixar-ho clar des d'un principi, no existeixen els rius subterranis i, encara que fos així, l'aigua no té cap element tel·lúric o esotèric per fer desviar una vareta de fusta.

Però anem per ordre. Si hem de parlar de les aigües subterrànies en un context de sequera, comencem primer parlant de què és una sequera i com es classifica de manera formal.

2. LES SEQUERES A CATALUNYA

Tothom té una idea preestablerta sobre què és una sequera. Tanmateix, cal dir que el terme està molt ben establert en la literatura científica (Wilhite, Glantz, 1985). A més, en l'actualitat el concepte de sequera s'ha estès per incloure fins a cinc tipus diferents: meteorològica, agrícola, hidrològica, socioeconòmica i ambiental. Els tres primers enfocaments tracten maneres de mesurar la sequera com a fenomen físic. Els dos darrers parlen dels seus efectes (figura 1).

La sequera meteorològica es defineix generalment en funció del grau de sequedat (en comparació amb alguna quantitat «normal» o mitjana) i la durada del període sec (nombre de dies amb precipitacions inferiors a un llindar especificat). Les definicions de sequera meteorològica s'han de considerar com a regions específiques, ja que les condicions atmosfèriques que donen lloc a deficiències de precipitació són molt variables d'una regió a una altra.

La sequera agrícola vincula diverses característiques de la sequera meteorològica sobre la coberta vegetal, i se centra en l'escassetat de precipitacions, el balanç d'aigua al sòl, la reducció dels nivells d'aigua subterrània o d'embassament, etc.

La demanda d'aigua de la planta depèn de les condicions meteorològiques predominants, les característiques biològiques de la planta específica, la seva etapa de creixement i les propietats físiques del sòl. La sequera agrícola implica tenir en compte la susceptibilitat variable dels cultius durant les diferents etapes del seu desenvolupament. Una humitat deficient del sòl pot dificultar la germinació, provocant problemes de creixement de les plantes i una reducció del rendiment final.

La sequera hidrològica s'associa amb els efectes de la manca de precipitació (sigui pluvial o nival) sobre els recursos d'aigua superficial o subterrània. La freqüència i la gravetat de la sequera hidrològica sovint es defineix a escala de conca hidrogràfica o fluvial. Les sequeres hidrològiques solen estar desfasades o endarrerides amb l'ocurrència de sequeres meteorològiques i agrícoles. Les deficiències de precipitació triguen més a aparèixer en components del sistema hidrològic, com ara la humitat del sòl, el flux de corrent i els nivells d'aigua subterrània i dels embassaments.

La sequera socioeconòmica es produeix quan la demanda d'un bé econòmic supera l'oferta com a conseqüència d'un dèficit de subministrament d'aigua relacionat amb el clima. Aquest pot ser bé la mateixa aigua, algun producte agrícola o ramader (fruita, carn...), algun element industrial (producció d'energia hidroelèctrica...) o turístic (tancament de fonts, parcs...). La competència per l'aigua augmenta durant la sequera i els conflictes entre els usuaris de l'aigua s'incrementen significativament, i és en aquest moment quan a Catalunya, i amb l'activació dels diferents nivells d'alerta, excepcionalitat i emergència, s'incideix sobre els màxims consums autoritzats segons les finalitats, incloent-hi restriccions parcials o totals.

La sequera ecològica, considerada com de 5è tipus fa pocs anys, es defineix com un dèficit prolongat i generalitzat en els volums d'aigua naturalment disponibles, inclosos els canvis en la hidrologia natural i gestionada, que creen múltiples tensions als ecosistemes. Insistirem sobre aquest tema més endavant.

A Catalunya tenim una història de sequeres. A mitjan segle XVI ja es parla d'una gran sequera que va provocar una pèrdua gairebé total de les collites de cereal a bona part del país. Cada pocs anys apareix un nou episodi de manca de pluges. Si anem a les sequeres més recents, en els darrers quaranta anys n'hem patit unes quantes, començant per la dels anys 1988-1989, de curta durada, però on ja es va arribar a parlar de restriccions a l'Àrea Metropolitana de Barcelona. Pocs anys després, el 1994-1995, es va repetir un llarg episodi de poca pluja que va acabar amb una gran tempesta el setembre de 1995, passant de sequera a inundacions en un no res. Ja en aquest segle vàrem tenir el 2007-2008 un total de 16 mesos sense pluges destacables, arribant al 20 % de les reserves dels embassament al sistema Ter-Llobregat. Finalment, hem tingut la de 2020-2024, la més llarga en termes de durada des del segle XIX, on les reserves al sistema Ter-Llobregat han arribat a mínims històrics del 16 %.

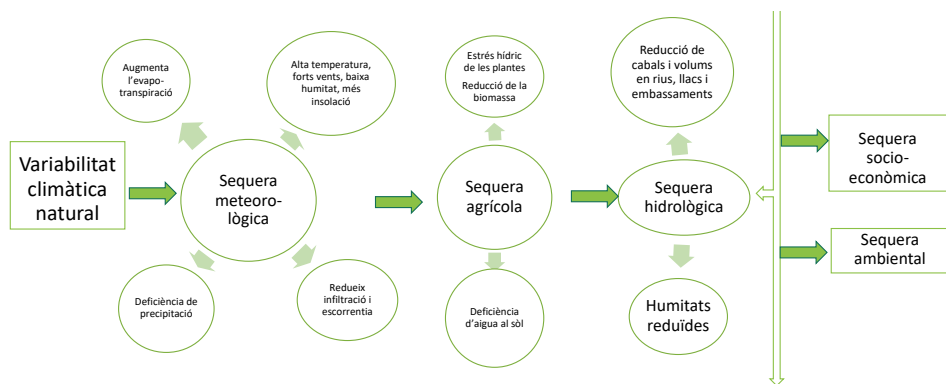


FIGURA 1. Els cinc tipus de sequeres amb les seves implicacions.

FONT: Elaboració pròpia.

Els episodis de sequera i les pluges intenses són fenòmens naturals. Per tant, són recurrents, i hem de pensar que som nosaltres qui ens hem d'adaptar a ells. En el 6è Informe d'Avaluació de l'IPCC (Panell Intergovernamental pel Canvi Climàtic) es diu que a la Mediterrània els fenòmens extrems com les precipitacions extremes i les inundacions, a més de les sequeres (amb èmfasi a les socioeconòmiques i ambientals), seran més freqüents en funció de l'increment global a la temperatura del planeta (IPCC, 2023).

És en aquest context de necessitat d'abastir la població i de donar aigua al teixit productiu quan s'ha de donar visibilitat a les aigües subterrànies, con un element positiu per contribuir a minimitzar els possibles impactes adversos de les sequeres socioeconòmiques i ambientals, sobre les quals podem interactuar, quan es parteix d'una sequera meteorològica prolongada, sobre la qual malauradament no podem fer res.

3. EL CICLE DE L'AIGUA I LA IMPORTÀNCIA DE LES AIGÜES SUBTERRÀNIES

3.1. El cicle hidrològic

El cicle hidrològic és un element de les Ciències de la Terra que ens comencen a explicar quan som ben joves, a primària, però que mai l'acaben de completar, cosa que dona lloc a molts malentesos. Comencem per un entorn relativament natural, poc antropitzat. Com que es tracta d'un cicle, podríem començar en qualsevol punt, però habitualment partim de l'evaporació de l'aigua des dels cossos d'aigua superficial per l'efecte de la radiació solar. Per raons òbvies, des del punt

de vista de la quantitat, la major part de l'aigua evaporada prové dels mars i els oceans. L'evaporació corresponent a llacs o rius és molt menys significativa a escala global, però pot arribar a ser important des del punt de vista de la reducció dels recursos locals (p. ex. l'evaporació d'aigua dels embassaments). Quan el vapor d'aigua puja cap a capes de l'atmosfera on la temperatura és més baixa, es refreda i condensa en petites gotes d'aigua. Aquestes s'agrupen per formar els núvols, que es desplacen amb els corrents d'aire.

El següent pas és la precipitació, en forma de pluja o neu. La distribució en espai i temps de la precipitació a un indret determinat és el resultat de la interacció entre la humitat de l'aire, la temperatura, el relleu, la proximitat a masses d'aigua, els corrents atmosfèrics i els sistemes de pressió. Aquestes variables expliquen per què algunes zones, com les regions tropicals i les muntanyes, reben molta pluja, mentre que altres, com els deserts o les zones protegides per muntanyes, són més seques.

Excepte una petita part que és interceptada, aquesta precipitació arriba al terra. Sense comptar la part retinguda en forma de neu a les muntanyes, l'aigua pot seguir tres camins. El primer, absolutament negligible, és l'evaporació directa. De la resta, una part s'infiltra al terreny i l'altra s'escola superficialment, generalment als rius. Aquesta darrera té un comportament altament no lineal. En la major part de les pluges, és inexistent; aquest és el motiu pel qual moltes de les pluges dels darrers anys no s'han vist pas reflectides en l'augment de volums als embassaments de les conques internes. Això trenca de soca-rel el concepte de coeficient d'escolament que es fa servir àmpliament en enginyeria hidrològica. Perquè l'escolament sigui important calen un conjunt de condicions, una pluja molt intensa amb un sòl poc desenvolupat i manca de vegetació i un pendent del terreny significatiu. Aquest conjunt d'elements es va encadenar per exemple a les inundacions catastròfiques del País Valencià d'octubre de 2024: la pluja de les muntanyes es va acumular de manera molt ràpida i va circular cap a la plana, on havia plogut molt menys, produint un efecte multiplicador que va desbordar les rieres.

L'aigua infiltrada encara pot seguir tres camins. Una part queda retinguda al sòl i és la part de la qual disposa la capa vegetal per crear les condicions necessàries perquè la fotosíntesi es pugui dur a terme mitjançant el procés conegut com a transpiració. Aquest és el mecanisme pel qual les plantes alliberen aigua en forma de vapor a través dels estomes de les seves fulles, i depèn de factors com la temperatura, la humitat, el vent i la llum solar, que poden fer augmentar o fer reduir la pèrdua d'aigua. En poques paraules, la transpiració és la responsable de mantenir boscos, pastures i part del terreny agrícola.

Quan la quantitat d'aigua (humitat) al sòl és superior a la que la planta pot captar, l'excedent segueix el seu camí vertical per l'acció de la gravetat. Aquesta aigua acaba acumulant-se en reservoris subterranis coneguts com a aqüífers. Una

altra part d'aquest excedent també es pot canalitzar cap a la superfície o cap a cursos fluvials, generant un increment del cabal del riu hores després de l'episodi de pluges, en un procés conegut com a escorrentiu hipodèrmic.

De manera general, l'aigua dels rius acaba en altres rius i, finalment, al mar. Si no s'interromp el seu moviment, per exemple amb un embassament, aquest camí el fa en unes poques hores, atesa que la velocitat de l'aigua als rius és de típicament alguns quilòmetres per hora. Una gran part de l'aigua dels aqüífers també es mou cap a altres aqüífers i cap al mar, però la velocitat de moviment és extremadament lenta, de manera que aquest moviment pot trigar anys, de vegades desenes o centenars.

Si pensem en els recursos hídrics en termes purament quantitativs, cal només dir que les aigües subterrànies poden brollar de manera natural per les fonts (que en molts casos s'exploten amb fins comercials o turístics), o bé mitjançant captacions com les mines o els pous (figura 2).

Però d'aquesta manera som lluny d'haver tancat el cicle hidrològic. Cal incloure en detall la interrelació entre els cossos d'aigües superficials i els aqüífers, cosa que farem més endavant, tot i que vull emfatitzar la implicació extraordinària que aquestes interrelacions tenen sobre el manteniment dels ecosistemes i de la vida en general al planeta. Tornarem sobre això.



FIGURA 2. Exemple d'un pou d'extracció en el moment de fer un assaig per estudiar els paràmetres hidràulics de l'aqüífer i la sostenibilitat de l'extracció. Fotografia: Dídac Sánchez.

3.2. Els aqüífers

Els aqüífers es defineixen com a formacions geològiques que posseeixen dues propietats: contenen aigua i són capaços de transmetre-la. El volum d'aigua emmagatzemat en un aqüífer s'obté com el producte del volum total del reservori multiplicat per la fracció de volum dels porus o de les fissures per les quals circula l'aigua, factor que es coneix pel nom de porositat, i en general suposen volums molt importants. Fem uns números. Si agafem un aqüífer de 200 km², amb una espessor de 30 m i una porositat del 25 %, i explotem cada any un 1 % del volum total per garantir la sostenibilitat, podríem abastir un 10 % de la població de l'Àrea Metropolitana de Barcelona.

Les aigües subterrànies són un recurs hídric estratègic a causa de la seva estabilitat i disponibilitat a llarg termini. A diferència de les aigües superficials, que poden ser ràpidament afectades per la variabilitat climàtica, com ara sequeres o inundacions, les aigües subterrànies ofereixen una font més constant i predictable d'aigua. Això és particularment crucial a regions àrides i semiàrides, on els aqüífers sovint representen l'única font d'aigua disponible durant els llargs episodis de sequera que se succeeixen de manera periòdica.

A nivell mundial, s'estima que aproximadament el 30 % de l'aigua dolça que es fa servir per cobrir la demanda prové de fonts subterrànies. Aquest percentatge encara és més gran en algunes regions on l'escassetat d'aigua superficial és crítica. Per exemple, a moltes parts de l'Àfrica, l'Àsia i l'Amèrica Llatina, les aigües subterrànies representen més del 50 % de l'aigua utilitzada per a consum humà, agricultura i indústria. En realitat, aquests números són molt discutibles, i corresponen només a les extraccions directes (fonts naturals, mines i pous). Si considerem que gran part de l'aigua captada dels rius són, fonamentalment, aportacions de les aigües subterrànies, com veurem d'aquí un moment, s'entén que alguns autors afirmen que les aigües subterrànies són la font directa o indirecta de més del 70 % de l'aigua consumida a escala mundial.

4. EL TANCAMENT DEL CICLE HIDROLÒGIC I EL PAPER DE LES AIGÜES SUBTERRÀNIES EN EL MANTENIMENT DE LES MASSES D'AIGUA SUPERFICIAL

4.1. Contribució de les aigües subterrànies al cabal base dels rius

Un primer element pel que fa a les interrelacions entre cossos d'aigua superficials i subterrànies és el cabal base d'un riu, que es defineix com el flux d'aigua que es manté durant períodes en què no hi ha aportacions significatives d'aigua superficial.

Aquest cabal és sostingut per la descàrrega subterrània cap al riu. A moltes conques hidrogràfiques, en zones semiàrides o àrides, el cabal base representa una porció significativa del flux total del riu durant els períodes secs. En termes generals, el temps de residència de l'aigua en un riu, que típicament és des de poques hores fins a uns quants dies, és generalment molt menor que el període entre dos episodis de pluja consecutius; així, els rius s'assecarien completament si no hi hagués aquesta aportació subterrània.

Les aigües subterrànies contribueixen al cabal base a través d'un procés conegut com a descàrrega directa. Això passa quan el nivell freàtic, que és la superfície superior de l'aigua en un aquífer, es troba per sobre del nivell de l'aigua al riu. En aquestes condicions, l'aigua subterrània aporta un flux continu que és aproximadament proporcional a la diferència entre aquests dos nivells. Aquest flux cap als rius és especialment important a regions on les precipitacions són estacionals o les fonts superficials d'aigua són limitades.

El cabal base d'un riu es pot veure afectat per una varietat de factors naturals o antròpics. Entre els primers s'hi inclouen la geologia de la conca, el clima, la topografia i la vegetació. Les conques amb sòls altament permeables i aquífers ben desenvolupats tendeixen a tenir un cabal base més alt, ja que permeten més infiltració d'aigua i una descàrrega subterrània sostinguda. D'altra banda, les activitats humanes, com l'extracció d'aigües subterrànies, l'agricultura intensiva i la desforestació, poden reduir significativament els cabal base, ja que tenen un efecte en la reducció del nivell freàtic i, per tant, en l'aportació d'aigua subterrània.

4.2. Contribució al manteniment d'aiguamolls

A molts aiguamolls i zones humides en general, les aigües subterrànies són la principal font d'aportació d'aigua. En general, els aiguamolls poden actuar com a zones de recàrrega on les aigües superficials penetren al subsol, però molt més sovint són zones de descàrrega on les aigües subterrànies emergeixen a la superfície. En aquest darrer cas, les aigües subterrànies, en passar per capes de sòl i roques, solen arribar a les zones humides amb menys contaminants, actuant com una font d'aigua neta. Això és essencial per mantenir la qualitat de l'aigua a l'aiguamoll i sostenir la vida aquàtica i terrestre.

Els aiguamolls alimentats per aigües subterrànies poden actuar com amortidors naturals, absorbint l'excés d'aigua durant pluges intenses i alliberant-la lentament, cosa que redueix el risc d'inundacions. Aquests mateixos aiguamolls poden suposar un element de protecció contra la desertificació.

4.3. *Contribució a la prevenció de la intrusió marina en zones costaneres*

A les zones costaneres hi ha una interrelació entre el nivell freàtic de l'aqüífer i el nivell del mar, així com de les oscil·lacions de tots dos. L'aigua subterrània fa una barrera de contenció a l'aigua salada, de manera que, a poques desenes o centenars de metres de la costa, l'aigua subterrània que es pot trobar als pous ja es dolça. Les variacions naturals o antròpiques als nivells de l'aqüífer suposen unes implicacions en la qualitat de l'aigua, amb variacions en la distribució de la salinitat de l'aigua subterrània en l'espai i el temps.

5. IMPACTE DE LES AIGÜES SUBTERRÀNIES ALS ECOSISTEMES ASSOCIATS

5.1. *Ecosistemes dependents de l'aigua subterrània*

Un dels beneficis menys coneguts de les aigües subterrànies és que sostenen una varietat d'ecosistemes que depenen, totalment o parcialment, d'elles per existir i funcionar. Aquests ecosistemes inclouen tant la vegetació riberenca com els boscos de ribera, així com zones associades a aiguamolls o fonts.

El cabal base dels rius, mantingut gràcies a l'aportació de les aigües subterrànies, és essencial per preservar la integritat ecològica dels ecosistemes aquàtics i de ribera (figura 3). Una funció fonamental del cabal base és regular la temperatura de l'aigua superficial, especialment en zones on la temperatura ambiental pot canviar significativament. Això és possible perquè l'aigua subterrània es troba protegida de les variacions tèrmiques diàries i estacionals, fet que fa que la seva temperatura sigui més estable que la de l'atmosfera. Per tant, a l'estiu, l'aigua subterrània, més fresca que la superficial, ajuda a mantenir una temperatura òptima en els rius, un aspecte imprescindible per a la supervivència d'espècies aquàtiques sensibles, com certs peixos i macroinvertebrats.

A més, el cabal base assegura un subministrament continu de nutrients i sediments, els quals són essencials per a la productivitat biològica dels rius i de les seves planes al·luvials. Aquests nutrients i sediments, transportats pel flux de l'aigua, sustenten la cadena alimentària aquàtica, des de les plantes i les algues fins als peixos i altres organismes de nivell superior. Sense el cabal base, la disponibilitat de nutrients podria disminuir, afectant la producció primària i, com a conseqüència, la biodiversitat de l'ecosistema.

El cabal base també té un paper fonamental en la dilució de contaminants als rius. Durant les temporades seques, quan el flux superficial disminueix i un alt percentatge de l'aigua prové de les estacions depuradores, la descàrrega d'aigües subterrànies contribueix a diluir la concentració de contaminants, mantenint així

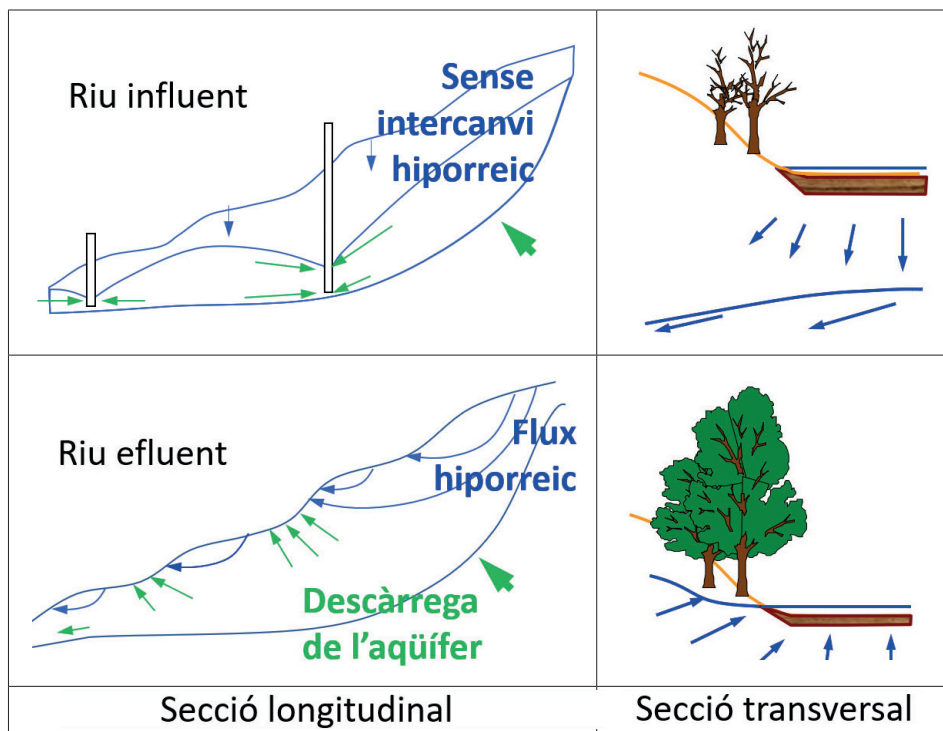


FIGURA 3. Impacte de la variació dels nivells de l'aqüífer en la descàrrega al riu i efecte sobre la vegetació de ribera. Quan la descàrrega s'inverteix, els efectes sobre els ecosistemes són molt dràstics, i poden arribar a ser irreversibles.

FONT: Elaboració pròpia.

la qualitat de l'aigua en nivells adequats per a la vida aquàtica i per als usos humans. La reducció del cabal base, per tant, pot provocar una concentració més gran de contaminants, fet que comporta la degradació dels hàbitats aquàtics i una pèrdua de biodiversitat.

En resum, un flux continu d'aigua als rius és essencial per preservar els hàbitats aquàtics, assegurar la qualitat de l'aigua i oferir les condicions necessàries per a la supervivència de diverses espècies. Una disminució d'aquestes aportacions podria tenir greus conseqüències per als ecosistemes aquàtics i les comunitats humanes que depenen dels rius. Sense l'aportació constant d'aigua subterrània, els rius podrien assecar-se durant l'època seca, afectant la biodiversitat aquàtica, la qualitat de l'aigua i el subministrament per a usos domèstics, agrícoles i industrials.

Pel que fa als aiguamolls que depenen de les aigües subterrànies, com els aiguamolls de l'Empordà, l'estany de la Ricarda o l'estany de Sils, és important asse-

nyalar que aquests ecosistemes actuen com esponges naturals, emmagatzemant aigua durant les estacions humides i alliberant-la lentament durant les seques. Això permet mantenir hàbitats essencials per a una gran diversitat d'espècies. A més, les zones humides exerceixen un paper en la regulació del clima local i en la millora de la qualitat de l'aigua, filtrant sediments i contaminants.

Un altre exemple són les fonts, que són punts on les aigües subterrànies emergeixen naturalment a la superfície. Les fonts poden formar ecosistemes únics que contenen espècies endèmiques i són vitals per a la flora i la fauna locals i per a les comunitats humanes. Aquests ecosistemes són extremadament sensibles als canvis en el nivell freàtic i es poden veure greument afectats per la sobreexplotació d'aigües subterrànies.

Els aqüífers costaners descarreguen al mar, aportant-hi un conjunt de nutrients que provoquen impactes biològics positius, com ara la millora de la productivitat primària, la presència i el creixement de bancs de peixos i la calcificació del corall.

5.2. Conseqüències de la reducció de les aportacions subterrànies a les masses d'aigua superficial

Un desequilibri en les extraccions d'aigües subterrànies pot modificar l'equilibri entre els cossos d'aigües superficials i els aqüífers. Això pot provocar una reducció dels cabals aportats a la superfície, cosa que pot tenir conseqüències devastadores per als ecosistemes aquàtics i riberencs, entre d'altres:

5.2.1. Dessecació de rius i rierols

Un dels impactes més directes de la reducció del cabal base és la dessecació de rius i rierols durant l'estació seca. Sense una aportació constant d'aigües subterrànies, molts rius poden reduir-se a petits fluxos o assecar-se completament, cosa que dona com a resultat la pèrdua d'hàbitats aquàtics i la interrupció dels cicles de vida de nombroses espècies. La dessecació de rius i rierols també afecta les comunitats humanes que depenen d'aquests cossos d'aigua per a l'abastament d'aigua potable, el reg agrícola i altres activitats econòmiques.

5.2.2. Pèrdua de biodiversitat

La reducció del cabal base pot conduir a la pèrdua de biodiversitat als ecosistemes aquàtics. Moltes espècies aquàtiques, incloent-hi peixos, amfibis i

macroinvertebrats, depenen d'un flux constant d'aigua per sobreviure. Les alteracions o discontinuïtats a les aportacions poden alterar les condicions de l'hàbitat, com ara la temperatura, la disponibilitat d'oxigen i la hidroquímica de l'aigua, cosa que pot fer els sistemes inhabitable per a algunes espècies. A més, la reducció del flux d'aigua pot fragmentar els hàbitats aquàtics, dificultant la migració i la reproducció de les espècies.

5.2.3. Degradació de zones humides

La reducció del flux d'aigua subterrània cap a les zones humides pot resultar en la seva dessecació, cosa que afecta no només la biodiversitat local, sinó també els serveis ecosistèmics que aquests proporcionen, com la regulació del clima, la recàrrega d'aqüífers, la millora de la qualitat de l'aigua i la presència de turisme. La pèrdua d'aiguamolls també pot augmentar la vulnerabilitat de les zones circumdants a inundacions i sequeres.

5.2.4. Augment de la contaminació

Finalment, la reducció d'aportacions també pot generar problemes de contaminació als rius. Sense un flux constant d'aigües subterrànies per diluir els contaminants, les concentracions de substàncies nocives a l'aigua poden augmentar, cosa que posa en perill la salut dels ecosistemes, la vida aquàtica i la salut humana. Aquest problema és particularment greu en àrees urbanes i industrials, on la contaminació de fonts puntuals i difuses és una preocupació constant.

6. EL PAPER DELS AQÜÍFERS EN LA GESTIÓ SOSTENIBLE MODERNA

6.1. La qualitat de les aigües subterrànies

La qualitat de les aigües subterrànies és un aspecte crític. De manera general, les aigües subterrànies són de molt més bona qualitat que les superficials, a causa d'una combinació de factors: les característiques geològiques del terreny, el temps de residència de l'aigua al subsol i les condicions geoquímiques. Les activitats antròpiques poden deteriorar aquesta qualitat, afegint-hi un conjunt de contaminants deguts a les activitats productives (agricultura, ramaderia, indústria i turisme), l'aportació d'aigües residuals o els lixivis d'abocadors, entre d'altres.

La qualitat de l'aigua ha de ser gestionada i protegida per garantir-ne la disponibilitat i la seguretat per al consum humà, l'agricultura, la indústria i la preservació

dels ecosistemes. La monitorització constant i la mitigació de les fonts de contaminació són essencials per mantenir la qualitat d'aquest recurs natural.

Però, potser de nou per la seva invisibilitat, existeixen un conjunt de prejudicis. Un de molt habitual és afirmar que «les aigües freàtiques de l'Àrea Metropolitana no són potables». És clar que no! Tampoc ho són les dels rius Llobregat, Ter o Ebre abans de ser potabilitzades. En principi tota aigua pot ser potabilitzada, i es tracta només d'un tema de cost. Les aigües subterrànies són gairebé sempre de més bona qualitat que les superficials, i per tant més barates de tractar.

Les aigües subterrànies experimenten un conjunt de processos durant el seu moviment dins l'aqüífer que, en general, suposen una reducció de les concentracions dels contaminants. L'atenuació natural es refereix al conjunt de processos físics, químics i biològics que redueixen de manera natural la concentració i la toxicitat dels contaminants presents a les aigües subterrànies. Els principals mecanismes que intervenen en l'atenuació natural inclouen: 1) difusió i dispersió hidrodinàmica, que són processos regits pels gradients de concentracions i que suposen una reducció en les concentracions amb un augment del volum afectat; 2) adsorció, que suposa que alguns contaminants s'adhereixen a la matriu de l'aqüífer, evitant així que continuïn desplaçant-se amb l'aigua; 3) biodegradació, catalitzada pels microorganismes presents al subsol, que poden utilitzar alguns contaminants com a font d'energia, degradant-los i transformant-los en compostos menys nocius o fins i tot innocus; i 4) diferents reaccions químiques (precipitació-dissolució, oxidació-reducció, hidròlisi...) que poden transformar els contaminants en formes menys tòxiques o immobilitzar-los.

Aquest conjunt de processos es pot modelar matemàticament amb un sistema d'equacions diferencials en derivades parcials acoblades, de manera que es pot predir amb una certa precisió (no total per la manca de dades a causa de la comentada invisibilitat de les aigües) el destí dels contaminants al llarg de l'espai i del temps, així com dissenyar sistemes de remediació activa en casos concrets. Cal comentar que aquestes equacions són força complexes i que els mètodes de solució impliquen l'ús d'eines matemàtiques avançades, i en alguns casos calen ordinadors potents.

6.2. La sobreexplotació dels aquífers

La capacitat de les aigües subterrànies per actuar com a reserva d'aigua durant períodes d'escassetat ha portat a la seva sobreexplotació a moltes regions. L'extracció excessiva d'aigua subterrània sense una recàrrega adequada ha donat lloc a una sèrie de problemes greus. El primer efecte i més immediat de la

sobreexplotació és la reducció generalitzada dels nivells freàtics. D'aquesta manera, i com ja s'ha dit abans, s'altera l'equilibri amb els cossos d'aigua superficial, i es redueix l'aportació d'aigua subterrània, amb els efectes ja esmentats. Un altre fenomen és la intrusió marina en aqüífers costaners, amb la següent contaminació dels pous més propers a la costa, contaminació que triga molts anys en revertir-se, fins i tot si es reverteixen les causes que l'han provocada.

A més, la sobreexplotació té altres conseqüències, algunes de locals, com la manca de sostenibilitat dels recursos hídrics, o la subsidència del terreny, reportada a molts indrets del món (alguns exemples ben coneguts són Ciutat de Mèxic, Califòrnia, grans àrees a la Xina o la ciutat de Venècia). Però també té un efecte global: en aquest moment s'estima que el recurs subterrani s'explota més ràpidament que no es recarrega en vora 300 km³ anuals (Wada, 2016). Si dividim aquest valor per la superfície total de mars i oceans, ens surt que aquesta sobreexplotació contribueix a l'augment del nivell del mar de l'ordre de 0,8 mm/any en mitjana, una aportació significativa a l'augment del nivell dels oceans que contribueix a les moltes i diverses causes associades al canvi climàtic.

6.3. *La integració amb el desenvolupament dels recursos no convencionals*

El cicle de l'aigua convencional i la gestió corresponent dels recursos hídrics s'han vist modificats en els darrers anys amb la incorporació de recursos no convencionals, incloent-hi la dessalinització d'aigua marina i la regeneració, entre d'altres. De la primera hi ha poc a dir, es tracta d'una solució industrial que dona molta seguretat respecte a la òbvia disponibilitat permanent d'aigua de mar, però que té conseqüències molt infravalorades: és una solució molt cara que aviat veurem reflectida en la nostra factura mensual atès que ha estat l'aposta dels nostres governants als darrers anys, i que pot anar a pitjor si tornem a tenir una crisi energètica en el futur semblant a la de 2022. Però pitjor encara, és la solució amb un peatge ambiental més gran, ja que depèn d'un subministrament constant d'energia que, com tots sabem, suposa un augment de les emissions de gas d'efecte d'hivernacle, per no parlar de la gestió del rebuig, un aspecte en el qual no tenim una solució clara. Es pot dir, per tant, que és la pitjor solució des dels punts de vista econòmic i de sostenibilitat.

La regeneració és la solució en la qual creiem la majoria de científics implicats en la gestió dels recursos. Hi ha molt a comentar sobre la regeneració, però jo volia lligar-la amb els aqüífers, amb les tècniques de regeneració que més es fan servir a escala mundial, tot i que aquí estem a les beceroles. Per això, cal parlar d'algunes de les línies de recerca del Grup d'Hidrologia Subterrània de la UPC.

7. ALGUNS DELS ÀMBITS DE RECERCA LLIGATS A LES AIGÜES SUBTERRÀNIES

Com en totes les ciències, cada tema i subtema és susceptible d'incorporar recerca avançada de primer nivell. Aquí vull centrar-me en dos aspectes als quals he dedicat una gran part de la meva carrera recercadora.

7.1. La recàrrega gestionada d'aqüífers lligada a la reutilització i al balanç global d'aigua

La recàrrega gestionada d'aqüífers (RGA) es defineix com la infiltració intencionada d'aigua als aquífers, com una estratègia per ajudar a augmentar les reserves d'aigua subterrània en àrees on la recàrrega natural és insuficient o bé on els aquífers han estat sobreexplotats, o simplement incloent el concepte en un context d'economia circular, aprofitant l'aigua d'una forma oportunista. Aquest procés implica la injecció d'aigua superficial, aigua tractada o aigua de pluja als aquífers mitjançant pous d'injecció, basses d'infiltració o altres tècniques. Aquestes aigües experimenten un conjunt de processos d'atenuació natural en el seu trànsit fins a un punt de captació situat a una distància prefixada que permeti mantenir uns temps de residència adients, usualment d'un mínim de tres mesos (figura 4).

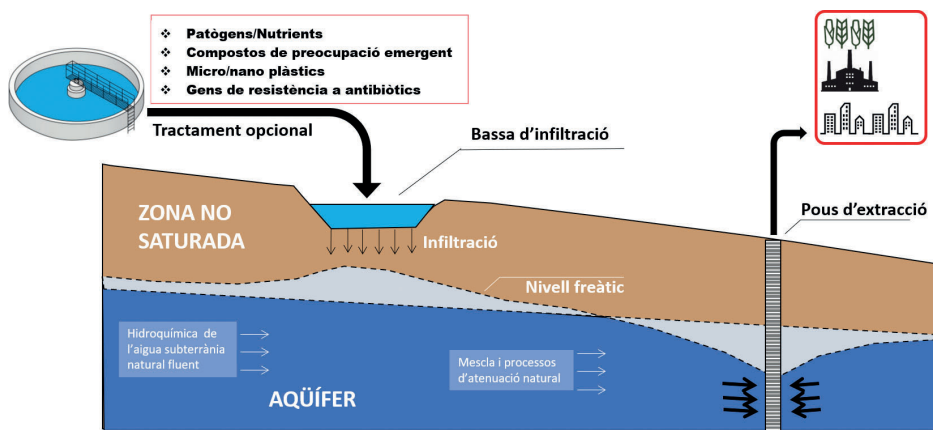


FIGURA 4. Esquema general d'un sistema de recàrrega gestionada d'aqüífers amb bassa superficial. L'aigua infiltrada, procedent per exemple d'una estació depuradora d'aigües residuals, experimenta un conjunt de processos transformadors que donen com a resultat un augment significatiu de la qualitat de l'aigua, previ a quan és captada.

FONT: Paula Rodríguez-Escales.

Entre els principals avantatges de la recàrrega gestionada hi ha la capacitat d'augmentar l'emmagatzematge d'aigua subterrània, però també la de mantenir o elevar els nivells freàtics, cosa essencial per a l'estabilitat dels ecosistemes dependents d'aigües subterrànies, com els aiguamolls, per assegurar un subministrament constant d'aigua en èpoques de sequera, i per prevenir o mitigar la intrusió salina a aqüífers costaners, o la subsidència del terreny.

L'ús d'aigua regenerada provinent de les estacions depuradores d'aigües residuals en la recàrrega d'aqüífers és una pràctica cada cop més rellevant. Aquesta estratègia permet reutilitzar l'aigua, reduint la pressió sobre les fonts naturals i disminuint l'impacte ambiental. L'aigua regenerada, després d'un tractament avançat que elimina una gran part de contaminants i patògens, es pot tornar a introduir als aqüífers, contribuint així a la recàrrega d'aquests cossos hídrics. Aquesta pràctica no tan sols millora la disponibilitat d'aigua, sinó que també fomenta la sostenibilitat pel fet de promoure un cicle tancat de l'aigua, on el recurs és reciclat i reutilitzat de manera eficient. En el context del canvi climàtic i l'augment de la demanda d'aigua, la recàrrega gestionada d'aqüífers combinada amb l'ús d'aigua regenerada és una eina vital per garantir la seguretat hídrica a llarg termini. La reutilització redueix el dèficit d'extraccions, col·laborant en la reducció dels vessaments d'aigua al mar.

En un esquema de RGA, la qualitat de l'aigua millora gràcies a la combinació de reaccions químiques i biològiques durant el transport de l'aigua prèviament infiltrada. Aquesta aigua es pot recuperar aigües avall del punt d'infiltració un cop fet un estudi hidrogeològic sobre la signatura química de l'aigua original, les condicions del medi pel qual circula (fonamentalment la mineralogia) i elements hidrològics, com el temps de residència, en una feina de modelatge del flux subterrani i del transport reactiu de les substàncies dissoltes, amb elements de microbiologia, que permet de conèixer en detall les reaccions químiques catalitzades per microorganismes que hi tenen lloc. La nostra recerca ha permès comprovar que la RGA permet reduir a pràcticament zero la matèria orgànica, els indicadors patogènics, els contaminants de preocupació emergent, els nanoplàstics i els gens de resistència als antibiòtics. Això es produeix lligat a les variacions en l'estat redox del sistema i és catalitzat per un conjunt de microorganismes. En aquests moments la nostra recerca se centra en l'estudi de la formació i el creixement de biofilms com a element que condiciona la degradació d'aquests elements no desitjats. Les formulacions dels processos de degradació són, novament, força complexes, amb l'afegit dels processos que tenen lloc a diferent escales espacials i temporals.

A causa d'aquests efectes beneficiosos, la RGA és avui àmpliament considerada com una eina útil per garantir una aigua segura i de bona qualitat, com demostren la progressiva implementació d'aquests esquemes al món, començant pels

pioners, Israel, i amb grans àrees de recàrrega existents a països com Austràlia, Estats Units o Alemanya, per exemple. També existeix un conjunt de projectes a Catalunya (figura 5).

Tanmateix, per garantir l'èxit de qualsevol projecte de RGA calen alguns elements essencials, com 1) una font d'aigua per a la recàrrega, 2) un aquífer adequat per emmagatzemar i recuperar aigua, 3) terreny disponible per construir les instal·lacions, 4) una demanda suficient per a l'aigua recuperada i 5) la capacitat científica i tecnològica per gestionar eficaçment aquest projecte (Dillon *et al.*, 2009). Malgrat això, aquesta llista de factors sembla involucrar només aspectes d'infraestructura i gestió, ignorant les limitacions legals, socials, econòmiques i polítiques que poden complicar significativament, i fins i tot impedir, la posada en marxa d'una nova instal·lació.

La RGA té encara més avantatges. Ara mateix, a Catalunya l'aigua regenerada s'aboca directament al riu Llobregat per poder-la captar aigües avall. Aquest sistema és vàlid en un context de sequera extrema, però cal pensar què farem amb aquesta aigua quan torni a ploure: la llencem al mar?, o la posem al riu, quan aquest ja portarà un cabal suficient? Cal plantejar-se la possibilitat d'emmagatzemar aquesta aigua regenerada per poder-la fer servir quan arribi la propera sequera. És en aquest sentit quan cal plantejar-se introduir-la i emmagatzemar-la a aquífers propers a l'àrea on eventualment caldrà. És en aquest moment quan podrem dir que som a un context de circularitat i plenament sostenible.



FIGURA 5. Bassa d'infiltració (RGA) a Sant Vicenç dels Horts.
Fotografia: Xavier Sanchez-Vila.

7.2. Els desafiaments de la gestió d'aigües subterrànies des d'una visió de la hidrogeologia estocàstica

La gestió de les aigües subterrànies presenta una sèrie de desafiaments a causa de la seva naturalesa oculta i la complexitat de les dinàmiques hidrogeològiques. A diferència de les aigües superficials, que són visibles i relativament fàcils de mesurar, les aigües subterrànies requereixen un coneixement especialitzat i eines avançades per tal de ser monitoritzades i gestionades de manera efectiva.

Un dels principals desafiaments és la manca de dades precises sobre els aqüífers, incloent-hi l'extensió, la capacitat d'emmagatzematge, les taxes de recàrrega i la qualitat de l'aigua. Sense aquesta informació, és difícil desenvolupar polítiques de gestió efectives que equilibrin l'extracció amb la recàrrega natural. A més, la impossibilitat de fer un monitoratge continu i exhaustiu contribueix a fer que tot estudi hidrogeològic sigui incert per natura. Quan això succeeix, que deixeu-me dir que és sempre, el tractament més correcte del problema rau en la hidrogeologia estocàstica.

La hidrogeologia estocàstica, per definir-la de manera molt abreujada, consisteix a aplicar conceptes de probabilitat i l'estadística als processos hidrogeològics. En els sistemes naturals, l'heterogeneïtat, entesa com la variabilitat en les propietats geològiques, és freqüent però difícil de predir amb precisió. Els mètodes estocàstics ens permeten modelar i fer prediccions sobre aquests sistemes tractant propietats com la conductivitat hidràulica, la porositat o la recàrrega com a funcions aleatòries espacials (FAE) o camps aleatoris. Una FAE és un element amb una component dual, on a cada punt tenim una variable aleatòria (de les que s'estudien en estadística), però que si es mira en conjunt es comporta com una funció espacial (de les que es treballen en matemàtiques).

La primera pregunta que sorgeix és: per què utilitzar mètodes estocàstics? El motiu que hi ha al darrere és que el subsol és inherentment heterogeni i incert: les propietats del sòl i de les roques varien significativament, fins i tot a petites escales, i també les mesures directes de propietats com la conductivitat hidràulica són limitades i escasses, de manera que els models deterministes exactes no són factibles. La hidrogeologia estocàstica abraça aquesta incertesa en el sentit que, en lloc d'intentar especificar valors exactes per a les propietats, assumirem que les propietats varien segons unes distribucions estadístiques predefinides o que es poden estudiar a nivell global. Mitjançant la modelització de la distribució de valors puntuals, podem fer prediccions sobre el flux d'aigua subterrània i el transport de soluts, però sempre en termes probabilistes.

Tornant al concepte de FAE, les propietats clau d'un camp aleatori inclouen la mitjana, la variància i l'estructura de correlació. Aquesta estructura defineix com es relacionen els valors en diferents ubicacions, amb la correlació que sovint

disminueix amb la distància, el que significa que els valors propers són més semblants que els valors allunyats. L'estructura de correlació es modela normalment amb una funció de distància anomenada variograma, que descriu de manera matemàtica com es correlacionen els valors d'una propietat en dos punts en funció de la distància entre ells. La geoestadística és el camp que s'ocupa d'aquest tipus d'anàlisis espacials i proporciona eines com el mètode de Krige, per estimar valors en llocs no mesurats a partir de dades properes, o el mètode de simulació de Monte Carlo, que a partir de la generació de múltiples realitzacions d'un camp aleatori que representen possibles configuracions del sistema, totes igualment versemblants, permet analitzar el conjunt de resultats d'un model de flux o transport d'aigua subterrània i tractar-los mitjançant tècniques estadístiques simples, com l'histograma o els moments.

Les equacions de flux d'aigua subterrània i transport de contaminants, com ara la llei de Darcy i l'equació d'advecció-dispersió, es poden adaptar per a models estocàstics. En aquestes equacions, paràmetres com la conductivitat hidràulica i la porositat es representen com a camps aleatoris. Les solucions resultants proporcionen informació probabilística sobre els cabals, les direccions i la propagació del contaminant.

La hidrogeologia estocàstica ha tingut aplicacions amb resultats molt convincts en diferents àmbits, com l'escalat i la definició de paràmetres efectius per entendre el comportament de sistemes a escala regional basat en mesures a escala local. L'heterogeneïtat natural complica les prediccions del model, perquè les propietats poden variar en escales més petites que la mida de la quadrícula del model numèric. Així, els mètodes d'augment d'escala tenen com a objectiu definir propietats efectives (mitjanes) per a models a gran escala que encara capturen el comportament essencial de l'heterogeneïtat a petita escala. El resultat no és unívoc i depèn totalment de la variable que estiguem estudiant en cada cas.

La hidrogeologia estocàstica és també vital per predir com es propaguen els contaminants a les aigües subterrànies. Com que no podem mesurar tots els punts d'un plomall de contaminants, els models estocàstics ajuden a estimar la probable propagació de contaminants, inclosos els «punts calents» d'alta concentració. Una de les contribucions més importants de la hidrogeologia estocàstica ha estat la possibilitat de trobar equacions escalades, és a dir, vàlides a escales superiors a les de les observacions. El problema creix quan intentem incorporar processos complexos i no lineals de transport reactiu a aquestes equacions (figura 6).

Finalment, les avaluacions de risc sovint requereixen estimacions del flux d'aigua subterrània i del transport de soluts que incorporin incerteses. En proporcionar prediccions probabilístiques, la hidrogeologia estocàstica ajuda a avaluar els riscos per a les fonts d'aigua potable i a gestionar els recursos sota incertesa.

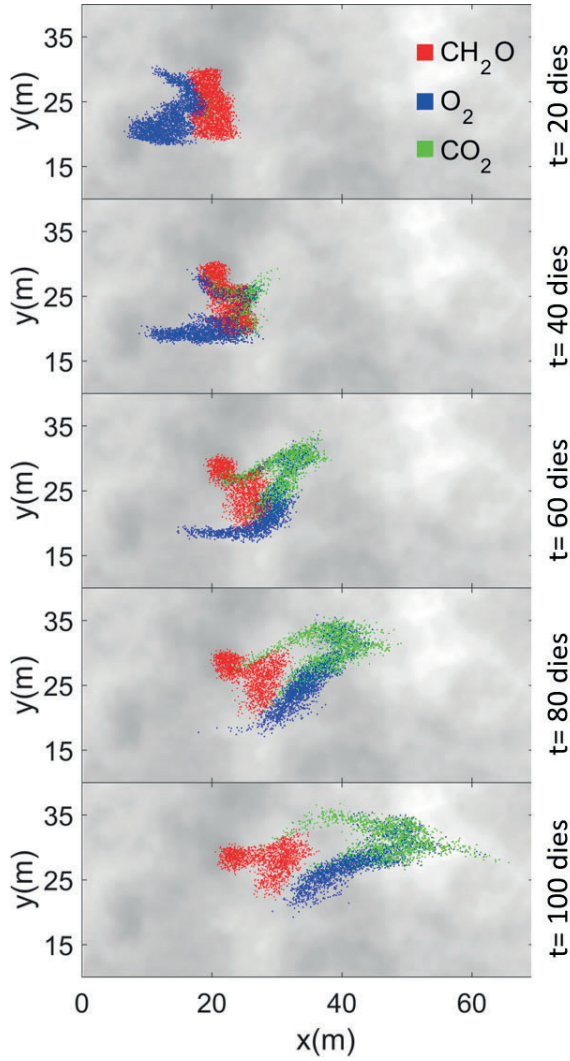


FIGURA 6. Exemple de transport reactiu multicomponent en medi heterogeni; els plumalls de reactius i reactants segueixen una forma molt diferent de la que es pot predir suposant medi homogeni (que serien el·lipses).
 FONT: Adaptat de Solé-Marí *et al.*, 2017.

7.3. L'ús de models numèrics per a la gestió dels aqüífers sota incertesa

Els models numèrics són eines essencials per a la gestió de les aigües subterrànies, ja que permeten simular i predir el comportament dels aqüífers sota diverses condicions. Els models són representacions matemàtiques dels sistemes hidrogeològics que integren dades sobre la geologia, la hidrologia, l'ús del sòl, l'extracció d'aigua i la recàrrega, entre altres factors (figura 7). Mitjançant models numèrics, es poden avaluar diferents escenaris de gestió, identificar riscos potencials i desenvolupar estratègies sostenibles per a l'explotació i la conservació de les aigües subterrànies.

Un cop configurat, el model numèric s'utilitza per simular diferents escenaris. Per exemple, es pot avaluar com respondria l'aqüífer a un augment en l'extracció d'aigua, a canvis en les precipitacions a causa del canvi climàtic o a la implementació de tècniques de recàrrega gestionada. Aquestes simulacions permeten predir el comportament futur de l'aqüífer i ajuden a identificar possibles problemes, com ara la sobreexplotació, la disminució dels nivells freàtics o la intrusió salina en àrees costaneres.

Els models numèrics també es poden fer servir per optimitzar la gestió de les aigües subterrànies. Això implica la identificació d'estratègies d'extracció que maximitzin l'ús sostenible del recurs, minimitzant impactes negatius com la degradació de la qualitat de l'aigua, la disminució de cabals base a un riu o l'aportació a un aiguamoll. Els gestors poden utilitzar els resultats del model per prendre decisions informades sobre la ubicació i la quantitat d'extracció permesa, la necessitat de recàrrega gestionada o la protecció de zones de recàrrega.

L'ús de models numèrics no és un procés estàtic. Els models numèrics s'han d'actualitzar regularment amb noves dades obtingudes del monitoratge continu de l'aqüífer. Aquesta actualització permet que el model reflecteixi amb precisió les condicions actuals del sistema, millorant la precisió de les prediccions i l'efectivitat de les estratègies de gestió.

Els models numèrics no proporcionen una certesa. Existeixen diverses fonts d'incertesa, que moltes vegades es classifiquen en epistèmiques i aleatòries. Les darreres són valors que són incerts per natura, i que no es poden predir de manera exacta; per exemple, la pluja esperada durant el proper any. Les incerteses epistèmiques són ben diferents. Es tracta de valors que no es coneixen, simplement, perquè no s'han pogut mesurar; es podrien mesurar, però no podem ser totalment exhaustius per un problema de cost, de manera que és possible fer tasques per optimitzar el coneixement d'un sistema amb un pressupost raonable. Aquest element es pot fer servir, per exemple, per dissenyar les xarxes de control hidrogeològic.

En resum, els models numèrics són eines poderoses per a la gestió de les aigües subterrànies, ja que permeten una comprensió profunda del comportament

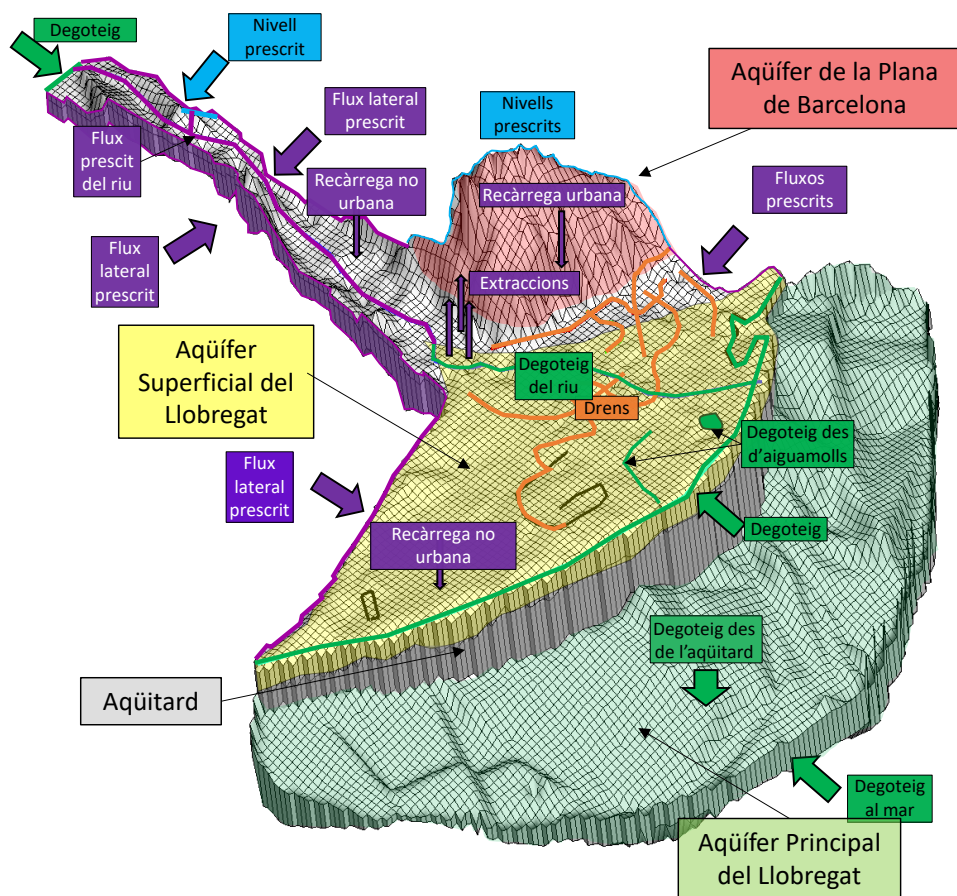


FIGURA 7. Model numèric del delta del Llobregat, amb discretització tridimensional i condicions de contorn governades pels elements del territori.

FONT: Daniel Fernández-Garcia.

de l'aqüífer i l'avaluació de diferents estratègies de maneig. En integrar dades i simular escenaris futurs, aquests models faciliten la presa de decisions informades, promovent l'ús sostenible del recurs. Actualment, els models numèrics estan derivant cap a la construcció de bessons digitals, que són rèpliques virtuals precises dels aqüífers, que en permeten la monitorització, la simulació i l'anàlisi en temps real. Els bessons digitals permeten optimitzar el rendiment dels aqüífers entesos com a sistemes complexos ja que simulen diverses condicions i escenaris.

8. CONCLUSIONS I REFLEXIONS FINALS

Les aigües subterrànies són un recurs fonamental per a la gestió sostenible dels recursos hídrics i el manteniment dels cabals base dels rius i els aiguamolls i els ecosistemes associats. A través de la seva contribució al cabal base, les aigües subterrànies asseguren la continuïtat dels fluxos dels rius o la mateixa existència dels aiguamolls durant les temporades seques, cosa que és vital per a la biodiversitat aquàtica, la qualitat de l'aigua i el subministrament de aigua per a usos humans.

Tot i això, la sobreexplotació de les aigües subterrànies i l'alteració de les zones de recàrrega estan posant en perill aquest recurs crític i els ecosistemes que en depenen. Per abordar aquests reptes, cal adoptar un enfocament integral i sostenible per a la gestió de les aigües subterrànies, que inclogui el monitoratge continu, la protecció de les zones de recàrrega, la regulació de l'extracció, l'augment de recursos en un context de circularitat i l'educació pública.

En un context de canvi climàtic, creixement poblacional i augment de la demanda d'aigua, la gestió sostenible de les aigües subterrànies s'enfronta a desafiaments cada cop més grans. El canvi climàtic està alterant els patrons de precipitació, cosa que afecta la recàrrega natural dels aquífers i augmenta el risc de sequeres. Alhora, el creixement poblacional i el desenvolupament econòmic estan incrementant la demanda d'aigua per a consum humà (també lligada a l'estacionalitat de la població deguda al turisme), agricultura i indústria, fet que exerceix una pressió addicional sobre els recursos hídrics subterranis.

En aquest context, és clau desenvolupar enfocaments innovadors i adaptatius per a la gestió de les aigües subterrànies que considerin les incerteses associades amb el canvi climàtic i les dinàmiques socioeconòmiques. Això inclou un conjunt de reptes científics per millorar la disponibilitat d'aigua en un context de manca general de recursos i avaluar la qualitat d'aquests nous recursos. La recàrrega gestionada d'aquífers és un element indispensable pel futur de la seguretat hídrica incorporant conceptes de sostenibilitat i circularitat, lluny dels sistemes més simples, com la instal·lació de grans infraestructures, que suposen exactament anar en direcció contrària. Hem d'avançar en el coneixement científic dels processos biogeoquímics al subsol per poder donar garanties de les bondats de la RGA i minimitzar les reticències de la població i les autoritats davant d'un element invisible o, pitjor, invisibilitzat.

AGRAÏMENTS

Durant la meua trajectòria he tingut la sort de comptar amb excel·lents professors, col·legues i estudiants que m'han ajudat a avançar i a arribar fins aquí. La meua admissió com a membre numerari de l'Institut d'Estudis Catalans no m'honora

només a mi, sinó també totes aquestes persones. El treball que he presentat és un conjunt de coneixements adquirits, contínuament en evolució, permanentment en dubte i sempre buscant problemes nous, de complexitat creixent, i amb un únic nexa en comú: la curiositat científica multidisciplinària. La meua feina recercadora actual la faig en el marc del Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, i antigament al Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya. Vull fer esment de Jordi Corominas, membre proponent de l'IEC, antic professor meu amb el qual mai he treballat en projectes de recerca, però a qui sempre he admirat per la seva doble vessant docent i recercadora. Gràcies a Jesús Carrera, que em va ensenyar a qüestionar-me totes les coses que se suposaven sabudes i, d'aquesta manera, em va fer un científic. Gràcies a tots els membres del Grup d'Hidrologia Subterrània, capaços de pensar i fer coses que jo mai havia pensat ni aspirat a fer. Gràcies al *caro professore* Alberto Guadagnini, per vint-i-cinc anys d'amistat i de vides paral·leles, i a la resta de professors, companys i estudiants, els noms dels quals seria llarg d'esmentar però no per això menys importants, amb qui he après a pensar, analitzar i discutir; sé que totes aquestes persones han après de mi, però segurament no saben fins a quin punt aprenc cada dia d'ells.

Finalment, dono gràcies la Tere, l'Alba i en Dídac per fer-me obrir els ulls cada dia i per fer-me entendre quines són les coses importants de debò.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- DILLON, P.; STUYFZAND, P.; GRISCHEK, T.; LLURIA, M. [et al.] (2019). «Sixty years of global progress in Managed Aquifer Recharge». *Hydrogeology Journal*, 27, 1–30. En línia: <<https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>>.
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H. Lee and J. Romero (ed.)]. Ginebra (Suïssa): IPCC, p. 35-115. En línia: DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- SOLÉ-MARÍ, G.; FERNÁNDEZ-GARCIA, D.; RODRÍGUEZ-ESCALES, P.; SANCHEZ-VILA, X. (2017). «A KDE-based random walk method for modeling reactive transport with complex kinetics in porous media». *Water Resources Research*, 53 (11), 9019-9039. En línia: <<https://doi.org/10.1002/2017WR021064>>.
- WADA, Y. (2016). «Impacts of groundwater pumping on regional and global water resources». A: *Terrestrial water cycle and climate change: Natural and human-induced impacts*, [Q. TANG, T. OKI (ed.)]. American Geophysical Union. En línia: <<https://doi.org/10.1002/9781118971772.ch5>>.
- WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. (1985). «Understanding the drought phenomenon: The role of definitions». *Water International*, 10(3):111–120.

