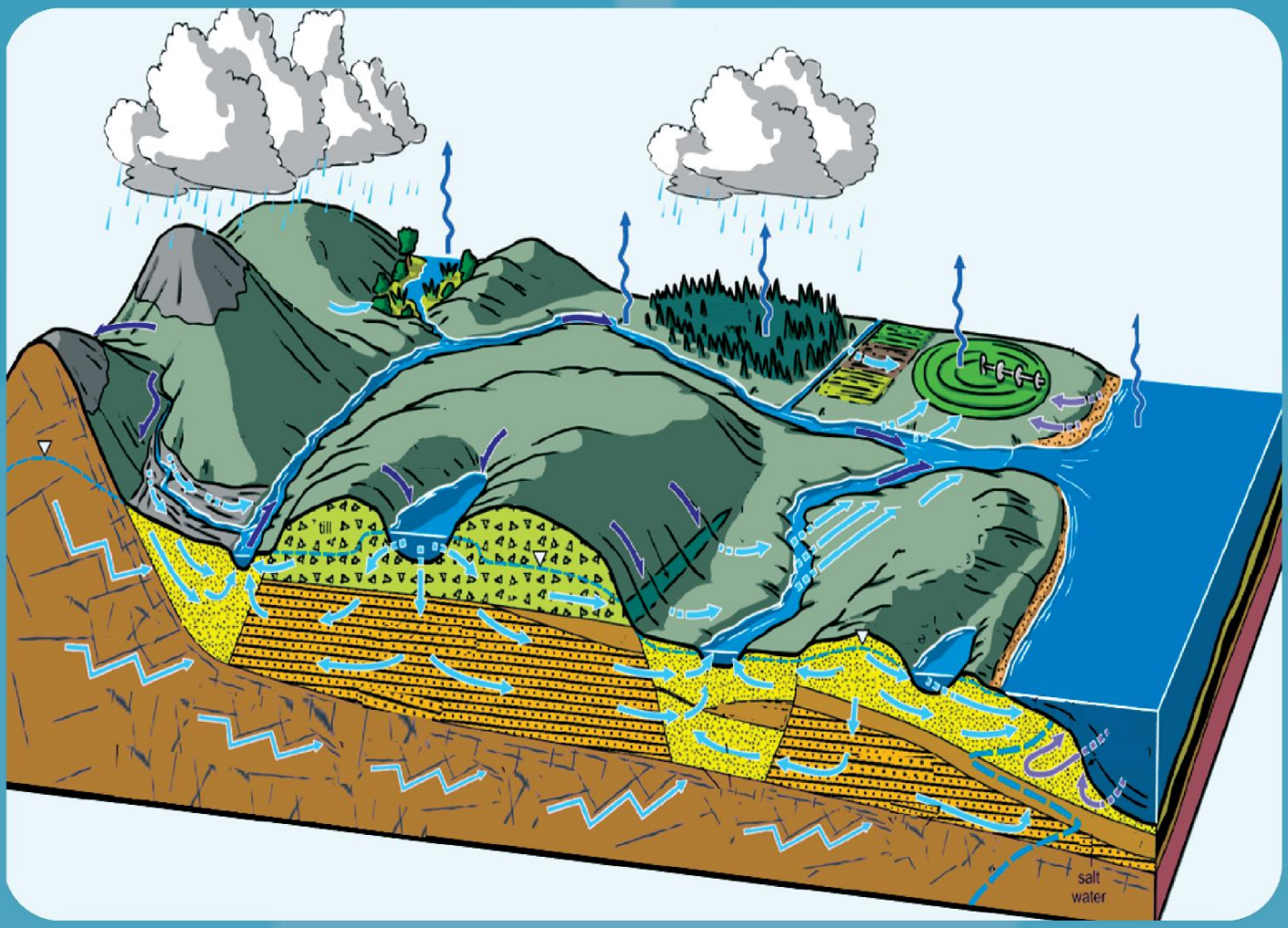


L'aigua subterrània en el cicle hidrològic

Una introducció a la reserva d'aigua dolça més important de la Terra

Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry,
Warren Wood i Douglas Mackay
Traducció: Josep Mas-Pla

THE GROUNDWATER PROJECT

L'aigua subterrània en el cicle hidrològic

Una introducció a la reserva d'aigua dolça més important de la Terra

The Groundwater Project

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Eileen Poeter
Colorado School of Mines, Golden,
Colorado, USA

Ying Fan
Rutgers, The State University of New Jersey,
New Brunswick, New Jersey, USA

John Cherry
G360 Institute for Groundwater Research,
Guelph, Ontario, Canada

Warren Wood
Michigan State University, East Lansing,
Michigan, USA

Douglas Mackay
University of California, Davis,
California, USA

Traductor: Josep Mas-Pla
Universitat de Girona
Institut Català de Recerca de l'Aigua

L'aigua subterrània en el cicle hidrològic

Una introducció a la reserva d'aigua dolça més important de la Terra

The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Tots els drets reservats. Aquesta publicació està protegida pel copyright. No està permesa la reproducció total o parcial d'aquest llibre, en cap mena de mitjà, sense el permís escrit dels autors. Per sol·licitar permís, contacteu mitjançant el correu electrònic: permissions@gw-project.org↗. La seva reproducció i distribució amb finalitat comercial està estrictament prohibida.

Les publicacions del *GW-Project* es poden obtenir lliurament a gw-project.org↗. Tothom pot usar i compartir els enllaços de gw-project.org↗. No està permès distribuir les publicacions ni material editat per *GW-Project* des de cap altre lloc web, ni vendre'n còpies a terceres persones o entitats.

Copyright © 2020 Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood, Douglas Mackay (Els Autors)

Publicat pel *Groundwater Project*, Guelph, Ontario, Canadà, 2020.

Poeter, Eileen.

Groundwater in our water cycle – getting to know Earth's most important fresh water source / Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood, Douglas Mackay – Guelph, Ontario, Canada, 2020. 136 pages. ISBN: 978-1-7770541-1-3

Traductor: Josep Mas-Pla, Universitat de Girona, Institut Català de Recerca de l'Aigua. 2021. 159 pàgines

ISBN: 978-1-77470-028-0

Consideri subscriure's a la llista de distribució del *Groundwater Project* per a informar-se de les noves publicacions, així com de les possibilitats de participar-hi. Afegint-se a la llista de correu electrònic, contribueix al creixement de la comunitat global dedicada a les aigües subterrànies. Signeu↗.

Citació: Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood, Douglas Mackay, 2020, L'aigua subterrània en el cicle hidrològic. Una introducció a la reserva d'aigua dolça més important de la Terra↗. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.

Editors en cap: John Cherry i Eileen Poeter
Consell: John Cherry, Stephen Moran, Everton de Oliveira i Eileen Poeter
Comitè de Direcció: J. Cherry, A. Freeze, P. Hsieh, I. Kalwij, D. Mackay, St. Moran, E. de Oliveira, B. Parker, E. Poeter, Y. Fan, W. Wood, i Y. Zheng.
Imatge de portada: Adaptada de Hinton (2014)
Traducció al català: Josep Mas-Pla (2021).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Dedicatòria

Aquest llibre està dedicat als investigadors/investigadores, professionals i docents que ens han precedit i ens han ensenyat tot el que coneixem sobre l'aigua subterrània, i també a totes aquelles persones que aspiren a crear un futur sostenible pel nostre estimat, i únic, planeta Terra.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Taula de contingut

DEDICATÒRIA ..... **IV**
TAULA DE CONTINGUT ..... **V**
PRÒLEG – EL PROJECTE *GROUNDWATER* ..... **VII**
PREFACI ..... **VIII**
PREFACI A LA VERSIÓ CATALANA ..... **IX**
AGRAÏMENTS ..... **X**
1 PREÀMBUL **1**
2 PROPÒSIT **1**
3 LES CANONADES DE LA TERRA **3**
4 LA PART SUBTERRÀNIA DEL CICLE HIDROLÒGIC **11**
4.1 LA PERSPECTIVA SUPERFICIAL 12
4.2 LA PERSPECTIVA PROFUNDA 15
La connexió entre l'aigua subterrània i el paisatge *18*
La connexió entre l'aigua subterrània i els rius *20*
La connexió entre l'aigua subterrània i les fonts *26*
Aigua subterrània i captacions *30*
4.3 LA PERSPECTIVA REGIONAL 32
Aqüífers i nivells confinants *33*
L'emmagatzement d'aigua als aqüífers *37*
4.4 LA PERSPECTIVA CONTINENTAL 39
5 EL CONCEPTE DE TEMPS DE RESIDÈNCIA **42**
6 L'AIGUA SUBTERRÀNIA ACTUA ARREU DE LA TERRA **45**
6.1 L'AIGUA SUBTERRÀNIA A LES ZONES DE MUNTANYA 45
6.2 L'AIGUA SUBTERRÀNIA A LES ZONES CÀRSTIQUES 46
6.3 L'AIGUA SUBTERRÀNIA A LES ZONES PERIGLACIALS 49
7 LES FUNCIONS DE L'AIGUA SUBTERRÀNIA A LA TERRA **50**
7.1 L'AIGUA SUBTERRÀNIA COM A REGULADOR HIDROLÒGIC 50
7.2 L'AIGUA SUBTERRÀNIA COM AGENT QUÍMIC I DE TRANSPORT 55
Els components químics naturals de l'aigua subterrània *56*
Origen dels components dissolts a l'aigua subterrània *59*
La presència d'aigua subterrània salina i mineralitzada als aqüífers *65*
Producció geoquímica i transport del soluts a regions amb climes àrids i humits *69*
7.3 L'AIGUA SUBTERRÀNIA COM DIPÒSIT DE RESIDUS (D'ALLÒ QUE ELS ULLS NO VEUEN, EL COR NO SE'N DOL) 71
7.4 L'AIGUA SUBTERRÀNIA COM A SISTEMA DE SUPORT DE LA VIDA A LA TERRA 79
L'aigua subterrània per l'agricultura i el consum humà *79*
8 L'AIGUA SUBTERRÀNIA, EN PERILL DE DESAPARÈIXER **83**
9 REPTES EN LA GOVERNANÇA DE L'AIGUA SUBTERRÀNIA **85**
10 EPÍLEG **89**
11 QÜESTIONS I EXERCICIS **90**
11.1 CONSIDEREU LA REGIÓ ON VIVIU: 90
11.2 CONSIDEREU ARA UNES CONDICIONS GENERALS A QUALSEVOL ALTRE LLOC: 90
12 BIBLIOGRAFIA **92**
13 SOLUCIONS ALS EXERCICIS **99**

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

13.1 CONSIDEREU LA REGIÓ ON VIVIU: 99
13.2 CONSIDERANT CONDICIONS GENERALS A TOTES LES REGIONS: 118
14 ELS AUTORS 140
15 EL TRADUCTOR 143
MODIFICACIONS RESPECTE A L'ORIGINAL EN ANGLÈS ..... A

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Pròleg – El Projecte *Groundwater*

Els membres i les associacions de l'ONU-Aigua estableixen els temes anuals d'interès amb anys d'antelació. El tema pel Dia Mundial de l'Aigua que se celebrarà el 22 de març de 2022 és "Aigua subterrània: fent visible l'invisible" i és el més apropiat per el primer llibre del Projecte *Groundwater* (GW-Project) de 2020, amb el que tenim l'objectiu de fer visible l'aigua subterrània.

El Projecte *Groundwater* (en anglès, *groundwater* significa "aigua subterrània") és una organització sense ànim de lucre registrada al Canadà l'any 2019 compromesa en contribuir en el progrés educatiu i aportar una nova visió en la creació i divulgació del coneixement per a la comprensió i la resolució de problemes relacionats amb els recursos hidrogeològics. El GW-Project opera des del lloc web https://gw-project.org/↗, com una plataforma global per a la democratització del coneixement en hidrogeologia basat en el següent principi anònim:

"El coneixement hauria de ser accessible a tothom i el millor coneixement hauria de ser de lliure accés."

La missió del GW-Project és proporcionar material educatiu accessible, atractiu, de gran qualitat, de lliure accés a la xarxa i en diversos idiomes, per a tothom que vulgui aprendre sobre aigua subterrània i entendre com l'aigua subterrània està relacionada amb els sistemes ecològics i la humanitat als quals manté i preserva. És doncs un nou esforç en l'educació global atès que es basa en el voluntarisme de professionals de diferents disciplines que inclou membres de l'acadèmia, professionals i persones jubilades. Inclou voluntariat associat a més de 200 organitzacions de 14 països i 6 continents, amb una participació en continu creixement.

És un projecte basat en un esforç incessant que prosseguirà en la publicació de centenars de llibres en xarxa en els propers anys, primer en anglès i després en altres idiomes, a punt per a ser descarregats a tot arreu on internet sigui disponible. Les publicacions inclouen materials de suport, com vídeos, conferències, experiències de laboratori i eines d'aprenentatge. Addicionalment, inclou, o enllaça, amb programari de lliure accés en diferents àmbits de la Hidrogeologia recolzant el procés educatiu.

El GW-Project és una entitat activa, i les properes edicions de llibres s'aniran publicant periòdicament. Convidem als usuaris a proposar nous títols.

Us agraïm que formeu part de la comunitat del GW-Project. Ens interessa conèixer la vostra experiència relacionada amb l'ús d'aquests llibres i dels materials que us proporcionem. Acceptem gustosament idees i participants!

La Comissió Directora del GW-Project

Agost 2020

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Prefaci

Aquest llibre parla del paper i de la importància de l'aigua subterrània en el cicle hidrològic al planeta Terra i és el producte estrella del GW-Project. Durant la darrera dècada, s'han publicat molts llibres dedicats a la creixent crisi global de l'aigua. Malgrat que molts d'aquests llibres estan centrats en la immensa importància de l'aigua dolça per a la humanitat i en els moltíssims problemes relacionats amb la disponibilitat d'aigua, cap d'ells ha estat escrit per experts en hidrologia que tracti la part corresponent a l'aigua subterrània dins del cicle hidrològic per a una audiència amplia d'una manera tan integrada com ho fa aquest. Així, aquest text titulat "L'aigua subterrània en el cicle hidrològic: Una introducció a la reserva d'aigua dolça més important de la Terra" fa que aquest recurs "amagat" prengui vida per al lector.

Inicialment, el llibre va ser redactat per Eileen Poeter qui va anar contactant amb els altres co-autors a mesura que calia un major nivell d'expertesa per assolir l'objectiu plantejat. El resultat final és un llibre preparat per acadèmics i professionals mundialment reconeguts en especialitats diverses que inclouen la recerca de camp, l'anàlisi i la modelació del flux d'aigua subterrània, la geoquímica i la contaminació dels recursos hídrics. Es tracta d'una tasca col·laborativa del tipus que el GW-Project encoratja amb la idea de sintetitzar el coneixement i presentar-lo d'una forma simple sense evitar la complexitat que li és pròpia.

Totes les persones que han contribuït en aquest text formen part de la Comissió Directora del GW-Project. Durant la redacció del llibre van ser aconsellats per col·legues experts en diversos àmbits, especialment en governança de l'aigua subterrània. Posteriorment, el manuscrit va ser revisat per altres persones expertes en aquesta temàtica. En conseqüència, el seu contingut és el fruit d'una col·laboració inter-disciplinària tan necessària en l'actualitat per transferir els coneixements associats a l'aigua subterrània i per promoure la consciència indispensable que permeti una major protecció i una millor gestió d'aquest recurs.

John Cherry, Líder del GW-Project

Guelph, Ontario, Canadà, Agost 2020

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Prefaci a la versió catalana

La tesi del llibre de E. Poeter i col·laboradors que teniu a les mans és contundent: l'aigua subterrània és indispensable per garantir les necessitats humanes i ecològiques. Especialment quan la pressió humana sobre els recursos naturals és molt forta i els impactes són molt greus. A més, la influència del canvi climàtic farà inviables els models de gestió actuals i caldrà pensar noves formes de gestió, basades en la protecció ambiental i la justícia social. El text posa de manifest que l'aigua subterrània és la part més desconeguda del cicle hidrològic i que cal conèixer la seva dinàmica per a poder afrontar els reptes esmentats en la governança d'aquest recurs natural imprescindible per la vida.

Aquest llibre, publicat l'any 2020 i que ara arriba en versió catalana en el sí del Projecte *Groundwater*, és un text clar i entenedor per a tothom, sense equacions, però presenta tots i cada un dels conceptes relacionats amb el cicle de l'aigua amb prou detall perquè qualsevol lector n'adquireixi el coneixement necessari. Recomano aquest llibre a tots els estudiants universitaris que faran un curs de hidrologia o hidrogeologia en qualsevol grau o, fins i tot, estudi a nivell de màster. És un text per ser llegit la primera setmana del curs: us donarà el context imprescindible i ordenat per entendre el que desenvolupareu amb detall al llarg del programa de l'assignatura.

La Directiva Marc de l'Aigua de la Unió Europea estableix que la participació pública és un requeriment per redactar els plans hidrològics de conca fluvial. Tothom ha de poder aportar la seva opinió a través d'un procés participatiu implementat per les administracions, com em consta que s'està fent amb més o menys intensitat, a moltes conques hidrogràfiques. Recomano també aquest text a totes aquelles persones que, individualment o representant un col·lectiu, contribueixen a la discussió de com ha de ser la gestió hidrològica més local. D'una manera planera entendreu com funciona la part subterrània del cicle hidrològic, la més desconeguda, i obtindreu el coneixement necessari per a fonamentar les vostres opinions. És cert que els exemples del llibre són generals i fan referència a casos paradigmàtics d'arreu del món. Us animo, tot llegint el llibre, a integrar-hi exemples de la vostra realitat més propera. No us serà gens difícil; de fet, el qüestionari de caràcter local del capítol 11 us hi ajudarà. Crec que és important llegir aquest llibre de conceptes fonamentals amb la mirada orientada cap al territori més conegut.

Estic convençut que la seva lectura us serà molt profitosa i, alhora, entretinguda. Ben segur que en acabar veureu el cicle hidrològic amb una altra perspectiva, més ampla i més integradora de tots els factors naturals i antròpics relacionats amb el recurs aigua.

Josep Mas-Pla
Voluntari del The Groundwater Project
Universitat de Girona / Institut Català de Recerca de l'Aigua
Girona, agost 2021

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Agraïments

Agraïm moltíssim les revisions detallades i profitoses, així com les col·laboracions a aquest llibre, de les següents persones:

- Hugh Whiteley, Enginyer Civil independent i Professor Adjunt Emèrit, University of Guelph, Kitchener, Canada;
- Kamini Singha, Professor, Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA;
- Ineke Kalwij, Consultor, Kalwij Water Dynamics Incorporated, Vancouver, British Columbia, Canada;
- Garth van der Kamp, Investigador Associat, Global Institute for Water Security, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada; anteriorment, Científic i investigador, Environment Canada;
- Ian Stewart, Professor Associat d'Humanitats, King's College, London, Ontario, Canada;
- Allan Freeze, Professor Emèrit, Geological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada; i,
- Fred Phillips, Professor Emèrit, Department of Earth and Environmental Science, New Mexico Tech, Socorro, New Mexico, USA.

També agraïm a Amanda Sills per la revisió i producció d'aquest llibre i a Elhana Dyck per la seva edició, ambdues són membres del Projecte *Groundwater* a Guelph, Ontario, Canada. Apreciem el consell i les aportacions d'Everton de Oliveira, Diego Nogueira i Bruna Soldera del Projecte *Groundwater* a São Paulo, São Paulo, Brasil, mentre redactàvem el contingut d'aquest llibre. Agraïm a Josep Mas-Pla la traducció d'aquest llibre al català.

Eileen Poeter
Ying Fan
John Cherry
Warren Wood
Douglas Mackay

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

L'aigua subterrània en el cicle hidrològic

Una introducció a la reserva d'aigua dolça més important de la Terra

The Groundwater Project

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

1 Preàmbul

La presència d'aigua a la Terra és el tret essencial que permet la vida tal i com la coneixem. La circulació de l'aigua a escala global exerceix el control de les formes de vida de tots els organismes i és la base per a la salut humana, tant individual com social, així com de la salut dels ecosistemes. Conèixer com i per on l'aigua circula en el context del cicle hidrològic és la base necessària per construir una gestió fonamentada del cicle de l'aigua.

Els efectes de l'activitat humana en els processos geològics han estat tant intensos que, per reconèixer-ho, s'ha proposat una nova subdivisió del temps geològics, l'època Antropocena. El coneixement dels processos naturals ha estat sempre importantíssim pel desenvolupament humà en cultures pròsperes i resilients. Actualment, l'activitat humana altera aquest processos amb conseqüències imprevisibles i, per tant, el coneixement d'aquestes dinàmiques naturals i de les pressions antròpiques que les afecten és fonamental per desenvolupar les bases per la seva gestió sostenible.

L'informe de les Nacions Unides sobre el Desenvolupament dels Recursos Hídrics al món de 2016 (UNWWAP, 2016) estima que el planeta pot enfrontar-se a un dèficit hídric del 40% per 2030. Aquesta dada sorprenent empitjorarà per l'augment global de la temperatura causada pel canvi climàtic, el creixement de la població i de les zones urbanes. Pel 2025, dos terceres parts de la població de la Terra viuran en condicions d'escassetat hídrica. La crisis d'aigua global esdevé doncs un problema urgent i requereix propostes innovadores per a identificar, prioritzar i accelerar solucions a escala global.

L'aigua subterrània ha de ser inclosa en les solucions de la crisi d'aigua global atès que constitueix el 99% dels recursos d'aigua dolça en estat líquid de la Terra (Shiklomanov, 1993) i és vital per la subsistència de rius, llacs, zones humides i altres sistemes ecològics. No obstant, l'aigua subterrània passa desapercebuda per moltíssima gent perquè està amagada sota la superfície de la Terra. Per superar aquesta "invisibilitat" invitem al lector a pensar sobre l'aigua dolça des d'un punt de vista nou, reconeixent que tota l'aigua superficial que veiem a rius, llacs, aiguamolls, ..., és només una petita mostra de les immenses reserves d'aigua dolça al planeta; talment la punta d'un "iceberg" format per aigua en lloc de gel.

2 Propòsit

Aquest llibre presenta l'aigua subterrània en el vast context del cicle de l'aigua, també anomenat cicle hidrològic. El cicle hidrològic és el moviment continu de l'aigua damunt, per sobre i per sota de la superfície de la Terra, com es mostra a la Figura 1. La Hidrogeologia és la ciència que estudia l'aigua subterrània en el context d'aquest cicle, el seu origen, la seva explotació i, finalment, la gestió sostenible d'aquest recurs.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

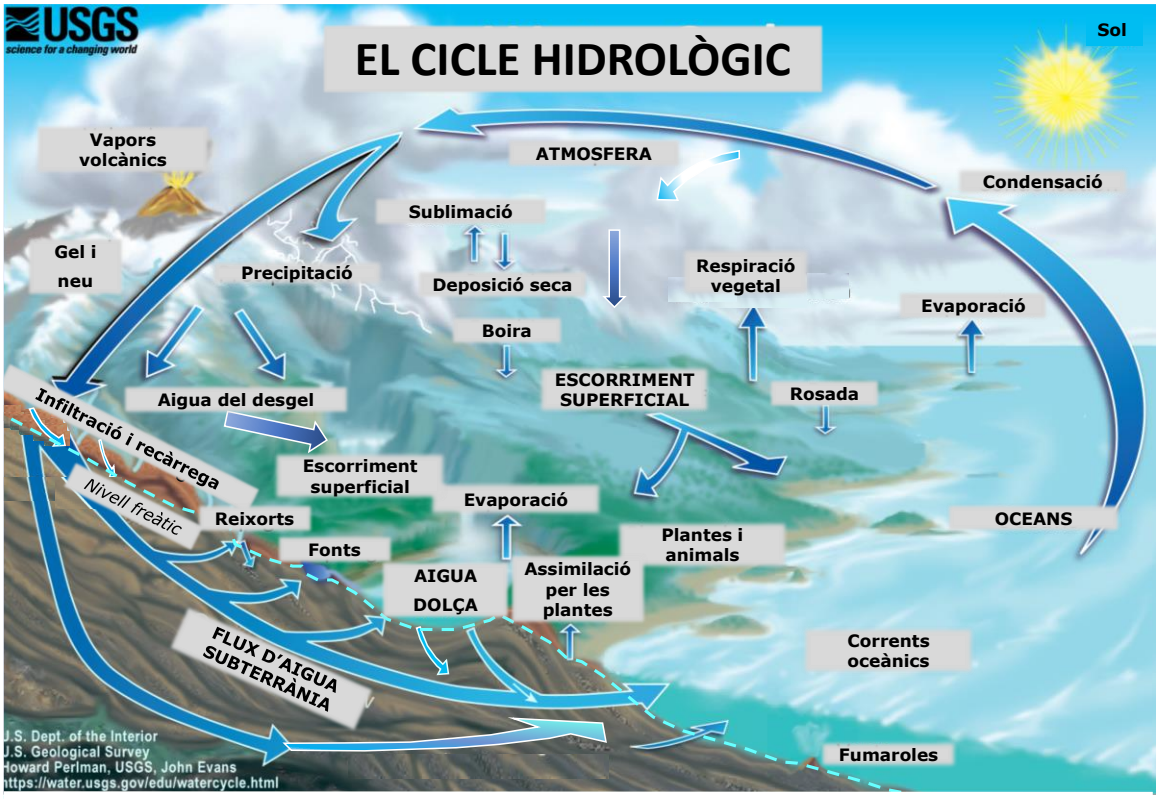


Figura 1 - El cicle hidrològic és el moviment continu de l'aigua damunt, per sobre i per sota de la superfície de la Terra (adaptat de USGS, 2020).

Aquest llibre explica que, malgrat que l'aigua subterrània representa el 99% de l'aigua dolça en estat líquid, només una part d'aquest volum és accessible sense generar una sobreexplotació del recurs. Conseqüentment, només una petita part de tota l'aigua subterrània emmagatzemada al subsol pot emprar-se anualment sense generar l'esgotament d'aquest recurs vital. Tot i així, l'extracció d'aigua subterrània s'ha multiplicat per quatre en els darrers 50 anys i ha estat la causa d'un 25% del ritme actual de 3.1 mm/any de creixement dels oceans (Wood i Hyndman, 2018).

L'aigua subterrània modifica la Terra mitjançant la meteorització de les roques i els processos geomorfològics externs. Els rius, els llacs i les zones humides són manifestacions superficials de l'aigua subterrània, establint una relació de flux amb els dipòsits d'aigua subterrània (és a dir, els aqüífers) que els donen aigua en temps de sequera i se n'alimenten en períodes humits quan hi ha un excés d'aigua superficial. Aquest llibre insisteix en els processos pels quals l'aigua superficial, que veiem, es connecta i relaciona amb l'aigua subterrània, "invisible", i en els fluxos d'aigua continus que formen part del cicle hidrològic. Aquest flux continu d'aigua subterrània és també el medi de transport de substàncies químiques, tant naturals com artificials. La distribució d'aquestes substàncies determina on l'aigua subterrània és apte per beure. Alhora, també incideixen en la capacitat del sòl pel conreu; la qual depèn, en gran mesura, de com l'aigua subsuperficial interacciona amb el terreny.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Finalment, aquest llibre aporta una visió amplia de "l'aigua subterrània en el cicle hidrològic", incloent el transport de substàncies químiques, naturals i artificials pels fluxos d'aigua subterrània. Alhora, el llibre serveix per introduir altres temes que es desenvolupen amb més detall en altres volums del GW-Project↗. A més, també es reconeix el fet que l'aigua subterrània proporciona diversos serveis ambientals com la regulació del cabal dels rius i la preservació dels ecosistemes aportant l'aigua necessària per a la vida. Ras i curt, l'aigua subterrània és l'element que suporta la vida a la Terra.

3 Les canonades de la Terra

Majoritàriament, l'aigua subterrània té el seu origen en la precipitació que s'infiltra al sòl i percola fins al nivell freàtic. El nivell freàtic és una superfície conceptual que es troba a tot arreu per sota de la superfície del terreny, a una fondària que varia segons el lloc (Figura 2). La seva fondària en una perforació (pou, sondeig, ...) se situa en el punt en que l'aigua comença a fluir a dins del sondeig i equival a la distància entre la superfície del terreny i el punt on flueix l'aigua subterrània. De fet, el nivell de l'aigua a un llac o un riu esdevé el nivell freàtic on la superfície del terreny intersecta amb el nivell del llac o del riu. (Figura 2). És a dir, el nivell de l'aigua a la vora de llacs i rius, i també del mar, es prolonga per sota la superfície del terreny com a nivell freàtic. Al llarg de la línia de costa, l'aigua generalment flueix des del terreny cap al llac o riu, donant lloc a una descàrrega d'aigua subterrània cap aquests cossos d'aigua superficial. Tanmateix, en alguns casos, la direcció del flux pot ser a la inversa, des del llac o riu cap al terreny que l'envolta.

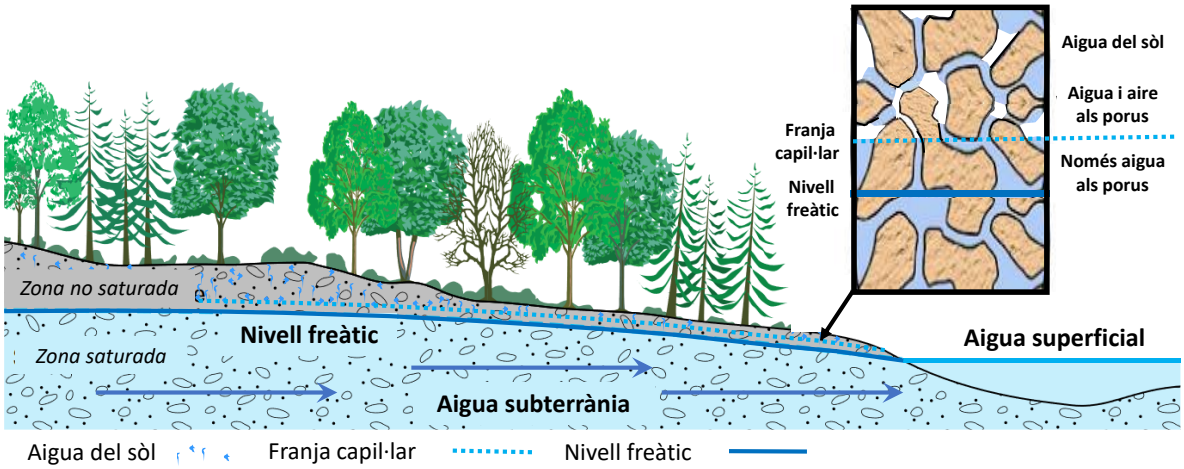


Figura 2 – El nivell freàtic s'estén per sota la superfície del terreny on la superfície del llac o riu creua la línia de costa (adaptat de USGS, 2019a).

Al subsol, l'aigua s'eleva una petita distància a l'interior dels porus del sòl per damunt del nivell freàtic degut a les forces de capil·laritat resultants de l'adhesió de les molècules d'aigua a la superfície de les partícules del sòl i a la pròpia cohesió entre les molècules d'aigua. Aquesta zona s'anomena la franja capil·lar. Les forces de capil·laritat forcen un moviment ascendent de l'aigua oposat a la força de la gravetat; de manera

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

semblant a com una esponja seca atreu l'aigua de la superfície d'una taula per omplir els buits del seu interior. Per damunt de la franja capil·lar i fins a la superfície del terreny, s'hi troba l'anomenada zona "vadosa" o "no saturada" en la qual els espais del sòl (els porus) s'omplen d'aire i d'una quantitat variable d'aigua. Per sota del nivell freàtic, l'aigua ocupa tot l'espai disponible entre les partícules de sediment (els porus), a les esquerdes o fractures i als canals o coves que es formen en algun tipus de roques (per exemple, el carst), com mostra la Figura 3. Tots els sediments i roques dels primers milers de metres de fondària des de la superfície de la Terra presenten espais connectats entre partícules, esquerdes o coves. Aquests espais s'anomenen porositat. La porositat és, doncs, l'espai obert en els materials geològics (roques, sediments) que poden contenir fluids (aire, aigua, petroli, gas, ...). El grau de connectivitat entre aquests espais oberts atorga permeabilitat als materials geològics i permet el flux d'aigua subterrània o qualsevol altre fluid. La permeabilitat és la mesura de la facilitat amb que un fluid i, en el nostre cas, l'aigua subterrània es mou a través dels porus i altres espais oberts en els materials geològics.

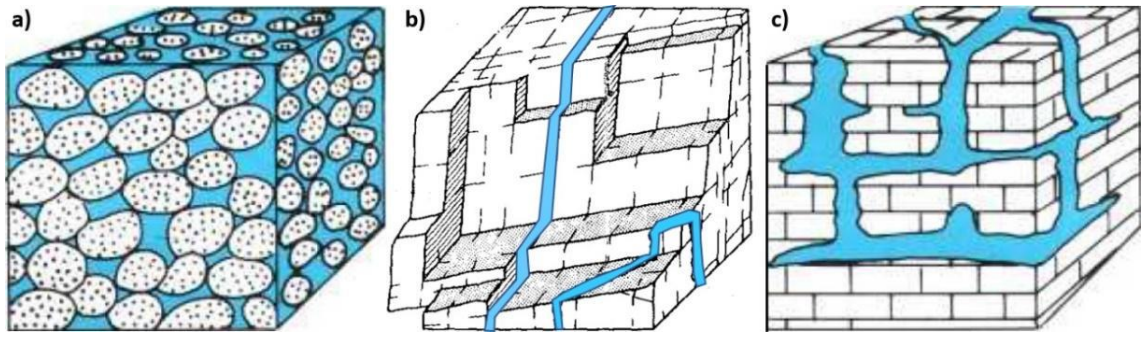


Figura 3 – Per sota el nivell freàtic, l'aigua omple els materials geològics del terreny a) els porus entre les partícules de sediment; b) les fractures de les roques; i c) les coves i conductes en roques carbonatades (carst). (a i c de Heath, 1983; b adaptat de Gale, 1982).

Un aqüífer es defineix com la formació geològica que permet l'emmagatzement i el flux de volums d'aigua aptes per a la seva explotació. Aquestes formacions geològiques, els aqüífers, són més porosos i permeables que les formacions geològiques limítrofes. Un bon exemple d'aqüífer és un nivell de sorra gruixuda per sota del nivell freàtic. Les unitats o nivells confinants són formacions geològiques que impedeixen el flux d'aigua subterrània entre aqüífers. Una capa d'argila de baixa permeabilitat entre capes de sorra o un nivell de roca basàltica sense fractures entre nivells de basalt fracturat són dos exemples de nivell confinants.

Els pous oberts de gran diàmetre, cavats a mà, són molt habituals arreu del món on el nivell freàtic és prou superficial per arribar-hi amb mètodes d'excavació manuals o amb petites excavadores. Abocant-nos al pou, es pot veure el nivell de l'aigua al seu interior que correspon amb el nivell freàtic de l'aqüífer, com es mostra a la Figura 4a en un pou excavat per nòmades al desert del Gobi. En altres casos, si els pous han de ser més profunds cal l'ús de maquinària perforadora especialitzada (Figura 4c). Aquests pous perforats, o sondejos,

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

tenen un diàmetre menor que impedeix poder veure el nivell de l'aigua al seu interior, però el concepte, expressat en la Figura 4b, és el mateix que el que es mostra en el pou obert de la imatge a la Figura 4a.

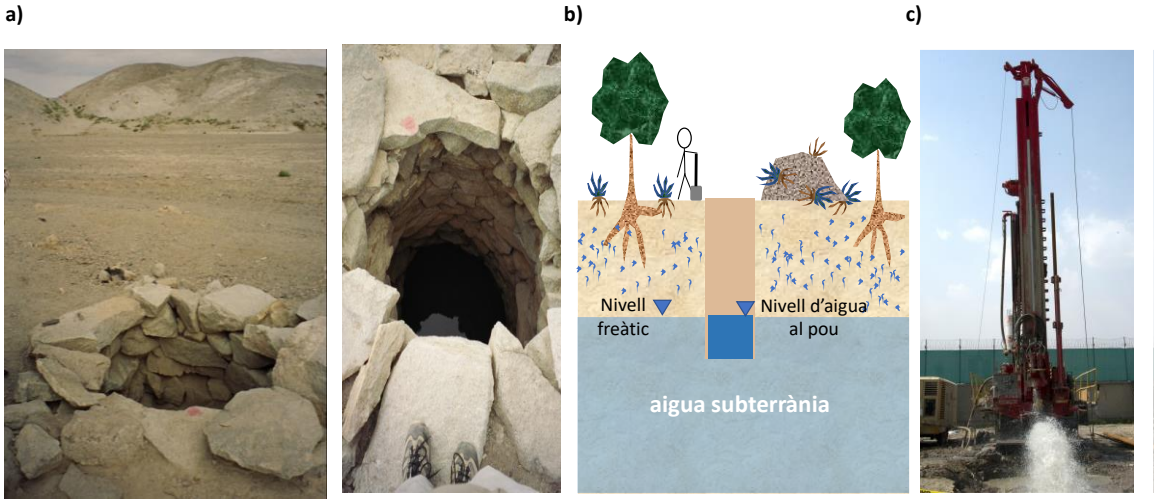


Figura 4 – Els pous es construeixen per tenir accés al nivell freàtic. A) Pou excavat al Desert del Gobi amb el cel reflectit en l'aigua (foto Cherry 2019); b) Esquema d'un pou excavat o "pou obert" (Poeter et al., 2020, gw-project.org). c) Imatge d'una màquina de sondeigs per pous d'aigua profunds (foto Mellin, 2013).

L'aigua subterrània és un component integral del cicle hidrològic. La Figura 5 conté un enllaç a un vídeo que il·lustra el cicle hidrològic en acció.

Figura 5 – Premeu per veure ▶ l'animació del cicle hidrològic (NASA, 2020).

L'aigua entra a la fase atmosfèrica del cicle hidrològic per evaporació i en surt per precipitació. El Sol és el motor del moviment d'aigua a l'atmosfera, el qual està controlat per el continu intercanvi de molècules d'aigua entre els masses d'aigua superficial líquides (llacs, rius, oceans) i el vapor d'aigua de l'aire.

L'energia solar escalfa l'aigua superficial i provoca el trencament dels enllaços que uneixen les molècules d'aigua entre elles afavorint el trànsit cap a l'atmosfera en fase gasosa. Simultàniament, les molècules de vapor d'aigua contacten amb les d'aigua líquida i queden absorbides. Segons les temperatures de l'aire i de l'aigua superficial, així com el

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

contingut de vapor d'aigua a l'atmosfera, aquesta intercanvi produeix evaporació (moviment net d'aigua des de la superfície a l'aire) o condensació (moviment net de l'aigua de l'aire cap a la superfície). L'aire té una capacitat limitada de contenir aigua en forma de vapor. Per tant, si la quantitat de vapor a l'aire excedeix la màxima quantitat permesa a la temperatura existent (estat de saturació), l'excés de vapor es condensa en forma d'aigua líquida, formant boira o rosada.

L'evaporació dona lloc a la humitat de l'aire. A mesura que el Sol escalfa l'aire proper a la superfície de la Terra, aquest s'expandeix i ascendeix cap a les capes altes de l'atmosfera. L'atmosfera terrestre és més calenta prop de la superfície que en alçada. Per tant, l'aire humit ascendent es refreda progressivament fins que el contingut d'humitat assoleix el punt de saturació. Aleshores, l'excés d'aigua es condensa en forma de petites gotetes que formen els núvols o la boira prop de la superfície. L'evaporació crea la humitat de l'aire. Les gotetes augmenten la seva mida per col·lisions entre elles i per condensació del vapor d'aigua a la seva superfície. Quan són prou grans, esdevenen massa pesades per a mantenir-se en suspensió i precipiten en forma de gotes de pluja, flocs de neu, aiguaneu o calamarsa.

Quan la precipitació arriba a la superfície, pot

1) Evaporar-se i retornar a l'atmosfera;
2) Drenar per damunt del terreny, originant l'escorriment superficial, o infiltrar-se i percolar pels nivells del sòl més superficials i temporalment saturats d'aigua, en forma d'un flux intermedi, fins arribar a les lleres dels rius augmentant notablement el seu cabal durant després de la tempesta; o
3) Infiltrar-se en el sòl.

La fracció d'aigua infiltrada entra a la zona vadosa i una part és captada per la vegetació. Quan hi ha un excés d'aigua a la zona vadosa, aquest excedent percola avall fins al nivell freàtic produint la recàrrega del sistema hidrogeològic. Com a conseqüència de la recàrrega, el nivell freàtic s'eleva indicant un increment del volum d'aigua emmagatzemat a l'aqüífer. Alhora, l'ascens del nivell freàtic també afavoreix el moviment lent de l'aigua subterrània cap a la xarxa de drenatge formada pels rius i els seus afluents, cap als llacs, les zones humides o els oceans, retornant a la superfície. Aquest flux d'aigua subterrània suposa un emmagatzement temporal d'aigua al subsol en el seu trànsit cap a les zones de descàrrega (rius, llacs, zones humides, oceans) i actua com el regulador que alimenta a les masses d'aigua superficial fins i tot durant els períodes de sequera. El cabal fluvial que persisteix durant les estacions seques, o períodes excepcionals de sequera, s'anomena flux de base. A moltes conques hidrogràfiques, la descàrrega d'aigua subterrània és la principal aportació, i sovint la única, al flux de base.

L'aigua circula entre l'atmosfera, la superfície del terreny i el subsol en el seu trànsit des dels continents fins als oceans. Una part de l'aigua subterrània retorna a l'oceà en forma de flux de base aportat al cabal dels rius. Una altra arriba directament a l'oceà per la

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

descàrrega subterrània al llarg de la línia de costa. Finalment, la resta retorna a l'atmosfera per evaporació. De fet, aquesta fracció de l'aigua subterrània que es restitueix a l'atmosfera sense passar per l'oceà, ho fa en depressions tancades. El mar d'Aral (entre el Kazakhstan i l'Uzbekistan), el mar Caspi (entre Europa i Asia), i el mar Mort (a la vall del Jordà), així com les basses salines i zones humides del *Death Valley* (al sud-oest dels Estats Units) són exemples de sistemes de drenatge tancats, anomenats endorreics.

L'evaporació té lloc tant a en el continent com a l'oceà, però els oceans ocupen el 71% de la superfície del planeta i, a diferència de la superfície terrestre, l'oceà no pateix sequeres i, òbviament, és una font d'evaporació constant. Per aquest motiu, sovint ho simplifiquem dient que el cicle hidrològic comença a l'oceà. No obstant, l'evapotranspiració és un procés que aporta gran quantitat d'aigua des de les capes més superficials del sòl cap a l'atmosfera, atès que inclou l'aportació de vapor d'aigua a l'atmosfera deguda a la transpiració de la vegetació. Les plantes absorbeixen aigua del sòl, tant de la zona vadosa com de la zona freàtica, a través de les arrels (Figura 6). És habitual que un sol arbre absorbeixi fins a 500 litres d'aigua diaris del sòl i els restitueix a l'atmosfera per transpiració. Globalment, entre un 70 i un 75% de la precipitació continental és transpirada o evaporada, retornant a l'atmosfera (Dai i Trenberth, 2002). És a dir, nomes un 25-30% de la precipitació flueix a través del subsol, com a flux d'aigua subterrània, o pels rius cap als oceans. A grans trets, la meitat del cabal anual dels rius que arriba als oceans és aportat per aigua subterrània (Reitz, et al., 2017). L'altra meitat flueix directament com a escorriment superficial o subsuperficial (flux intermedi).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

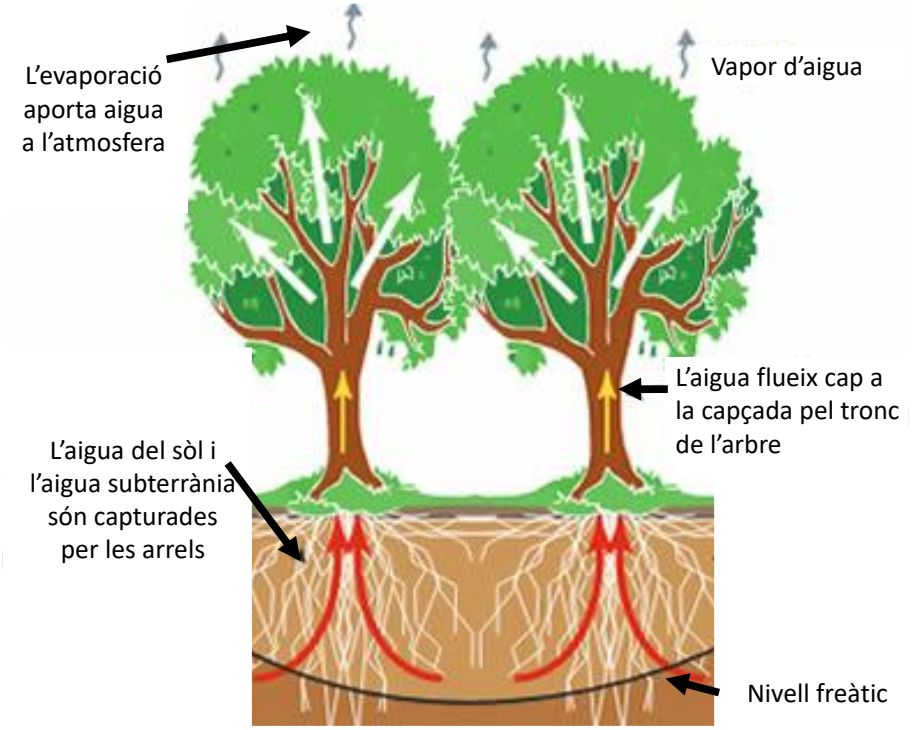


Figura 6 – Els arbres extreuen aigua del sòl o de la zona freàtica i la retornen a l'atmosfera, Un sol arbre pot transpirar uns 500 litres d'aigua per dia causant una disminució del nivell freàtic per sota dels arbres com s'il·lustra a la figura (adaptat de USEPA, 2012).

Concretament, el terme evapotranspiració combina els processos d'evaporació d'aigua a la superfície de llacs i rius, així com també del sòl, i la transpiració d'aigua per acció de les plantes. Tot plegat representa el flux d'aigua del continent cap a l'atmosfera.

L'aridesa climàtica es defineix com el quocient entre la precipitació (P) i l'evapotranspiració potencial (ETP) anuals a una localitat determinada. L'ETP representa la quantitat d'aigua que podria ser evapotranspirada si existís una disponibilitat d'aigua il·limitada al sòl. La magnitud de la ETP és més elevada en zones càlides, amb baixa humitat i amb força velocitat del vent. Concretament, el nivell d'aridesa és defineix amb l'Índex d'Aridesa (IA). Com s'ha esmentat, IA = P/ETP.

Així, les zones humides són aquelles amb un valor de IA superior a 0,65 i, típicament, tenen una precipitació superior a 500 mm anuals. Si bé pot variar notablement d'un lloc a un altre,

- la recàrrega dels aqüífers a les regions humides sol tenir lloc diversos cops per any, coincidint amb les estacions més plujoses.

Les zones seques subhumides tenen un valor de IA entre 0,50 i 0,65.

Les zones semiàrides, amb valors de IA entre 0,20 i 0,50, presenten una precipitació de l'ordre de 250-500 mm/any. Les zones àrides tenen un IA entre 0,05 i 0,20.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

A ambdues zones,

- una gran part de la precipitació es perd per evapotranspiració i només una petita part recarrega els aqüífers (entre un 0 i un 4% de la precipitació) i,
- la recàrrega, si bé petita, té lloc de manera freqüent.

A les zones hiperàrides, amb IA < 0,05, succeeix que,

- la recàrrega dels aqüífers només ocorre a les depressions que reuneixen prou escorriment superficial durant una tempesta de manera que permet la infiltració d'una determinada quantitat d'aigua a través del sòl que, finalment, arriba al nivell freàtic, recarrega els aqüífers i, per tant, suposa un augment de l'aigua subterrània emmagatzemada, i
- en aquestes zones, l'aigua subterrània és sovint l'única font d'aigua, atès que les aigües superficials tendeixen a ser salines a causa de la intensa evaporació.

La distribució de zones semiàrides i àrides es mostra a la Figura 7. Les regions àrides acullen una població de 2.5 mil milions de persones i produeixen un 44% dels aliments i un 50% de la ramaderia mundial.

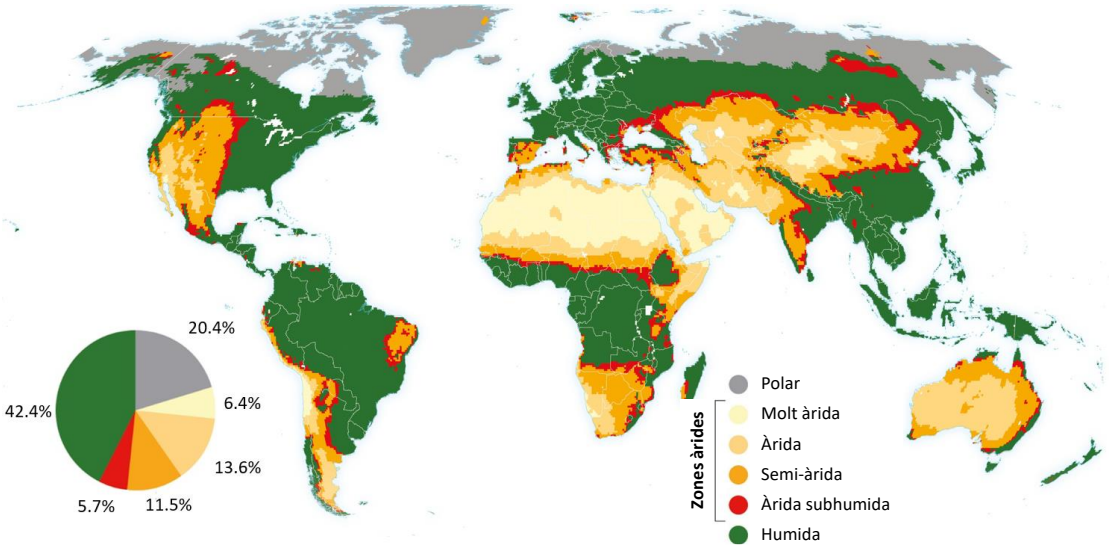


Figura 7 – Distribució de l'aridesa a la Terra (adaptat de *European Commission Joint Research Center*, 2020).

El vídeo de la Figura 8 mostra la distribució de l'evapotranspiració al planeta. La filmació ha estat realitzada pel *US National Center for Atmospheric Research* (USNCAR) i es basa en els resultats del model de sistemes climàtics de simulació de vapor d'aigua a l'atmosfera i de la precipitació. En el vídeo, els núvols (fils blancs) apareixen tant damunt els oceans com els continents, especialment a les zones amb selva tropical com l'Amazònia. Els punts taronges en el vídeo indiquen l'inici de precipitació on els núvols esdevenen carregats d'aigua i inicien la precipitació. Aquests episodis de precipitació s'alimenten de l'evaporació tant de l'oceà com del continent. Com es veu, el vapor d'aigua originat als

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

continents s'uneix a la massa d'aire en moviment, incrementant el seu grau d'humitat. Aquest vapor d'aigua es transportat per la circulació atmosfèrica (vents) i precipita en un altre indret. Aquest procés es coneix com precipitació reciclada perquè comença com pluja (o neu) damunt del continent que posteriorment s'evapotranspirarà i tornarà a precipitar més lluny.

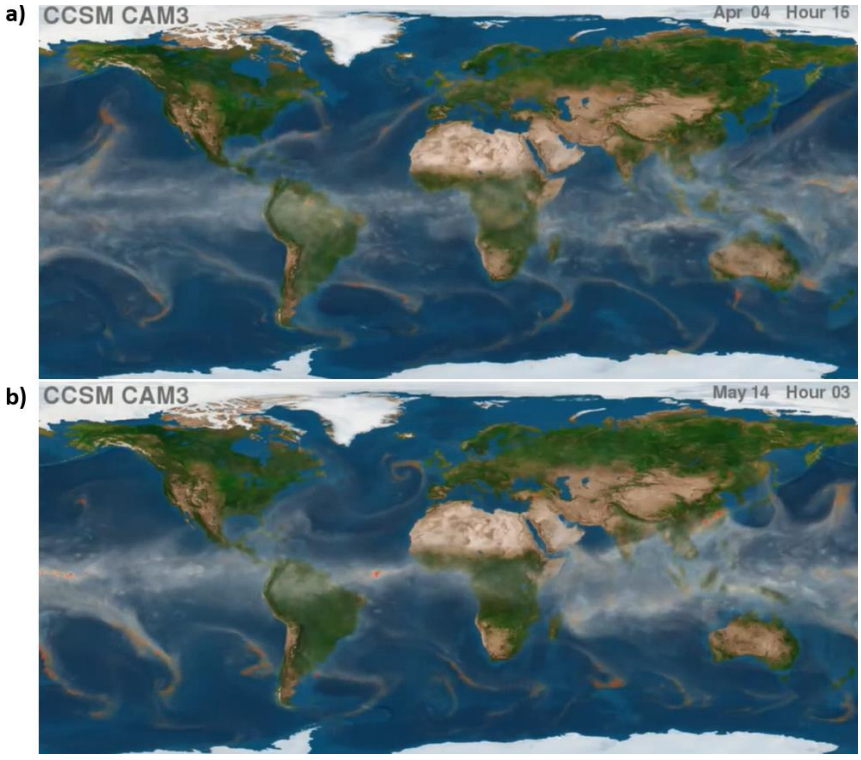


Figura 8 - Premeu per veure ▶ una animació de l'evaporació i l'evapotranspiració (blanc) i la precipitació (taronja) creada per un model de simulació climàtica per un període de temps al 2010. Els punts taronges indiquen l'inici d'una tempesta a) al límit nord de la selva tropical de l'Amazònia i b) a l'Oceà Atlàntic al nord-est de Sud-Amèrica, així com al sud-est de Xina (USNCAR, 2020).

La precipitació reciclada pot representar una proporció significativa de la precipitació total a regions allunyades de l'oceà (Figura 9a). Per exemple, més de la meitat de la precipitació a la part meridional de Sudàfrica s'origina per aigua transpirada a la selva amazònica (van der Ent et al, 2010). El vídeo de la Figura 8 mostra la producció de vapor a la conca de l'Amazones i com la nuvolositat que en resulta es desplaça cap al sud i des d'ones dirigeix cap a l'est condicionada per la serralada dels Andes i acaba precipitant a la conca del riu de La Plata. Una conca, o conca hidrogràfica, és una àrea drenada per una xarxa fluvial. El seu límit és la línia que determina la divisòria topogràfica amb la xarxa fluvial veïna. Cada gota d'aigua que precipiti a un cantó de la divisòria anirà a una xarxa fluvial, mentre que la gota que caigui a l'altre costat, anirà a l'altra. Així, la conca hidrogràfica fa referència a la xarxa de drenatge de l'aigua superficial. La conca hidrogeològica, en referència al moviment de l'aigua subterrània en els aqüífers, pot coincidir amb la conca hidrogràfica si les línies que connecten els punts amb major nivell

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

freàtic coincideixen amb les divisòries topogràfiques entre conques adjacents. En cas contrari, no coincidiran i caldrà diferenciar-les basant-nos en els trets geogràfics (conca hidrogràfica) i geològics (conca hidrogeològica) de la regió. Les fletxes de la Figura 9b mostren la direcció de transport del vapor d'aigua a l'atmosfera simulada en el vídeo de la Figura 8. Com més lluny estigui una regió del punt on l'aire marí humit arriba al continent, major serà la contribució de l'evapotranspiració continental en la precipitació. Pel fet que la conca de La Plata depengui de la transpiració a l'Amazònia, la selva amazònica s'ha anomenat "l'oceà verd".

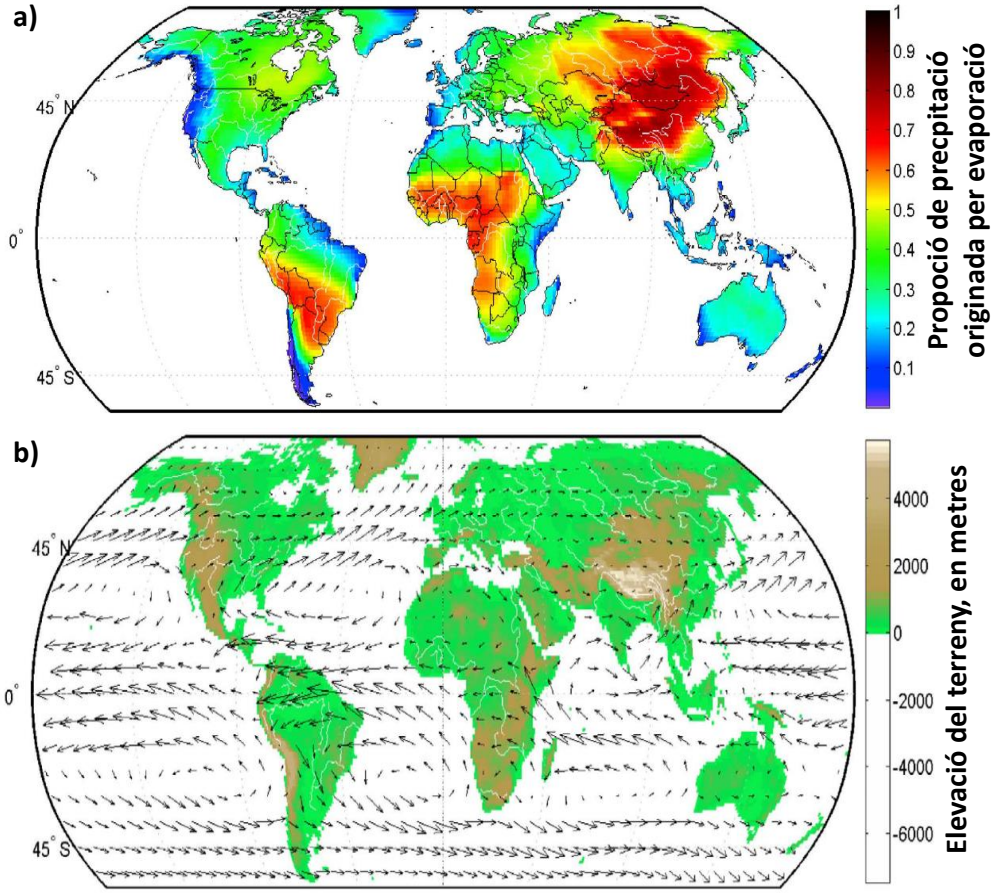


Figura 9 – Precipitació reciclada: a) els colors indiquen la proporció de precipitació originada per evaporació en zones continentals; i b) les fletxes indiquen la magnitud i la direcció del transport del vapor atmosfèric sobreposat a un mapa d'elevació topogràfica (van der Ent et al., 2010).

4 La part subterrània del cicle hidrològic

Per examinar el rol de l'aigua subterrània en el cicle hidrològic cal considerar la opaca, elusiva i poc considerada part subterrània del cicle, a la qual la majoria dels llibres del GW-Project estan dedicats.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

4.1 La perspectiva superficial

Quan la precipitació entra al subsol, esdevé infiltració. La Figura 10 mostra un terreny amb roques fracturades a l'esquerra i uns sediments porosos a la dreta. A la roca fracturada, l'aigua transcorre per les fractures, mentre que en el medi porós flueix pels espais lliures entre les partícules granulars del sediment. Els processos de flux són els mateixos en ambdós casos, si bé el tipus de material geològic és diferent.

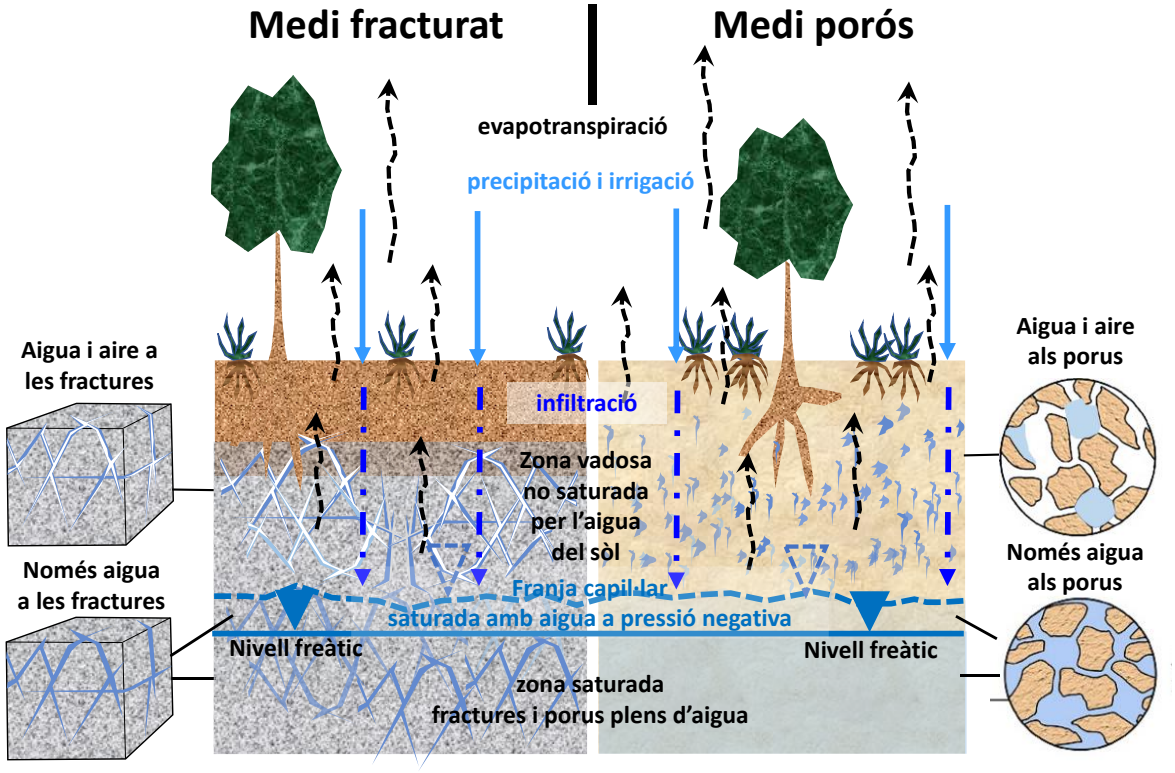


Figura 10 – Esquema mostrant el procés d'infiltració a través de la zona no saturada fins a la franja capil·lar i el nivell freàtic, on recarrega l'aigua de l'aqüífer. L'aigua a la zona no saturada generalment es mou verticalment cap avall com infiltració (fletxes blaves) o cap amunt com evapotranspiració (fletxes negres).El flux a la zona no saturada es considera un flux unidimensional, malgrat que en determinats indrets pugui tenir una component lateral (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

L'aigua precipitada en una tempesta breu només s'infiltrarà als nivells més superficials del sòl a poca fondària; però una precipitació resultant d'una pluja suau però continua assolirà nivells més profunds arrossegant aigua infiltrada en períodes anteriors i, a cops, arribarà al nivell freàtic (línia horitzontal assenyalada per dos triangles invertits a la Figura 10) on formalment recarrega l'aqüífer i esdevé aigua subterrània. Si bé el flux és tridimensional i localment pot tenir un moviment lateral, el flux a la zona vadosa per damunt del nivell freàtic és principalment unidimensional.

Per sota del nivell freàtic, les fractures i els porus estan plens d'aigua i la pressió de l'aigua és superior a la pressió atmosfèrica (pressió manomètrica positiva). Contràriament, per damunt del nivell freàtic, els porus i fractures estan plens d'aigua i aire i la pressió de l'aigua és inferior a l'atmosfèrica (pressió manomètrica negativa).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

La zona per damunt de la franja capil·lar s'anomena zona no saturada perquè els porus de sòl només estan parcialment plens d'aigua. També rep el nom de zona vadosa (Figura 10). Independentment de si el material del subsol és roca o sediment i, per tant, possiblement diferent del material del sòl pròpiament dit (és a dir, l'horitzó edàfic), l'aigua de la zona vadosa sovint s'anomena aigua del sòl per diferenciar-la de l'aigua subterrània que es pròpia de la zona saturada per sota del nivell freàtic. La pressió manomètrica negativa a la zona vadosa es deu a les forces de capil·laritat.

Prop del nivell freàtic, les forces de capil·laritat creen una franja capil·lar (Figura 10) en la que els porus i les fractures estan completament plenes d'aigua, però on la pressió de l'aigua és negativa. La franja capil·lar s'estén uns pocs mil·límetres, o fins i tot centímetres, per damunt del nivell freàtic en materials amb porus de mida gran, com en els dipòsits de sorra, i alguns metres per damunt del nivell freàtic en materials amb porus molt petits, com per exemple els dipòsits d'argiles o les roques amb fractures finíssimes. Malgrat que la franja capil·lar estigui saturada amb aigua com la zona freàtica, es considera que forma part de la zona no saturada degut a la pressió negativa de l'aigua. Aquesta és la raó per la qual el terme "zona vadosa" també inclou la franja capil·lar.

Un cop s'ha assolit la capacitat d'emmagatzement de l'aigua al sòl, les forces de capil·laritat ja no poden retenir més volum d'aigua i la força de la gravetat empeny l'aigua en excés fins al nivell freàtic. Aquest procés s'anomena recàrrega d'aigua subterrània, doncs la precipitació infiltrada alimenta l'aqüífer. Cal tenir present que la recàrrega només té lloc quan el sòl té aigua en excés. El volum recarregat s'emmagatzema a l'aqüífer on, lentament, flueix cap a les zones de descàrrega: l'oceà, la xarxa fluvial o cap un altre aqüífer limítrof.

Les forces capil·lars tenen menys influència en la recàrrega quan el sòl ja està humit i l'aigua infiltrant té més facilitat d'arribar al nivell freàtic. Conseqüentment, és durant les estacions humides o durant períodes de precipitació continuada, sigui pluja o neu, quan l'aigua infiltrada recarrega amb major intensitat els aqüífers. Així, no tots els episodis de precipitació impliquen la recàrrega dels aqüífers; molts d'ells només aporten humitat a la zona vadosa reemplaçant l'aigua del sòl que ha estat consumida per la transpiració de les plantes: boscos, prats, conreus, ... Com s'ha dit, la recàrrega tindrà lloc quan el sòl presenti un excés d'humitat, esdevingui saturat i es creï un flux d'infiltració dominat per la gravetat. El moment i la magnitud de la recàrrega depèn de les propietats del sòl, de la profunditat del nivell freàtic i de la durada i intensitat de la precipitació, com ho il·lustra l'ascens del nivell freàtic després dels episodis plujosos (Figura 11).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

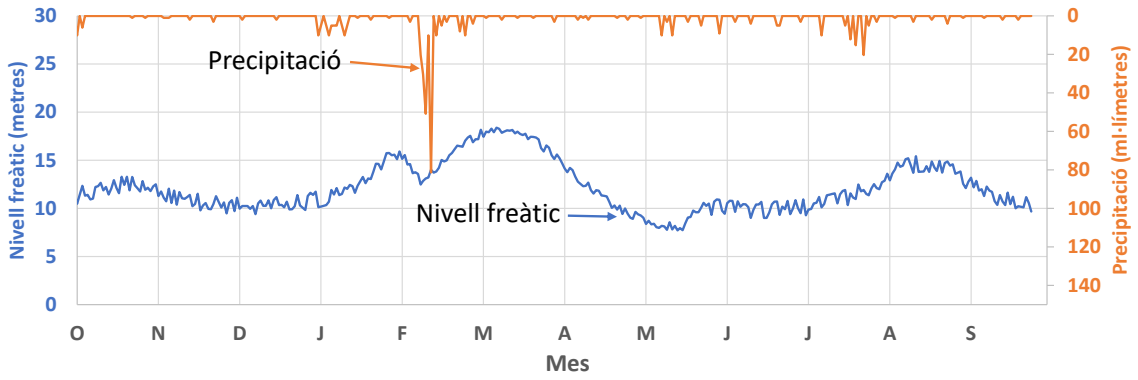


Figura 11 - Relació entre episodis plujosos i variació del nivell freàtic. La precipitació és mostra en un eix invers (dreta), de manera que una precipitació intensa està representada per un pic descendent. L'ascens del nivell freàtic sol presentar un retard respecte a la pluja; en aquest cas és de gairebé un mes. L'elevació del nivell freàtic té una durada superior a la duració de la precipitació. Altres factors, com el bombament d'aigua subterrània, també influencien la relació entre precipitació i nivell freàtic, de manera que la seva correlació no és del tot directe (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

La vegetació terrestre utilitza l'aigua de la zona vadosa com a recurs. Les arrels ocupen aquesta zona perquè conté aire amb l'oxigen essencial per a la respiració de la planta. A l'absorbir aigua per les arrels, les plantes produeixen un descens de la pressió de l'aigua i afavoreixen el moviment de l'aigua del sòl cap a l'arrel.

En zones àrides, l'aigua subterrània més propera a la superfície del terreny presenta un contingut molt elevat de sals que és inadequat per a la supervivència de molts tipus de vegetació. Per tant, la vegetació es redueix a aquelles espècies de plantes que toleren alts nivells de salinitat. Altres plantes, habitualment en zones àrides, tenen arrels prou llargues per captar aigua directament de la zona freàtica, nodrint-se d'aigua subterrània en lloc d'aigua del sòl, sovint inexistent. S'anomenen plantes freatòfites; per exemple, arbres com els pollancres, els salzes, els eucaliptus, arbusts com el tamariu o conreus com la userda. Les arrels de les freatòfites poden estendre's fins a 15 m de fondària i s'han observat arrels de tamariu fins a 30 m a la zona del canal de Suez.

Hi ha una especial preocupació pel fet que la introducció d'espècies animals d'un continent a un altre puguin causar un greu desajust ecològic; per exemple, l'arribada de conills a Austràlia procedents d'Anglaterra. No obstant, hi ha molt poca preocupació per l'impacte que la introducció de plantes invasores que necessiten un gran consum d'aigua pugui causar en els recursos hídrics subterranis de les zones on han estat exportades, especialment si són zones àrides. Per exemple, les plantacions d'eucaliptus fora d'Austràlia. Aquestes plantes esdevenen uns grans consumidors no desitjats d'aigua subterrània amb greus afectes per les plantes natives i per l'agricultura. De manera similar, les plantacions intensives d'aquestes espècies per a producció forestal en àrees properes als rius suposa un ús elevat d'aigua subterrània que afecta a la relació entre el riu i l'aqüífer al provocar un descens del nivell freàtic, disminuir el flux de base i, amb ell, el cabal superficial.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

4.2 La perspectiva profunda

Un cop la precipitació infiltrada arriba al nivell freàtic, aquest augmenta. La gravetat fa que l'aigua subterrània flueixi lateralment des de zones amb nivells freàtics elevats a zones amb nivells deprimits com es mostra a la secció vertical de la Figura 12. El requadre marró a la cara frontal del bloc diagrama de la Figura 12 correspon al flux unidimensional a la zona vadosa mostrat anteriorment a la Figura 10 i l'emmarca en un context bidimensional més ampli del cicle hidrològic. De fet, el flux subterrani té lloc en les tres dimensions de l'espai, però per una primera visualització en aquesta secció es presentarà simplificadament com un flux vertical bidimensional.

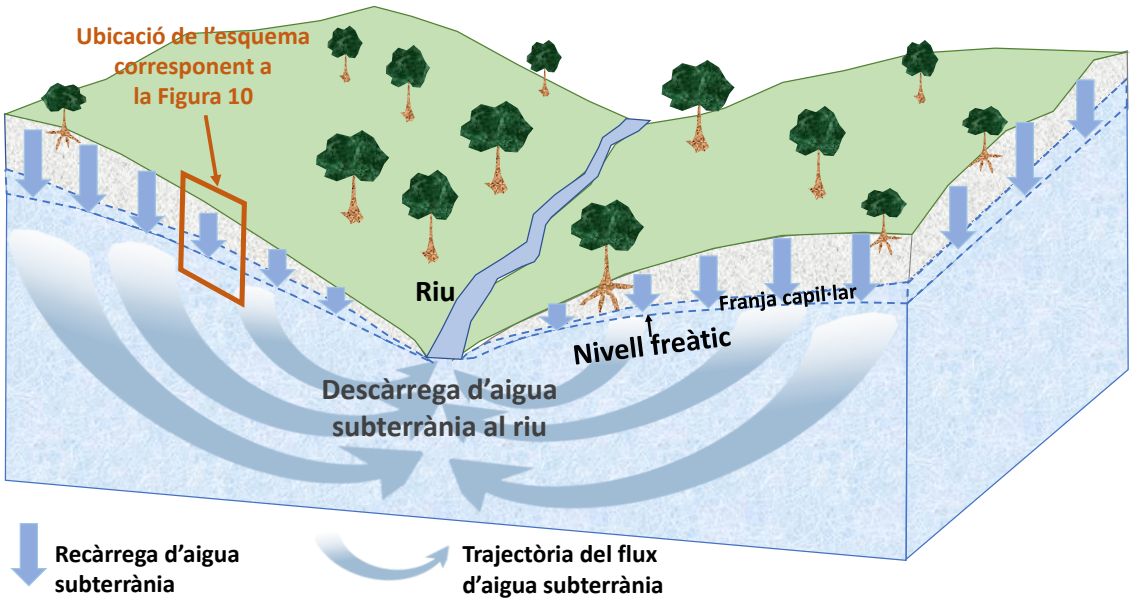


Figura 12 – Un cop l'aigua infiltrada recarrega el sistema hidrogeològic, el pendent del nivell freàtic permet el desplaçament de l'aigua subterrània des dels turons fins a les valls, on finalment el flux subterrani s'incorpora al cabal dels rius. El requadre marró situa l'esquema de la Figura 10 en aquest context espacial més ampli (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

El nivell freàtic és més alt en zones topogràficament elevades perquè la precipitació entra al terreny a major altitud i l'aigua flueix seguint el pendent a l'interior de l'aqüífer fins a zones de menor altitud. La magnitud del flux subterrani (en unitats de volum per unitat de temps; per exemple, m^3/dia) des de les zones elevades a les zones de descàrrega (valls, àrees topogràficament deprimides, ...) depèn de 1) el ritme de recàrrega (volum d'aigua que s'infiltra i assoleix el nivell freàtic per unitat de temps: dia, mes, ...), 2) la diferència d'altitud entre la zona recàrrega i la zona de descàrrega, i 3) la permeabilitat dels sòls, sediments i roques per les quals flueix. Durant un període de sequera, el nivell freàtic a les zones elevades decreix atès que l'aigua flueix constantment cap a les zones de descàrrega (habitualment, rius) i no hi ha recàrrega per infiltració des de la superfície. Per ambdues raons, l'aigua emmagatzemada als porus i fractures de les formacions geològiques va buidant-se a mesura que flueix cap als punts de descàrrega, provocant així

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

la disminució del nivell freàtic. Quan el nivell freàtic disminueix a la zona de recàrrega, la magnitud del flux subterrani cap als rius (Figura 12) també decreix, però el flux continuarà mentre hi hagi una diferència de nivell freàtic entre l'aqüífer i el riu. Quan els dos nivells s'igualin, el flux cessarà.

Un piezòmetre és un sondeig entubat de petit diàmetre (habitualment <15 cm) obert en algun tram o en el seu extrem inferior per permetre l'entrada d'aigua subterrània. L'elevació del nivell d'aigua a l'interior del piezòmetre respecte al nivell del mar (pres com a nivell de referència) s'anomena nivell hidràulic o nivell piezomètric, i és una mesura de l'energia potencial de l'aigua en aquell punt.

L'aigua subterrània flueix des de punts amb alt nivell piezomètric (per tant, amb alta energia potencial) a punts amb baix nivell piezomètric (baixa energia potencial). Durant la trajectòria des de les zones de recàrrega als turons fins a les de descàrrega a les valls, l'aigua perd energia per fregament amb els sediments i roques per les quals flueix, de manera que el nivell piezomètric decreix en el sentit del flux a mesura que l'energia potencial es transforma en calor, si bé aquest calor és massa petit per poder-se mesurar.

El sistema de flux representat a la cara frontal de la Figura 12 representa una secció vertical ideal del moviment de l'aigua subterrània en una secció perpendicular des dels turons, situats a l'esquerra i a la dreta del bloc diagrama, fins a la vall fluvial al centre. L'aigua s'infiltra a la superfície del terreny, percola fins al nivell freàtic, després flueix en trajectòries que combinen moviment en sentit descendent, lateral i ascendent, fins que descarrega al riu. Aquesta representació és ideal doncs sembla que tot el flux tingui lloc només en la cara frontal. És a dir, mostra un flux bidimensional en el pla del dibuix sense mostrar que la direcció del flux pugui travessar aquest pla, ni cap a dins ni cap a fora. A la natura, el flux d'aigua subterrània és clarament tridimensional com s'il·lustra esquemàticament a la Figura 13. En aquesta figura, les línies blaves discontínues uneixen punts amb el mateix nivell piezomètric i les línies blaves contínues representen la direcció del flux d'aigua subterrània seguint el gradient hidràulic. Conceptualment, la Figura 12 s'ubica seguint la línia blanca gruixuda perpendicular al traçat del riu de la Figura 13. Malgrat que la Figura 12 indiqui que el flux és perpendicular a la línia de relleu i al traçat de la vall fluvial, en un sistema natural no és ben bé com ho mostra la Figura 13. És a dir, el flux subterrani s'inicia a les àrees amb nivell piezomètric alt a les muntanyes i es dirigeix, seguint sempre el gradient hidràulic, cap on el nivell piezomètric és menor.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

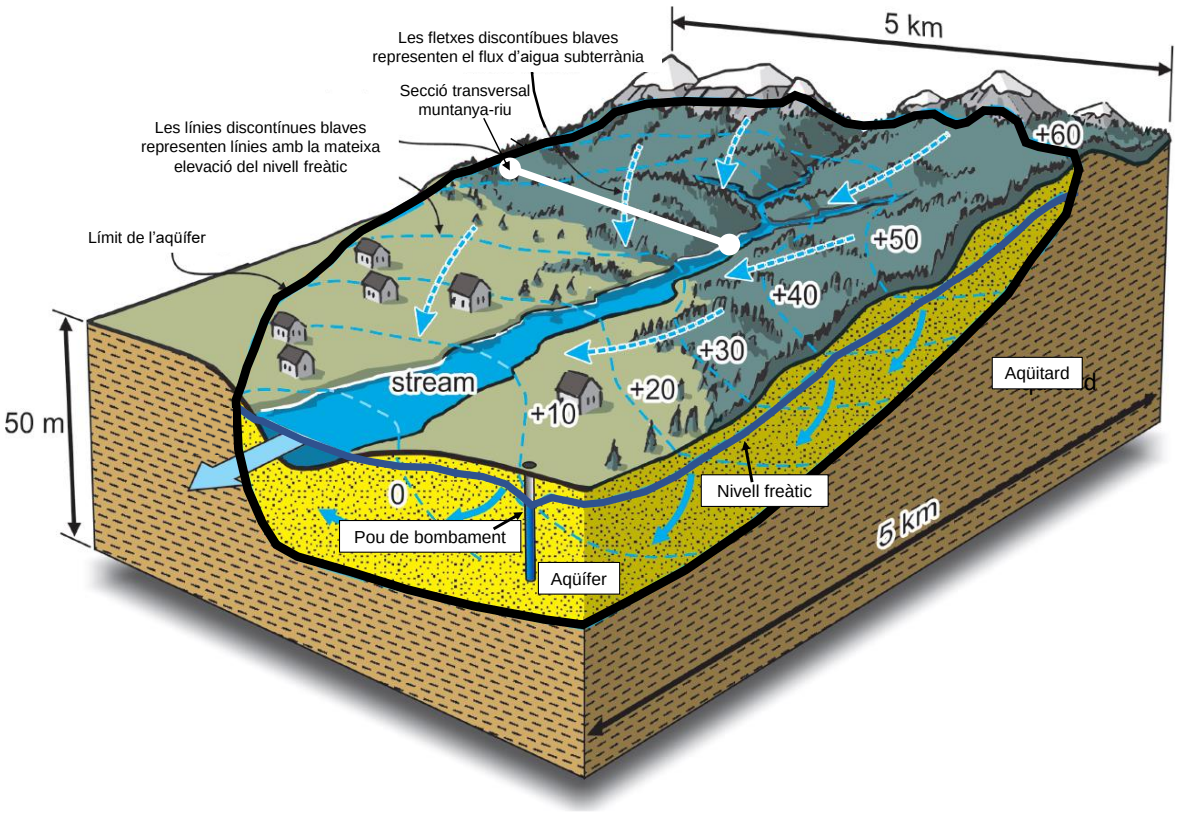


Figura 13 – El flux d'aigua subterrània és tridimensional com es mostra en aquest esquema d'una conca hidrogeològica, limitada per la línia negra. El nivell freàtic es representa per una línia de color blau fosc gruixuda, i les línies amb igual nivell piezomètric en color blau clar, traç prim i discontinu. Les fletxes blaves gruixudes mostren la trajectòria del flux a les cares del bloc diagrama i les fletxes blaves discontínues més primes, la direcció del flux en una cartografia en planta. El diagrama de la Figura 12 mostra el flux en una secció perpendicular al relleu i al riu (línia blanca). La Figura 12 representa, doncs, el flux general idealitzat des del turo a la vall, ignorant que el flux pot creuar el pla del dibuix en la direcció transversal a la secció (modificat de Rivera, 2014).

Aquest flux lateral de les muntanyes cap a les valls és important. El nivell freàtic a la vall es troba més proper a la superfície del terreny que no a les muntanyes i hi varia menys que a les zones elevades perquè està regulat per la recàrrega que té lloc en tot el vessant, des de la divisòria fins a la llera del riu. Si no plou en uns quants dies, la part de l'aqüífer sota les muntanyes perdrà recursos i esdevindrà més seca, però les valls seguiran reben el flux subterrani que s'inicia al cim de les muntanya, perquè el flux és relativament lent, i el nivell freàtic a la vall no notarà la manca de precipitació amb tanta intensitat. Durant un període de sequera, el nivell freàtic a la vall disminuirà poc, doncs l'aigua recarregada a les zones de muntanya segueix movent-se durant dies, i fins i tot anys, cap cotes inferiors. Així, aquesta recàrrega permanent que arriba amb un cert retard respecte a la precipitació que l'ha originat a les muntanyes garanteix el manteniment dels recursos d'aigua subterrània als aqüífers propers a les valls fins i tot en èpoques seques.

En certa manera, un sistema hidrogeològic és similar a un compte bancari: l'aigua emmagatzemada al subsol de les muntanyes són els "estalvis" (reserves hídriques) que continuadament fan transferència de "diners" (aigua subterrània) a les valls, a través d'un "servei postal" (flux subterrani) que arriba àdhuc quan no hi ha "ingressos locals"

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

(precipitació a la vall). Així, les valls tenen uns "ingressos" constants aportats pel flux d'aigua subterrània en temps de poca o nul·la recàrrega. Per això, els arbres de les valls són més frondosos que els arbres de les muntanyes en àrees on les sequeres són freqüents.

La connexió entre l'aigua subterrània i el paisatge

La fondària del nivell freàtic és en part responsable de la distribució del tipus de vegetació dels vessants, des dels cims de les muntanyes fins a les valls, atès que només les plantes adaptades a la sequera poden viure en les zones muntanyoses de les zones àrides, i les plantes adaptades a la presència d'aigua són més habituals prop dels rius (Figura 14). A les zones en climes àrids, l'aigua es perd a l'atmosfera per evapotranspiració, causant l'acumulació de sals i afavorint la vegetació halòfita tolerant amb l'alta salinitat del sòl.

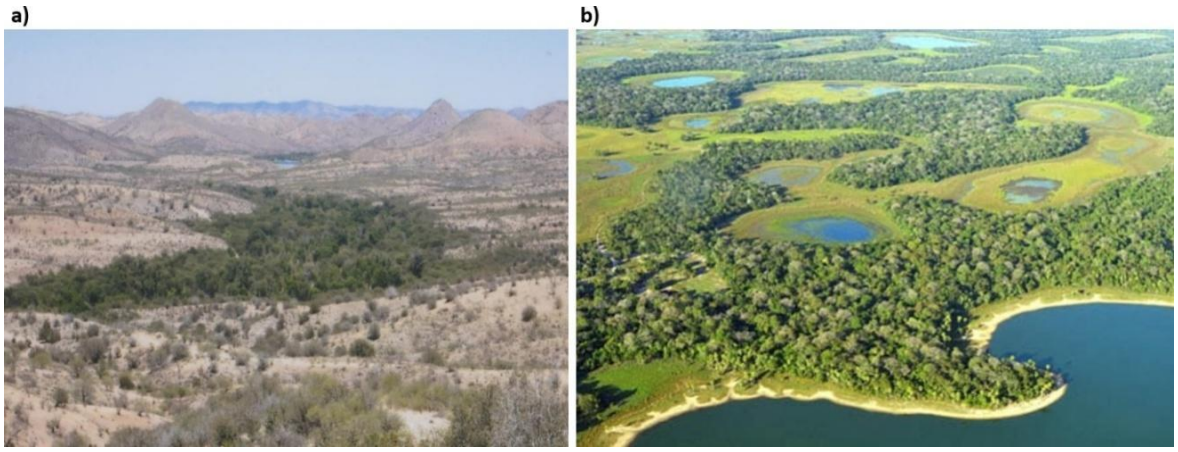


Figura 14 – La profunditat del nivell freàtic influencia els tipus de vegetació. A) A zones amb dèficit hídric com Arizona, Estats Units (imatge esquerra), els arbres creixen només a la proximitat dels cursos d'aigua on el nivell freàtic és poc profund; mentre que l'herba i els arbusts dominen als vessants dels turons on el nivell freàtic és massa profund perquè hi arribin les arrels (The Old Pueblo, 2014. "Riparian Forest along Sonoita Creek, southwest of Patagonia Lake↗", The Old Pueblo té llicència CC BY-SA 4.0↗). b) Als llocs amb aigua abundant, com les zones humides de El Pantanal, al Mato Grosso del Sud, Brasil, els arbres viuen als turons on les arrels poden créixer en una zona vadosa rica en oxigen per damunt del nivell freàtic. A la vora dels llacs, el nivell freàtic és tan proper a la superfície que els arbres no poden obtenir suficient oxigen doncs pràcticament no hi ha aire als porus del sòl i s'hi desenvolupa una vegetació herbàcia (Wikimapia, 2020. "Pantanal Mato-Grossense National Park↗" per Wikimapia↗ amb llicència CC BY 4.0↗).

El nivell freàtic és a tot arreu i quan els humans modifiquem el paisatge, la vegetació o captem aigua subterrània per l'abastament agrícola o urbà, alterem la profunditat a la que es troba. Això sol generar un impacte pels humans i pels sistemes ecològics. No obstant, amb el coneixement hidrogeològic, podem preveure les seves conseqüències abans de realitzar els canvis i, per tant, prendre decisions basades en una informació veraç i sabent de l'abast de les nostres accions. En funció de les conseqüències previstes, es pot valorar si cal procedir amb una determinada acció o si cal modificar-la amb l'objectiu de reduir, o evitar, efectes adversos.

La profunditat del nivell freàtic també pot tenir una notable influència en la manera com el terreny respon a la calor. Per exemple, a les zones àrides i caloroses d'Austràlia, on

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

la vegetació autòctona són els eucaliptus, la fondària natural del nivell freàtic és més profunda on hi ha boscos que en llocs on han estat talats per fer-hi conreus. El motiu és que els eucaliptus consumeixen la humitat del sòl i capturen l'aigua que s'infiltra, disminuint la recàrrega efectiva de l'aqüífer. Amb el canvi d'ús de forestal a agrícola, els conreus consumeixen menys aigua subterrània i, com a conseqüència, hi ha més recàrrega i el nivell freàtic és més proper a la superfície del terreny. Però quan el nivell freàtic és molt a prop de la superfície, l'aigua s'evapora deixant enrere les substàncies dissoltes i formant precipitats salins que s'acumulen al sòl fent que siguin inadequats pel conreu. De fet, la salinització del sòl és una de les causes de la contínua pèrdua de terres de conreu al món. A les zones agrícoles amb aquest problema, la gestió del sòl per evitar la salinització és clau per a mantenir la productivitat agrícola.

Un altre exemple de la influència del nivell freàtic en el paisatge el trobem en els indrets que han sofert incendis forestals, com ho explica Elbein (2019) en el seu article del *National Geographic* guanyador d'un premi Pulitzer, titulat "Els programes de reforestació poden ser més perjudicials que beneficiosos". L'autor explica que un nivell freàtic proper a la superfície en zones humides estableix la diferència entre incendis normals i inferns que causen una destrucció massiva del bosc. És el cas de l'incendi de Fort McMurray a Alberta, Canadà, l'any 2016, i el que va causar més danys de la història del Canadà. Les zones pantanoses amb abundants molses, anomenades torberes, cobreixen una immensa part del nord de Canadà i Rússia. La torba està formada principalment per matèria orgànica en descomposició, com la molsa i, per tant, les torberes contenen grans quantitats de carboni acumulat durant milers d'anys. Però hi ha pocs arbres adaptats per viure en aquests terrenys torbosos, com la *Picea mariana*, un tipus de conífera (avets) pròpia de Nord-Amèrica. Amb pocs arbres, hi ha poca evapotranspiració, la recàrrega augmenta i el nivell freàtic és proper a la superfície del terreny, causant que les torbes humides siguin resilients després dels incendis. De fet, aquests zones pateixen incendis forestals de poca intensitat i en poc temps recuperen el carbó perdut per combustió doncs la presència del nivell freàtic evita que el foc s'endinsi a l'interior de la torba. En els llocs on les torberes s'han drenat amb el propòsit de plantar-hi boscos de coníferes, com a Fort McMurray, ha succeït un ajustament ambiental: els avets, ara en excés, han consumit més aigua i com a resultat el nivell freàtic ha disminuït i la torba superficial ha estat substituïda per molsa seca que és una esca pel foc. Els avets, al créixer, acumularen grans quantitats de combustible i és en aquest context que es va produir l'incendi. Les zones de torbera intensament afectades pel foc necessitaran molts anys per recuperar el carbó alliberat a l'atmosfera (Figura 15). Els mitjans de comunicació atribuïren l'incendi als fenòmens extrems associats al canvi climàtic sense reconèixer que el factor humà en la transformació ambiental que causà el descens del nivell freàtic fou clau en la magnitud dels danys causats pel foc.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

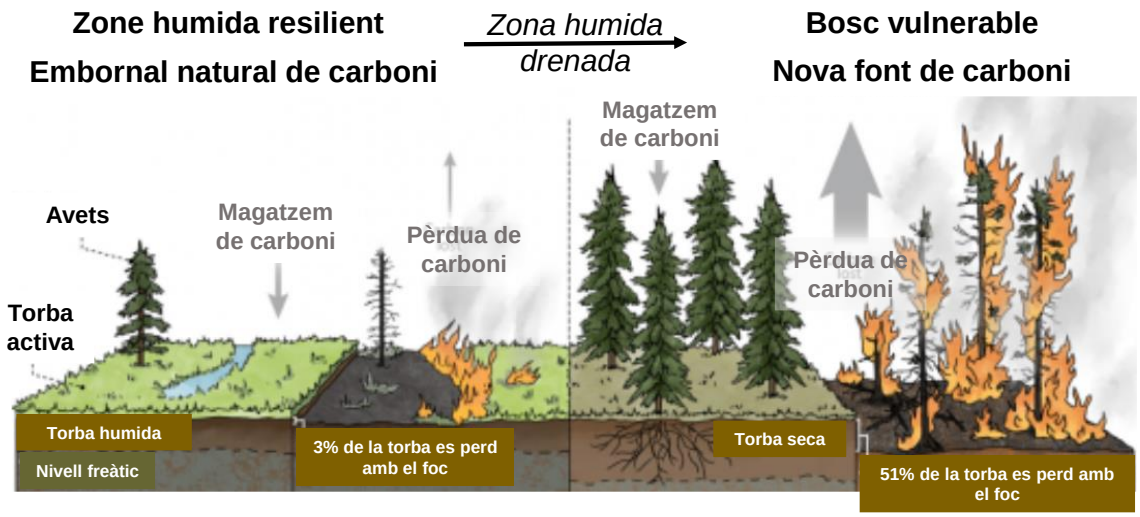


Figura 15 - L'estudi científic de l'incendi de 2016 a Fort McMurray determinà que el foc va ser molt més intens i va cremar a major profunditat en els llocs on el nivell freàtic s'havia enfondit per sota de les torberes degut a factors humans (plantacions de coníferes). En aquest context, el foc va causar la pèrdua d'una gran quantitat de carboni que havia trigat uns 1000 anys a acumular-s'hi (segons Elbein, 2019; imatge de Wilkinson, 2018).

La connexió entre l'aigua subterrània i els rius

El moviment de l'aigua subterrània des de les zones elevades cap les valls té lloc sempre que el nivell freàtic sigui superior a les muntanyes que a prop del riu. Aquells trams de riu que reben aigua subterrània s'anomenen trams o rius efluents o "rius guanyadors" (del terme anglès, *gaining streams*; Figura 16a). Vist des de la perspectiva d'una barca anant riu avall, un riu efluent incrementa el seu cabal al llarg del trajecte. Aquest increment pot representar una major amplada i/o profunditat del curs fluvial i/o una major velocitat del seu cabal. Aquest és el procés més habitual de descàrrega d'aigua subterrània. L'aigua que entra la xarxa de drenatge des de l'aqüífer manté el flux de base del riu. Als llocs on el nivell freàtic és més profund que l'elevació del nivell d'aigua al riu, el flux va del riu cap a l'aqüífer. Els trams de la xarxa de drenatge on el cabal superficial recarrega l'aqüífer s'anomenen trams o rius influents o "rius perdedors" (del terme anglès, *losing streams*; Figura 16b i c). De la barca estant, un riu influent notarà una pèrdua de cabal aigües avall, observable per la reducció de la secció i/o la fondària del canal i/o de la velocitat del cabal) i, fins i tot, pot arribar a perdre tot el cabal i quedar sec (Figura 16d). Els rius que perdent estacionalment tot el seu cabal , com els *arroyos* al sud-oest dels Estats Units, s'anomenen rius intermitents o efímers. Els rius que sempre són efluents o "guanyadors", perquè hi ha prou recàrrega per emmagatzemar aigua subterrània a l'aqüífer i alliberar-la al riu fins i tot en períodes de sequera, s'anomenen rius permanents o perennes.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

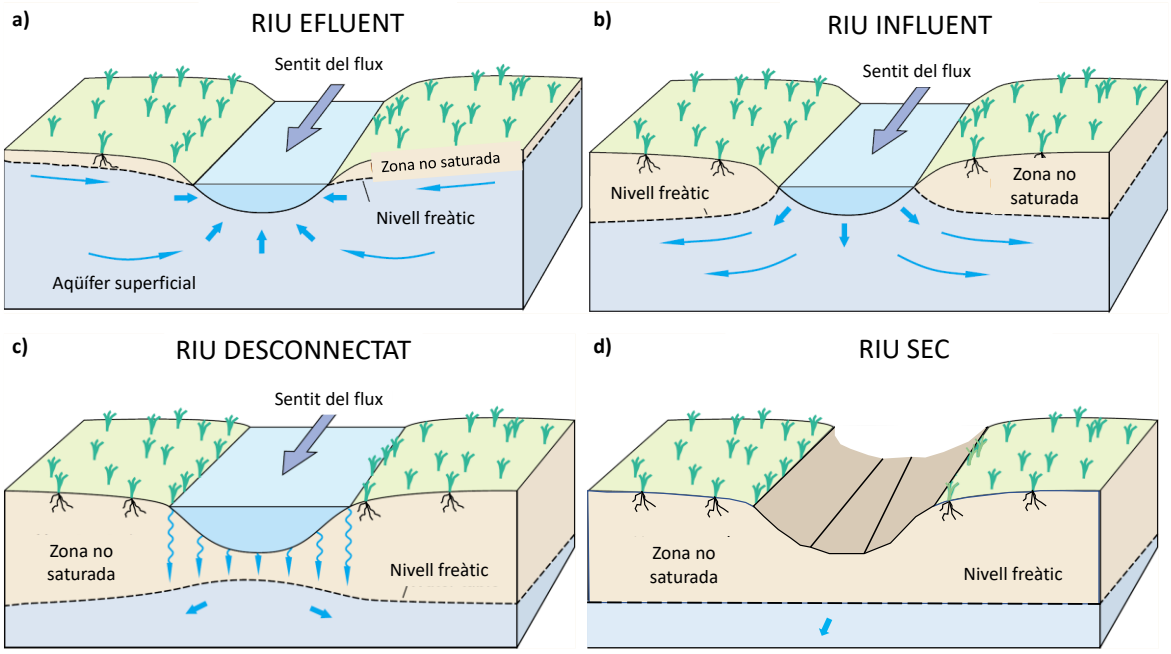


Figura 16 – Esquemes de a) riu efluent, b) riu influent, c) riu influent desconnectat, i d) riu sec (adaptat de Winter et al., 1998).

El cabal del riu és la combinació de diversos components del cicle hidrològic,

- La precipitació que s'escorre en superfície fins a les lleres;
- La infiltració que flueix a través dels horitzons del sòl temporalment saturats per damunt del nivell freàtic (anomenat flux intermedi o flux ràpid);
- La descàrrega d'aigua subterrània;
- L'activitat humana, principalment, les aportacions del clavegueram durant tempestes, les aportacions puntuals a llera de indústries i estacions de depuració d'aigua residual i el retorn de reg.

La descàrrega d'aigua subterrània a les lleres és la causa principal per la qual els rius porten aigua fins i tot quan no plou. Aquesta aportació subterrània és continua perquè la recàrrega del sistema hidrogeològic, sovint molt antiga i procedent de llocs allunyats, flueix de manera lenta i constant cap a la xarxa fluvial, constituint un component essencial per mantenir el cabal dels rius.

Malgrat que els components naturals de l'escorriment superficial varien en funció del clima i la geologia locals, es pot afirmar que, globalment, la meitat de del cabal dels rius procedeix del flux subterrani aportat per la part saturada del sistema hidrogeològic. L'altra meitat s'origina per l'escorriment superficial originat per les tempestes o per les aportacions dels nivells del sòl temporalment saturats. Una part de l'escorriment originat pels episodis plujosos té lloc a la superfície del terreny, si bé la majoria de l'escorriment a les lleres dels rius s'inicia a la zona vadosa mitjançant els nivells temporalment saturats originats per capes de baixa permeabilitat. La zona capil·lar prop de les lleres proporciona el flux intermedi un cop la infiltració arriba a la franja capil·lar modificant la pressió negativa en

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

positiva als porus del subsol. En aquest cas, l'aigua retinguda per les forces de capil·laritat es mobilitza i flueix ràpidament cap a la llera contribuint a l'escorriment superficial. Aquest fenomen s'anomena efecte de la franja capil·lar.

Cal fer esment al fet que mols hidròlegs anomenen escorriment superficial al flux que té lloc a les lleres dels rius, però en aquest text preferim dir-ne cabal superficial i reservarem el terme escorriment superficial per l'aigua de la pluja que arriba a les lleres ja sigui per fluint per damunt de la superfície del terreny o bé per les capes del sòl temporalment saturades.

Un tram de llera fluvial, com la que es mostra a la Figura 16, pot ser efluent durant un cert període de temps i esdevenir influent en el següent, tot plegat depenent de la posició relativa del nivell freàtic respecte el nivell del riu. Al llarg de la xarxa fluvial, la relació entre riu i aqüífer pot variar a cada tram i a cada estació de l'any. El cabal del riu depèn de dues condicions. La primera, de la precipitació o del desgel en els dies precedents a les capçaleres de les conques drenades per la xarxa fluvial. La segona, de la posició del nivell freàtic a sota la llera. Així, el nivell freàtic per sota la llera pot ser més elevat degut a un flux subterrani potent o pot ser inferior degut a l'efecte d'una sequera o per la vegetació freatòfita de les vores del riu. Per tant, prop de la llera, l'elevació del nivell del riu i l'elevació del nivell freàtic poden variar per diversos motius, i en temps diferents, en funció del terreny, de la vegetació i del clima tant locals com regionals.

L'intercanvi bidireccional, continu i dinàmic entre el riu i l'aqüífer il·lustra l'estreta connexió que existeix entre l'aigua superficial i l'aigua subterrània. Tant aviat una molècula d'aigua pertany a l'aqüífer com forma part de l'escorriment superficial o del volum d'un llac, estany o aiguamoll, per retornar posteriorment al subsol. Reconèixer aquesta continuïtat entre aigua superficial i aigua subterrània és indispensable per la gestió dels recursos hídrics.

Els rius influents tenen un rol important en la recàrrega dels aqüífers en zones àrides. A moltes regions àrides del planeta, les serralades reben més precipitació que les valls i, conseqüentment, proporcionen aigua a les lleres. A les parts altes de la conca, la base de les lleres sol estar més elevada que el nivell freàtic. Quan aquests torrents arriben a la plana i la llera discorre per damunt del sediments secs del fons de la vall perden part del cabal que s'infiltra i recarrega l'aqüífer subjacent (Figura 17). La manca de precipitació als fons de les valls fa que l'aigua subterrània en aquests llocs tingui un gran valor ecològic, sustentant uns ecosistemes que sense ella no existirien com es mostra a la Figura 17.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

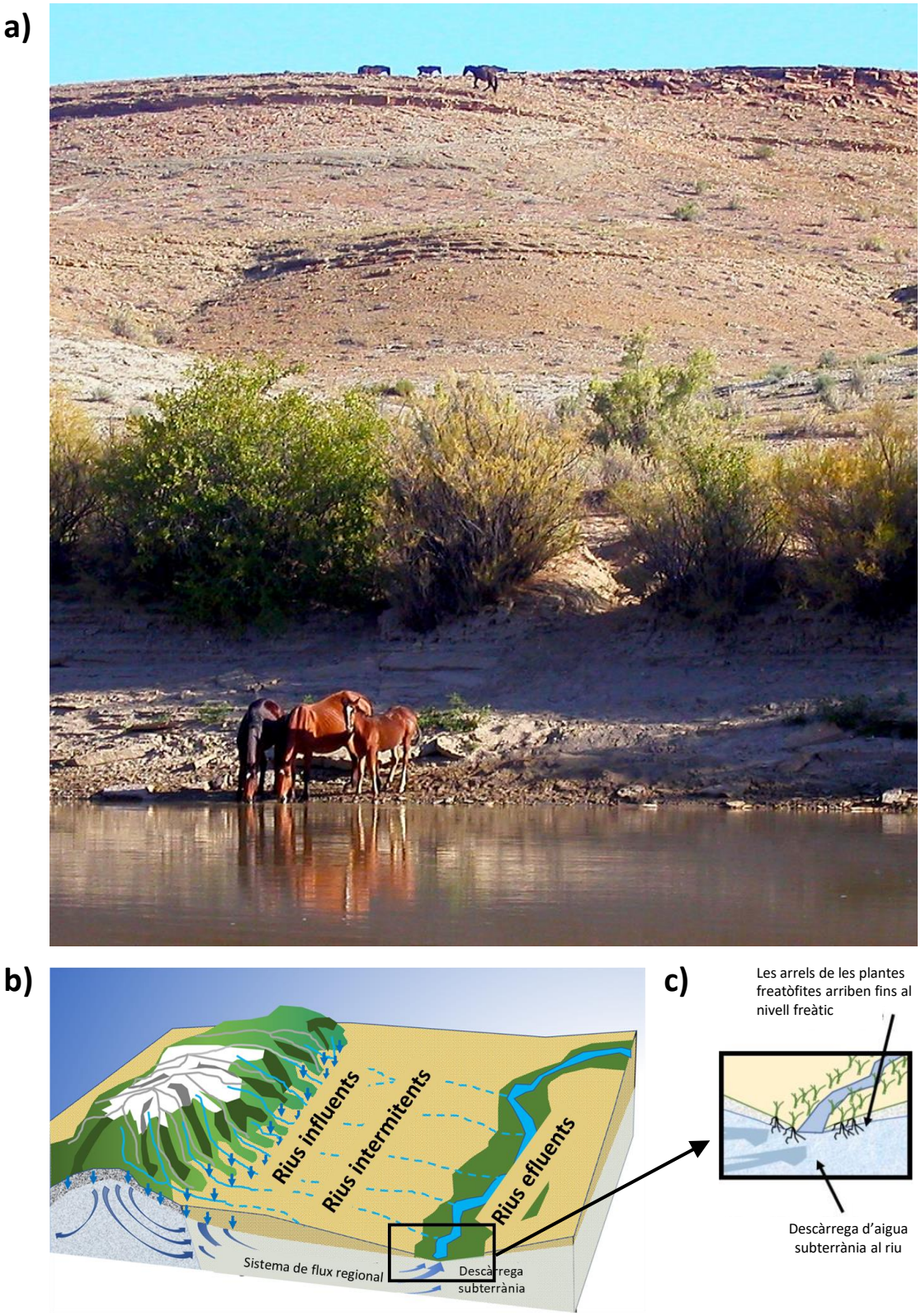


Figura 17 - La presència d'un nivell freàtic poc profund al fons de les valls en zones àrides és conseqüència del flux d'aigua subterrània originat per la recàrrega a la capçalera de la conca; a) prop del Green River, a Utah, Estats Units, la vegetació adapta les arrels per prendre l'aigua directament del nivell freàtic prop del riu i els cavalls hi troben aigua per sobreviure (Foto: Leitz, 2009); b) els rius influents al peu de les serralades contribueixen a la recàrrega del sistema; i c) les arrels de les plantes freatòfites prenen l'aigua directament del nivell freàtic (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Els recursos d'aigua subterrània han estat aprofitats des de tempos antics per les civilitzacions establertes en zones àrides excavant llargues galeries de poca pendent a l'interior de les muntanyes per extreure l'aigua del subsol cap a la superfície i desenvolupar zones agrícoles productives. (Figura 18). Aquestes galeries, conegudes com *qanat* o *kariz*, van crear-se per primer cop a l'Orient Mitjà uns 3000 anys enrere.

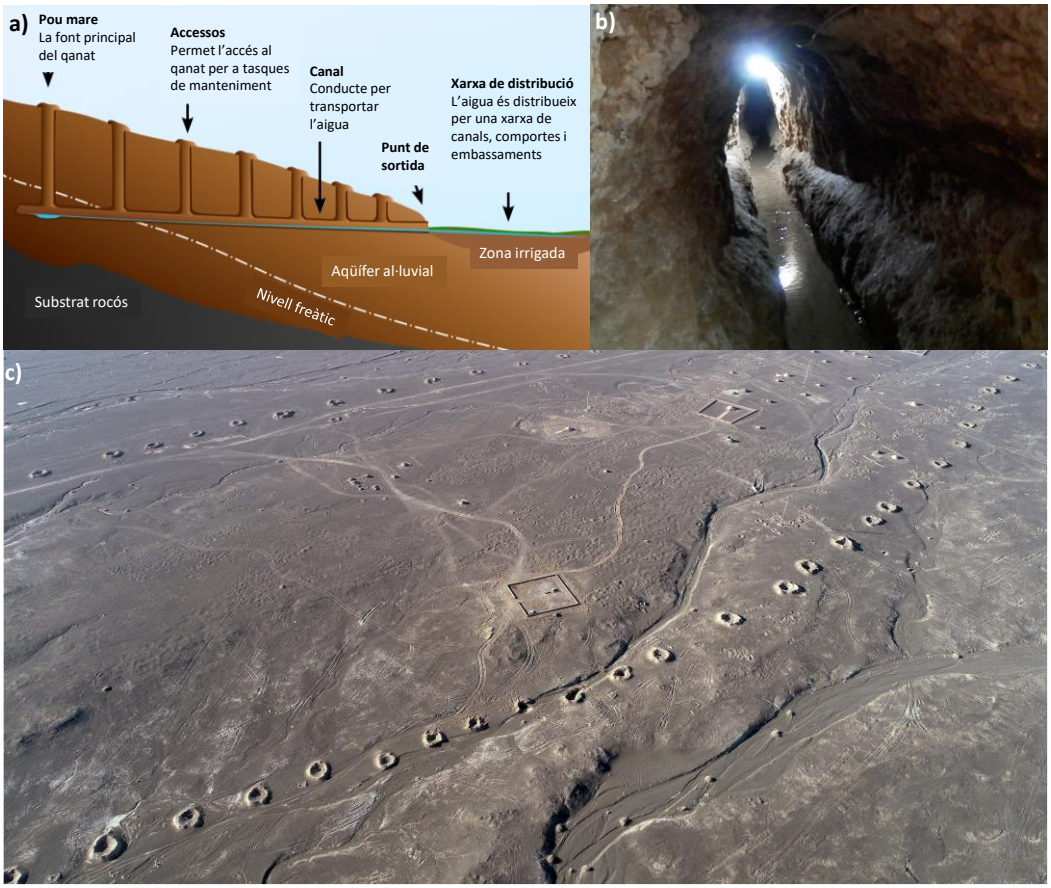


Figura 18 – Les cultures antigues construïen qanats per dur aigua de les muntanyes al desert: a) esquema d'un qanat (Bailey, 2009. "A cross section of a typical qanat↗" per Samuel Bailey↗ amb llicència CC BY 3.0↗); b) imatge de l'interior d'un qanat (Naeinsun, 2012. "A qanat tunnel near Isfahan, Iran↗" per Naeinsun, amb llicència CC BY-SA 3.0↗); i, c) traçat d'un qanat a Xingjiang, China (panoramastock.com, 2020).

En altres llocs, l'aigua sol derivar-se directament dels rius, sovint per irrigar els conreus. Als llocs on el cabal es deriva de trams de riu influents, s'impedeix que una part important del cabal recarregui l'aqüífer afectant la posició del nivell freàtic i, per tant, el volum de recursos hídrics emmagatzemats en el subsol.

L'aigua subterrània regula la temperatura del cabal dels rius

L'aportació d'aigua subterrània als rius proporciona un recurs permanent a molts rius efluents del món, la qual cosa és molt important pel bon estat dels ecosistemes aquàtics. Les plantes aquàtiques i els peixos són la base de la cadena alimentària de moltes especies

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

animals que, sense l'aportació d'aigua subterrània, no podrien sobreviure doncs el riu perdria una gran part del seu cabal en períodes de sequera. L'aportació d'aigua subterrània als rius també regula la temperatura de l'aigua superficial, doncs l'aigua del subsol està aïllada de les variacions tèrmiques diàries i estacionals de manera que les variacions de la temperatura de l'aigua subterrània són menors que les de l'atmosfera (Figura 19).

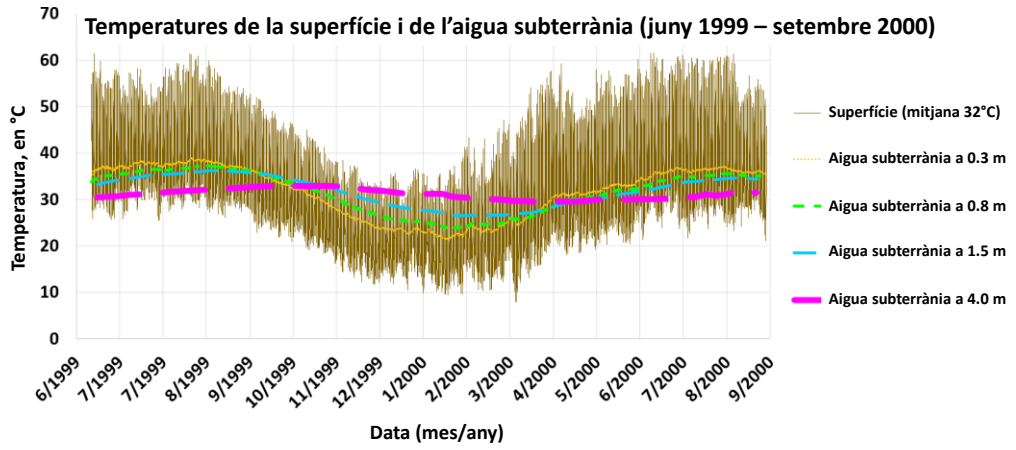


Figura 19 – La temperatura de l'aigua subterrània més superficial varia estacionalment, però amb un rang d'amplitud menor que la temperatura a la superfície. En profunditat, l'arribada dels pics de temperatura (escalfament i refredament) apareix retardada respecte als pics registrats a la superfície. A profunditats de 4 m (línia fúcsia gruixuda), la temperatura de l'aigua subterrània és pràcticament constant amb un valor proper a la temperatura mitjana en superfície (32°C en aquest lloc). A més de 10 m de fondària, la temperatura de l'aigua subterrània sol ser major que la mitjana en superfície atesa la influència de l'energia geotèrmica originada a l'interior de la Terra (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Per tant, l'aigua subterrània que alimenta els rius és més freda que l'aigua del riu a l'estiu i més calenta a l'hivern (Figura 20). Una temperatura més alta a sota la llera impedeix la congelació del fons del riu en períodes de glaçada; essent important pels ecosistemes aquàtics molts dels quals només poden sobreviure en un estret interval de temperatura. L'aigua subterrània que entra pel fons de riu o del llac també aporta oxigen, la qual cosa afavoreix la posta d'ous de peixos i evita que l'aigua més profunda del riu/llac esdevingui pobre en oxigen (anòxica) i, per tant, tòxica pels organismes aquàtics. Les condicions anòxiques es deuen a canvis d'ús del sòl a la zona de recàrrega, la compactació del sòl, la seva impermeabilització per creixement urbà o l'abocament de residus orgànics.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

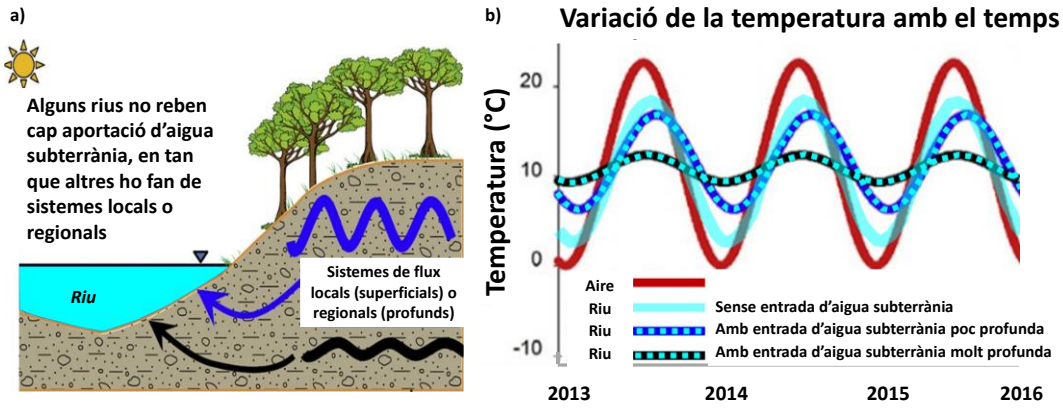


Figura 20 – Esquema de la relació entre les temperatures de l'aire, l'aigua superficial i l'aigua subterrània: a) alguns rius no reben aigua subterrània, altres en reben de la part més superficial i/o de la part més profunda de l'aqüífer; b) la fluctuació de la temperatura a l'aire (línia vermella) és més ampla que a l'aigua. Un riu que no rebi aigua subterrània tindrà una variació tèrmica un xic menor que l'atmosfèrica (línia de color blau clar), mentre que un riu que en rebi mostrarà una amplitud més atenuada (línies amb punts blaus) (adaptat de Briggs et al., 2018).

La connexió entre l'aigua subterrània i les fonts

Les fonts s'alimenten d'aigua subterrània en aquells llocs on el nivell freàtic creua la superfície del terreny. Poden formar-se en fondalades o depressions dels vessants que tallen la superfície freàtica com a la Figura 21a, o poden formar-se on un nivell geològic de baixa permeabilitat manté l'aigua "penjada" per damunt del nivell freàtic i la condueix fins a la superfície com a la Figura 21b.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

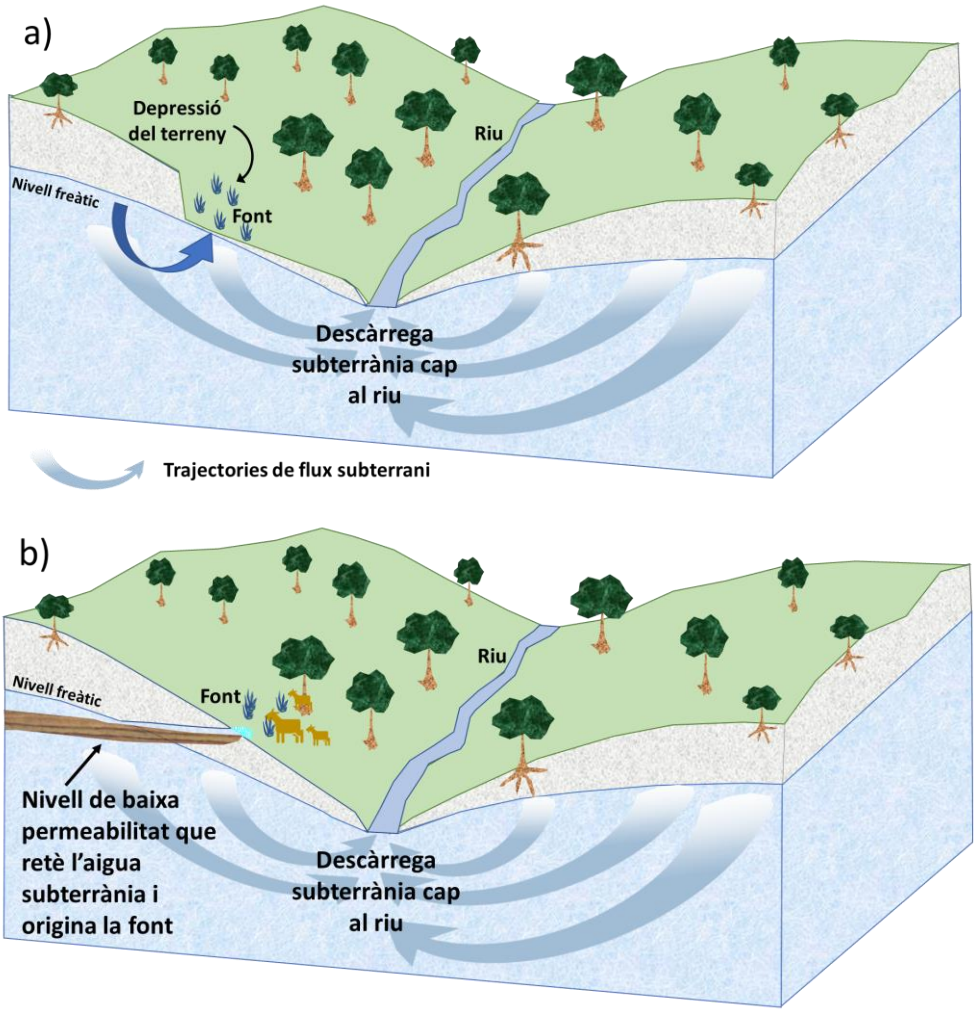


Figura 21 – Les fonts es troben on el nivell freàtic creua la superfície del terreny, a) en una depressió del vessant, o b) per una formació geològica que "penja" l'aigua i la fa aflorar **(**Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Les fonts, o sorgències, han estat un recurs hídric important en la història de la humanitat i, actualment, abasteixen més de 100 milions de persones i, també, les empreses envasadores d'aigua mineral. Les fonts eren l'origen de l'abastament d'aigua a l'antiga Roma, on la seva aigua era transportada per aqüeductes, alguns dels quals encara proveeixen la demanda actual de la ciutat. Els oasis, que de fet són sorgències al mig del desert, eren la principal font d'abastament d'aigua a la Ruta de la Seda entre Xina i Europa. Precisament, el trajecte nord de Ruta de la Seda creua el desert Badain Jaran a Xina (el quart més extens del món) on hi ha més de cent llacs alimentats per aigua subterrània al mig de les dunes més grans del planeta (Figures 22 i 23). Aquests llacs mantenen els oasis i un sistema ecològic únic al desert. De manera semblant, es pensa que els flux d'aigua subterrània de llarg recorregut que convergeixen i formen sorgències a la Gran Vall del Rift a l'València oriental van ser essencials per mantenir l'entorn vital de les primeres comunitats humanes malgrat les sequeres de mols segles de durada.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

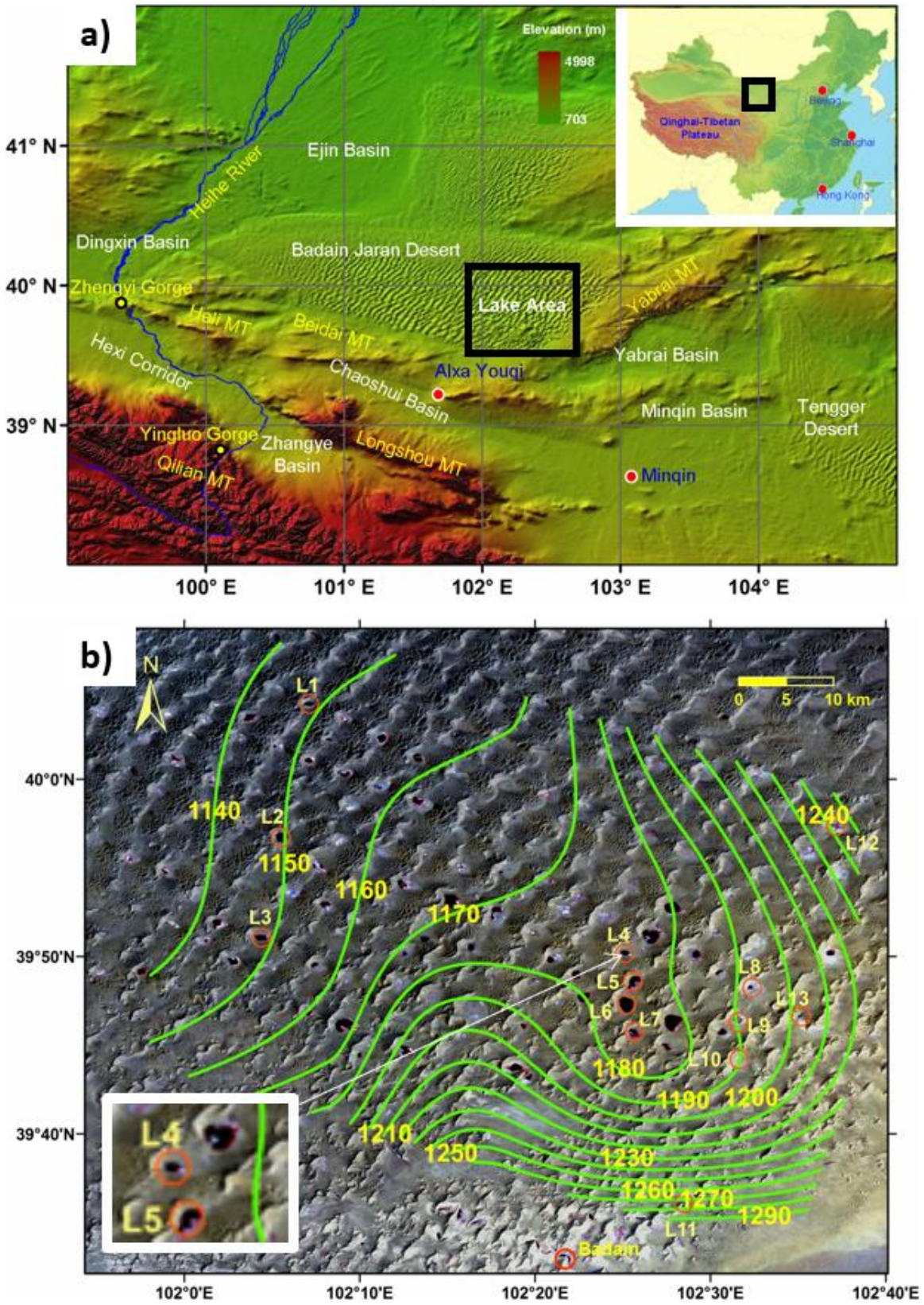


Figura 22 – Les fonts d'aigua subterrània formen llacs al mig de les dunes més grans del món al desert de Badain Jaran a Xina. Aquests llacs presenten diversos nivells de qualitat, des d'aigua dolça a aigua extremadament salina, i preserven els oasis i la seva ecologia. a) Situació del desert de Badain Jaran i de la zona de llacs (Jiao, 2015); (b) Imatge Landsat de la zona dels llacs del 24 de maig de 2003, amb les línies isopiezes a intervals de 10 m estimades pel ICESat (*Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite*) (Jiao, 2015).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Figura 23 – Llac entre les dunes del desert de Badain Jaran a Xina (Jiao, 2017).

En determinats llocs, el cabal d'algunes sorgències és més calent que el d'altres aigües superficials properes i s'anomenen fonts termals. En aquest tipus de fonts, l'aigua subterrània assoleix profunditats on augmenta la seva temperatura degut a activitat volcànica o simplement pel gradient geotèrmic de l'interior de la Terra. La densitat de l'aigua decreix amb la temperatura i permet que l'aigua ascendeixi fins arribar a la superfície on apareix formant fonts d'aigua calenta. Aquestes fonts termals se situen generalment a prop de zones amb activitat ígnia recent com ho indica la seva concentració al voltant de les zones tectònicament actives de l'oest dels Estats Units (Figura 24).

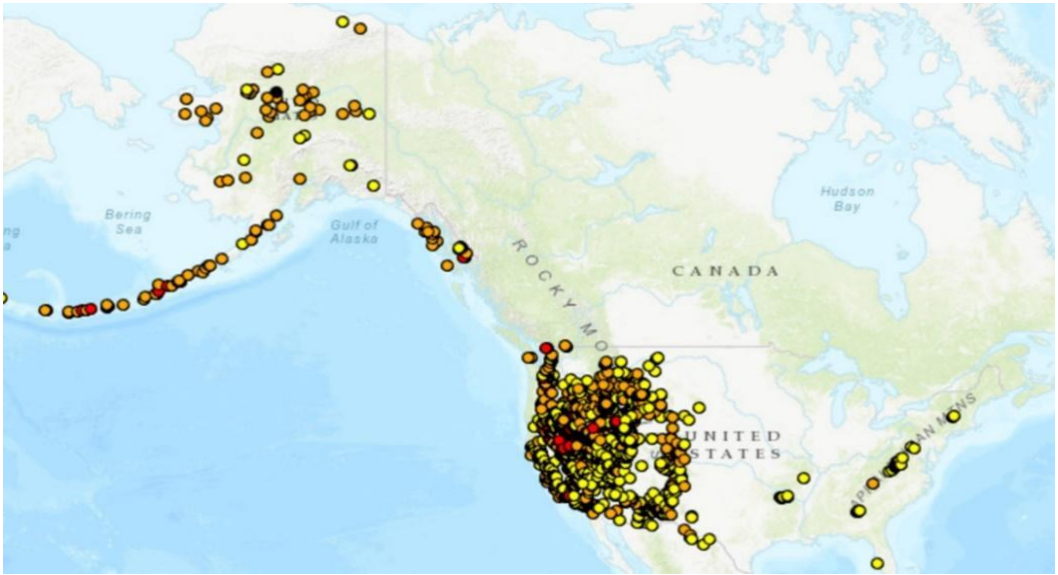


Figura 24 – Les fonts termals se situen generalment a prop de zones amb activitat ígnia recent, com ho mostra aquesta imatge de *Google Earth* amb la distribució de les fonts termals a Nord-Amèrica (USNOAA, 2019; dades extretes de Berry et al., 1980).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

En altres circumstàncies, l'aigua augmenta la seva temperatura en profunditat i aprofita un conducte directe a través de zones fracturades o falles per fluir a la superfície, formant un guèiser que periòdicament expulsa un gran volum d'aigua i vapor. L'aigua expulsada es refreda i torna al subsol on s'escalfa de nou, esdevé menys densa i guanya pressió per l'efecte dels gasos dissolts. Durant aquest procés, arriba un moment en que el pes de la columna d'aigua és insuficient per a retenir la pressió de l'aigua en profunditat i es produeix l'erupció. Aquests fenòmens, com el guèiser de la Figura 25, són molt menys freqüents que les fonts termals.

Figura 25 – El famós guèiser islandès Strokkur en erupció (Tille, 1996. "Eruption of Strokkur close by↗ " per Andreas Tille↗ amb llicència CC BY-SA 3.0↗).

Aigua subterrània i captacions

El bombament d'aigua subterrània a la superfície a través de pous, o captacions, és un altre factor d'intercanvi dinàmic en el cicle hidrològic. El bombament produeix un descens del nivell freàtic a prop dels pous, extraient l'aigua emmagatzemada en el subsol. El descens ocasionat s'estén radialment des del pou creant una superfície en forma de con invertit al seu voltant. La diferència de nivell freàtic abans i després del bombament s'anomena descens i la geometria cònica que adopta el nivell freàtic, el con de depressió (Figures 26a i b). Si el bombament continua, el con de depressió creix fins que el flux entrant a través de l'aqüífer equilibra el volum extret al pou. En el cas que el con de depressió arribi fins a un riu, l'aigua superficial s'infiltra i recarrega l'aqüífer induïda pel bombament.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

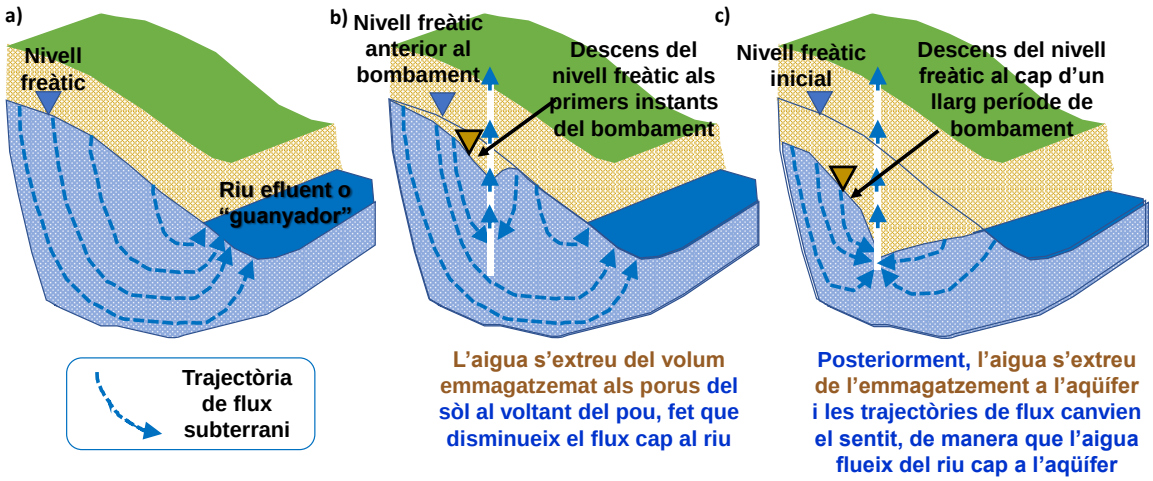


Figura 26 – Esquema relacionant el bombament en un pou i el seu efecte en un riu proper a conseqüència del descens originat. a) abans del bombament; b) un cop iniciat el bombament, disminueix l'emmagatzement d'aigua a l'aqüífer i decreix el flux subterrani cap el riu, afectant al seu cabal; c) si el bombament continua, el descens s'incrementa i causa que l'aigua del riu s'infiltri i flueixi cap al pou, disminuint el cabal superficial i, amb ell, el nivell d'aigua a la llera (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

L'aigua subterrània, a diferència d'altres recursos explotables, pot ser renovable. Per tant, hom pot desenvolupar un règim d'extracció que perduri indefinidament sense causar impactes, la qual cosa és desitjable des de la perspectiva ambiental. No obstant, l'aigua subterrània és un recurs compartit, de manera que l'explotació que beneficia a una part pot ser perjudicial per una altra i/o per la viabilitat d'un ús perdurable dels recursos hídrics a llarg termini. Així, assolir l'ús sostenible, on s'hi considerin totes les implicacions ambientals i socials, és necessari per evitar el que es coneix com la "tragèdia dels comuns"; és a dir, per prevenir una situació en què l'acció conjunta d'usuaris individuals, actuant en el seu propi interès, acaben comportant-se de forma contrària a l'interès comú, arribant a fer malbé el recurs o fins i tot produint el seu esgotament. El terme sostenibilitat ha estat proposat per definir aquesta gestió ambiental i social dels recursos. En l'explotació dels recursos d'aigua subterrània, la sostenibilitat s'interpreta sovint per extreure menys recurs que el que naturalment es recarrega. Aquest enfoc s'anomena producció segura. Malgrat que es respecti aquesta condició, el creixement del con de depressió amb el bombament continuat pot causar una pèrdua d'evapotranspiració, induir la infiltració de recursos superficials propers o capturar aigua que, en altres circumstàncies, fluiria cap a altres massa d'aigua: aqüífers, rius, zones humides, ... Si el ritme d'extracció d'aigua subterrània respecte el balanç hídric regional i genera cap dels impactes esmentats, aleshores es parla de producció sostenible. Un pla de gestió basat en la producció sostenible té en compte que la modificació d'una part del cicle hidrològic pot impactar-ne d'altres, la qual cosa pot tenir implicacions ambientals, culturals i legals.

L'explotació dels recursos d'aigua subterrània no pot ser sostenible si la seva extracció excedeix al recàrrega del sistema doncs el nivell freàtic disminuirà progressivament i, en conseqüència, s'esgotarà el recurs emmagatzemat en l'aqüífer. Si el volum extret per bombament supera al de recàrrega, el con de depressió creixerà

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

indefinidament fins que l'explotació del recurs sigui del tot ineficient. Quan el bombament és superior a la recàrrega es parla d'esgotament del recurs, sobreexplotació o, en un cas extrem, mineria d'aigua subterrània. L'aqüífer Ogallala a Kansas, Estats Units, és un exemple clar dels efectes del bombament excessiu d'aigua subterrània. El descens del nivell freàtic causat per la seva sobreexplotació provocà que els cursos fluvials s'assequessin en una àrea d'uns 200 mil km² (Figura 27).

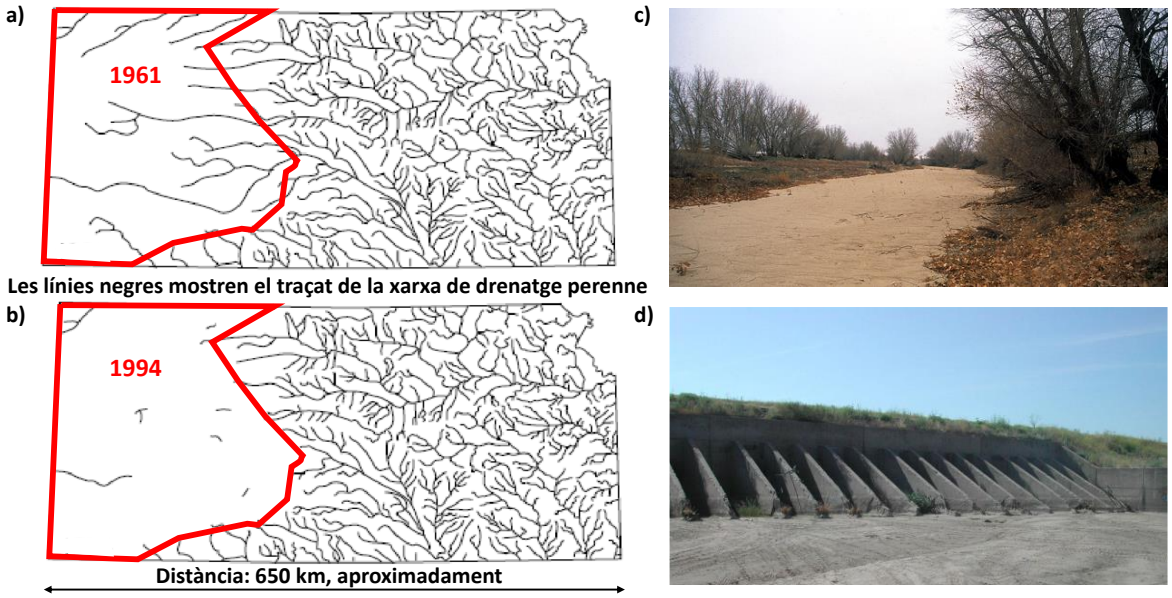


Figura 27 – El bombament d'aigua subterrània a l'aqüífer Ogallala, Kansas, Estats Units, esgotà el recurs emmagatzemat i afectà al nivell freàtic causant que (a) els rius perennes al 1961 (KGS, 1998) esdevinguessin secs (b) al 1994 (KGS, 1998) com es mostra a les fotografies c) (Charlton, 2018) i d) (USNWS, 2012).

Altres vegades, l'explotació antròpica dels recursos hídrics complica el cicle hidrològic transvasant aigua d'una conca a una altra, ja sigui físicament a través de conductes i canonades, o de manera inadvertida, de forma virtual. L'aigua virtual és aquella que conté un producte procedent d'una altra regió on s'ha conreat, envasat o manufacturat de manera que amb el producte s'importa un determinat volum d'aigua.

4.3 La perspectiva regional

Ampliant la perspectiva en que analitzem el cicle hidrològic (Figura 28), les unitats hidrogeològiques presenten sovint una estructura en capes d'abast regional. Les capes geològiques, o estrats, es deuen a: 1) sediments depositats per l'aigua o el vent; i 2) la presència de roques sedimentàries, que formen el 73% de l'escorça terrestre superior, que mostren la seva distribució estratigràfica original. Aquest estructura en capes és important doncs tant la capacitat d'emmagatzemar aigua subterrània com la facilitat de deixar-la fluir dependran de la porositat i permeabilitat de cada un dels materials geològics de les capes, creant una seqüència de nivells aqüífers i de nivells confinants.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

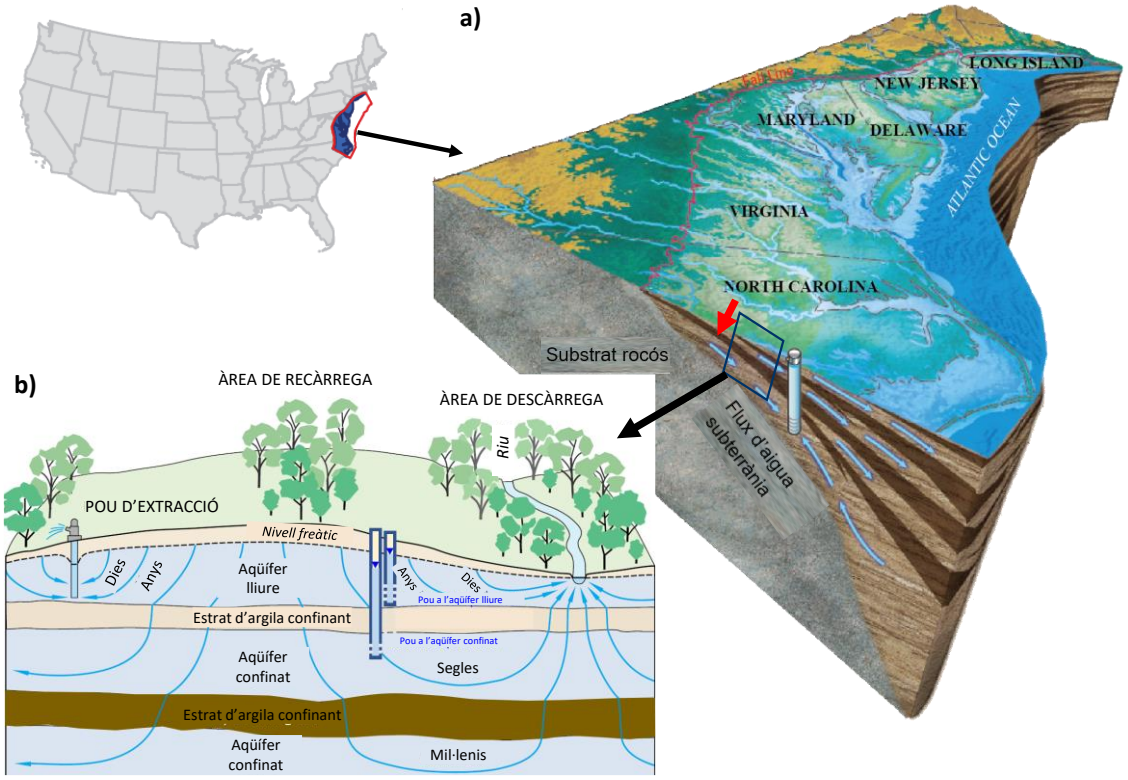


Figura 28 – Vista regional d'un sistema hidrogeològic. a) Esquema tridimensional de a plana sedimentària costanera i la seva acreció cap al mar a la costal atlàntica dels Estats Units (adaptat de USGS, 2019b), i la seva situació; b) a escala local, els diferents nivells hidrogeològics són una petita part del sistema hidrogeològic regional i es distingeix entre unitats aqüíferes i unitats confinants. (Winter et al, 1998, adaptat de Heath 1983).

Aqüífers i nivells confinants

En la perforació d'un pou o un sondeig s'arriba al punt on es troba zona saturada; és a dir, s'arriba al nivell freàtic que representa el nivell d'aigua en un aqüífer lliure o no-confinat. Així, el nivell hidrogeològic superior just per sota la superfície del terreny, com es mostra a la Figura 28b, constitueix un aqüífer lliure o no-confinat. La base d'aquest aqüífer lliure coincideix amb el sostre del primer nivell confinant (Figura 28b). Si el pou o sondeig es revesteix amb un tub que l'aïlli de l'aigua subterrània emmagatzemada a l'aqüífer lliure i se n'extreu l'aigua que pugui haver-hi, ens trobarem amb un tub buit obert per la part de baix a un material fangós. Més avall, a mesura que el sondeig continua travessant el nivell confinant, l'aigua subterrània no pot fluir a la perforació doncs el nivell confinant format per llims o argiles de baixa permeabilitat ho impedeix. A més profunditat, el sondeig arribarà a la base del nivell confinant i penetrarà a l'estrat de sorra. Immediatament, l'aigua entrarà a l'interior del sondeig i el nivell d'aigua s'elevarà fins a una alçada superior al sostre de l'estrat sorrenc. Aquesta capa de sorres és un altre nivell aqüífer perquè es tracta d'una formació geològica porosa i permeable; en aquest cas, però, el nivell d'aigua al seu interior és més elevat que el límit geològic superior perquè l'aigua s'hi troba a pressió. Per tant, l'estrat sorrenc constitueix un aqüífer confinat, captiu o artesià (Figura 28b). És confinat en el sentit que l'aigua subterrània que conté està retinguda pel nivell d'argiles

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

superior. Aquests nivells confinants solen ser de baixa permeabilitat, fent que l'aigua hi flueix molt lentament i mantenint la pressió hidrostàtica de l'aqüífer inferior. Quan el sondeig travessa el nivell confinant, la pressió de l'aigua subterrània dins de l'aqüífer confinat és transmet a l'aigua de l'interior del pou fins que s'equilibra amb el nivell piezomètric de l'aqüífer. La Figura 29 mostra la relació en detall entre aqüífer lliures i confinats. D'altra banda, el nivell de l'aigua a l'aqüífer superior no està confinat per dalt per cap nivell de baixa permeabilitat i el nivell d'aigua coincideix amb el nivell freàtic. Per això aquests aqüífers s'anomenen aqüífers lliures. El nivell d'aigua més elevat al pou situat a l'aqüífer lliure en relació al nivell de l'aigua al pou proper ubicat a l'aqüífer confinat de la Figura 29 indica que, en aquest punt precís, existirà un flux d'aigua descendent a través de la capa confinant. Aquest flux serà molt petit atesa la baixa permeabilitat del nivell confinant.

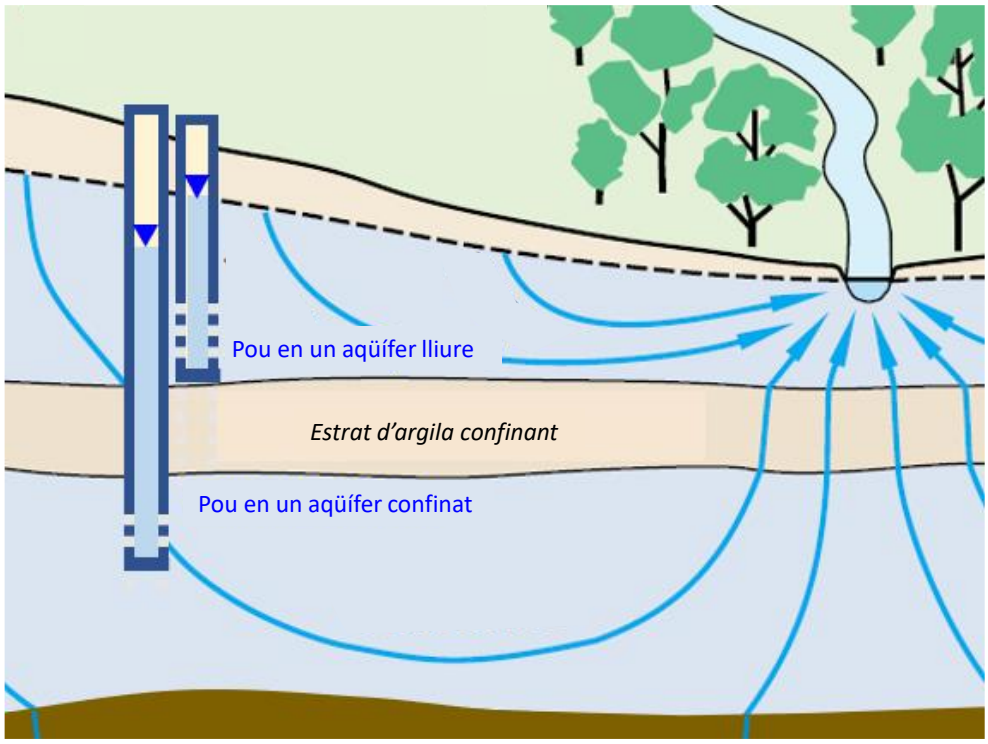


Figura 29 – Detall de l'esquema de la Figura 28b. Les línies discontínues al perfil dels pous indiquen les "zones de reixeta" per on l'aigua de l'aqüífer entra al pou. La resta del sondeig, representat amb línia contínua, està entubat impedint el pas de l'aigua. El nivell d'aigua al pou ubicat a l'aqüífer lliure coincideix amb el nivell freàtic, mentre que el nivell al pou de l'aqüífer confinat indica la pressió existent en aquesta unitat hidrogeològica, preservada per la presència de la capa confinant (adaptat de Winter et al., 1998, i de Heath, 1983).

Per interpretar les caues de la pressió de l'aigua subterrània a l'aqüífer confinat, ens referim de nou a la Figura 28b i al seu emplaçament a escala regional a la Figura 28a, on els diversos nivells hidrogeològics (aqüífers confinats, nivells confinants, ...) són part d'un sistema hidrogeològic molt més gran. L'alternança d'estrats de sorra llim i argila està inclinada suaument cap al mar. Aquesta estructura lleugerament cabussant de nivells

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

interestratificats de materials grollers, com sorres i graves, amb materials fins, com llims i argiles, és habitual a les planes sedimentàries costaners d'arreu del món. La visió regional revela que, terra endins (a la part esquerra de la Figura 28a), els nivells confinants es perllonguen cap al continent i intercepta la superfície del terreny. En el punt on afloren, assenyalat per una fletxa vermella a la Figura 28a, l'aqüífer no és confinat perquè ja no hi ha la capa d'argiles confinant; per tant, esdevé un aqüífer lliure que es recarrega per infiltració de la precipitació. Atès que aquesta zona de recàrrega és més elevada que el punt on se ubica el pou, aquesta elevació addicional es transforma en una pressió extra que es transfereix al conjunt de l'aqüífer. Aquest fet és semblant al sistema de subministrament d'aigua potable a una població mitjançant un dipòsit d'aigua elevat. L'alt nivell hidràulic al dipòsit força el flux d'aigua cap a les cases del poble (Figura 30). Malgrat que els conductes de la xarxa de distribució estan per sota el nivell del carrer, quan s'obre una aixeta al segon pis l'aigua surt a pressió perquè es troba a un nivell inferior al del dipòsit.

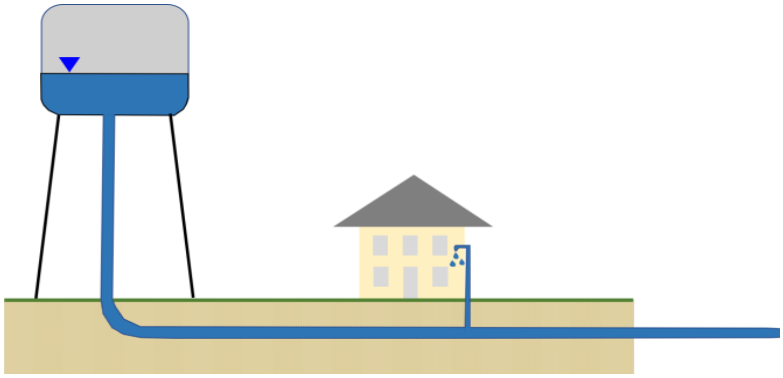


Figura 30 – El dipòsit d'aigua més elevat que la casa dona una pressió alta al sistema que permet que l'aigua arribi fins al segon pis, malgrat que la xarxa de distribució estigui soterrada (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Diguem que el cas del dipòsit elevat és "semblant" a un sistema hidrogeològic perquè, a diferencia del subsol, el conducte no està omplert per material porós. De fet, l'aigua perd molta més energia quan flueix a través d'un medi porós que per una canonada. En qualsevol sistema hidrogeològic, fins i tot en un aqüífer lliure, l'aigua de les parts més profundes està sota pressió i, si és el cas, pot fluir en sentit ascendent cap a la llera d'un riu. A més, un pou que només estigui obert a la part més profunda de l'aqüífer pot tenir un nivell piezomètric superior al propi nivell freàtic i, fins i tot, superior al nivell del terreny, de manera que l'aigua fluirà del pou cap a l'exterior sense ajuda de cap mecanisme d'extracció (bomba). Aquest pou, amb un nivell piezomètric superior a la superfície del terreny s'anomena pou sorgent i aquesta circumstància pot ocórrer tant en aqüífers lliures com confinats.

Un conegut pou artesià sorgent és el que es va perforar a un aqüífer amb una elevada pressió l'any 1888 a Woonsocket, South Dakota, Estats Units, causant un "sortidor"

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

(Figura 31a). La pressió s'originava a la zona de recàrrega de l'aqüífer Dakota situada a l'extrem oest de la Figura 31b, des d'on l'aigua subterrània fluïa per l'aqüífer per sota d'una capa confinant argilosa de baixa permeabilitat, de manera que la pressió es mantenia i no es perdia per fluxos cap a altres nivells hidrogeològics durant el trajecte. Quan el pou Woonsocket (representat per la línia vermella a la Figura 31b) es va perforar, l'aigua va sortir a una pressió elevada formant un sortidor colossal (Figura 31a). Amb el temps, el volum d'aigua emmagatzemat a l'aqüífer va disminuir. Per tant, la pressió també ho va fer i el pou va deixar de ser sorgent (és a dir, el nivell piezomètric al pou va baixar fins a situar-se per sota de la superfície del terreny). Més endavant, va caldrà una bomba per extreure l'aigua del pou. Els pous artesians sorgents solien ser habituals a molts llocs del planeta, però la pèrdua de pressió als aqüífers degut al bombament n'ha fet desaparèixer molts.

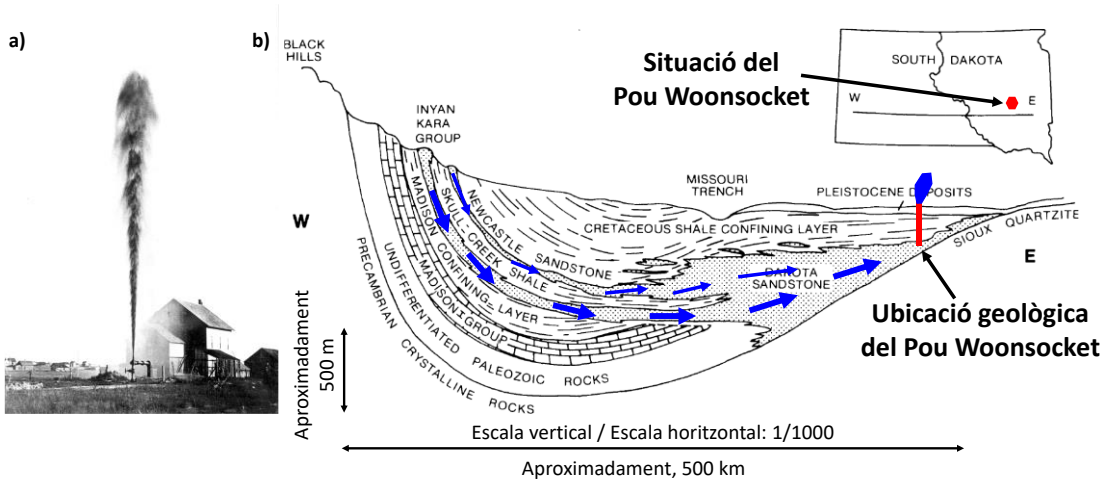


Figura 31 - En pou artesià sorgent: a) El pou Woonsocket a l'aqüífer Dakota es va perforar l'any 1888 amb el seu "sortidor" retratat a l'any 1900 (Darton, 1900); b) Secció transversal de l'aqüífer Dakota mostrant la recàrrega a la zona oest i el sentit del flux per sota de la capa confinant d'argiles que permet mantenir l'elevada pressió a l'interior de l'aqüífer (adaptat de Bredehoeft, 1983).

Traducció dels termes del tall geològic: *Precambrian Crystalline Rocks*: Roques cristal·lines del Precambrià; *Undifferentiated Paleozoic Rocks*: Roques indiferenciades del Paleozoic; *Madison Group*: Grup Madison; *Madison Confining Layer*: Nivell confinant Madison; *Inyan Kara Group*: Grup Inyan Kara; *Skull-Creek Shale*: Argila Skull-Creek; *Newcastle Sandstone*: Sorrenca Newcastle; *Dakota Sandstone*; Sorrenca Dakota; *Cretaceous Shale Confining Layer*: Nivell confinant d'argila del Cretaci; *Missouri Trench*: Vall del Missouri; *Pleistocene Deposits*: Dipòsits del Plistocè; *Sioux Quartzite*: Quarsita Sioux.

La diferència entre aqüífer lliure i confinat és important per diverses raons. Per exemple, els aqüífers lliures són més vulnerables a la contaminació atès que reben la recàrrega directament a la seva superfície i el volum d'aigua emmagatzemat hi fluctua més en funció dels períodes de pluja o sequera. Un aqüífer confinat està protegit pel nivell confinant, els seus recursos tendeixen a contenir menys contaminants i el seu nivell piezomètric no sol respondre tant ràpidament a les variacions de la recàrrega. L'aigua en un aqüífer confinat sol tenir un llarg temps de residència en el sistema hidrogeològic com mostra la Figura 28b. Si bé en alguns llocs l'aigua d'un aqüífer lliure també pot presentar un temps de residència llarg, el més habitual és que sigui només de dies o anys. Contràriament, l'aigua en aqüífers confinats granulars (a diferència del sistemes càrstics i

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

de roques fracturades) té un temps de residència de l'ordre de centenars o milers d'anys; és a dir, l'aigua que flueix cap a les zones de descàrrega va infiltrar-se fa cents o milers d'anys enrere.

L'emmagatzement d'aigua als aqüífers

Una altra diferència entre aqüífers lliures i confinats és la manera com responen un cop s'inicia el bombament. Quan l'aigua s'extreu d'un aqüífer lliure, l'espai que deixa lliure al fluir es replaça per l'aire dels porus de la zona no saturada (Figura 32). Quan l'aigua s'extreu d'un aqüífer confinat, l'aire no pot omplir els porus doncs aquest nivell hidrogeològic no està comunicat amb l'atmosfera i la disminució de la càrrega hidràulica produeix la descompressió de l'aigua i la compactació dels materials geològics (especialment, les capes argiloses a l'interior dels nivells aqüífers o entre ells). Això succeeix perquè l'elevada pressió hidrostàtica ha contribuït a l'estabilitat del terreny sostenint una part del pes dels materials geològics del damunt i de la mateixa aigua (Figura 33).

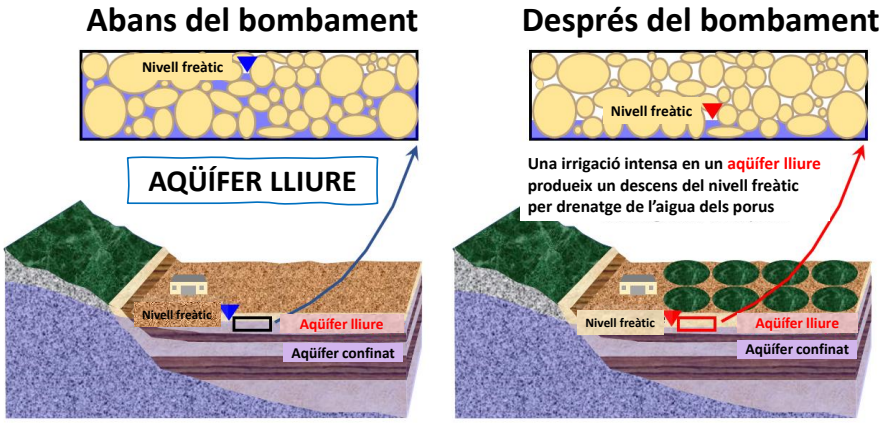


Figura 32 – Esquema del canvi en un aqüífer lliure abans (esquerra) i després (dreta) d'un bombament intens que ha buidat els porus (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

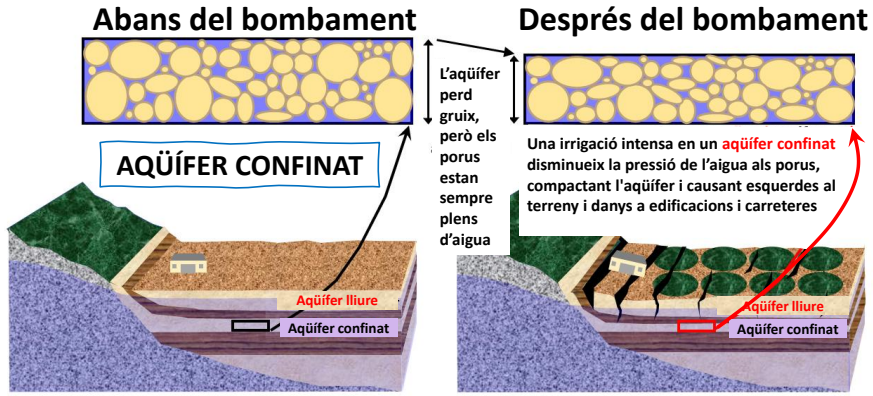


Figura 33 - Esquema mostrant el canvi de les condicions a l'interior d'un aqüífer confinat abans (esquerra) i després (dreta) d'un bombament intens que ha produït la pèrdua de pressió als porus i la compactació dels nivells geològics (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Degut al fet que els porus es buiden quan s'extreu aigua d'un aqüífer lliure i perden pressió quan és un aqüífer confinat, la resposta del bombament es propaga molt més ràpidament en els aqüífers confinats que en els lliures. **El descens del nivell piezomètric a causa del bombament en un aqüífer confinat pot registrar-se a centenars de metres o kilòmetres del pou en qüestió d'hores o dies (depenent, és clar, de les propietats de l'aqüífer), malgrat que l'aigua al voltant del pou només s'hagi desplaçat un pocs metres durant el bombament**. Aquest fenomen és semblant a les onades del mar: l'ona es trasllada ràpidament però les molècules d'aigua no es mouen pràcticament del mateix lloc, doncs l'onada transfereix energia i no desplaça massa.

Una diferència que cal tenir en compte entre el drenatge dels porus en aqüífers lliures i la compressió en un aqüífer confinat és que **pel mateix descens de nivell piezomètric un aqüífer lliure subministrarà un volum d'aigua molt més gran que un aqüífer confinat**. En general, una variació de nivell d'un metre de descens en un aqüífer lliure permetrà extreure una quantitat d'aigua prop de mil vegades superior que en un aqüífer confinat per la mateixa magnitud de descens (1 m).

En determinades regions del món, on s'han extret grans quantitats d'aigua durant de dècades d'un aqüífer confinat, les formacions geològiques han assolit una elevada compactació que, com a resultat, ha originat un descens perceptible de la superfície del terreny. Aquest fenomen s'anomena subsidència i un dels exemples més coneguts succeí al *Central Valley* a Califòrnia, on un bombament continuat d'aigua subterrània per la irrigació de conreus intensius durant períodes de sequera va causar una subsidència del terreny de 10 m entre 1925 i 1977 com ho mostra la Figura 34. Aquest descens topogràfic degut a la pressió de l'aigua subterrània a l'aqüífer confinat també s'ha detectat de manera notable a la ciutats de Mèxic, a Jakarta (indonèsia), Venècia (Itàlia) o a Beijing (Xina). A més, quan la subsidència té lloc prop de la costa, accelera la intrusió d'aigua marina als aqüífers. Si el règim de bombament disminueix de manera que el nivell piezomètric es manté estable, la subsidència s'atura. Malgrat que la reducció del bombament permetés una recuperació del nivell piezomètric, el terreny no recuperaria el seu nivell inicial; és a dir, la subsidència no és reversible atès que les partícules d'argila no poden retornar a la seva estructura geològica original com s'il·lustra a les Figures 34c i 34d.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

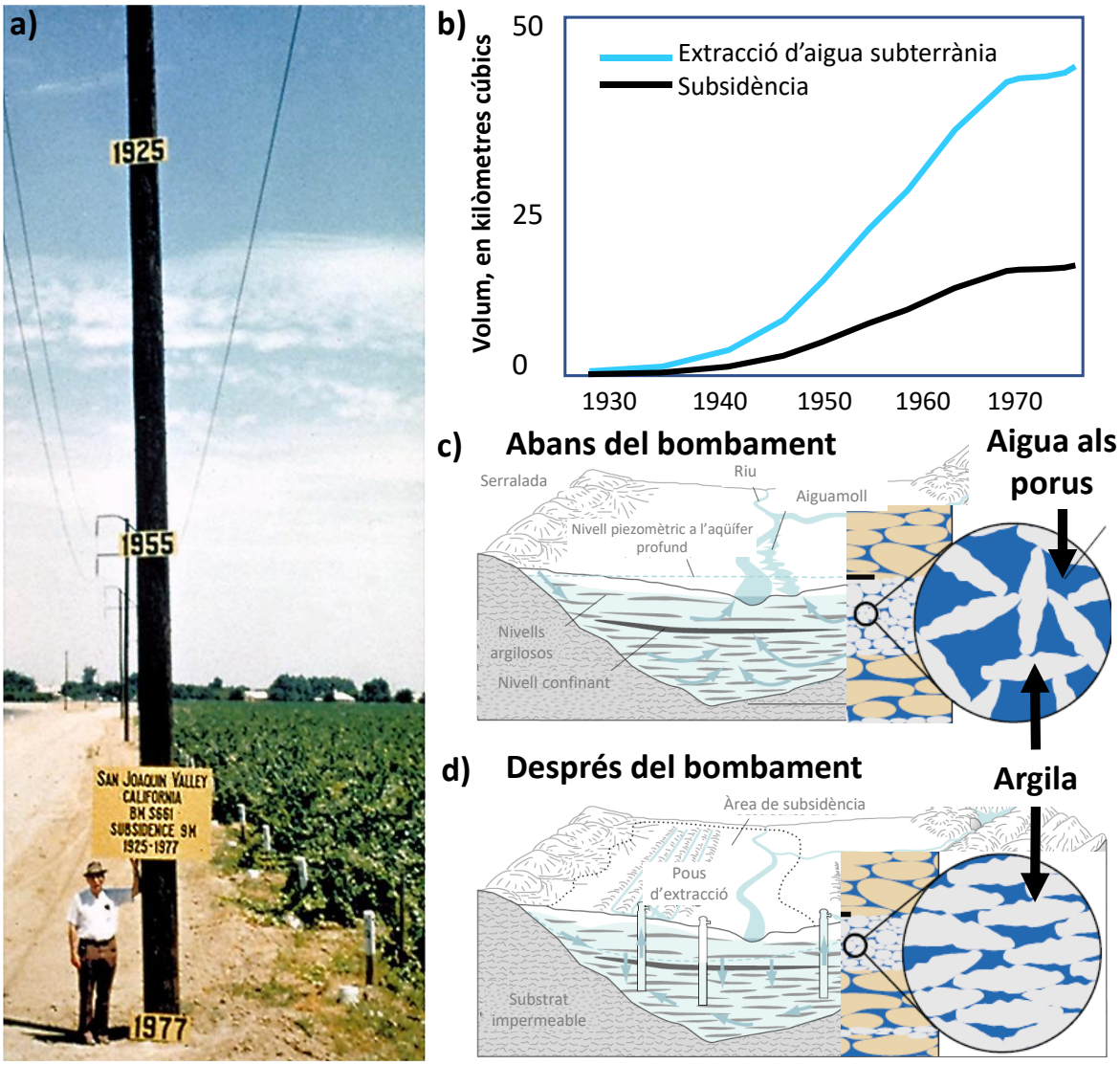


Figura 34 – Subsidència al San Joaquin Valley, California, EUA. a) Fotografia del descens del terreny per subsidència produïda per reg intensiu entre 1925 i 1977 (Poland, 1977); b) Comparació entre el volum d'aigua extret i el volum de terreny enfonsat en una àrea d'aproximadament uns 2.000 km^2 de superfície (Galloway et al., 1999); c) Esquema de la hidrogeologia de la zona abans del bombament, mostrant l'estructura de la partícules fines del sediment en els nivells argilosos (adaptat de Sneed et al., 2018); i, d) Esquema hidrogeològic després del llarg període d'extracció d'aigua subterrània, mostrant l'estructura més compacta dels nivells argilosos originada per una pèrdua de pressió hidrostàtica degut al bombament (adaptat de Sneed et al., 2018).

4.4 La perspectiva continental

La Figura 35 il·lustra una visió més amplia del cicle de l'aigua mostrant un sistema hidrogeològic que comprèn des de la divisòria de la conca hidrogràfica fins a la línia de costa. Aquest sistema a escala continental presenta dos grans àmbits:

- Les capçaleres de les conques hidrogràfiques a les regions muntanyoses prop de la divisòria continental, i,
- Les parts baixes de la conca a les planes litorals.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

La connexió entre la capçalera i les planes litorals es produeix mitjançant dos sistemes de transport a gran escala, un de superficial i un altre de subterrani:

- El sistema superficial està format per la xarxa de drenatge, concentrada en els "canals" que formen l'espai fluvial i és de tipus bidimensional, estenent-se per tota la superfície de la conca. Els rierols de les capçaleres convergeixen aigües avall per formar una xarxa fluvial estructurada.
- El sistema subterrani, i per tant no observable, està format pel sistema hidrogeològic que té una tipologia difusa atès que flueix per l'entramat de porus i fractures de les roques dels subsol (excepte en zones càrstiques on es desenvolupen cavitats i túnels per dissolució). A diferencia de la xarxa de drenatge superficial, la subterrània és tridimensional atès que les línies de flux no s'emmotllen a la superfície terrestre. El flux subterrani és menys estructurat que el superficial doncs està governat per gradients hidràulics condicionats per la complexitat de les estructures geològiques.

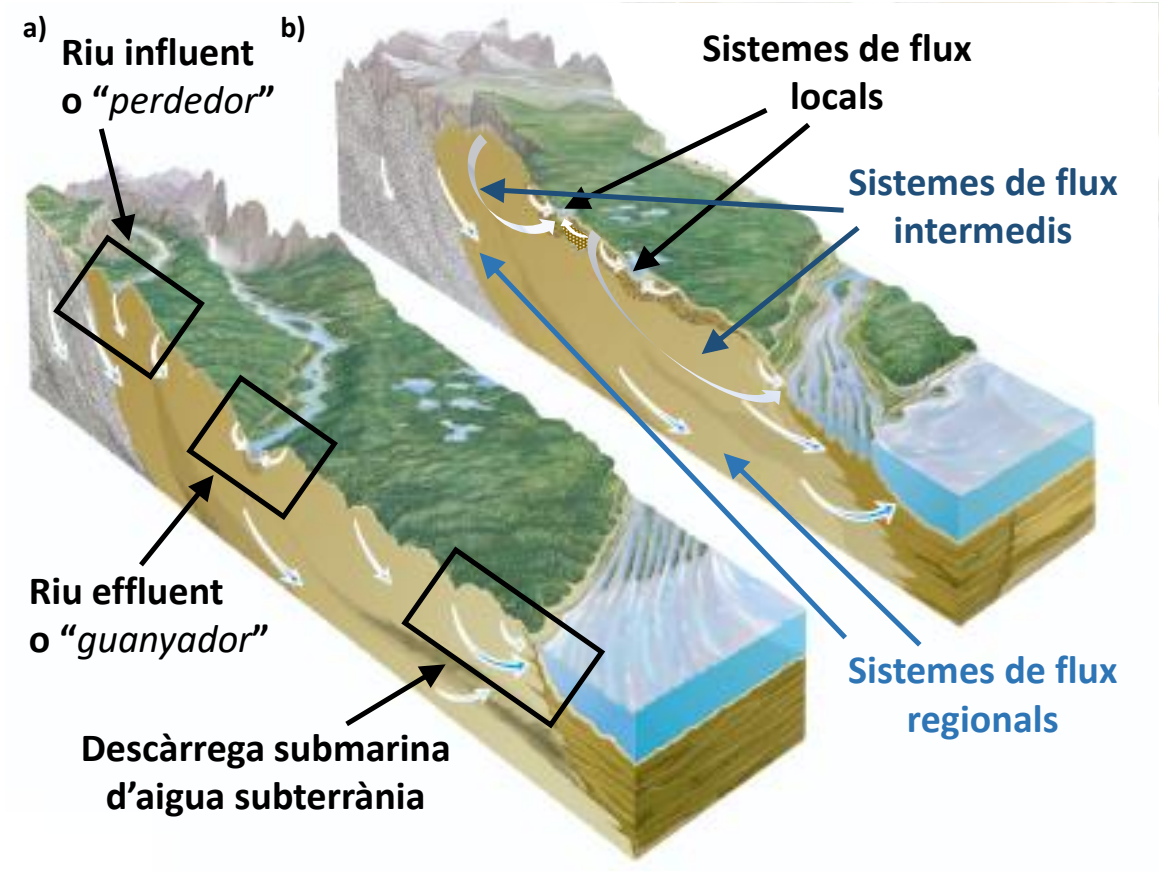


Figura 35 – Esquema de la perspectiva continental que situa: a) els trams de riu influents i efluents i la descàrrega d'aigua subterrània al mar; i b) la natura multi-escalar dels sistemes hidrogeològics constituïda per sistemes subsuperficials i sistemes locals, envoltats de sistemes intermedis que, a la vegada, formen part de sistemes hidrogeològics regionals a escala de tota la conca. L'esquema il·lustra la connectivitat existent entre el sistema superficial i el subterrani que sol implicar grans distàncies i finalitza amb la descàrrega final a l'oceà (adaptat de Winter et al. 1998).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

De fet, l'aigua s'intercanvia constantment entre els dos sistemes –superficial i subterrani– mitjançant un entrellat de rius influents i efluents i la descàrrega final a l'oceà (Figura 35a), alhora que genera sistemes hidrogeològics a diverses escales: local, intermèdia i regional (Figura 35b). Els sistemes locals solen ser propers a la superfície i de recorregut curt, i responen eficientment a períodes intensos de precipitació o a sequeres i a les variacions hidrològiques estacionals. Els sistemes regionals són més profunds i de recorregut molt més llarg. Aquests "registren" condicions climàtiques pretèrites, ocorregudes fa dècades, segles o fins i tot mil·lenni. Per exemple, un riu efluent a les zones baixes properes al litoral que rebi la recàrrega d'un sistema hidrogeològic regional rarament patirà una pèrdua greu de cabal, fins i tot després d'un llarg període de sequera perquè l'aigua que aporta el sistema regional va recarregar-se fa milers, o desenes de milers, d'anys abans quan les condicions climàtiques eren diferents a les actuals.

Com mostra l'esquema de la Figura 35, l'aigua subterrània descarrega directament a l'oceà a través de la línia de costa. Aquest flux s'anomena descàrrega submarina d'aigua subterrània. Aquestes aportacions d'aigua dolça al mar eren conegudes i aprofitades pels habitants del litoral des de l'antiguitat (Figura 36). La major part de la descàrrega submarina d'aigua subterrània es troba a badies i estuaris.

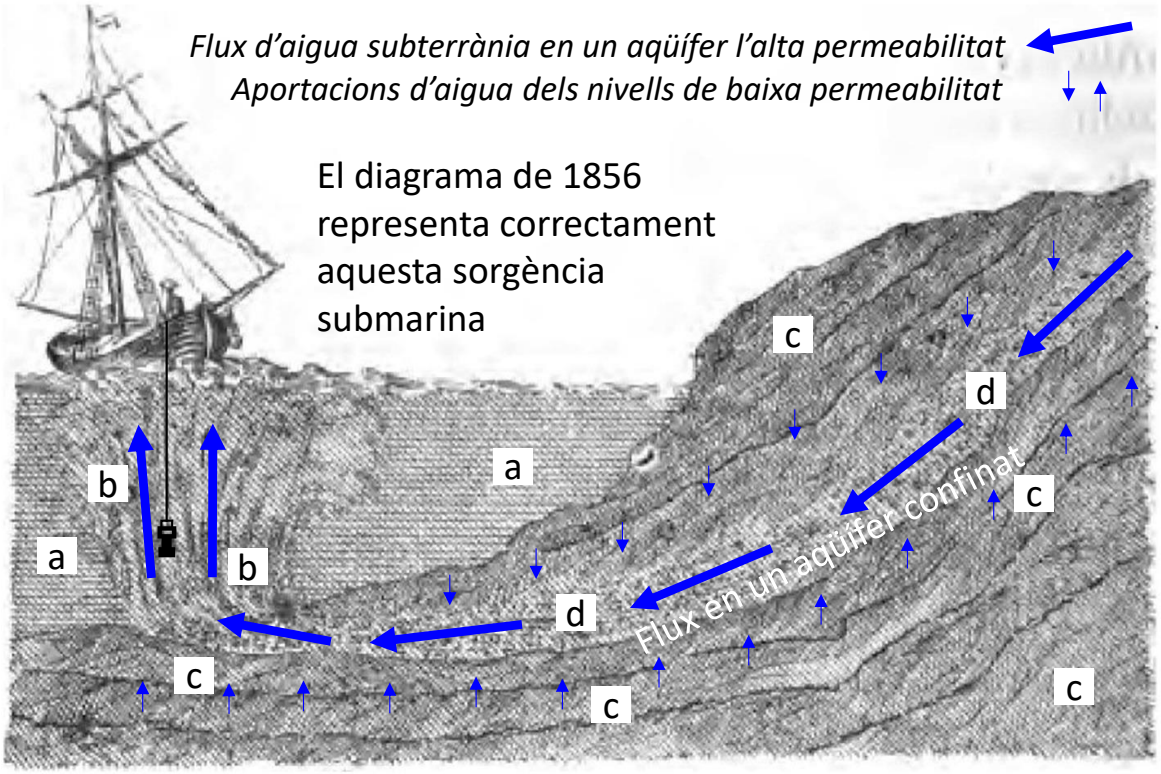


Figura 36 – Les fonts submarines eren ben conegudes i aprofitades com aigua potable des de l'antiguitat. Llegenda: a) aigua marina, b) aigua dolça, c) nivells hidrogeològics de baixa permeabilitat, i d) nivells hidrogeològics d'alta permeabilitat (segons Humboldt (1825), autor d'aquest diagrama publicat a la traducció feta l'any 1856 per Thrasher).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

En síntesi, existeixen **tres sistemes de transport d'aigua a escala continental**:

1) L'atmosfera**;**
2) La xarxa de drenatge fluvial; i,
3) Els sistemes hidrogeològics**.**

Els tres sistemes estan connectats entre elles i estretament relacionats. No tan sols transporten l'aigua de la pluja de retorn a l'oceà, sinó que bescanvien aigua constantment al llarg d'aquest trajecte (Figura 37).

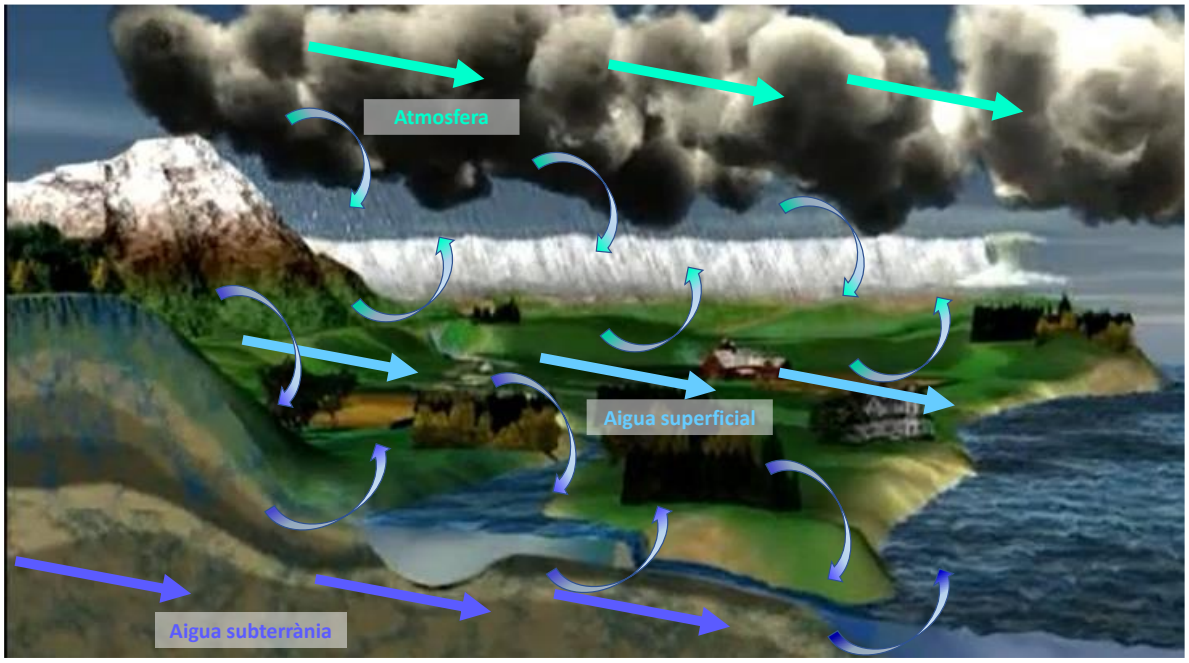


Figura 37 – Els tres sistemes de transport d'aigua a escala continental: la circulació d'aire a l'atmosfera, la xarxa fluvial en superfície, i els sistemes hidrogeològics en el subsol. Tots tres estan estretament connectats i bescanvien aigua constantment al llarg del trajecte (adaptat de NASA, 2020).

Els mecanismes que regulen aquest bescanvis d'aigua inclouen la transferència d'aigua de l'atmosfera a la superfície i al subsol i, novament, del subsol a la superfície i el posterior retorn a l'atmosfera per l'acció contínua dels processos de precipitació, infiltració, evapotranspiració i precipitació reciclada i per l'acció dels rius influents i efluents. Totes aquestes interaccions governen la dinàmica dels **sistema hidrològic global**.

5 El concepte de temps de residència

El flux d'aigua subterrània és notablement lent si el comparem amb el de l'aigua superficial; per la qual cosa és pertinent considerar el temps que tarda l'aigua en recórrer la component subterrània del cicle hidrològic (Figura 38). El temps que necessita una molècula d'aigua per moure's d'un punt a un altre al llarg de la trajectòria d'un flux subterrani s'anomena temps de trànsit. Així, el temps que tarda una molècula ubicada en el nivell freàtic a la zona de recàrrega en desplaçar-se fins al punt on retorna a la superfície

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

(un riu en el cas de la Figura 38) s'anomena temps de residència, doncs és el temps que aquesta molècula ha "residit" a l'interior de l'aqüífer. Els rètols sobreposats a les fletxes de la Figura 38 indiquen que l'aigua subterrània que flueix per línies de flux profundes, lentes i més llargues roman molt més temps en el subsol que l'aigua de les més superficials, per això es diu que les primeres han tingut un temps de residència llarg un cop descarreguen al riu. Com mostra aquesta figura, l'aigua entra al sistema hidrogeològic per tota la superfície de la conca, però les línies de flux convergeixen per descarregar en zones concretes; en aquest cas, un tram de riu. Així, aquesta descàrrega inclourà aigua subterrània amb diferents temps de residència.

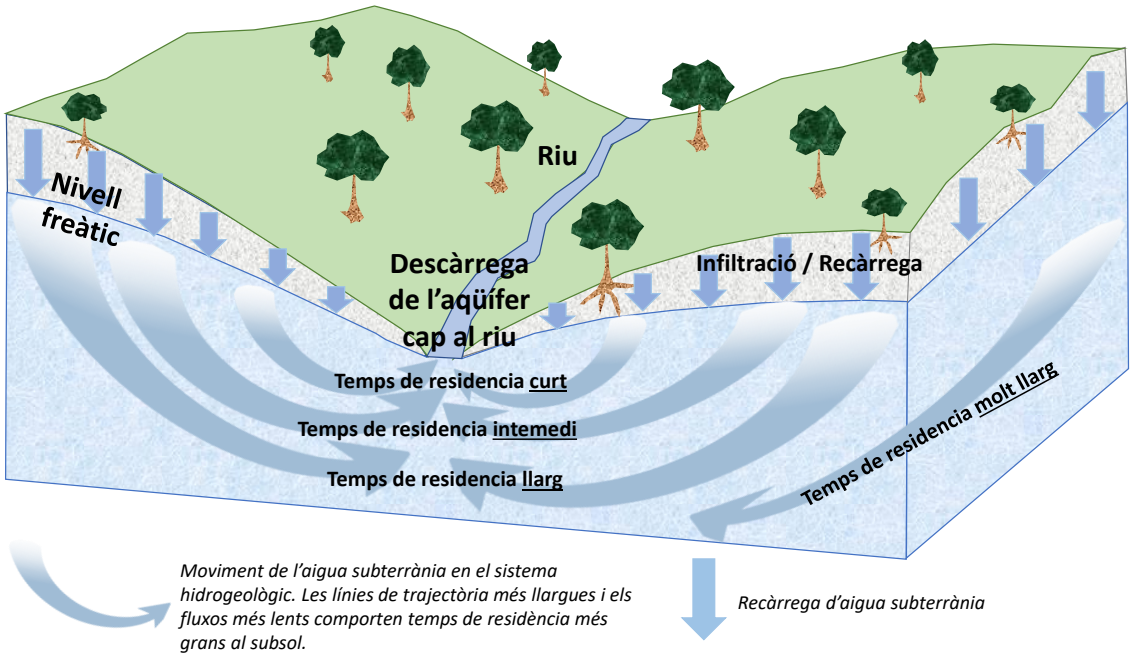


Figura 38 - L'aigua subterrània que flueix per línies de flux profundes, lentes i llargues roman molt més temps en el subsol i, per tant, es diu que té un temps de residència elevat un cop descarrega al riu. L'aigua entra al sistema hidrogeològic per tota la superfície de la conca i els fluxos d'aigua subterrània amb diferents temps de residència convergeixen a una mateixa zona de descàrrega, el riu (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Els trets geològics del subsol influencien notablement la velocitat del flux subterrani i, per tant, els temps de trànsit i de residència. La velocitat del flux subterrani en els tres tipus principals de materials geològics (a grans trets: sediments granulars, roques fracturades i roques carstificades) varia moltíssim; fins i tot, poden variar significativament entre formacions geològiques semblants atès que la velocitat del flux depèn tant de la facilitat en que l'aigua flueix entre els porus (permeabilitat) com del gradient hidràulic existent entre dos punts de la trajectòria. Malgrat això, hom pot esperar que la velocitat del flux subterrani en medis granulars sigui entre 0,01 i 1 m/dia, entre 0,5 i 50 m en roques fracturades i de 10 a 500 m/dia en aqüífers càrstics ben desenvolupats. Tornant a la Figura 38, si la litologia de l'aqüífer fos un sediment sorrenc, el temps de residència seria d'anys o dècades; en canvi, si el sediment fos llim o argila, molt menys permeables que la sorra, el temps de residència seria molt més llarg, de dècades a mil·lennis.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Com s'ha esmentat, el temps de residència de l'aigua en el sistema subterrani del cicle hidrològic és molt més llarg que en el superficial o en l'atmosfera. És més semblant al temps que una molècula d'aigua pot romandre en un gran glaciar que en qualsevol compartiment d'aigua líquida. El temps de residència en un compartiment del cicle hidrològic es calcula dividint el volum total d'aigua que conté entre el flux mitjà d'aigua que hi entra i en surt. Els valors exactes són sempre incerts, però els ordres de magnitud poden calcular-se fàcilment. Per exemple, el temps de residència d'una molècula d'aigua a l'atmosfera és d'uns 10 dies i roman uns altres 10-15 dies a la zona vadosa, centenars o milers d'any als llacs, alguns milers d'anys als oceans i de l'ordre de centenars de milers d'anys als casquets glaciars (Figura 39). Respecte a l'aigua subterrània, el temps de residència de l'aigua dolça en els aqüífers pot ser d'anys, centenars o milers d'anys. No obstant, a les parts més profundes dels sistemes hidrogeològics, on l'aigua esdevé salina, el temps de residència és encara molt més llarg essent de l'ordre de milions d'anys. De fet, aquesta aigua profunda no participa mai del cicle hidrològic excepte quan tenen lloc els grans canvis a escala geològica que ocorren amb una freqüència de desenes de milions d'anys. La profunditat on es troba aquesta aigua salina varia en funció de la geologia regional i de la dinàmica hidrogeològica, si bé habitualment se situa entre 200 i 1000 m.

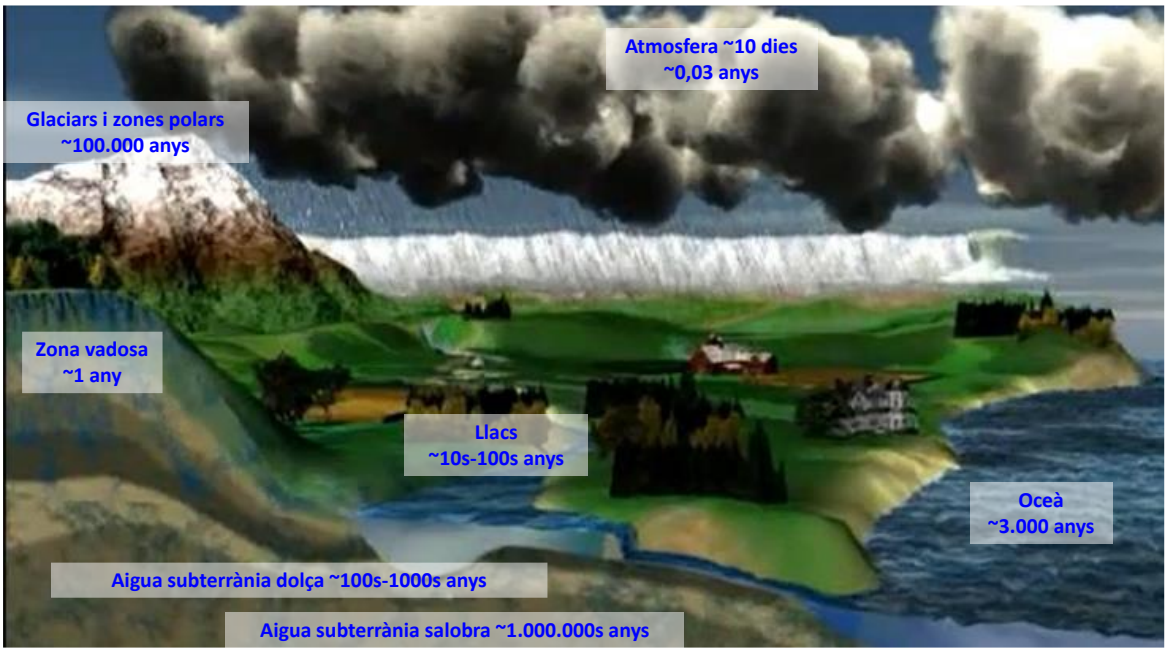


Figura 39 – Temps en que una gota d'aigua resideix en els diferents compartiments del cicle hidrològic (adaptat de NASA, 2020).

A mesura que flueix entre els porus dels aqüífers, l'aigua dissolt els minerals que conformen els seus materials; de manera que com més elevat sigui el temps de residència de l'aigua subterrània, major serà la concentració de soluts. En conseqüència, atès l'ample rang de temps de residència de l'aigua als aqüífers i els diversos tipus de litologies existents, l'aigua subterrània pot presentar una àmplia varietat de composicions químiques.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Els conceptes de temps de trànsit i de residència són importants quan es considera la presència de contaminants al subsol. Si les substàncies contaminants que entren per les zones de recàrrega no són assimilades pels materials geològics o degradades pels processos microbiològics als nivells més superficials del subsol poden tardar anys o dècades a descarregar als rius i afectar la qualitat de l'aigua superficial durant una generació humana, o bé durant segles o mil·lennis, de manera que el perill que suposa és a molt llarg termini.

Diguem que l'aigua subterrània té "memòria" a perquè el temps en omplir o buidar un aqüífer és molt llarg. De fet, alguns aqüífers contenen recursos hídrics que es van recarregar en períodes pretèrits més freds i humits, relacionats amb els cicles glacials de les darreres desenes o centenars de milers d'anys de la història de la Terra. Aquesta aigua subterrània és considera un recurs fòssil en el sentit que no és renovable, com els combustibles fòssils: carbó, petroli, gas natural que s'extreuen del subsol.

Un cop enllestida la descripció dels sistemes hidrogeològics és oportú considerar exemples que mostrin la seva diversitat al planeta. Amb aquesta intenció, es descriuen àmbits geològics com les zones de muntanya, les zones càrstiques amb abundants cavitats i les zones periglacials on l'aigua del sòl està permanentment glaçada (permafrost).

6 L'aigua subterrània actua arreu de la Terra

L'aigua subterrània juga un rol a totes les zones del planeta. Per il·lustrar la variabilitat de les condicions hidrogeològiques, aquest capítol considera la presència i la dinàmica de l'aigua subterrània a zones de muntanya, càrstiques i periglacials.

6.1 L'aigua subterrània a les zones de muntanya

Des de l'antiguitat, les fonts, o sorgències, han estat el recurs hídric aprofitat per l'abastament humà en zones de muntanya, especialment on es desenvolupà el conreu en terrasses propi de civilitzacions com la Inca a la serralada dels Andes a Sud-Amèrica (Figura 40). Aquests pobles van crear un sistema d'estructures per aprofitar l'aigua de les fonts i transportar-la mitjançant canals fins a les zones de conreu, formades sovint per terrasses construïdes als vessants de les muntanyes, i a les ciutats.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Figura 40 – Vessant històricament transformat en terrasses de conreu (Graber, 2011).

Aproximadament, el 12% de la població mundial viu actualment en zones de muntanya i, en molts casos, depèn de l'aigua subterrània pel seu abastament. La majoria de muntanyes presenten un terreny escarpat i estan formades per roques fracturades amb una capacitat d'emmagatzemar aigua molt baixa. En conseqüència, el flux d'aigua subterrània és ràpid i, sovint, descarrega a les fonts dels vessants on la capa freàtica es creua amb la superfície terrestre, o als rierols de les muntanyes. Les àrees boscoses tenen un sòl derivat de la dinàmica pròpia d'un ecosistema forestal que impedeix l'escolament ràpid durant les tempestes, la qual cosa afavoreix la recàrrega d'aigua subterrània i el seu emmagatzematge per poder-la alliberar posteriorment als corrents fluvials. La desforestació inverteix aquest procés i, en conseqüència, augmenta l'escassetat d'aigua a zones de muntanya, alhora que disminueix l'aportació des del subsol a la xarxa fluvial amb la conseqüent repercussió ecològica. Malgrat que la hidrogeologia de zones muntanyoses és de gran importància per més de mil milions d'habitants, equivalents a un 13% de la població mundial, encara no està prou estudiada atesa la dificultat de perforar pous en aquests torrents que puguin emprar-se com a punts d'observació i de presa de dades.

6.2 L'aigua subterrània a les zones càrstiques

Les roques carbonatades formen un 15% de la superfície de la Terra, com mostra la cartografia de la Figura 41, i més d'un 25% de la població del planeta obté els recursos hídrics necessaris pel seu abastament dels aqüífers càrstics.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

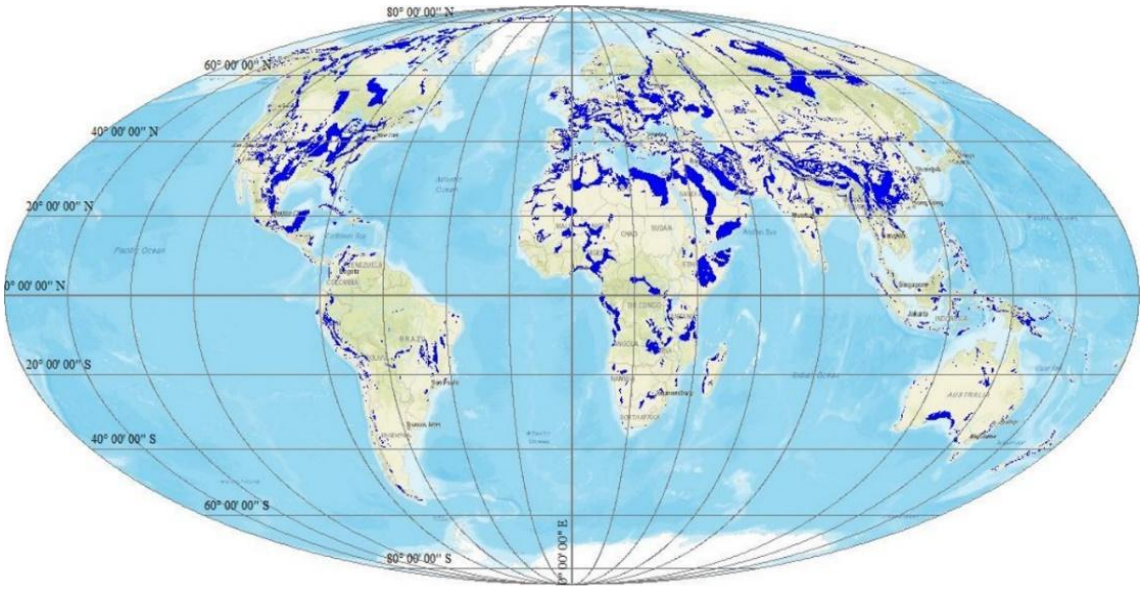


Figura 41 – Afloraments de roques carbonatades i evaporítiques que formen aqüífers càrstics arreu del món (Kuniansky, 2020; basat en dades espacials del *Mapa Mundial d'Aqüífers Càrstics* de Chen et al., 2017).

Els aqüífers càrstics se situen en formacions geològiques de roques carbonatades o evaporítiques i es caracteritzen per presentar grans cavitats i coves connectades entre elles, conductes, avencs i dolines com ho il·lustra la Figura 42. Aquesta morfologia subterrània es desenvolupa durant llargs períodes de temps en els quals les aigües lleugerament àcides de la zona vadosa van anar dissolent els minerals de les roques calcàries i les dolomies i en lixiviaren els soluts, creant les cavitats pròpies del carst. En profunditat, el procés de dissolució s'alenteix a mesura que els soluts neutralitzen l'acidesa de l'aigua infiltrada i, en conseqüència, perd la seva capacitat de crear noves cavitats i conductes o eixamplar els existents per on circula l'aigua subterrània. Posteriorment, quan el clima esdevé més sec o té lloc un descens del nivell del mar, el nivell freàtic decreix i la infiltració d'aigua acidificada crea noves coves i conductes a nivells més profunds. Durant períodes més humits o amb nivell del mar elevat, aquestes cavitats s'omplen d'aigua donant lloc a aqüífers càrstics saturats. Cal remarcar que han estat les fluctuacions del nivell freàtic al llarg del temps geològic les que han produït els aqüífers càrstics profunds en molts indrets de la Terra.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

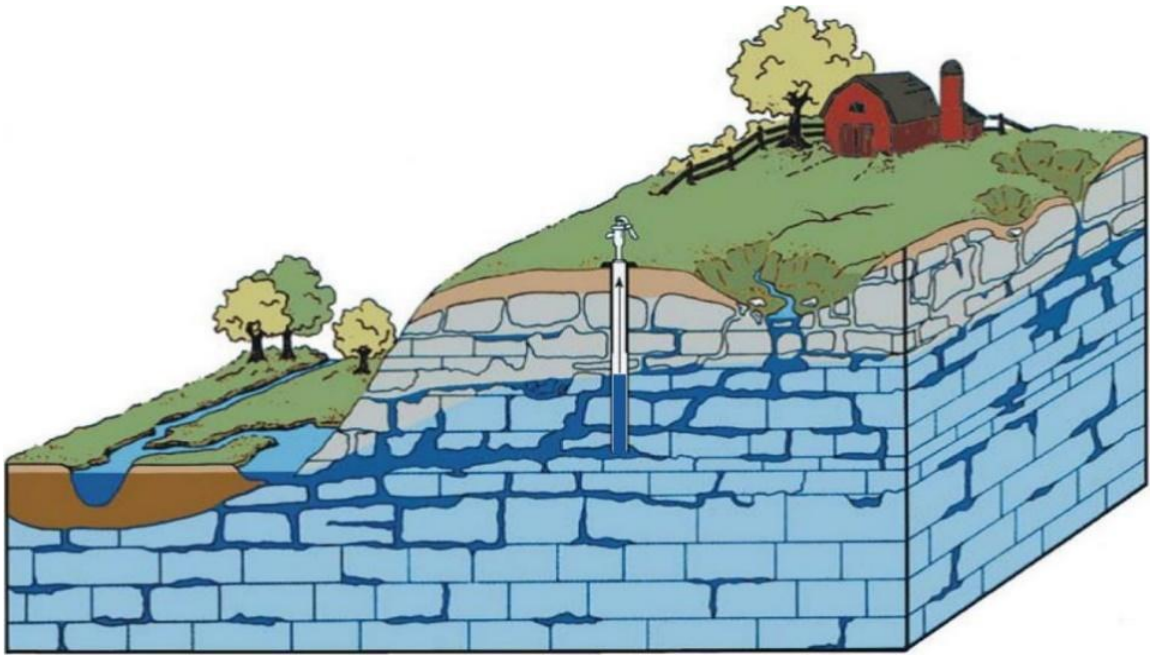


Figura 42 – Les grans cavitats estan ben connectades entre elles a les formacions càrstiques, permeten un flux ràpid i un temps de residència curt de l'aigua subterrània. Això comporta que siguin vulnerables a la contaminació (Iowa Geological Survey, 2020).

L'aigua de recàrrega flueix ràpidament per les cavitats ben connectades dels aqüífers càrstics i descarrega a fonts i rius o a altres aqüífers limítrofes. Atesa aquesta bona connectivitat, el flux en aquests aqüífers és més similar al flux superficial dels rius que al flux subterrani dels aqüífers en sediments granulats o en roques fracturades. De fet, les zones càrstiques solen tenir pocs recursos superficials doncs la infiltració és molt elevada. El fet que el flux d'aigua hi sigui tan ràpid els fa especialment vulnerables a la contaminació.

El carst és l'únic tipus d'entorn geomorfològic on les persones podem explorar directament el subsol aprofitant les connexions entre les coves seques, situades per damunt del nivell freàtic, o fent servir aparells de submarinisme quan l'aigua subterrània omple les cavitats. Les coves càrstiques, formades per la dissolució de les roques carbonatades, són atractius turístics amb elements morfològics espectaculars (anomenats espeleotemes, com ara les estalactites al sostre de la cavitat o les estalagmites a la seva base, entre altres) que es formen quan l'aigua subterrània conté més mineral dissolt (sobresaturació) i possibilita la seva precipitació (Figura 43).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

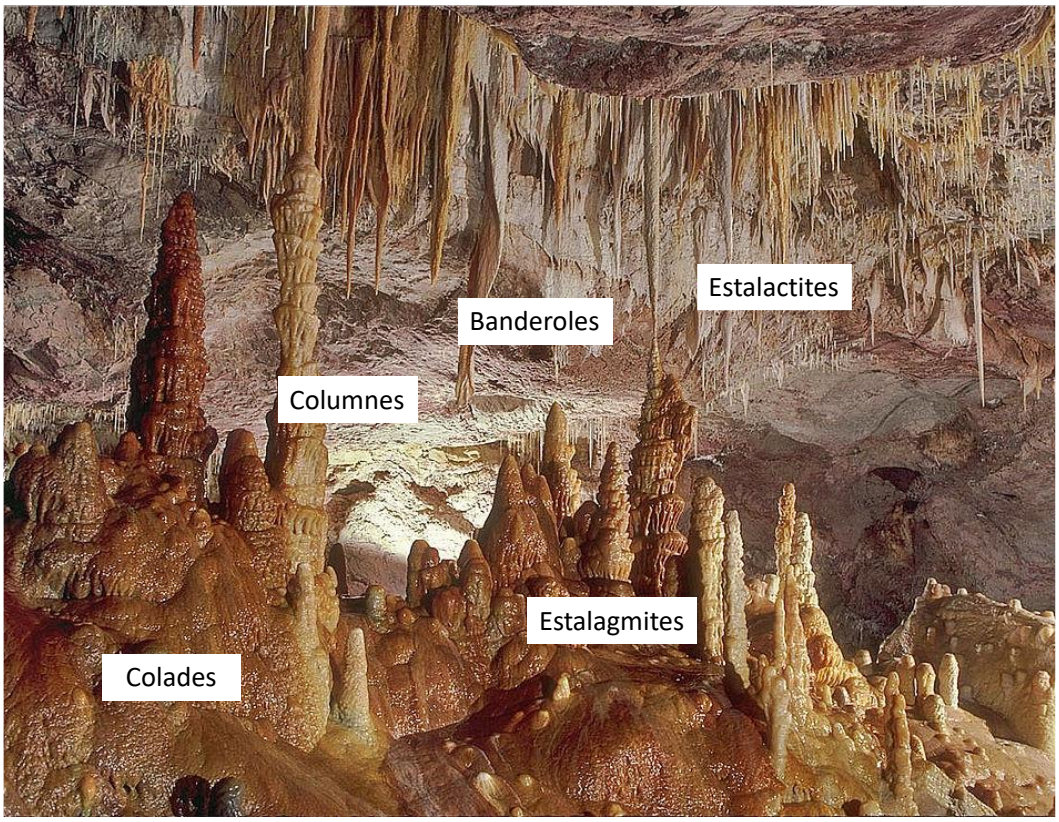


Figura 43 – Cova subterrània amb diverses estructures (espeleotemes) formades per precipitació de minerals aportats per l'aigua subterrània (Photo by Dave Bunnell↗" per Dave Bunnell↗, 2006, amb llicència CC BY-SA 2.5↗).

6.3 L'aigua subterrània a les zones periglacials

A les zones més fredes del planeta, especialment a l'hemisferi nord, el permafrost condiciona els sistemes hidrogeològics (Figura 44). Per definició, el permafrost és un sòl, sediment o roca, saturat o parcialment saturat d'aigua, que ha estat glaçat al menys durant dos anys consecutius.

Figura 44 – Mapa de la criosfera (zones de la superfície de la Terra on l'aigua es troba en estat sòlid). La distribució del permafrost es mostra amb diferents tons de color blau (Ahlenius, 2007).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

On la superfície del terreny no està gelada, el permafrost es troba per sota de la "capa activa", formada per un nivell de sòl, sediment o roca que es glaça i desglaça anualment. El flux d'aigua subterrània té lloc per damunt i per sota el permafrost, el qual és essencialment impermeable. És doncs un obstacle a la infiltració, fet pel qual la superfície sol estar embassada i fangosa. Si el flux d'aigua cap al subsol és considerable, pot provocar el desgel local del permafrost (Figura 45).

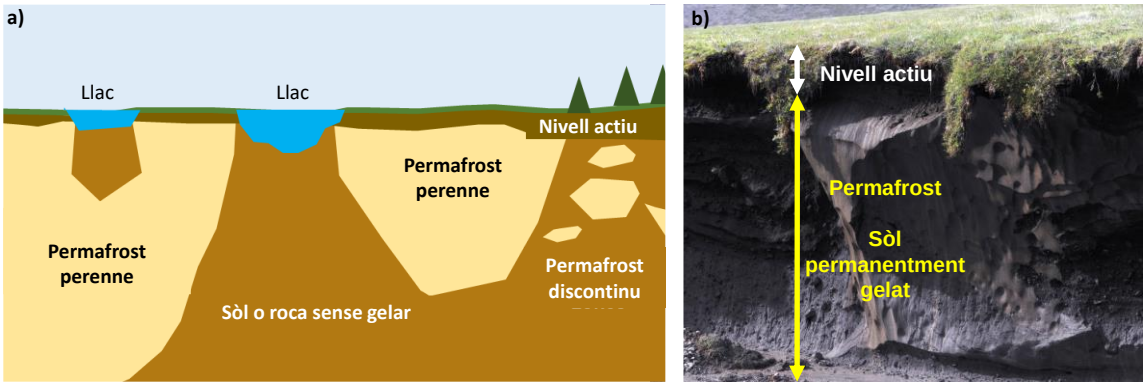


Figura 45 – El permafrost està format per zones glaçades del subsol properes a la superfície del terreny: a) esquema de la discontinuïtat del material glaçat per on l'aigua superficial s'infiltra al terreny i on la presencia de boscos aïlla el sol de les baixes temperatures exteriors; b) Exemple de capa activa per damunt del permafrost a la regió del *North Slope* a Alaska (foto: Kling, 2012).

7 Les funcions de l'aigua subterrània a la Terra

La part subterrània del cicle de l'aigua està formada per un immens volum d'aigua dolça (al menys a les zones més superficials) que es desplaça lentament i que reacciona químicament amb els materials geològics al llarg de la seva trajectòria. Alhora que té connexió amb els elements superficials del cicle hidrològic: l'aigua de rius, llacs i oceans i l'atmosfera. Aquest gran volum subterrani d'aigua realitza diverses funcions: 1) regula el cicle hidrològic de l'aigua dolça a l'interferir amb el flux de les aigües continentals superficials; 2) amb la seva activitat química, transforma els materials geològics i els transporta des dels continents als oceans; 3) processa i reacciona amb residus i contaminants; i 4) és un suport fonamental per a la vida al planeta.

7.1 L'aigua subterrània com a regulador hidrològic

La mida dels diferents volums d'aigua a la Terra es mostra, de forma relativa, a la Figura 46. L'esfera blava més gran representa el volum de tota l'aigua líquida al planeta, incloent l'aigua superficial, la subterrània i el vapor d'aigua de l'atmosfera, relativa a la mida total de la Terra (Figura 46a). Només el 2.5% d'aquest volum d'aigua és aigua dolça, i la major part de la vida al planeta depèn d'aquest petit tant per cent. De tota l'aigua dolça del planeta, un 70% es troba als pols terrestres en forma de gel i, per tant, és inaccessible als éssers vius (Figura 46b). La relació 99:1 entre aigua subterrània i aigua superficial té una

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

gran rellevància. Fent servir el símil bancari esmentat anteriorment, el moviment de diners és només un 1% del balanç del banc; la resta s'hi troba en forma de dipòsits. Això dona una "seguretat" hidrològica, doncs els rius, llacs i aiguamolls, i els ecosistemes que s'hi troben, disposen de "fons financers" disponibles en forma d'aigua subterrània. És a dir, les aigües superficials no desapareixeran en períodes de sequera doncs l'aigua subterrània del subsol, emmagatzemada en grans quantitats, continuarà alimentant-les en forma de flux de base. Pot dir-se que l'aigua subterrània actua com un "regulador" que manté l'aigua en rius, llacs i zones humides malgrat les variacions meteorològiques i climàtiques. No obstant, si té lloc un canvi d'usos del sòl que faciliti un major escolament de l'aigua cap als oceans i en disminueixi la recàrrega als aqüífers (per exemple, per desforestació, urbanització o un desenvolupament agrícola intensiu que depengui de recursos superficials) hi haurà menys recursos subterranis per a mantenir el cicle de l'aigua dolça als continents.

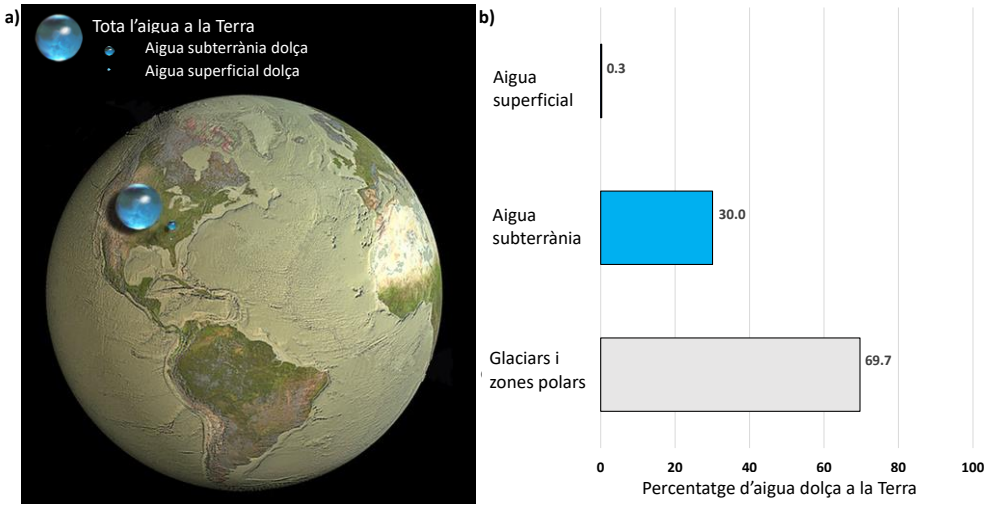


Figura 46 – Volums proporcionals de a) aigua a la Terra (adaptat de USGS, 2019c) i b) percentatges d'aigua dolça a la Terra emmagatzemades com aigua superficial, aigua subterrània i gel (Poeter et al., 2020, gw-project.org, basat en dades de Shiklomanov, 1993).

Com s'ha esmentat, els nivells als aqüífers no només varien per condicions meteorològiques o climàtiques, sinó també pel bombament i captació d'aigua subterrània. Novament, l'immens volum d'aigua subterrània i la seva capacitat per emmagatzemar aigua actua com un regulador quan els nivells piezomètrics decreixen a causa del bombament perquè l'aigua captada procedeix inicialment d'una pèrdua d'emmagatzematge, a causa del descens del nivell, abans no afecti al flux que recarrega el cabal fluvial o capturi aigua directament del propi riu. A més, en algunes situacions, el descens del nivell freàtic pot disminuir l'evapotranspiració (Figura 47), la qual cosa comporta una major recàrrega i el manteniment del flux de base. En aquest cas, la vegetació que es nodria de recursos hídrics subterranis quan el nivell freàtic era alt morirà amb el descens del nivell i altres espècies més adaptades a condicions seques les reemplaçaran. Finalment, si el nivell continua disminuint, els rius, llacs o aiguamolls s'assecaran. De fet, l'aigua es bescanvia

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

entre els diferents compartiments del cicle hidrològic adaptant-se a les noves condicions ambientals.

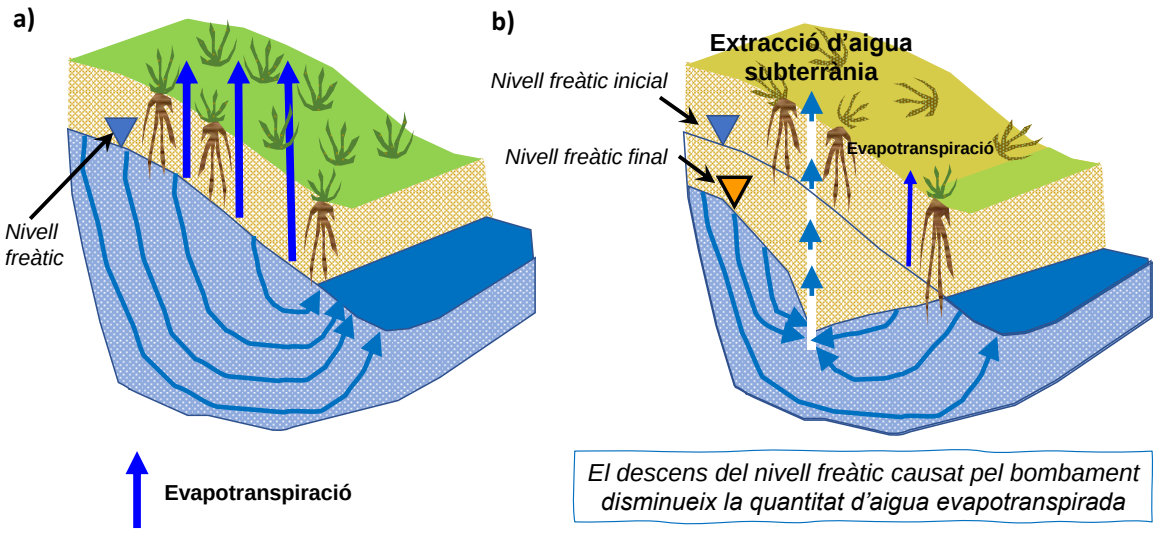


Figura 47 – Descens produït pel bombament a un pou amb els conseqüents descens del nivell freàtic i disminució de l'evapotranspiració. La pèrdua de capacitat evapotranspiradora afavoreix la recàrrega i la disponibilitat de recursos per a captacions o flux de base cap a la xarxa de drenatge superficial, si bé pot produir impactes ecològics al afectar l'accessibilitat a l'aigua dels ecosistemes (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

A nivell global, el descens continuat dels nivells piezomètrics indica que el recurs s'explota més ràpidament que no es recarrega. La pèrdua de nivell suposa una disminució de recursos d'aigua subterrània de 283±40 km^3 anuals (Wada, 2016), fet que té enormes implicacions. Quan la captació d'aigua és superior a la recàrrega, el volum d'aigua superficial augmenta en detriment del volum d'aigua subterrània, la qual cosa contribueix a l'augment del nivell del mar de l'ordre 0,8 +/-0,1 mm/any, equivalent a un 25% dels 3,1 mm/any d'augment del nivell dels oceans per les diverses causes associades al canvi climàtic (Wood and Hyndman, 2018).

Un exemple clar del descens del nivell freàtic és el de la Gran Planúria del Nord de la Xina (Zheng et al., 2010). En aquesta regió de prop de 40,000 km^2, el nivell piezomètric ha disminuït fins a 90 m en alguns pous des de 1950, amb un descens mitjà de 15 m a tota la planúria com a resultat d'un bombament insostenible d'aigua subterrània (Figura 48). Com a conseqüència, els rius han perdut cabal i s'ha produït la subsidència del nivell del terreny.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

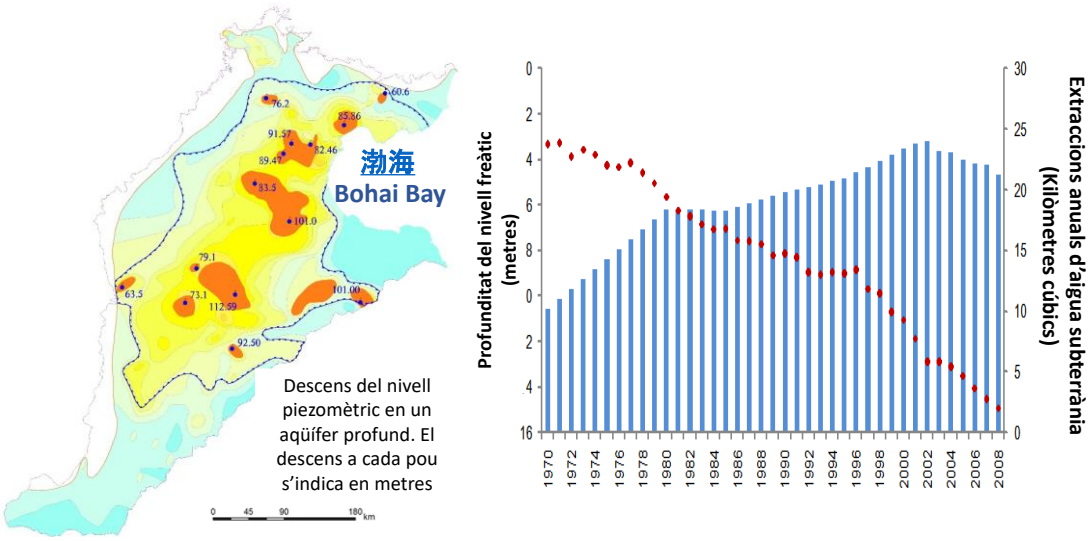


Figura 48 – La Gran Planúria del Nord de la Xina presenta un gran con de depressió del nivell piezomètric causat per un bombament insostenible, destinat a l'abastament agrícola: a) descens dels nivells des de 1950, en metres, on destaquen les zones amb descensos superiors als 90 m (Zheng et al., 2010); i, b) fondària mitjana del nivell piezomètric a la regió i volums anuals de bombament des de 1970 a 2008 (Zheng, 2020).

Atès que el descens de reserves dels aqüífers està causant una disminució del flux de base als rius i un augment del nivell del mar arreu del món, diversos projectes d'enginyeria pretenen capgirar aquests impactes negatius mitjançant la gestió del nivell piezomètric en algunes conques. Aquesta gestió requereix disminuir els règims de bombament, incrementar la recàrrega, o ambdues accions si és possible. Per augmentar la recàrrega mitjana durant un període de diversos anys, cal procurar que més precipitació s'infiltri al sòl per augmentar el nivell freàtic i evitar que menys precipitació contribueixi al cabal dels rius i surti de la conca hidrogràfica. Les actuacions específiques que milloren la recàrrega varien d'un lloc a un altre, però solen basar-se en modificacions del relleu per capturar escorriment i facilitar-ne la infiltració; construcció de basses de recàrrega o zones humides per a la infiltració d'aigua residual regenerada; i l'ús de pous de recàrrega que injecten aigües pluvials o regenerades als aqüífers. Els programes de gestió de la recàrrega d'aqüífers són cada cop més habituals per a reduir la pèrdua d'emmagatzement de recursos subterranis doncs l'alternativa (és a dir, una menor captació del recurs) és quasi impossible d'assolir en un món amb continu creixement demogràfic que, alhora, comporta un augment de la producció agrícola i industrial. Aquests programes es basen en aprofitar la capacitat d'emmagatzement dels aqüífers i, com s'ha explicat, els més adients són els aqüífers lliures on la recàrrega s'acumula en els porus inicialment no saturats.

Per assolir un abastament sostenible basat en la captació d'aigua subterrània, els nivells piezomètrics (i, per tant, l'emmagatzement) poden variar anualment, però el nivell mitjà ha de ser constant a llarg termini. En els anys humits, l'aqüífer rebrà una major recàrrega, augmentant els recursos emmagatzemats i equilibrant l'excés d'aigua captada durant els anys secs. Si la gestió del sistema hidrogeològic és adequada, els excedents dels anys humits han de compensar el dèficit derivat dels períodes de sequera.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Les iniciatives que es van aplicar l'any 1968 per evitar la sobreexplotació dels recursos d'aigua subterrani a la conca de San Fernando, que abasteix a la ciutat de Los Angeles a Califòrnia, és un bon exemple de gestió hidrològica. La disponibilitat de dades de nivell piezomètric des de 1929 va permetre calcular el volum dels recursos emmagatzemats als aqüífers de la conca (Figura 49). En aquest aqüífer, l'extracció continua d'aigua subterrània va causar un descens continu del nivell freàtic des de 1945 fins a la dècada de 1960 quan va ser evident que calia aplicar un pla de gestió per controlar la progressió del descens i l'esgotament dels recursos. Aquest pla requeria recarregar un volum aproximat de 0,44 km^3 d'aigua a l'aqüífer (línia verda discontínua a la Figura 49). Considerant la freqüència d'anys secs i anys humits, es va decidir que l'emmagatzement mínim seria uns 0,18 km^3 inferior a l'emmagatzement requerit (línia vermella discontínua inferior a la Figura 49) a fi de poder disposar d'una capacitat d'emmagatzement apropiada que permetés aprofitar eficientment la precipitació dels anys humits. La capacitat d'emmagatzement màxima era de 0,26 km^3, major que a la requerida (línia vermella discontínua superior a la Figura 49) per evitar que un augment del nivell freàtic que provoqués una pèrdua de recursos cap a les conques limítrofes. Com es mostra a la Figura 49, la quantitat d'aigua subterrània emmagatzemada només ha assolit els objectius esperats en comptades ocasions, situant-se habitualment per sota dels volums desitjats. No obstant, aquesta gestió va aturar el descens de nivell i encara es continuen construint infraestructures de recàrrega per augmentar el volum de recurs emmagatzemat.

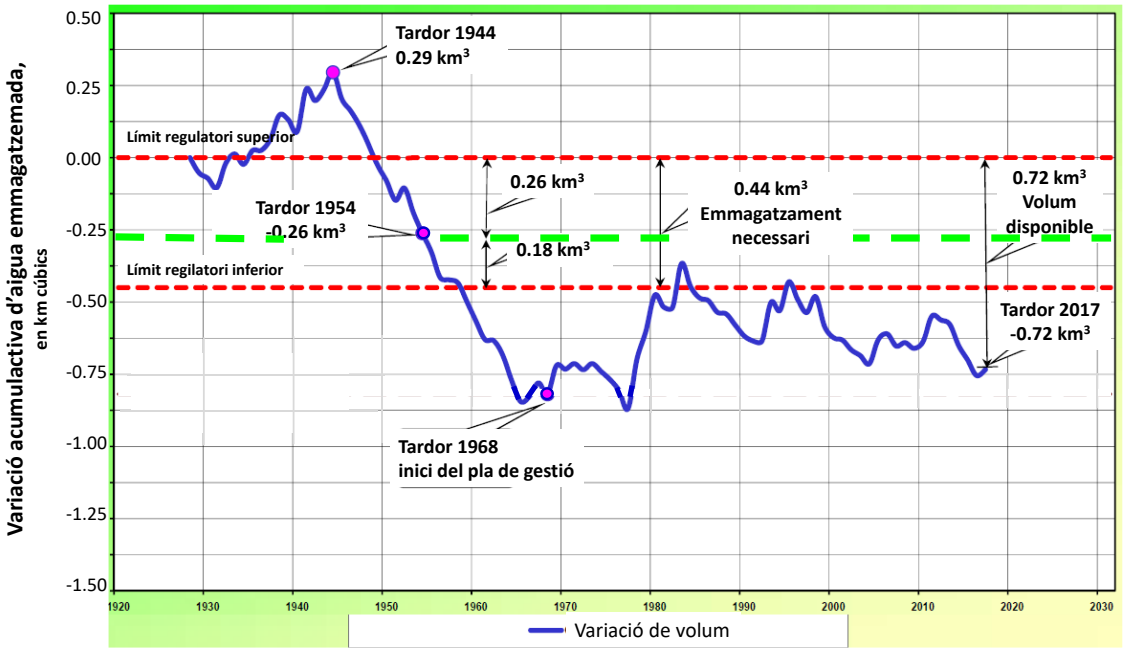


Figura 49 – Variació acumulada del volum d'aigua subterrània emmagatzemat a l'aqüífer de la conca de San Fernando, Califòrnia, EUA. La línia blava mostra les variacions de volum de recurs des de 1929 a 2016. El valor corresponent a 1929 es pren de referència i es considera "variació zero". El pla de gestió va controlar la captació d'aigua subterrània mentre recarregava aigua amb basses d'infiltració a fi d'assolir i mantenir un volum de 0,44 km^3 d'aigua a l'aqüífer (línia verda) amb una variació acceptable situada entre les dues línies vermelles (modificat de ULARA Watermaster, 2018).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

L'aigua emmagatzemada als aqüífers representa els "estalvis" aportats al "banc" per la natura. Però, com en el cas dels combustibles fòssils, actualment estem "extraient" i "gastant" aquest "estalvi" acumulat durant molts anys en només un curt període de temps. A moltes regions agrícoles del món, l'aigua que ha estat acumulada als aqüífers durant desenes de milers d'anys ha estat explotada en els darrers 50 anys. Aquest ús intensiu de les reserves naturals, siguin d'aigua antiga infiltrada milers d'anys enrere o capes de carbó i trampes de petroli derivades d'acumulacions de matèria orgànica vegetal ara fa centenars de milions d'anys, implica que estem deixant menys recursos per a les futures generacions.

7.2 L'aigua subterrània com agent químic i de transport

Tota l'aigua subterrània conté soluts en dissolució i els transporta a través dels sistemes hidrogeològics cap a les zones de descàrrega: oceans, rius, ... Aquest procés ha estat actiu al llarg dels temps geològics. El tipus i la concentració d'aquests soluts determinen la potabilitat de l'aigua subterrània per a ús domèstic i la seva idoneïtat per a usos industrials o agrícoles. La superfície de la Terra, tal com és avui dia, és el resultat de processos geològics actius durant milers de milions d'anys. Aquests processos són actius a la part més profunda de l'escorça terrestre i han generat el relleu en successives fases orogèniques, mentre que, simultàniament, l'erosió l'ha modelat creant valls i planes on s'acumulen els sediments. El cicle hidrològic s'establí des de l'inici en sincronia amb els canvis climàtics i geomorfològic, evolucionant conjuntament al llarg de la història geològica de la Terra.

L'aigua que flueix per la superfície de la Terra és el principal agent responsable dels processos d'erosió i deposició que determinen l'evolució del relleu. Leopold et al. (1964) van escriure: "Els rius són els embornals pels que s'escorren les desferres dels continents", fent referència a la massa de sediments que la xarxa fluvial transporta fins als oceans. De fet, aquesta sentència tan contundent pot reescriure's com "L'aigua subterrània és l'agent enigmàtic que transporta les restes produïdes per l'alteració de les roques", fent referència a la massa de substàncies en dissolució que arriben a l'oceà a través del flux d'aigua subterrània.

Com ja s'ha comentat, el flux d'aigua subterrània és el principal agent que abasteix els sistemes d'aigües superficials tant en els períodes humits com en els períodes secs. Ocasionalment, a més, transforma el relleu formant planes salines en zones àrides o coves i avencs en zones càrstiques. Aproximadament, la meitat d'aigua que transcorre pels rius (és a dir, en forma d'escorriment superficial) procedeix de la descàrrega de fluxos subterranis amb llargs temps de residència al subsol i l'altra meitat s'origina directament a partir de la precipitació incident. Una part de l'escorriment té lloc en superfície a través de la xarxa de drenatge, però una altra part, habitualment majoritària, flueix pel subsol amb un flux que s'inicia a la zona vadosa mitjançant la zona capil·lar o a través de zones saturades retingudes per capes de baixa permeabilitat.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Els components químics naturals de l'aigua subterrània

Les aigües naturals contenen elements dissolts que, en conjunt, es coneixen com el contingut en sòlids dissolts totals (també anomenat Total de Sòlids Dissolts; TSD); els quals són, en gran part, sals inorgàniques. Aigües amb menys de 1.000 mil·ligrams per litre (mg/L) de TSD es consideren aigües dolces, en tan que valors de TDS superiors a 4.000 mg/L es defineixen com aigües salabroses i per damunt de 10.000 mg/L com salines. Cal tenir present que l'aigua de mar té un valor de TDS aproximat de 35.000 mg/L (és a dir, 35 grams per litre) i les salmorres presenten valors de TDS encara superiors. La Taula 1 resumeix els termes emprats per descriure els nivells de TDS a les aigües naturals. Quan es perfora un sondeig a qualsevol lloc del planeta, l'aigua més superficial és, en general, dolça amb un valor de TDS baix, essent adequada pel consum domèstic si no ha estat contaminada per productes químics originats per l'activitat humana. A major profunditat, l'aigua subterrània esdevé salabrosa i a mesura que augmenta la profunditat es transforma en salina i, si perforem encara a més fondària, pot assolir el TDS propi d'una salmorra. Aquest augment de la salinitat en fondària, passant d'aigua dolça a salmorra, succeeix gairebé arreu del planeta, excepte on l'aigua ja és salada a qualsevol profunditat.

Taula 1 - Termes per anomenar aigua amb diferent contingut de TDS

Total de Sòlids Dissolts (mil·ligrams/litre)	Descripció de l'aigua
< 1,000	dolça
1,000 - 4,000	límit de potabilitat
> 4,000 - <10,000	salabrosa
> 10,000 - < 35,000	salina
35000	marina
> 35,000	salmorra

L'aigua dolça natural conté elements dissolts de tres categories diferents: components majoritaris, minoritaris i traça. La seva quantitat a l'aigua subterrània depèn del clima a les àrees de recàrrega, de les condicions químiques a la zona vadosa i de la geologia de les roques encaixants. És molt útil conèixer d'antuvi quins elements es poden trobar dissolts a l'aigua subterrània doncs no és possible, i no només per qüestions econòmiques, mesurar cada un dels elements de la taula periòdica en una mateixa mostra. Habitualment, uns 8 o 9 components sumen el 95% de tota la massa de sòlids dissolts a l'aigua subterrània i, alguns d'ells, solen trobar-se a qualsevol tipus d'aigua subterrània.

Els sòlids dissolts es troben principalment en forma iònica (és a dir, en forma de ions amb càrregues positives o negatives). Els ions H^+ i OH^- estan sempre presents doncs són les formes iòniques de dissociació de la molècula d'aigua. Aquest fenomen, aparentment simple, és de fet fascinant i complex, però en aquest text només podem exposar alguna terminologia i principis bàsics de geoquímica. La quantitat de ions H^+ en una mostra d'aigua determina el seu pH. Com és conegut, una mostra d'aigua amb un pH

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

de 7 es considera neutra, doncs indica que els ions H^+ i OH^- estan equilibrats. La Figura 50 esmenta que el rang de valors de pH a l'aigua subterrània és habitualment entre 6 i 9, i amb major freqüència només entre 7 i 8. En una mostra amb pH de 7 hi ha una concentració de 0,0001 mg/L de ions H^+. Malgrat que els ions $H^+$and OH^- hi apareixen a concentracions molt baixes comparat amb altres components, ambdós són essencials en moltes reaccions químiques, incloent les reaccions de meteorització que afecten la dissolució i precipitació de minerals a més d'un seguit de transformacions microbiològiques i abiòtiques.

Els components més freqüents en dissolució a l'aigua subterrània s'esmenten a la Figura 50. Els sis components principals amb més altes concentracions s'anomenen ions majoritaris, i inclouen els ions amb càrrega positiva o cations: sodi, Na^+; calci, Ca^{2+}; magnesi, Mg^{2+}, i els ions amb càrrega negativa o anions: bicarbonat, HCO_3^-; sulfat, SO_4^{2-}; clorur, Cl^-). Tots ells representen quasi tota la massa de TDS. Els components minoritaris són: potassi, K^+; manganesi, Mn^{2+}; ferro, Fe^{2+}; silici, Si^{4+}; nitrat, NO_3^-; fluorur, F^-; i el carbó orgànic dissolt, COD; els quals solen trobar-se en concentracions entre 0.1 i 5 mg/L. Altres components, anomenats elements traça, apareixen a molt baixes concentracions, molt sovint per sota la capacitat de detecció dels mètodes analítics més comuns.

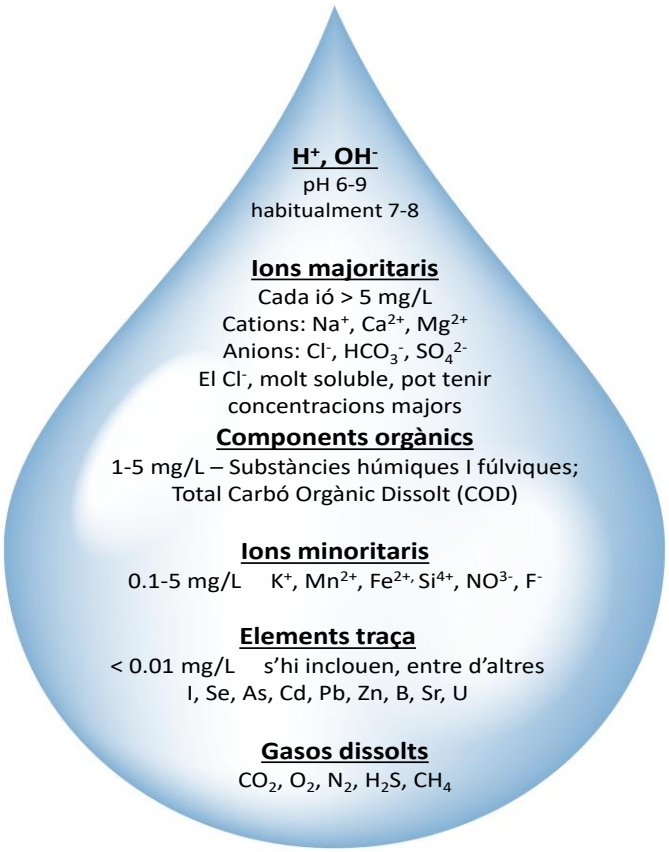


Figura 50 – L'aigua dolça natural conté nombrosos components químics en dissolució, anomenats majoritaris, minoritaris o traça, així com compostos orgànics i gasosos. Molts d'ells estan presents en forma iònica (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Els tipus de components de cada categoria i les seves concentracions defineixen la part química de la "qualitat" natural de l'aigua. Altres components són la seva temperatura, el color, l'olor, la terbolesa, i el contingut microbiològic. Alguns d'aquests components naturals poden ser tòxics a concentracions altes, malgrat que són saludables a concentracions prou baixes (per exemple, el iode, el fluorur o el seleni).

Gairebé tota l'aigua dolça que no presenti un nivell significant de contaminació causada per activitats humanes és potable excepte en alguns casos determinats, com el de les aigües subterrànies amb concentracions naturals molt altes d'arseni o fluorur. La ingesta d'aigua amb concentracions elevades d'arsènic causa problemes de salut, inclòs el càncer. L'arsènic es troba a nivells tòxics de manera natural a uns països, afectant a més de 150 milions de persones. En el cas del fluorur, que també es troba a l'aigua subterrània de forma natural, la seva presència a concentracions baixes (1 - 2 mg/L) és beneficiosa per la higiene dental, però en excés causa fluorosi dental o, pitjor, fluorosi esquelètica paralitzant causant la afecció a lligaments i músculs i, fins i tot, problemes neurològics. Més de 200 milions de persones de Xina, Índia, Estats Units, Canada i d'algunes parts d'Àsia i Sud-Amèrica consumeixen aigua amb elevades concentracions de fluorur.

Malgrat que la legislació estableix llindars de concentracions per determinats elements naturals potencialment tòxics, com el cadmi, el mercuri, el plom i la plata, aquests elements són molt minoritaris i rarament assoleixen aquestes concentracions llindar a l'aigua subterrània. En el cas de l'arsènic i el fluorur, el fet que assoleixin concentracions tòxiques es deu a la presència de minerals rics en aquests elements als materials geològics i a l'existència de condicions químiques que facilitin la seva dissolució i persistència.

En aquells països o regions dependents quasi exclusivament de l'aigua subterrània per l'abastament domèstic, com a Bangladesh, l'arsènic esdevé un gran problema ambiental. Si es construeix un pou en una formació geològica que conté minerals rics en arsènic i l'aigua subterrània és pobre en oxigen, la presència d'arsènic i ferro dissolts a l'aigua subterrània és inevitable. Quan els pous són soms, l'aigua té una concentració d'oxigen suficient que permet la precipitació de minerals de ferro que, alhora, incorporen arsènic i redueixen la seva concentració a l'aigua subterrània. No obstant, aquests pous soms, sovint construïts de forma defectuosa, solen presentar altres problemes de qualitat com ara la contaminació bacteriològica d'origen urbà procedent de les aigües superficials.

La presència d'arsènic i fluorur ha causat, i causarà, problemes de salut a moltes àrees rurals mentre la pobresa persisteixi. Però també són una font de problemes sanitaris a països desenvolupats on milions de persones consumeixen aigua rica en arsènic o fluorur dels seus propis pous sense ser conscients del perill que suposa, atès que aquests pous no estan inclosos en els controls de l'administració pública. Les regions on hi ha un excés d'arsènic o fluorur a les aigües subterrànies es mostren representades a les Figures 51a i b.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

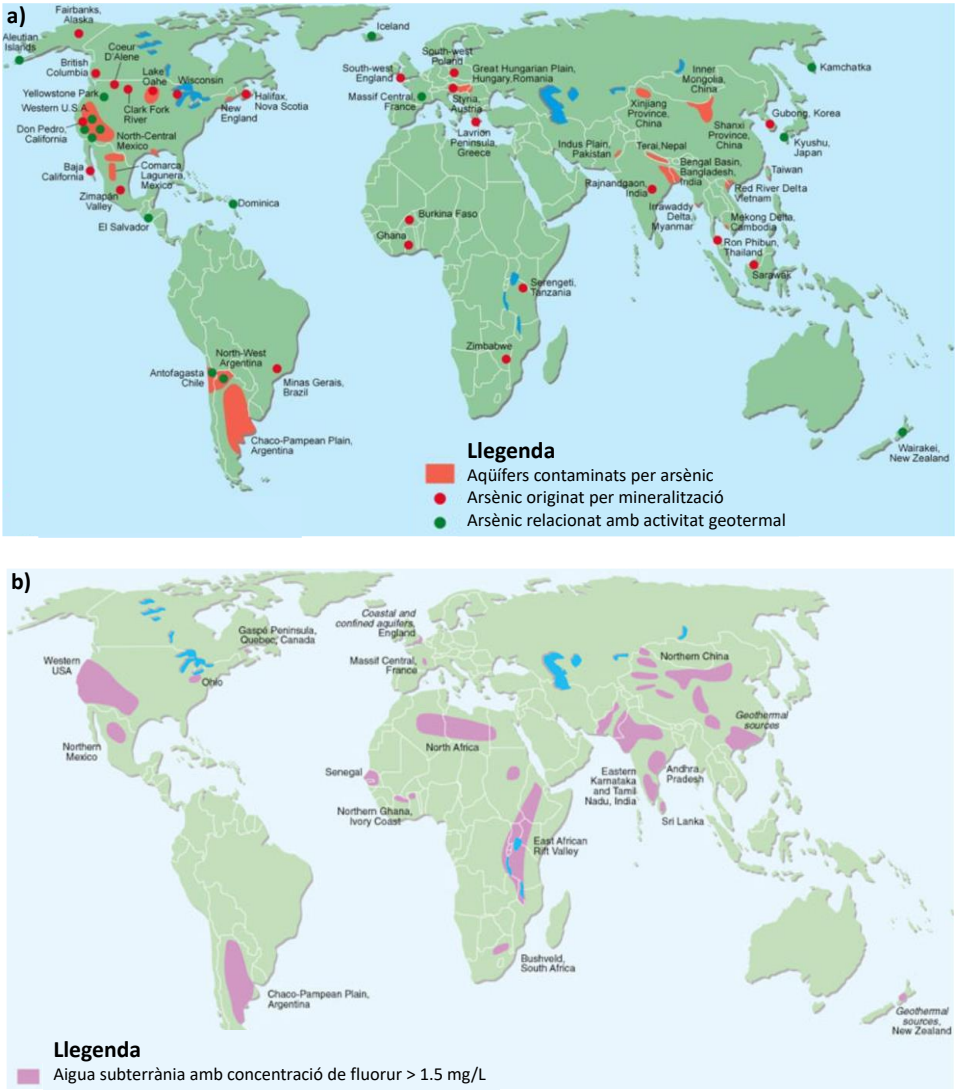


Figura 51 – La presència natural en concentracions elevades d'arsènic o fluorur i són una mostra del perquè l'aigua subterrània pot esdevenir no potable malgrat l'absència de contaminació per activitats humanes; a) distribució documentada de regions amb problemes de presència d'arsènic a l'aigua subterrània (>50 µg/L) relacionats amb activitats mineres o geotermals (BGS, 2020a); b) regions amb presència documentada d'excés de fluorur a l'aigua subterrània (>1.5 mg/L) (BGS, 2020b).

Origen dels components dissolts a l'aigua subterrània

La càrrega de substàncies químiques dissoltes a l'aigua subterrània no només està relacionada amb la interacció amb els minerals de les roques per on flueix, sinó també amb els components atmosfèrics que entren a l'aqüífer amb la precipitació que incorpora ela aerosols presents a l'atmosfera. Aquests aerosols són d'origen divers, des de minúscules partícules d'aigua marina, emanacions procedents de volcans, pols continental, residus originats per llampecs i, també, productes químics derivats de l'activitat humana per la combustió de petroli, carbó, gas natural i l'aplicació de plaguicides agrícoles, entre altres. Atesa la seva petitíssima mida (inferior a la micra) i el caràcter àcid de l'aigua de pluja per la presència d'anhídrid carbònic (CO_2) a l'atmosfera, els aerosols secs es dissolen en la precipitació i inclouen molts elements de la taula periòdica en molt baixa concentració. La

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

concentració de cada element depèn de la distància al seu origen. Per exemple, la distribució del clorur a la precipitació als Estats Units mostra concentracions elevades prop de la costa i del Gran Llac Salat a l'estat de Utah originats per la formació d'aerosols procedents de l'oceà i d'aquest llac concret.

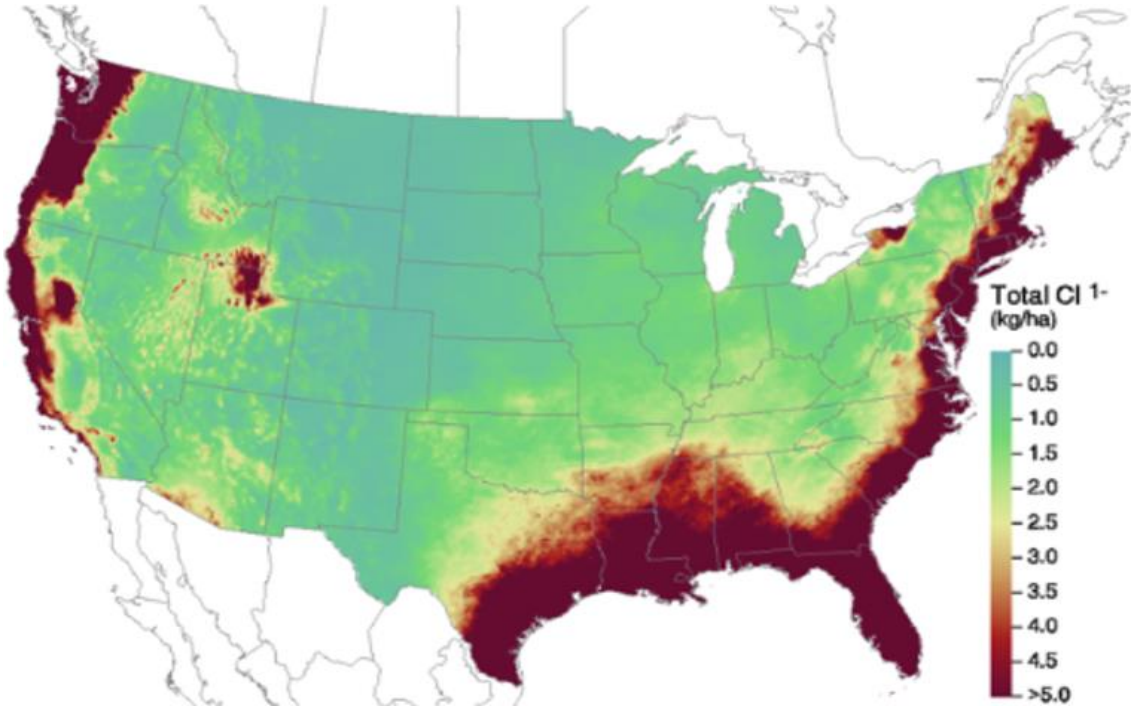


Figura 52 – Mapa de la concentració de partícules de clorur a la precipitació als Estats Units continentals a l'any 2016 (kilograms/hectàrea/any). Les concentracions baixes es mostren en color verd i les més elevades en color marró (NADP, 2019).

Malgrat que la composició química de l'aigua subterrània natural s'origina amb l'aportació dels components presents a l'atmosfera, la major part dels elements i compostos en dissolució els adquireix a mesura que s'infiltra al llarg de la zona vadosa. De fet, a la zona vadosa tenen lloc dos processos que modifiquen la composició de l'aigua d'infiltració: l'evapotranspiració que augmenta la concentració dels sòlids dissolts i les reaccions geoquímiques (Figura 53). Encara que la zona vadosa fos químicament i microbiològicament inert de manera que no pogués aportar cap constituent a l'aigua de recàrrega, el contingut en soluts (TDS) augmentaria degut a l'efecte amplificador de l'evapotranspiració.

L'evapotranspiració transfereix la major part de l'aigua acumulada a la zona vadosa a l'atmosfera, amb una mitjana global del 70%, però els soluts presents a l'aigua romanen a l'aigua del sòl i, per tant, la seva concentració augmenta. A les zones àrides i semi-àrides, la major part dels soluts procedeixen de la precipitació. No obstant, la zona vadosa no és inert, sinó que és químicament reactiva degut a l'oxigen dissolt de l'aigua de recàrrega i a la presència de diòxid de carboni (CO_2) produït a la zona vadosa pels processos de degradació microbiana de la matèria orgànica i per la respiració de les arrels de les plantes. La combinació d'aquestes reaccions i de l'efecte amplificador de la concentració de

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

l'evapotranspiració fa que, habitualment, la concentració de CO_2 al sòl sigui de 10 a 100 vegades superior al de l'atmosfera a les zones àrides, i de 2 a 5 vegades superior a les regions humides de la Terra. Aquest CO_2 es dissolt a l'aigua formant àcid carbònic acidificant l'aigua del sòl, que així esdevé més eficient en la dissolució dels minerals. En moltes regions, la zona vadosa també conté minerals sulfurosos, com la pirita, els quals s'oxiden per la presència d'oxigen i produeixen àcid sulfúric incrementant l'acidesa del sòl i la seva capacitat de dissoldre minerals. Aquest procés de dissolució de minerals a la zona vadosa s'anomena meteorització (literalment, alteració de les roques pels agents meteòrics) i és una acció determinant en l'evolució del relleu. Cal reconèixer, doncs, que la presència d'oxigen i anhídrid carbònic al sòl fan que la zona vadosa sigui un nivell especialment reactiu des de la perspectiva geoquímica.

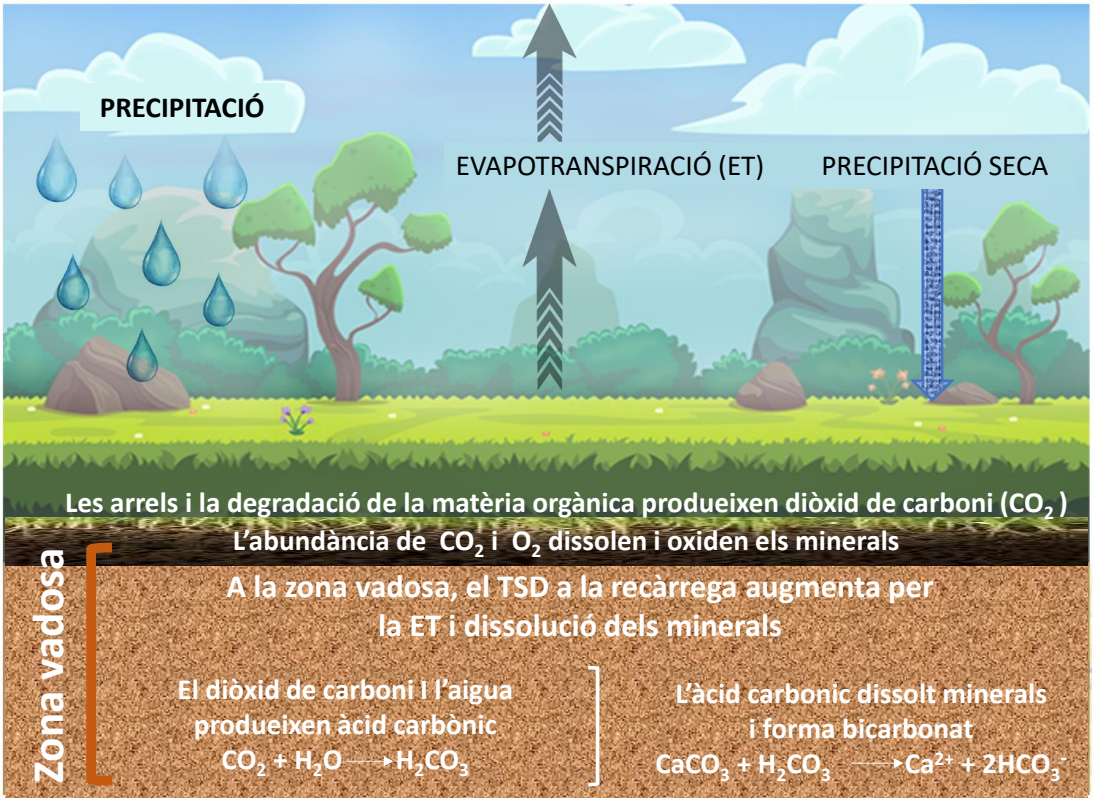


Figura 53 – La zona vadosa és particularment activa des del punt de vista geoquímic per la formació d'àcid carbònic (H_2CO_3) que facilita la dissolució de minerals amb la producció de l'ió bicarbonat (HCO_3^-) i la dissolució de minerals com la calcita ($CaCO_3$) (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Sense cap excepció, el contingut en sòlids dissolts de l'aigua subterrània augmenta a mesura que flueix des de la zona de recàrrega a la de descàrrega (Figura 54). Aquest increment també és degut a l'alliberament de salinitat relicte, o congènita, dels nivells de baixa permeabilitat en els quals el flux d'aigua és pràcticament nul. Aquests nivells retenen els soluts existents a l'aigua dels porus durant la seva formació en èpoques geològiques anteriors, quasi sempre en ambients marins o oceànics, i els van alliberant molt lentament

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

al flux subterrani. Una menor part dels soluts procedents d'aquests nivells pot deure's a una meteorització addicional, però la major part s'associa al moment de la formació.

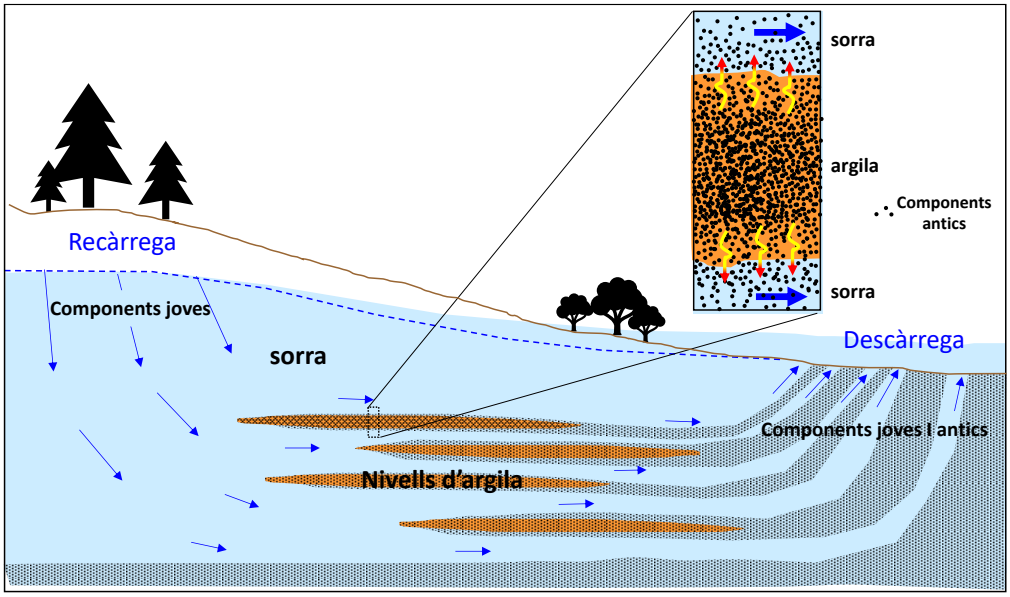


Figura 54 – Esquema il·lustrant com els nivells argilosos de baixa permeabilitat (zones marronoses) aporten components dissolts al flux d'aigua subterrània (fletxes blaves) que té lloc en els nivells més permeables d'aquest sistema hidrogeològic (zones blavoses). Les zones de baixa permeabilitat són pràcticament inactives en relació a la seva contribució al flux subterrani però poden aportar-hi components dissolts acumulats en èpoques geològiques (per exemple, salinitat congènita representada pels punts negres i les zones ombrejades) mitjançant processos de difusió (fletxes grogues ondulants a l'ampliació de la figura). Per tant, l'aigua subterrània que alimenta a les zones de descàrrega és una mescla de components dissolts "joves" i "vells". Per simplificar-ho, l'esquema només representa alguns nivell d'argila, però en realitat el medi geològic és molt més complex i l'aigua subterrània està formada per aportacions de zones amb diferent reactivitat geoquímica i amb diferents temps de residència (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Amb el temps, les formacions geològiques esdevenen menys reactives doncs els minerals solubles ja han estat alterats pel flux d'aigua subterrània. A les regions humides, l'aigua dels aqüífers "antics" presenta valors de TDS relativament baixos fins i tot en aqüífers amb llargs temps de residència a causa de la contínua dissolució dels minerals durant milions d'anys d'exposició a l'acció química de l'aigua subterrània. Contràriament, els aqüífers "joves" solen presentar valors de TDS alts doncs encara no s'han esgotat les minerals potencialment solubles. Per exemple, les àrees que han romàs glaçades durant els darrers centenars de milers d'anys al Canadà, a les parts més septentrionals dels Estats Units i al nord d'Europa i de Rússia poden considerar-se com relleus "joves" derivats de l'acció dels glaciars. Generalment, els materials geològics d'aquestes regions estan formats per minerals i fragments de roques que han estat exposades a l'acció meteoritzadora de l'aigua subterrània només durant 10.000 o 15.000 anys, un cop els glaciars van retrocedir cap a latituds més elevades. Per tant, una gran massa de minerals solubles com la calcita, la dolomita i la pirita, entre molts altres, poden dissoldre's per l'acció de l'aigua d'infiltració. En aquestes àrees tan concretes, fins i tot les aigües subterrànies amb temps

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

de residència curts presenten valors alts de TDS, propers als d'una aigua salabrosa. A mesura que l'aigua subterrània es desplaça cap a zones més profundes, l'aigua esdevé, en general, més salina. A les zones àrides, l'aigua subterrània tendeix a contenir més soluts a causa de l'extrema evaporació.

Per això, els ions bicarbonat (HCO_3^-) i calci (Ca^{2+}) són els components dominants a l'aigua subterrània de sistemes hidrogeològics curts i amb una magnitud de flux prou elevada que provoqui la renovació "ràpida" de l'aigua dels porus (Figura 55). Aquesta composició química és principalment el resultat dels processos de meteorització que tenen lloc a la zona vadosa com s'ha representat a la Figura 53. Com ja s'ha esmentat, la zona vadosa és especialment activa des del punt de vista geoquímic degut a la respiració de les plantes i a la degradació microbiana de la matèria orgànica que produeixen CO_2 en abundància. Aquest gas es dissolt en l'aigua produint àcid carbònic (H_2CO_3) que afavoreix la dissolució de minerals i produeix bicarbonat (HCO_3^-). Encara que a la zona vadosa no hi hagués minerals solubles, l'aigua del sòl contindria HCO_3^-. L'aigua subterrània que genera el flux de base que alimenta l'escorriment superficial procedeix de sistemes hidrogeològics on l'anió dominant és el HCO_3^-. En general, la concentració de sulfat (SO_4^{2-}) sol ser superior a la bicarbonat (HCO_3^-) a sistemes hidrogeològics més grans (Figura 55); si bé podríem trobar nombroses excepcions. Sovint la concentració de SO_4^{2-} disminueix degut a l'acció de processos microbiològics (reducció de sulfat) que consumeix el SO_4^{2-} i produeix CO_2 que, per torna, dona lloc a un augment de HCO_3^- i a un descens del pH. En sistemes hidrogeològics a escala regional (Figura 55), l'anió i el catió dominants són clorur (Cl^-) i sodi (Na^+), respectivament. Aquest canvi en la composició química es deu al fet que en trajectòries de flux molt llargues la incorporació d'aportacions d'halita (clorur de sodi) procedent de zones de baixa permeabilitat és més probable. També hi ajuda que els clorurs siguin minerals extremadament solubles. En aquest sentit, la baixa solubilitat dels minerals que contenen HCO_3^- i SO_4^{2-} determina que les seves concentracions siguin, habitualment, baixes o moderades.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

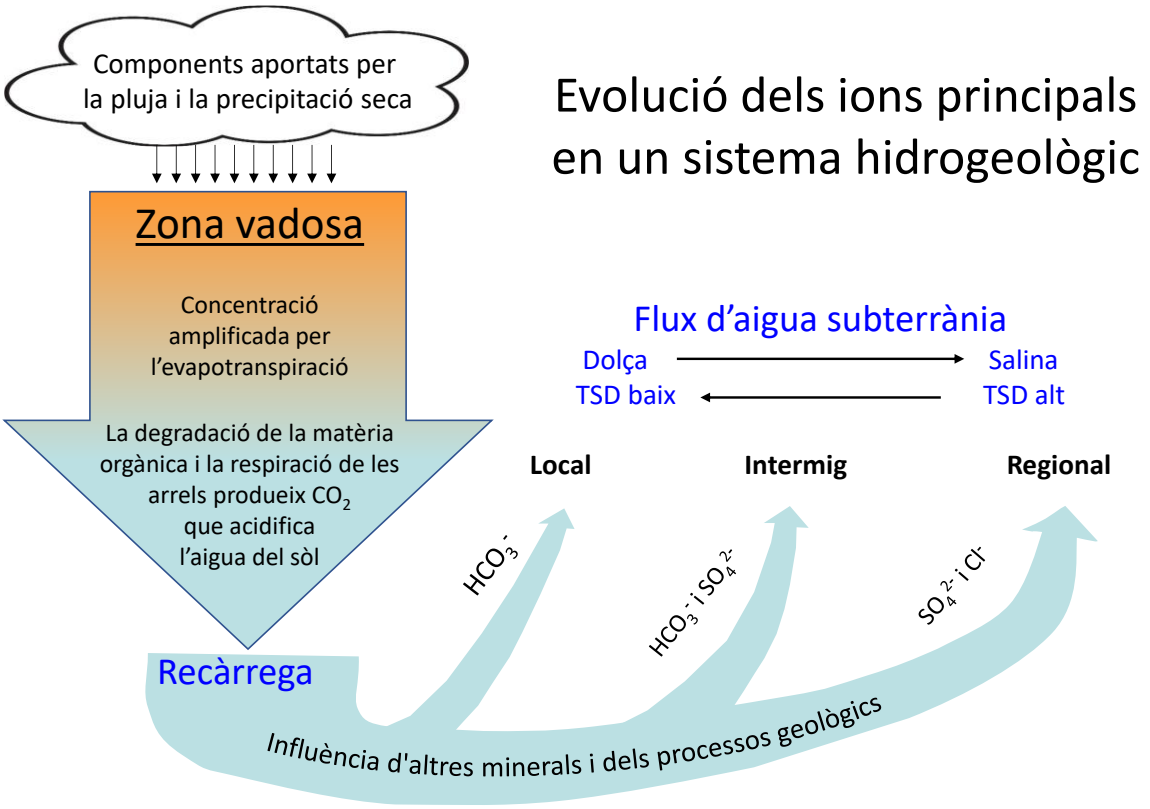


Figura 55 – Les concentracions d'anions varien al llarg de la trajectòria de l'aigua subterrània en funció del tipus de materials geològics interceptats entre les zones de recàrrega i les de descàrrega (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Els minerals clorurats són tan solubles que tot el clorur existent en roques o sediments d'alta permeabilitat ha estat rentat pels grans volums d'aigua subterrània que han travessat l'aqüífer al llarg dels temps geològics. Però també, el clorur sol quedar retingut com a "clorur relicte" als nivells de baixa permeabilitat i a les zones més profundes dels sistemes hidrogeològics (Figura 56). Com a regla general, com més llarg sigui la trajectòria del flux subterrani, més probabilitats hi ha que les zones de baixa permeabilitat aportin clorur relicte a l'aigua subterrània.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

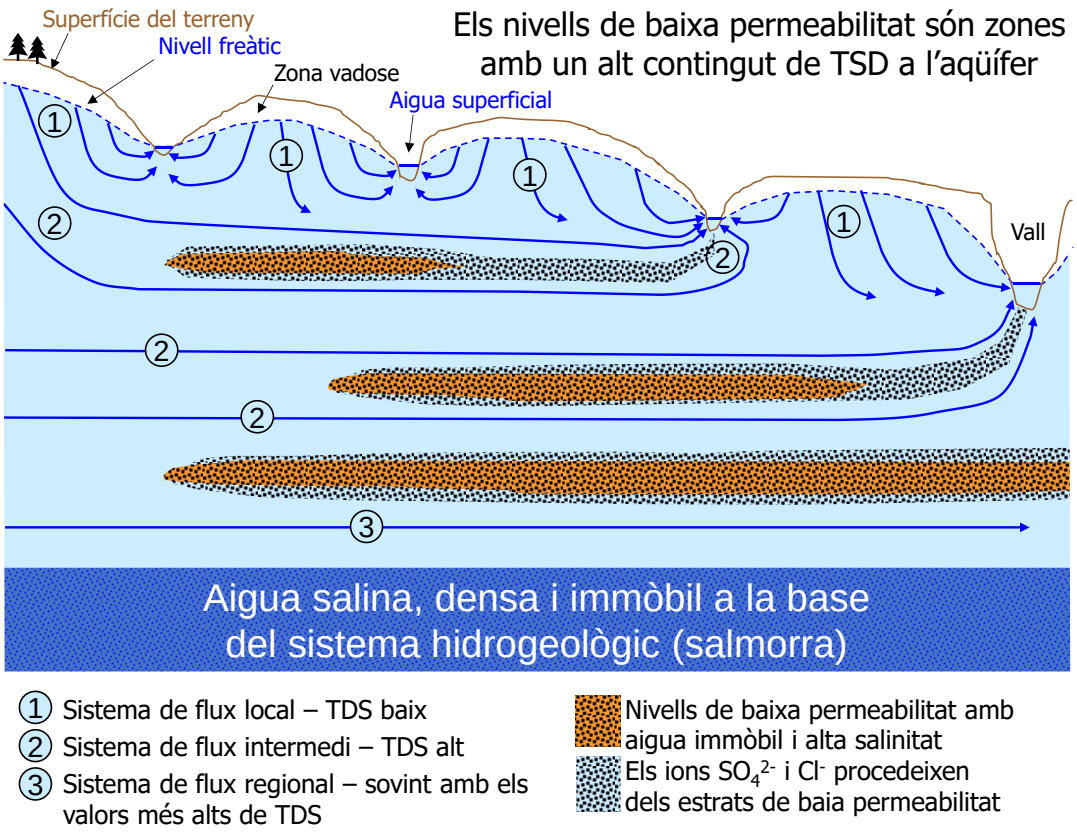


Figura 56 – Esquema sintètic de la distribució del contingut en TSD segons la profunditat a sistemes hidrogeològics regionals (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

La presència d'aigua subterrània salina i mineralitzada als aqüífers

L'aigua salada és freqüent a les parts més profundes dels sistemes hidrogeològics. Contràriament, l'aigua subterrània dolça és habitual a les parts més superficials dels aqüífers, excepte en zones àrides on pot trobar-se una elevada concentració de sals a aqüífers soms.

Un cop el clorur relicte del sòl ha estat lixiviat per la recàrrega durant milers d'anys, l'aigua subterrània actual és dolça fins a una profunditat considerable en molts sistemes hidrogeològics del planeta. Hi ha moltes regions a la Terra on es troba aigua dolça fins ben bé a 500 m o més de fondària (Bierkens and Wada, 2019). A més profunditat, l'aigua subterrània és probablement salabrosa o salada. La profunditat a la qual es produeix l'increment de salinitat que diferencia l'aigua dolça de la salabrosa varia arreu del planeta. La Figura 57 mostra el mapa de la profunditat a la que es produeix aquest canvi de salinitat a la part continental dels Estats Units.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

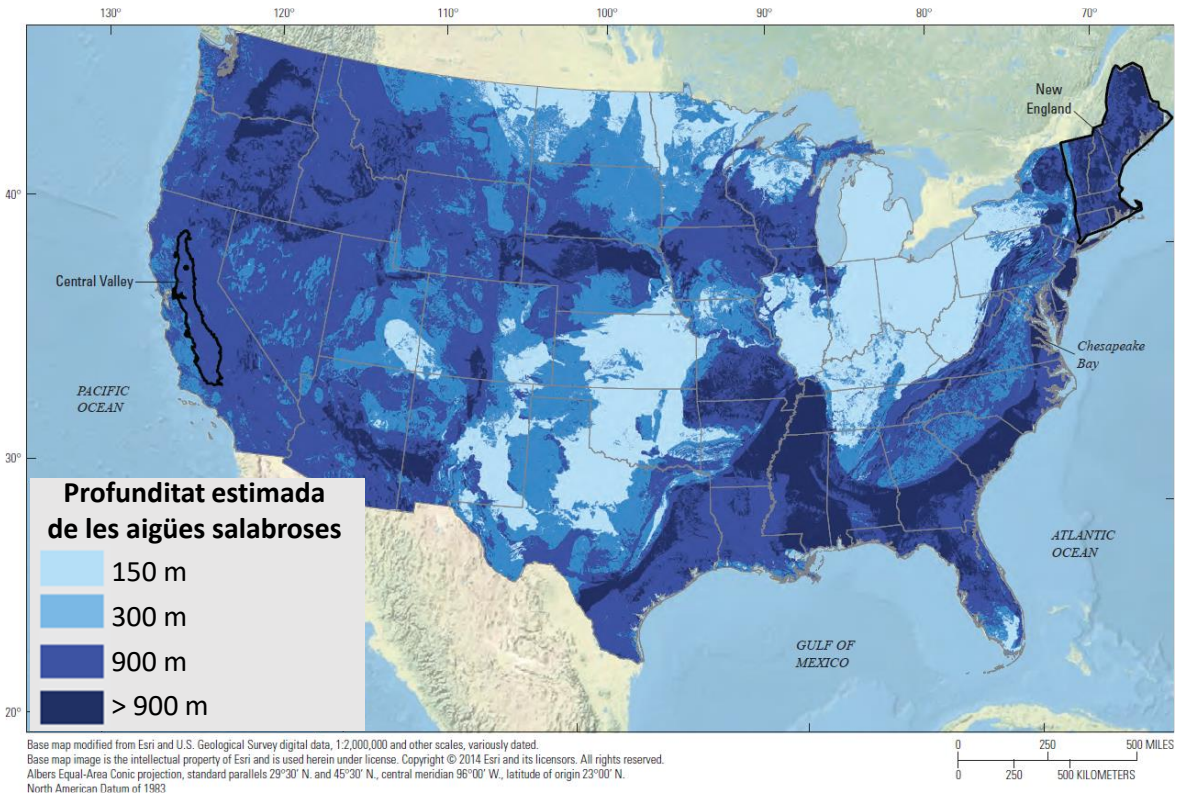


Figura 57 – Profunditat estimada on es produeix el canvi d'aigua dolça a aigua salabrosa a la part continental dels Estats Units. A les zones en blau clar, l'aigua salabrosa es troba a probablement a fondàries de menys de 150 m, mentre que a les zones de blau fosc, la fondària s'estima superior als 900 m (adaptat de Stanton et al., 2017).

Fins i tot s'ha localitzat, de forma completament inesperada, l'existència d'aigua dolça "fòssil" a sota del fons oceànic davant la costa nord-est dels Estats Units. Aquesta descoberta és l'evidència de tot el que encara resta per conèixer respecte a la distribució i natura de l'aigua subterrània en alguns indrets del planeta (Gustafson et al., 2019).

Als llocs on l'aigua subterrània flueix a la superfície, els components químics finalitzen la seva estada al subsol i inicien un nou trajecte, ara en forma d'aigua superficial, en el context del cicle hidrològic. A les regions amb climes humits, la descàrrega d'aigua subterrània nodreix rius, aiguamolls i llacs i, finalment, arriba als oceans. A les regions àrides i semi-àrides, la descàrrega té lloc a depressions intramuntanyoses, habitualment planes endorreiques, i a valls seques. L'evaporació en aquests indrets concentra els soluts a l'aigua subterrània més superficial en una proporció de 1:100 o 1:1.000, causant que els terrenys esdevinguin improductius per a l'agricultura. Així, la composició química de l'aigua subterrània determina tant la composició química de la majoria d'aigües superficials com les acumulacions salines a les zones deprimides i als sòls de les regions àrides.

La vegetació a les zones àrides és escassa, la recàrrega reduïda i el nivell freàtic sol trobar-se a força profunditat. Paral·lelament, els gradients hidràulics són petits i, en conseqüència, els temps de residència són llargs. Per aquests motius, la composició de l'aigua subterrània a les zones àrides és diferent (molt sovint amb concentracions dels components químics molt elevades) de la recàrrega pròpia de les regions humides. A les

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

primeres, els components químics procedeixen dels aerosols atmosfèrics, es concentren per evaporació i s'acumulen a la superfície del terreny fins que un episodi de recàrrega intens, i generalment poc freqüent, els arrossega fins al nivell freàtic. L'absència de vegetació determina que la quantitat de diòxid de carboni (CO_2) a la zona vadosa sigui molt baixa i, per tant, la meteorització té lloc a un ritme lent i produeix pocs soluts. Com a resultat, la composició química de l'aigua subterrània sol presentar una major concentració de clorur de sodi, sulfat de calci i bicarbonat sòdic i una menor quantitat de carbonat de calci en regions àrides que en les regions humides. Finalment, la lentitud del flux subterrani en aquestes zones permet que la composició química de l'aigua subterrània estigui més influenciada per les aportacions dels aqüífers relictes i dels aqüífer salins profunds, els quals contribueixen a augmentar la seva salinitat.

La descàrrega del flux subterrani a la superfície en zones àrides no sempre dona lloc a acumulacions d'aigua visibles. En aquests indrets, l'aigua s'evapora immediatament i forma dipòsits salins. Un estudi realitzat a les depressions salines d'Abu Dhabi conclou que l'aigua que s'evapora des de la franja capil·lar forma extensions salines, amb una salinitat 10 vegades superior a la de l'aigua de mar, que poden arribar a cobrir una extensió de 36.000 km^2 (Figura 58). La manca de vegetació permet la formació de morfologies úniques, anomenades *sabkhas* (mot àrab per designar les planures salines), per la interacció dels processos eòlics amb la dinàmica hidrogeològica. Concretament, el vent erosiona el sòl desprotegit de vegetació però no té prou capacitat per transporta el material de la zona capil·lar, saturada d'aigua, més cohesiva i, per tant, més difícil de ser erosionada i transportada pel vent. En aquests indrets, el terreny, habitualment molt pla, reflecteix la forma i pendent del nivell freàtic. Atès que són zones de descàrrega, l'evaporació crea acumulacions de sals que formen crostes salines (Figura 58).

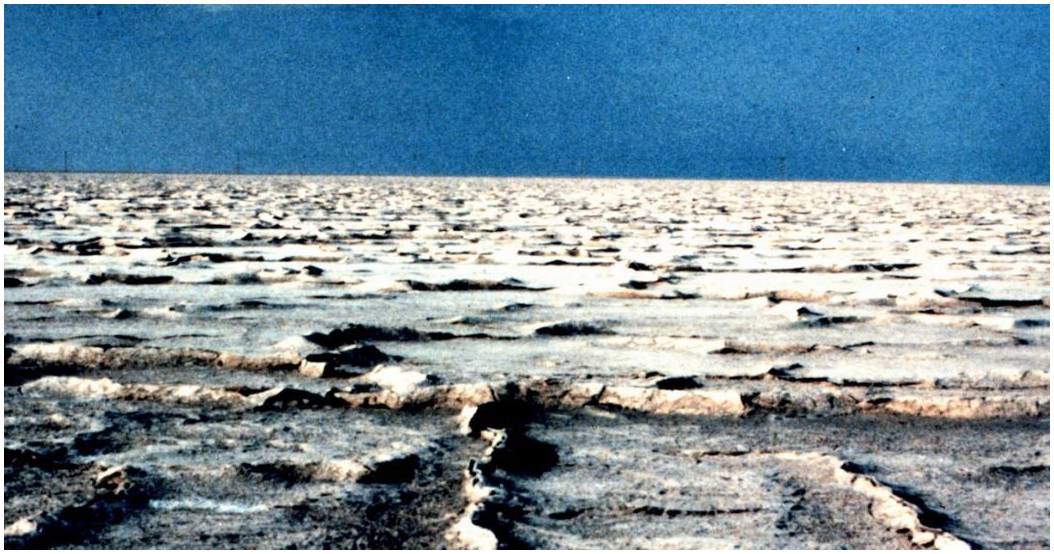


Figura 58 – Plana salina, o *sabkha*, a Abu Dhabi, als Emirats Àrabs Units. Encara que la foto sembli ser de baixa resolució, no ho és; l'aspecte granulat de la imatge es deu a l'extrema temperatura de la superfície (65°C; foto: Wood et al., 2002).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Les fonts alcalines presenten un quimisme caracteritzat per un pH elevat i sovint s'anomenen "llacs blaus" pel seu color blau intens. Solen trobar-se a zones on les roques del mantell terrestre, formats a temperatures molt altes i en condicions de pressió elevada, han estat desplaçades cap a la superfície pels processos tectònics (Figura 59). En condicions superficials, esdevenen inestables i són fàcilment alterables. La meteorització, en aquest cas sense la participació de diòxid de carboni, implica la dissociació de la molècula d'aigua alliberant l'ió hidrogen (H^+) i formant àcid silícic (H_4SiO_4) i ions hidroxil (OH^-) que incrementa la seva alcalinitat (és a dir, augmenta el pH). Quan l'aigua subterrània retorna a la superfície, els ions calci d'aquesta aigua alcalina reaccionen amb el CO_2 atmosfèric per precipitar calcita ($CaCO_3$) i formar crostes finíssimes d'aquest mineral a la superfície de l'aigua. A mesura que augmenten el gruix, les crostes davallen al fons dels llacs alcalins i formen un sediment esponjós de color blanc. El color blau d'aquests llacs és deu al fet que l'aigua absorbeix la franja vermella de l'espectre visible de la llum i reflecteix la franja blava, essent encara més intensa per l'efecte del carbonat de calci acumulat en el fons. A més, hom hi pot observar bombolles de metà inorgànic o d'hidrogen ascendint a la superfície.

Figura 59 – Una bassa blava al nord de Oman està formada per roques del mantell terrestre que han estat emplaçades a la superfície i posteriorment meteoritzats, produint aigües alcalines que reaccionen amb l'atmosfera per precipitar fines capes de calcita. Quan aquestes làmines de mineral davallen al fons de la bassa formen l'acumulació d'un sediment blanquinós que intensifica el color blau de l'aigua (foto: Warren Wood, 1990).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Producció geoquímica i transport del soluts a regions amb climes àrids i humits

En síntesi, i considerant que poden haver-hi excepcions, la composició química de l'aigua subterrània va variant al llarg de la seva trajectòria. A l'inici, la seva qualitat reflecteix les condicions quasi pristines (baixes concentracions de tots els components) de les zones de recàrrega i va variant a mesura que el flux transcorre per la zona vadosa incorporant els productes de la meteorització. Com s'ha esmentat, la producció d'àcid carbònic a la zona vadosa per dissolució del CO_2 gasos produït per les arrels i la degradació de la matèria orgànica permet l'alteració dels minerals que incrementa el total de sòlids dissolts (TSD). L'evapotranspiració incrementa encara més el valor de TSD, doncs l'aigua retorna a l'atmosfera deixant els soluts a l'aigua retinguda al sòl que, posteriorment, recarregarà l'aqüífer. Un cop a la zona freàtica, la composició química de l'aigua no variarà substancialment fins que retorni de nou a la superfície, com en el cas dels sistemes hidrogeològics locals. En sistemes de flux a escala regional, el fet d'equilibrar-se amb nous minerals o mesclar-se amb altres fluxos al llarg de la seva trajectòria fa que l'aigua subterrània acabi adquirint un valor més alt de TSD. **El flux de l'aigua subterrània esdevé així un agent de transport pels components dissolts des de les zones de recàrrega a les de descàrrega**.

Hi ha dues dinàmiques que regeixen els processos de transport de les substàncies en dissolució al subsol (Figura 60). En primer lloc, cal esmentar les dinàmiques pròpies dels climes àrids, on tota la descàrrega d'aigua subterrània s'evapora o evapotranspira de manera que les sals precipiten i s'acumulen en sòls salins, planes salades, o llacs salats com el Gran Llac Salat a Nord-Amèrica, el Llac Eyre a Austràlia, el Llac Titicaca situat a Perú i Bolívia o el Llac Txad a Àfrica. La composició química de l'aigua subterrània a les zones de descàrrega en aquestes condicions climàtiques influencia, potser de manera dominant, l'ecologia dels sistemes aquàtics i de la vegetació de l'entorn. En segon lloc, la descàrrega d'aigua subterrània en regions humides té lloc habitualment a la xarxa de drenatge superficial: fonts, rius, aiguamolls, estanys, ... i, a les zones litorals, directament als oceans.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

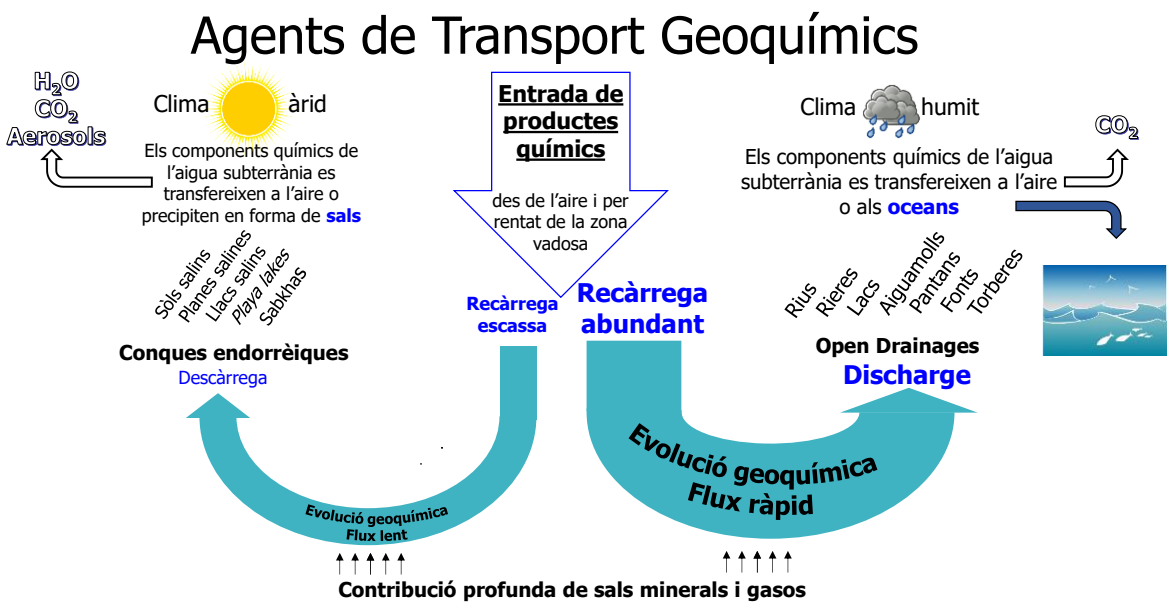


Figura 60 – A les zones de recàrrega, els aerosols arriben a la zona vadosa a través de la infiltració de la pluja incident, l'ió bicarbonat (HCO_3^-) es forma a la zona vadosa i, amb ell, els altres components dissolts arriben a la zona freàtica. En climes àrids, quan l'aigua rica en bicarbonat arriba a les zones de descàrrega, sovint en depressions endorreiques, els components HCO_3^- and CO_2 s'alliberen i es formen dipòsits minerals per acció de l'evaporació. El vent erosiona els minerals dipositats afegint de nou aerosols a l'atmosfera. En climes humits, quan l'aigua subterrània rica en bicarbonat descarrega a la xarxa de drenatge, el CO_2 s'allibera a l'atmosfera i provoca la precipitació de la calcita ($CaCO_3$), depositant-se al fons de les lleres dels rius o essent transportada fins als oceans en forma de finíssimes partícules juntament amb el HCO_3^- dissolt que resta en dissolució (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Si considerem ara el règim de flux i la distribució del nivell piezomètric, els sistemes hidrogeològics estan generalment en equilibri amb les condicions hidrològiques actuals dominants a cada indret de la Terra. És a dir, la distribució de la pressió hidrostàtica en el sistema està pràcticament en equilibri hidrològic amb les característiques climàtiques mitjanes, excepte en el cas en que l'aqüífer estigui sotmès a un intens règim d'extraccions per bombament. No obstant, aquest no seria el cas de la composició química de l'aigua, la qual −pràcticament arreu del món− en rares ocasions està en equilibri geoquímic amb els minerals que el flux d'aigua subterrània travessa en la seva trajectòria. Allà on no s'ha assolit l'equilibri, els processos geoquímics actuen sobre els minerals produint nous soluts que seran transportats pel flux subterrani fins a la superfície. Tanmateix, en els llocs del planeta que han estat geològicament estables durant milions d'anys, els processos geoquímic i de transport ja han completat els processos de dissolució afectant tota la massa de roca exposada al flux subterrani. En aquest llocs, l'aigua subterrània sol ser dolça, fins i tot a profunditats de un o dos kilòmetres, amb uns valors de TSD excepcionalment baixos i amb una composició química que reflecteix clarament la contribució dels aerosols i altres partícules atmosfèriques.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

7.3 L'aigua subterrània com dipòsit de residus (D'allò que els ulls no veuen, el cor no se'n dol)

Arreu de la Terra, allà on hi ha activitat humana que generi o usi productes químics, és altament probable que aquests s'infiltrin al subsol modificant la qualitat de l'aigua subterrània. Hi ha milions de productes químics i cada any n'apareixen de nous. En conseqüència, molts d'ells s'han infiltrat durant els darrers 100 anys, si bé només uns pocs milers està provat que causin la contaminació dels recursos hídrics (Figura 61). Aquells components químics que deriven de l'activitat humana s'anomenen compostos antropogènics per distingir-los dels d'origen natural o geogènics. De fet, algunes alteracions de la qualitat de l'aigua subterrània no són perjudicials ni per la salut humana ni per la dinàmica del ecosistemes; no obstant, aquells que són realment nocius pels humans i pel medi ambient han causat gravíssims problemes a molts indrets del món. La primera notícia registrada que relaciona la contaminació de l'aigua subterrània amb malalties i defuncions és del metge John Snow qui, al 1854, va relacionar una epidèmia de còlera a Londres, Anglaterra, amb l'ús d'aigua d'un pou contaminat per aigües residuals domèstiques. Malgrat que actualment els recursos hídrics, en general, i l'aigua subterrània, en particular, estan més protegits de la contaminació que al segle XIX, encara persisteixen molts casos de malalties i morts derivades de la contaminació de l'aigua.

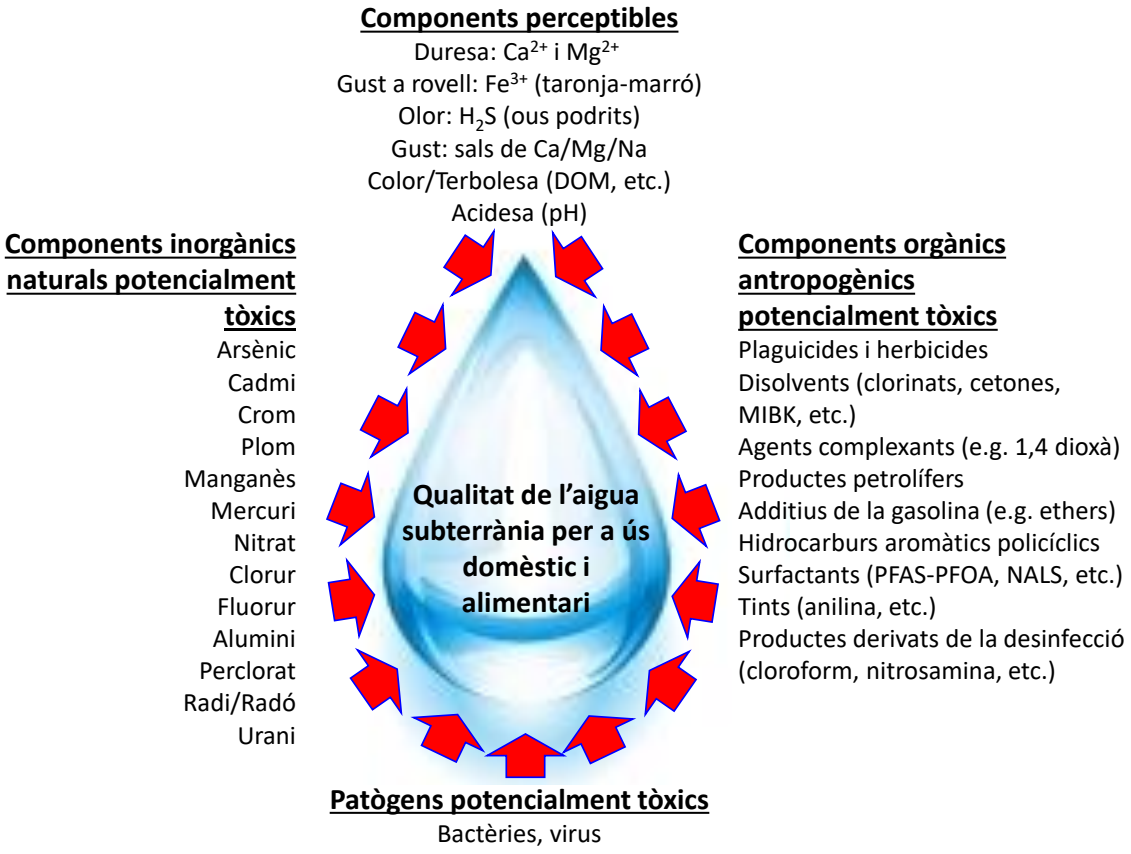


Figura 61 – Categories de components químics que causen la pèrdua de qualitat de l'aigua subterrània (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

La Figura 62 il·lustra algunes de les activitats que són l'origen de productes químics nocius pel medi aquàtic en entorns rurals. A més dels contaminants esmentats a la Figura 62, les xarxes de clavegueram urbanes solen tenir pèrdues importants per esquerdes i averies que vessen productes contaminants al subsol. A les zones rurals, les foses sèptiques de les cases també contribueixen a la contaminació. Cada una de los fonts de contaminants representades a la Figura 62 afecta una zona contaminada de l'aqüífer que s'estén en la direcció del flux subterrani i, degut a la seva forma allargada, s'anomenen plomalls. Els compostos antropogènics, igual que els naturals, es desplacen des de les zones de recàrrega a les de descàrrega o als pous d'abastament. Alguns plomalls arriben a les zones de descàrrega en qüestió d'anys o dècades, en tant que altres poden trigar segles. Aquests darrers segueixen les trajectòries de flux il·lustrades a les Figures 35 i 38. La degradació natural, l'adsorció dels contaminants a la superfície de les partícules sòlides del subsol, els processos microbiològics i la dilució contribueixen a reduir la massa de contaminant en dissolució i, a llarg termini, la poden fer desaparèixer completament. Amb tot, alguns contaminants no es poden degradar o eliminar per cap dels processos esmentats i d'altres poden transformar-se en subproductes que persisteixen a l'aqüífer i continuen desplaçant-se amb el flux subterrani fins a les zones de descàrrega.

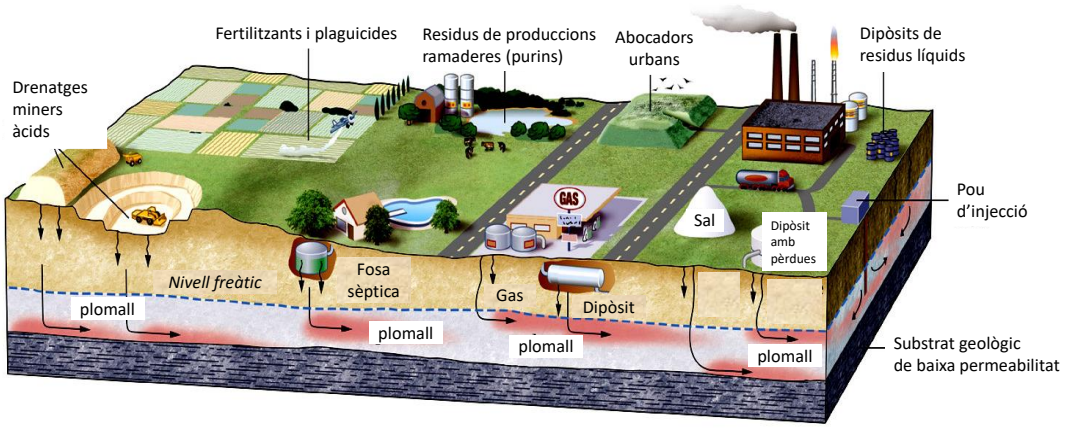


Figura 62 – Fonts de components químics derivats de l'activitat humana que s'infiltren al subsol i modifiquen la qualitat de l'aigua subterrània creant plomalls de contaminació (adaptat de Marshak, 2005).

Amb anterioritat a la Revolució Industrial, ara fa uns 200 anys, els compostos naturals d'origen humà que afectaven la qualitat dels recursos hídrics eren principalment compostos naturals de nitrogen i compostos orgànics associats a les deixalles produïdes pels homes o pels animals que criaven. Aquests compostos rarament causaven danys perquè, en les quantitats que es produïen, eren ràpidament assimilats o degradats per processos naturals. De fet, el subsol té una gran capacitat per assimilar compostos potencialment nocius d'origen humà (és a dir, d'autonetejar-se). Aquest potencial protegeix els recursos hídrics de molts productes químics produïts per la societat industrialitzada. Malgrat això, la quantitat de compostos químics alliberats al medi és actualment tan gran

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

que s'ha superat aquesta capacitat natural d'assimilació. A començament de la Revolució Industrial, a principis del segle XIX, la tecnologia va permetre extreure substàncies del carbó i d'altres materials geològics, creant nous compostos els quals s'introduïren progressivament al cicle hidrològic, especialment metalls i quitrà. El quitrà conté grans quantitats de toluè, xilè i naftalè. Aleshores, aquests impactes preocupaven poc a la societat, atesa la baixa densitat de la població, l'ús limitat de l'aigua subterrània, l'escassa activitat industrial i una inexistent conscienciació ambiental.

A partir de la meitat del segle XX, però, la contaminació de l'aigua subterrània començà a ser considerada un problema a Europa i Nord-Amèrica quan:

1) L'augment de la producció industrial va crear la societat de consum i, amb ella, el continu abocament de productes químics al medi,
2) Les zones urbanes van començar a escampar els residus als camps i a construir abocadors per residus sòlids i líquids,
3) La "revolució verda" va permetre l'expansió de l'agricultura intensiva fonamentada amb l'ús indiscriminat de fertilitzants, herbicides i plaguicides,
4) La indústria adquirí la capacitat de manufacturar productes químics inorgànics, complexos per a productes de neteja, de protecció contra el foc, de higiene personal, fàrmacs i antibiòtics, entre molts altres, l'ús dels quals es va estendre a tot el planeta. Alguns d'aquests productes s'alliberen al medi durant el seu ús, o a través de les deixalles o de les aigües residuals. Aquests residus entren al subsol per fuites a les clavegueres i pel lixiviat dels abocadors on s'acumulen, i,
5) Es va incrementar l'ús de l'aigua subterrània per a l'abastament substituint els recursos de rius i llacs, els quals ja presentaven una qualitat deficient.

Entre els milions de productes químics orgànics que es produeixen, alguns resten completament immòbils a l'interior de l'aqüífer, perquè s'adsorbeixen a la superfície dels minerals o d'altres partícules del medi geològic, i altres es degraden ràpidament per l'acció bacteriana i, per tant, ambdós tenen un impacte molt petit. Un tercer grup, que inclou alguns milers de productes, són mòbils i es degraden poc o molt lentament. En alguns casos, aquests compostos poden degradar-se en subproductes que són fins i tot més tòxics que els originals. Els d'aquest tercer grup són transportats pel flux d'aigua subterrània i, en molts països industrialitzats, hi ha exemples de llarguíssims plomalls de contaminació que arriben a distàncies de centenars a milers de metres lluny del seu origen amb trajectòries de flux que han durant desenes d'anys (50-70 anys).

Un indicador rellevant per determinar si un aqüífer explotat pot presentar contaminació derivada d'activitats humanes és la presència de triti a l'aigua subterrània. L'aigua "moderna" conté concentracions detectables de triti (molècules d'aigua radioactives) a nivells molt baixos. El triti es va incorporar a l'atmosfera a principis de la dècada de 1950, i amb major intensitat als anys 60, a partir de les proves atòmiques en superfície. Un cop a l'atmosfera, aquestes molècules d'aigua radioactives formen part de la precipitació que recarrega els aqüífers. A molts països on s'explota l'aigua subterrània, la majoria dels aqüífers presenten nivells detectables de triti indicant que part de la recàrrega

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

s'ha efectuat durant les darreres dècades. Per exemple, de les 3.493 mostres d'aigua subterrània de la base de dades del Servei Geològic dels Estats Units a les quals es va analitzar el contingut de triti, 2.702 van detectar-ne la presència (77%). Aquesta aigua "moderna" probablement també conté compostos antropogènics en dissolució. De fet, cada cop s'identifiquen més compostos químics a l'aigua subterrània i es desconeixen les conseqüències que aquesta contaminació pot tenir a llarg termini per la salut humana, especialment si considerem que la població està ingerint mescles dels diferents contaminants abocades al medi.

Un dels fets que distingeix l'aigua subterrània de la superficial és que, un cop contaminada, l'afecció és més perdurable perquè té un temps de residència molt més llarg. Si fóssim capaços d'aturar en un instant i per sempre tots els abocaments de contaminants al medi hídric subterrani, els compostos abocats fins aquell moment acabarien diluïts pel flux subterrani o degradats, doncs molts plomalls es troben en aqüífers amb una alta capacitat de degradació. Però en la majoria dels casos, el temps per assolir un nivell de contaminació "zero" seria de centenars o milers d'anys. Per exemple, el compost dibromcloropropà (DBCP), un plaguicida extensament utilitzat en les zones agrícoles dels Estats Units, fou prohibit l'any 1979; però el 2017, 38 anys després de ser retirat d'ús, encara se'n detectava a l'aigua subterrània de Califòrnia. Contràriament, la dilució i l'atenuació de contaminants a rius i llacs requereix només un termini de setmanes o mesos per retornar als nivells de concentració anteriors als de l'abocament un cop la font de contaminació ha estat eliminada. En conseqüència, atès que la contaminació de l'aigua subterrània persisteix durant llargs períodes de temps, és importantíssim prevenir qualsevol possible episodi de contaminació a fi d'evitar impactes de tanta magnitud i durada en la qualitat del recurs aigua.

El motiu pel qual l'aigua subterrània ha assolit nivells tan elevats de contaminació és per que tenim un perspectiva "d'allò que no es veu, no existeix". Fins i tot, acceptant que siguem conscients de l'existència de l'aigua subterrània, sovint tenim una concepció equivocada de quin és el destí d'un contaminant un cop entra al subsol i desapareix de la nostra vista. Per exemple, considerem el cas dels "pous negres", "pous cecs" o foses sèptiques on, especialment en habitatges aïllats, hi aboquem els residus domèstics. Generalment, estan formats per un dipòsit subterrani, excavat al terreny, que permet que l'aigua domèstica residual s'infiltri a la zona vadosa i recarregui l'aqüífer subjacent, sovint des del propi pou o a través d'uns conductes perforats que escampen l'aigua per tota un zona àmplia a instal·lacions més avançades (Figura 63). Aquest sistema és eficient com una primera barrera per eliminar bactèries i virus que podrien ser causa de malalties si arribessin a l'aigua subterrània. No obstant, no ha estat dissenyat per eliminar el nitrogen i altres compostos químics que utilitzen quotidianament, com detergents, sabons o productes farmacèutics. La Figura 63b mostra el plomall de contaminació que es genera immediatament a partir de la instal·lació del sistema sèptic. Amb el temps, el plomall de compostos recalcitrants (és a dir, amb poca capacitat per degradar-se en el medi) esdevé

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

més i més extens fins que afecta un receptor, sigui un element natural: riu, llac, estuari, ..., o un pou de captació.

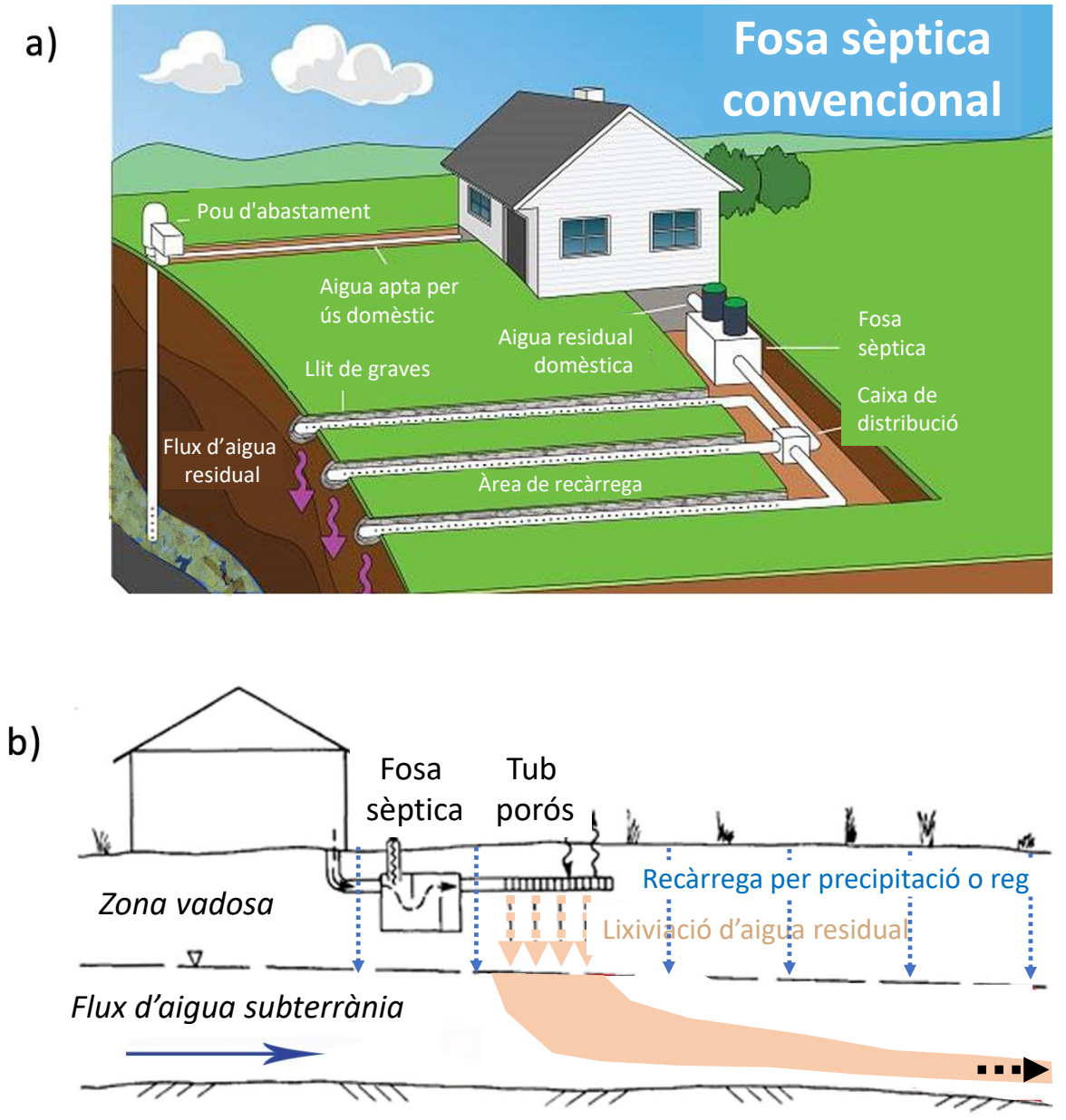


Figura 63 - Diagrama de: a) Un sistema sèptic típic d'una casa unifamiliar amb un pou de captació proper; i b) el plomall de contaminació generat a partir de l'aigua residual infiltrada tant bon punt el sistema s'ha posat en funcionament (adaptat de Wilhelm et al, 1996).

Gairebé un cinquena part dels habitatges dels Estats Units, Canadà o la Unió Europea disposen d'aquests sistemes de tractar les aigües residuals domèstiques. L'aigua que en surt conté nitrat i fòsfor, així com productes farmacèutics, de higiene personal i additius alimentaris. Durant els anys 1950, aquests sistemes de tractament de les "aigües grises" eren molt habituals en les àrees suburbanes dels Estats Units. Tot hi estar pensats

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

des de la perspectiva de l'enginyeria, assumien a priori que el subsol tenia una gran capacitat per atenuar i degradar la presència de contaminants. Per tant, no es preveié que els plomalls originats en aquests sistemes sèptics s'estenguessin gaire lluny del punt d'infiltració dels efluents i que, conseqüentment, cap dels contaminants derivats dels usos domèstics generaria plomalls de contaminació preocupants. En molts casos, aquests habitatges disposen del pou d'abastament a la mateixa propietat, no gaire lluny de la fossa sèptica (Figura 63), de manera que la possibilitat que el plomall afecti al pou és molt alta. En general, no hi ha massa informació de l'impacte d'aquests casos concrets de contaminació de l'aigua subterrània sobre la salut humana; però no hi ha cap mena de dubte que els sistemes sèptics contaminen i afecten la qualitat de l'aigua a rius, llacs, estuaris i badies on la descàrrega de concentracions elevades de nitrogen i fòsfor causa eutrofització i malmet els ecosistemes. Un impacte similar té lloc a partir de les pèrdues de la xarxa de clavegueram a zones urbanes.

De manera semblant, les aigües residuals domèstiques i ramaderes també suposen un risc per a la contaminació de l'aigua subterrània, per exemple, afavorint la presència de bacteris com l'Escherichia coli (E. coli) i virus. Els bacteris són poc mòbils en medis arenosos doncs el medi porós actua com un filtre atès que la mida dels microorganismes és prou gran per quedar-hi retinguda. No obstant, sí que poden desplaçar-se eficientment pel subsol en aqüífers de graves, càrstics o fracturats. Els virus són més mòbils que els bacteris precisament per la seva mida menor. Els virus nocius poden romandre actius fins a tres anys un cop infiltrats i poden desplaçar-se diversos kilòmetres en aqüífers amb una alta permeabilitat. E. coli és un bacteri habitual als pous domèstics que es detecta molt fàcilment en mostres d'aigua i la seva presència és alhora un indicador de la presència de virus. Amb tot, aquests contaminants microbiològics no s'analitzen de forma rutinària en els controls de qualitat de l'aigua subterrània i, per tant, la seva implicació en problemes de salut humana no pot establir-se amb precisió.

L'anomenada Revolució Verda en la producció agrícola és un altre exemple de com la ciència pot comportar grans beneficis i, al mateix temps i inadvertidament, causar un dany immens a la qualitat dels recursos hídrics. Va començar a la dècada de 1940 amb l'inici de la modificació genètica de les llavors. Si bé aquest part va desenvolupar-se poc, la mecanització de l'agricultura i l'aplicació de fertilitzants, herbicides i plaguicides manufacturats va contribuït a augmentar notablement la producció d'aliments. Com a conseqüència, una gran quantitat de nitrogen procedents dels fertilitzants s'acumulà a l'aigua subterrània en forma de nitrat (NO_3^-), una compost nociu per a la salut humana i pels ecosistemes. Tant per les aportacions de l'agricultura com per les originades a les fosses sèptiques, el nitrat és el contaminant més habitual a l'aigua subterrània en molts aqüífers del món, per la qual cosa ha generat legislacions específiques a molts països..

Quan s'estudia la història de la contaminació de l'aigua subterrània en els darrers 70 anys, hom se n'adona que el descobriment i producció de nous productes químics ha

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

tingut quasi sempre conseqüències negatives, inicialment no intencionades, sobre la qualitat dels recursos hidrogeològics (Figura 64).

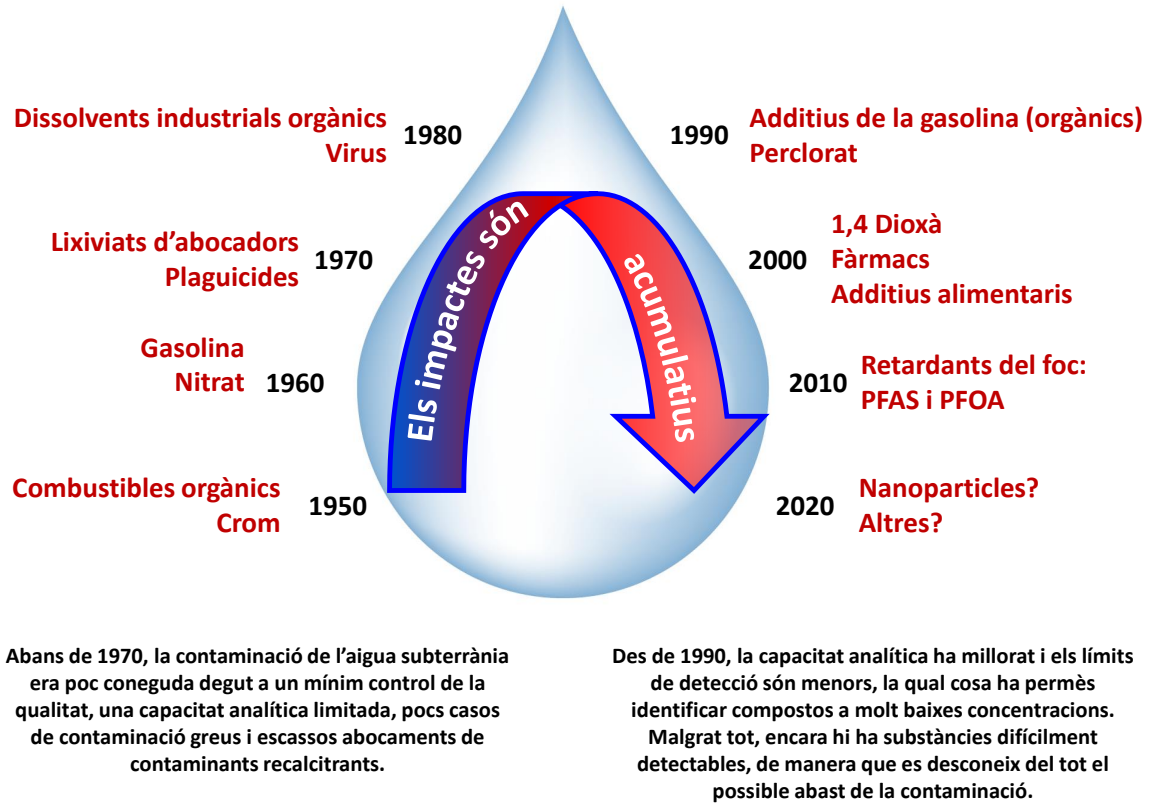


Figura 64 – Evolució de les fonts de contaminants en els darrers 100 anys. La informació sobre alguns contaminants s'amplia a la Figura 65 (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

L'exemple més recent d'un descobriment científic que havia estat dissenyat per millora la vida quotidiana i que ha acabat suposant un impacte negatiu en la qualitat de l'aigua subterrània són els milers de compostos orgànics fluorats, coneguts com PFAS (acrònim anglès de *per- and poly-fluoroalkyl substances*: substàncies perfluoroalquilades i polifluoroalquilades) representats a la Figura 65. Són compostos indispensables per produir productes tant coneguts com tefló, Gore-Tex, escumes contra incendis i teixits ignífugs. Els PFAS estan presents a les aigües subterrànies de tot el món, on són mòbils i recalcitrants. També tenen capacitat de bioacumular-se als teixits del organismes que hi estan exposats, de manera que la major part de la població i moltíssimes espècies animals tenen PFAS a la seva sang i a les seves cèl·lules causant amb afeccions al sistema immunològic, complicacions neuro-degeneratives i càncer (Sunderland et al., 2019).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

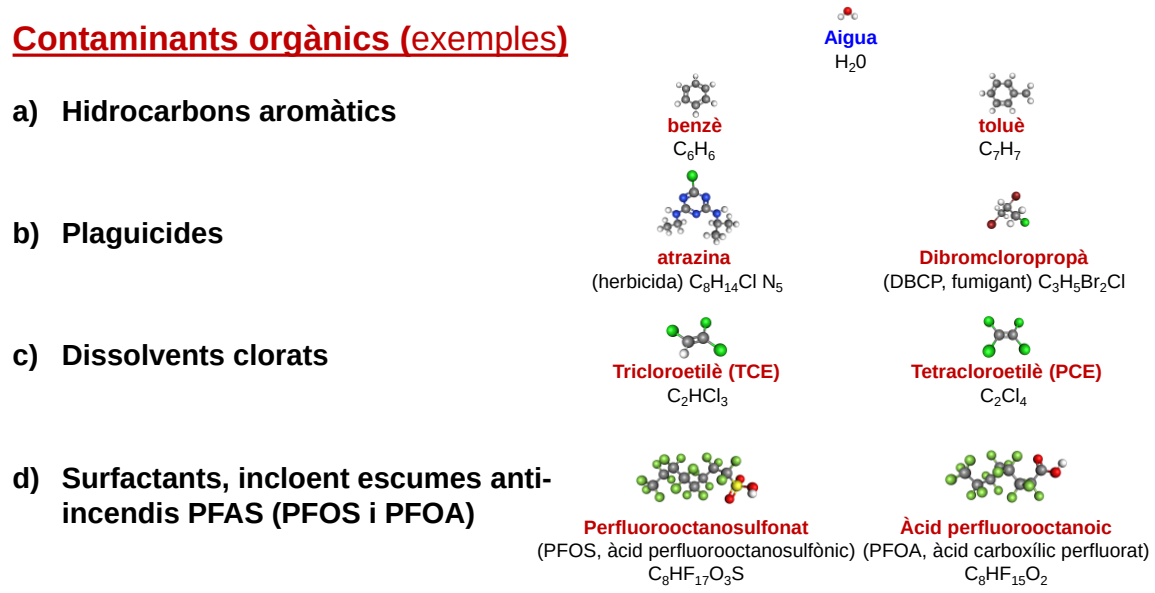


Figura 65 – Exemples d'alguns contaminants orgànics detectats a l'aigua subterrània (trobareu més exemples a altres llibres del *Groundwater Project*): a) hidrocarburs aromàtics propis de contaminació per vessament de benzina; b) plaguicides (un herbicida i un fumigant); c) dissolvents clorats; i, d) surfactants, incloent escumes contra incendis. S'ha dibuixat una molècula d'aigua a la part de dalt per poder comparar la seva mida i estructura amb la d'aquests contaminants orgànics (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

El desenvolupament de nanopartícules és un altre perill que pot malmenar la qualitat de l'aigua subterrània. Aquests compostos s'utilitzen en la fabricació de molts altres productes com, per exemple, la protecció anti-ratllades dels vidres de les ulleres, les pintures resistents a les clivelles, els recobriments per parets anti-graffiti, els protectors solars transparents, els teixits repel·lents a les taques i els revestiments ceràmics per les cèl·lules fotovoltaiques dels panells solars. Les nanopartícules estan presents a les nostres deixalles i probablement acabarem trobant-les ben aviat a l'aigua subterrània. Si hi arriben, com és d'esperar, desconeixem quines conseqüències ambientals se'n poden derivar.

En aquesta discussió sobre la contaminació de l'aigua subterrània tots els exemples han exposat conseqüències negatives; però també n'hi ha de positives com la idea de fer servir el subsol com un dipòsit de residus. És el cas dels anomenats "dipòsits geològics profunds (DGR, acrònim del nom anglès: *Deep Geological Repositories*) pensats per residus nuclears altament contaminants que han de romandre segellats durant milions d'anys abans d'esdevenir innocus. L'objectiu és enterrar aquest residus a llocs prou profunds on la radioactivitat romangui confinada a escala del temps geològic. És a dir, emmagatzemar el residu on l'aigua subterrània ja no formi part del cicle hidrològic. Molts països estan dissenyant i treballant amb DGRs ubicats en formacions geològiques de molt baixa permeabilitat situades a profunditats de 450-600 m per sota la superfície del terreny on el flux subterrani és inexistent, l'aigua subterrània ja és salina i presenta l'evidència d'haver-hi estat emmagatzemada durant milions d'anys (Figura 66). Hi ha altres tipus de residus tòxics no radioactius, però aquest ja presenten un ritme de degradació molt lent i, per

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

aquesta raó, els DGRs també són una bona opció per aïllar aquestes deixalles del medi ambient.

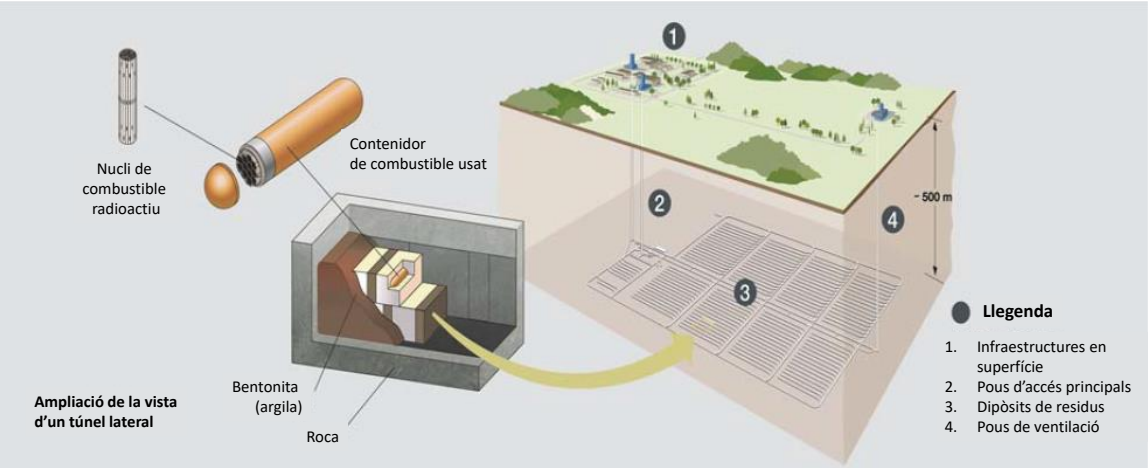


Figura 66 – En un dipòsit geològic profund, els residus nuclears sòlids s'enterren en galeries excavades en roques de molt baixa permeabilitat (Faybishenko et al., 2016).

7.4 L'aigua subterrània com a sistema de suport de la vida a la Terra

La presència d'aigua dolça en estat líquid fa possible la vida a la Terra. Quan hom cerca indicis de vida extraterrestre en altres planetes o satèl·lits del sistema solar, s'estan cercant de fet indicis de la presència d'aigua en estat líquid.

L'aigua subterrània per l'agricultura i el consum humà

L'any 2017, el Banc Mundial va calcular que un 70% de l'aigua dolça global es destinada a usos agrícoles, és a dir, a la producció d'aliments. L'any 2019, la *Global Agriculture Organization* coincidia amb aquest percentatge, si bé anotava que variava entre els diferents continents (Figura 67). L'aigua subterrània abasteix l'aigua domèstica de prop d'un 50% de la població mundial i un 43% de l'aigua destinada a l'agricultura (UNWWAP, 2015). Arreu del món, 2,5 mil milions de persones depenen només dels recursos subterranis per satisfer les seves necessitats d'aigua diàries (UNWWAP, 2015).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

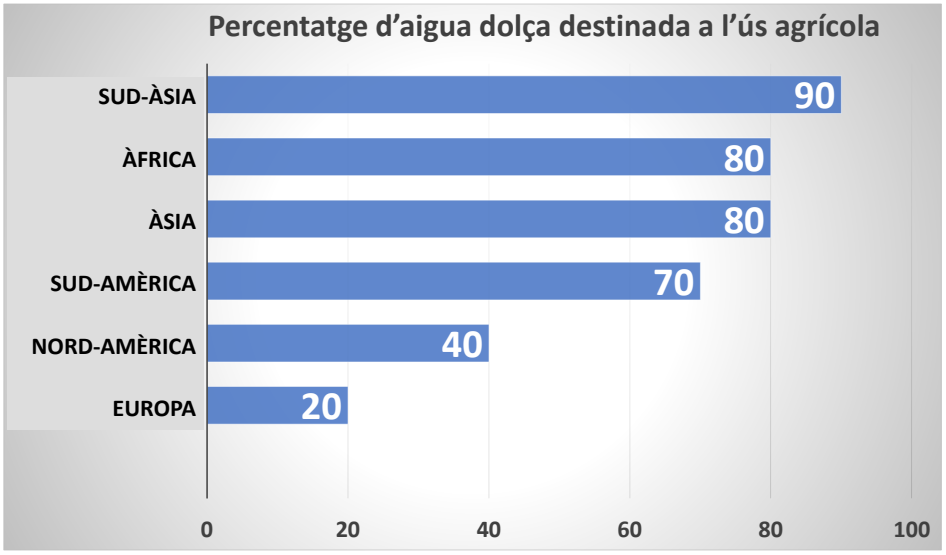


Figura 67 – Percentatge d'aigua dolça destinada a l'agricultura als diferents continents (Global Agriculture, 2020).

L'aigua subterrània és un recurs crític per a la producció d'aliments necessaris a nivell global i, durat segles, ha satisfet aquesta demanda amb escreix. Actualment, la seva disponibilitat està greument amenaçada. De fet, un 10% dels aliments es produeixen a regions on els sistemes hidrogeològics estan sobreexplotats i el creixement demogràfic augmenta ràpidament. L'agricultura de regadiu és dues vegades més productiva que la de secà, però no sempre ni a tot arreu es disposa de prou aigua per irrigar els camps de conreu.

La població mundial assolirà els 8 mil milions de persones a l'any 2020 i s'estima que serà d'11 mil milions al final del segle XXI. Això implica que perillarà la disponibilitat d'aliments a molts països. El progrés que va suposar la Revolució Verda s'està esvaint i l'erosió i la salinització del sòl causada per les pràctiques agrícoles intensives en algunes regions de la Terra estan causant una pèrdua de producció agrícola. Xina, amb un 19% de la població mundial (1,4 mil milions d'habitants), però amb només un 7% de les terres conreables del planeta, està completant el transvasament d'aigua més gran del món amb la intenció d'acabar amb dècades de sobreexplotació dels recursos d'aigua subterrània a la Gran Planúria del Nord de la Xina. El cabal del riu Iang-Tsé es transvasarà a més de mil kilòmetres cap al nord per recarregar els aqüífer sobreexplotats. Per contra, l'Índia, amb una població que l'any 2024 superarà a la xinesa, té unes necessitats d'aigua superiors però la seva capacitat per solucionar aquest problema és inferior. L'Índia utilitza un volum d'aigua subterrània dos vegades superior al de la Xina i del que un 89% es destina a l'agricultura causant una intensa sobreexplotació dels aqüífers amb un ús que, clarament, no és sostenible. Moltes regions a l'Índia tenen una precipitació elevada, però la taxa d'escorriment superficial és molt elevada i l'aigua retorna a l'oceà sense que s'hagi pogut aprofitar. A mig termini, el canvi climàtic suposarà un repte addicional per molts països que ja presenten greus deficiències i inseguretat en l'abastament d'aigua.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Com s'ha insistit en aquest llibre, els recursos d'aigua superficials en molts tipus de terreny depenen de les aportacions d'aigua subterrània (Figura 68). Aquest és la raó per la qual els rius tenen aigua fins i tot quan no plou durant dies o mesos. A més, la temperatura de l'aigua subterrània és més o menys constant i no està afectada per les fluctuacions atmosfèriques, de manera que el flux subterrani que recarrega els rius permet un hàbitat estable pel desenvolupament dels ecosistemes aquàtics. A la vora de rius i llacs i també en planes deprimides, les zones humides (incloent maresmes, zones pantanoses i torberes) són uns ecosistemes únics que es desenvolupen en el límit entre els aqüífers i els ambients terrestres. Així, les zones humides presenten una dinàmica molt particular en funció de la disponibilitat d'aigua i aire, permetent la presència d'organismes a zones amb escassetat d'oxigen.

Figura 68 – La majoria de les masses d'aigua superficial estan alimentades per la contínua aportació d'aigua subterrània (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Les zones humides es troben arreu del planeta i ocupen uns 12 milions de kilòmetres quadrats, en una superfície tant gran com Groenlàndia. La seva extensió es va reduint progressivament, havent disminuït un 35% de la seva superfície entre 1970 i 2015 a un ritme tres vegades més ràpid que el de la selva tropical. Les zones humides existeixen no per una pluviometria elevada, sinó per la continua aportació d'aigua subterrània molt a prop de la superfície a l'abast de les arrels de les plantes. És a dir, és la presència del nivell freàtic prop de la superfície que possibilitat l'existència d'aquests hàbitats. A les zones properes, on el nivell freàtic és més profund i les arrels poden respirar, però o encara és prou a prop de la superfície i a l'abast de les arrels d'arbres i arbusts, l'aigua subterrània és el principal recurs ambiental en períodes secs quan els recursos superficials s'assequen completament.

L'aigua subterrània proveeix diversos serveis ja sigui regulant i manteniment el cabal dels rius, alimentant els hàbitats de ribera o aiguamoll i, finalment, proveint aigua pels usos humans. Ras i curt, l'aigua subterrània és l'element que manté la vida a la Terra. L'any 2019, van der Gun va classificar els serveis ecosistèmics realitzats per l'aigua subterrània en funció dels Criteris Ecosistèmics del Mil·lenni mostrats a la Figura 69.

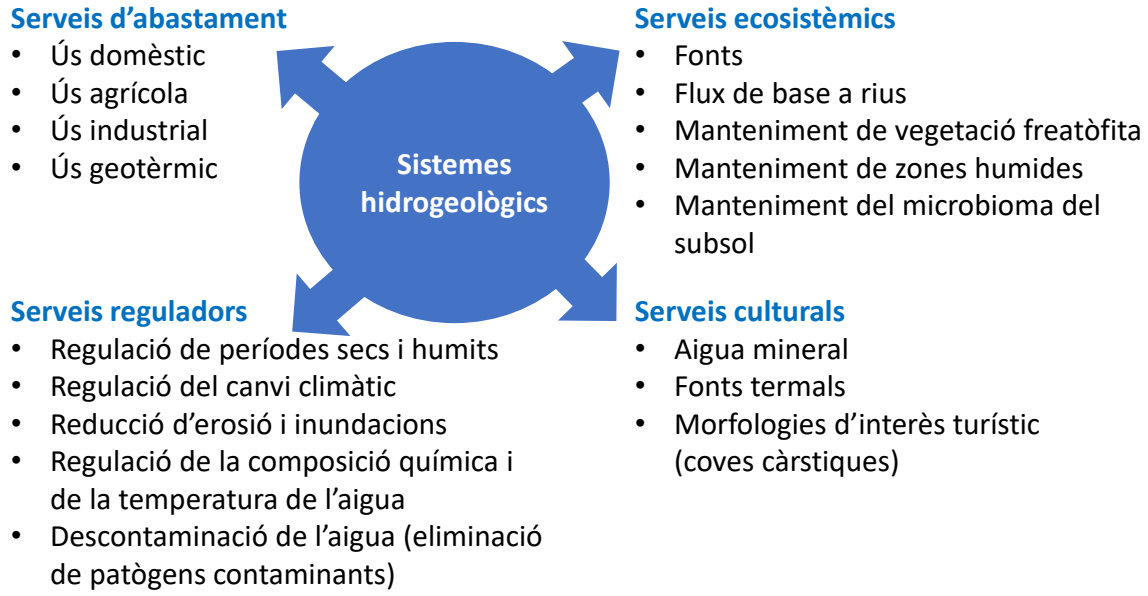


Figura 69 – Síntesi dels serveis ecosistèmics més importants atribuïbles a l'aigua subterrània, segons els criteris de classificació del *Millennium Ecosystem Assessment* (adaptat de van der Gun, 2019).

Resumint, l'aigua subterrània contribueix de forma essencial a l'abastament d'aigua pels usos humans, de manera directa en l'abastament domèstic i indirecta en la irrigació i producció d'aliments. De manera similar als ecosistemes, l'abastament als usos humans ha de ser sostenible. Les aportacions d'aigua des de les muntanyes a les valls i a les fonts a través de llarguíssimes trajectòries subterrànies han estat indispensables per l'existència de vida durant milions d'anys. El problema és que, actualment, la humanitat té un poder excepcional per extreure grans quantitats d'aigua subterrània i de transportar-la a gran

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

distància a llocs on el recurs és escàs, alterant d'aquesta manera el cicle hidrològic natural. La humanitat té doncs la capacitat d'extreure més recursos d'aigua subterrània que els que la natura pot restituir i, alhora, introdueix productes químics a un ritme que la natura tampoc pot assimilar. No hi ha dubte que, en molts aspectes, la nostra supervivència depèn de l'aigua subterrània i que, a mesura que la població mundial augmenta, hi haurà una major demanda i una major pressió sobre els recursos hidrològics, que són abundants però finits. La nostra capacitat per entendre i gestionar correctament els sistemes hidrogeològics considerant les restriccions inherents al cicle de l'aigua és cada cop més urgent i necessària.

8 L'aigua subterrània, en perill de desaparèixer

A la Terra hi ha milers d'aqüífers, però només uns quants poden incloure's a la categoria de "grans aqüífers". Gràcies a les dades de satèl·lit recollides al llarg d'una dècada (2003-2013) per un projecte d'observació del planeta anomenat *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) realitzat per la NASA, s'ha pogut caracteritzar la pèrdua de recursos en aquests grans aqüífers. El projecte GRACE, a diferència d'aquells projectes basats en imatges visuals, a mesurat a una escala espacial detallada i a intervals breus les variacions del camp gravitatori de la Terra amb els quals s'han pogut valorar canvis de la massa d'aigua emmagatzemada en aquests aqüífers. La Figura 70 mostra la localització d'aquests 37 "grans aqüífers" i quina ha estat el ritme d'esgotament (-) o reposició (+) dels seus recursos, en unitats de mil·límetres d'aigua per any, basat en les dades del projecte GRACE.

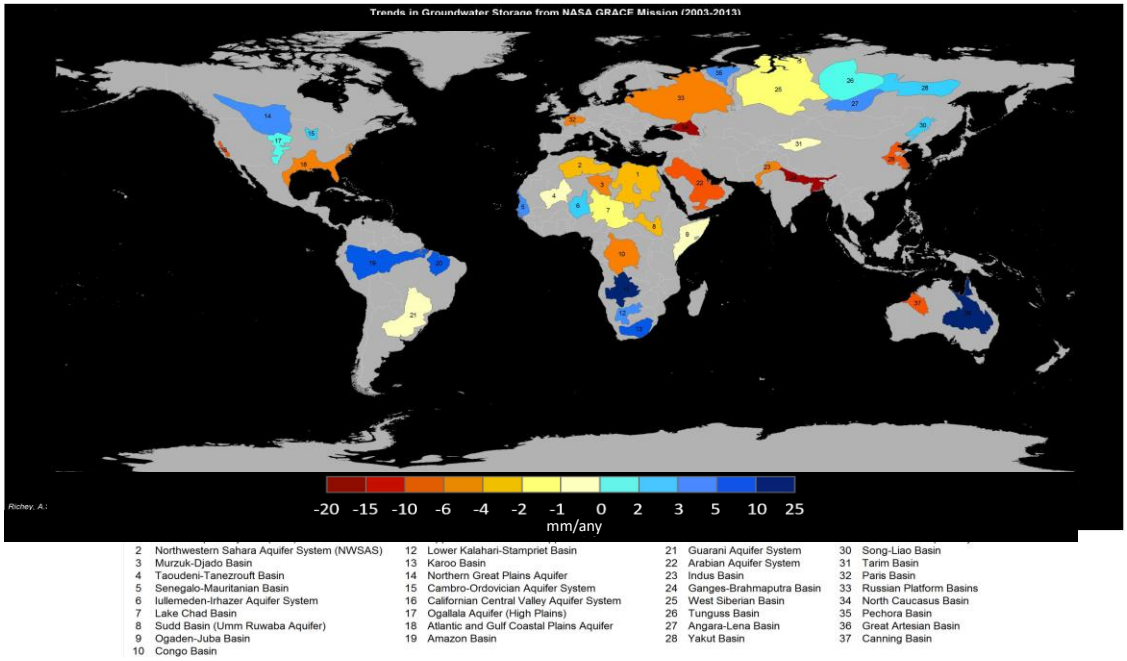


Figura 70 – Ritme d'esgotament (-) o reposició (+) dels recursos d'aigua subterrània, en mil·límetres per any, dels 37 "grans aqüífers" segons dades del projecte GRACE entre 2003-2013 (adaptat de NASA/JPL-Caltech, 2015).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Els resultats del projecte GRACE són coherents amb els valors d'extraccions de recursos hidrogeològics a llarg termini. Per exemple, l'evolució estimada de les extraccions d'aigua subterrània a l'Índia entre 1950 i 2010 (Figura 71), fou de 251 kilòmetres cúbics a l'any 2010, equivalent a una quarta part del conjunt d'extraccions globals. En el sistema hidrogeològic de la conca hidrogràfica Ganges-Brahmaputra, que inclou vastes extensions de l'Índia, Xina, Nepal, Bangladesh i Bhutan i on hi viuen el 10% de la població de la Terra, s'hi han detectat l'esgotament del recurs i uns alts nivells de contaminació. L'explotació de l'aigua subterrània a la meitat dels aqüífers del planeta ja ha sobrepassat el seu punt d'inflexió, de manera que al ritme de reposició natural del recurs caldran molts segles per a retornar-los a les condicions inicials suposant que el ritme d'extraccions s'adapti al ritme dels cicles hidrològics.

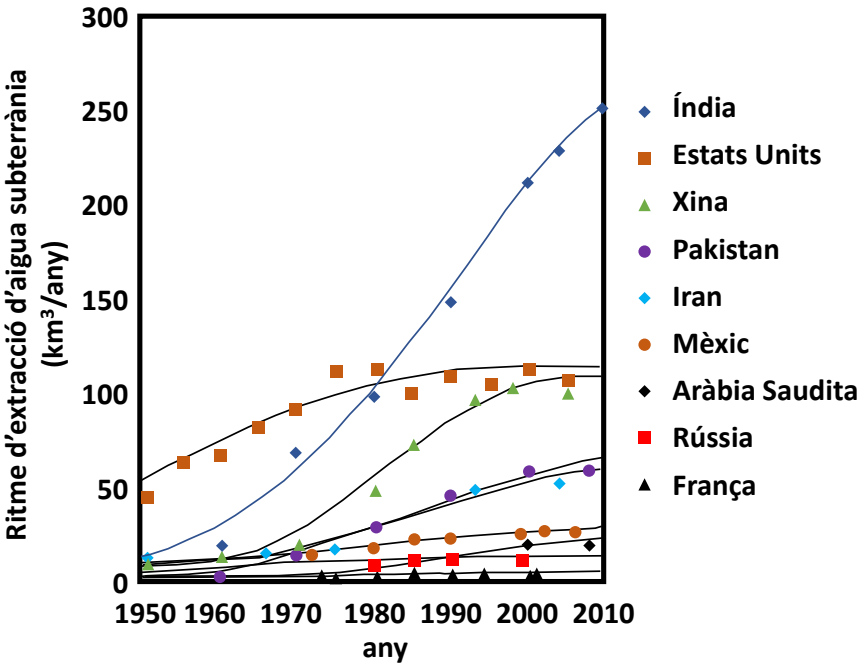


Figura 71 – Valors d'extracció calculats per a diferents països des de 1950 a 2010 (adaptat de Van Der Gunn 2019, amb dades de Margat i Van Der Gun, 2013).

El sistema hidrogeològic ubicat a la formació sedimentària de Núbia, l'aqüífer més gran amb recursos no renovables (aigua fòssil) del món, se situa a territoris d'Egipte i de Líbia, majoritàriament, i a parts del Sudan i Txad. Es considera que aquest immens aqüífer està sobreexplotat a causa dels elevats ritmes d'extracció d'aigua subterrània destinats a l'abastament urbà. De fet, Líbia depèn en un 95% de la seva demanda dels recursos d'aquests sistema hidrogeològic fòssil.

Tanmateix, aquest gran aqüífer és dels pocs que disposa d'un acord transfronterer per a la seva gestió. En total, hi ha sis aqüífers transfronterers al món que disposen d'acords específics, i uns altres dos d'acords informals. El sistema hidrogeològic del nord-oest del

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Sàhara, que ocupa un 60% del territori d'Algèria, un terç de l'extensió de Líbia i una part de Tunísia és un altre exemple d'aqüífer transfronterer en risc de sobreexplotació, essent similar al sistema nubi en el fet que explota recursos no renovables, els quals es destinen principalment a l'agricultura i a la indústria.

L'evolució dels recursos simulada en base al ritme d'extracció actual i les estimacions de creixement demogràfic i de desenvolupament econòmic indica un important dèficit de recursos per a la propera dècada, incloent en aquesta projecció uns 600 aqüífers transfronterers. L'esgotament dels aqüífers és el més evident dels dos grans problemes que afecten a l'aigua subterrània; el segon és la contaminació. La pèrdua de qualitat fa que el recurs que resta en l'aqüífer sobreexplotat esdevingui inadequat per a l'abastament. Així, el fracàs en la gestió dels recursos d'aigua subterrània és una clara amenaça a l'estabilitat global de la societat.

9 Reptes en la governança de l'aigua subterrània

Tots els llibres que s'estan editant dins del *The Groundwater Project* estan orientats a contribuir al coneixement dels diversos aspectes poc coneguts d'aquest "entrellat" que és l'aigua subterrània. Per a solucionar els problemes hidrogeològics al planeta de manera que l'aigua subterrània pugui destinar-se al seu rol essencial d'abastament humà i preservació ecològica, ens cal molt més que el coneixement científic de cada un dels aspectes del cicle hidrològic. Ens cal, a més, evitar caure en la tragèdia dels comuns recolzant-nos en un seguit de lleis, regulacions, mètodes, ..., coherents amb la natura i amb les complexitats del cicle de l'aigua i la seva relació amb la societat. Aquest conjunt de normes amb la finalitat esmentada, s'anomena governança.

Per assolir una gestió assenyada dels recursos hídrics, la millor forma de governança ha de reconèixer que tant l'aigua com l'aire són fluids en moviment a escala global indispensables per a la vida al planeta. Ambdós, aigua i aire, són recursos finits en quantitat i la seva quantitat no varia amb el temps. A la Terra, hi ha hagut la mateixa massa d'aigua durant milions d'anys. El que sí es pot canviar, i cal gestionar-ho amb coherència, són el ritme de transferència de l'aigua entre els diferents compartiments del cicle hidrològic i la qualitat química i biològica de l'aigua als llocs i en els moments que sigui necessària per a satisfer la demanda humana i ecològica; és a dir, per a satisfer les necessitats de la vida.

Atès que les dinàmiques de l'aigua i de l'aire són a escala global, l'impacte de les pressions generades per l'activitat humana no queden restringides al lloc on ocorren, sinó que afecten al conjunt del planeta. L'expressió "pensa globalment, actua localment" és espacialment important en la gestió dels recursos hídrics.

A nivell de gestió de l'aigua, entenem per "local" l'àmbit geogràfic de la conca hidrogràfica (és a dir, aquella part de la superfície de la Terra que comparteix una mateixa

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

xarxa de drenatge). Definir la conca hidrogràfica com a unitat de gestió simplifica l'observació i mesura del cicle hidrològic superficial sense haver de considerar la complexitat dels sistemes hidrogeològics.

Sortosament en molts casos i particularment a aquelles conques més grans de 1.000 km^2, els sistemes hidrogeològics no traspassen el límit vertical del perímetre de la conca hidrogràfica; per tant, en aquest casos, prendre-la com a unitat de gestió és ben lògic. No obstant, la majoria dels grans aqüífers tenen una extensió superior 100.000 km^2 i inclouen diverses conques hidrogràfiques. En aquests casos, la seva gestió ha d'incloure forçosament la complexitat dels sistemes hidrogeològics que comprenen.

Moltes conques hidrogràfiques i aqüífers s'estenen més enllà de les fronteres polítiques de regions i països. L'existència de diverses jurisdiccions referents a la gestió hidrològica afegeix dificultat a la governança de l'aigua subterrània i, actualment, és l'impediment més gran per assolir una de gestió eficient. Amb tot, hi ha exemples de governança plurinacional que han estat exitoses durant molts anys: 1) la Convenció per a la Protecció del Rin; i 2) l'Acord per a la Qualitat de l'Aigua en els Grans Llacs de Nord-Amèrica, si bé aquests tractats consideren més aspectes relacionats amb els recursos d'aigua superficial que amb els d'aigua subterrània.

La manca de mecanismes legals per a la gestió dels aqüífers transfronterers ha estat documentada per Pateiro (2017). Burchi (2018) fa un llistat dels acords de gestió existents a sis aqüífers que traspassen límits internacionals. L'acord més antic data de 1977 i fa referència a l'aqüífer de la regió de Ginebre entre França i Suïssa. Els altres acords són molt més recents, molts d'ells posteriors a 2007, i cal dir que, hores d'ara, molts ells no han estat completament implementats.

A molts països, la gestió de l'aigua subterrània és ineficient degut a la manca de reconeixement d'aspectes bàsics dels problemes inherents a aquest recurs. En concret,

- Els problemes que afecten a l'aigua subterrània solen presentar un desfasament entre les causes que l'han produït i el moment en que es manifesten els efectes amb prou magnitud per a requerir una intervenció. Massa sovint, la relació causa-efecte no és del tot evident per executar accions correctives eficients. La gestió de rius i llacs és diferent atès que les causes d'un problema −per exemple, una mortalitat anòmala de peixos− solen tenir un motiu clar i evident que pot identificar-se immediatament un cop observat l'impacte que ha generat; la qual cosa permet actuar ràpidament i eficient.
- Per a molts problemes associats a l'aigua subterrània i principalment els que afecten la seva qualitat, les accions correctives no aporten beneficis palpables fins al cap de molt de temps, sovint dècades, de manera que aquelles que s'iniciïn avui no obtindran resultats fins a la propera generació. Aquesta manca d'immediatesa condiciona la implementació d'accions correctives de part de de les administracions si no hi ha un fort compromís social per assolir una gestió ambiental sostenible, incloent-hi la part hidrològica.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

- Malgrat que els problemes associats a l'aigua subterrània formen part d'una crisis hidrològica global, la majoria dels casos són d'àmbit local atès que afecten un aqüífer concret i la comunitat que se'n beneficia. Precisament pel fet que cada problema és local i té la seva pròpia idiosincràsia, cal ser tractat d'acord amb la seva especificitat incloent-hi els factors hidrogeològics i socio-econòmics que han quedat afectats. Per tant, l'estructura de la gestió hidrològica ha de ser prou flexible per a donar resposta a tots els problemes sigui quins sigui la seva escala espacial, des d'actuacions que afectin a grans regions (plans de conca fluvial) a solucions per a pous concrets.

L'experiència mostra que els enfocs convencionals a la governança dels recursos hidrològics arreu del món solen ser deficients i, per tant, amb pocs resultats. Això es deu, en part, a la manca de coneixement general sobre els processos hidrogeològics de molts sectors socials i també de la mateixa administració; fet que es tradueix en una planificació inadequada. Així, *The Groundwater Project* està orientat no només a difondre els conceptes fonamentals de la hidrogeologia, sinó també a examinar quins són els factors que impedeixen assolir un nivell de governança eficient examinant, alhora, quins exemples reals han produït bons resultats i arribar a uns nivells satisfactoris de gestió.

La planificació destinada a assolir una governança efectiva dels recursos ha de començar explícitament per reconèixer que tant l'aigua com l'aire són fluids amb una circulació a nivell global i que són essencials per a la vida al planeta. El resultat d'acceptar aquest fet és que aigua i aire han de ser tractats com "bens comuns" sense que puguin ser reclamats com a propietat a cap nivell administratiu o polític amb una autoritat constitucional reconeguda. La gestió de l'aire i de l'atmosfera com a bens comuns és generalment acceptada; però no passa el mateix amb l'aigua subterrània.

En concret, l'aigua subterrània ha estat interpretada per alguna legislació o decisió judicial com un recurs que pot extreure's per bombament en una propietat sense considerar l'efecte que pugui tenir a la propietat veïna o en superfície. La gestió de l'aigua subterrània només pot tenir èxit si tota l'aigua, incloent la del subsol, es reconeix explícitament com un bé comú no subjecte a la propietat per les diverses legislacions[1]. Addicionalment, la

[1] Aquest paràgraf referit a la legislació fa esment, concretament, a la llei vigent als Estats Units i, possiblement, a molts altres països. La Unió Europea, però, reconeix el caràcter de "bé comú" de qualsevol recurs d'aigua en la Directiva Marc de l'Aigua (Directiva 2000/60/CE). En el seu preàmbul, punt 1, aquesta llei reconeix que «l'aigua no és un bé comercial com els altres, sinó un patrimoni que cal protegir, defensar i tractar com a tal». La Directiva Marc estableix un objectiu ambiciós de protegir l'aigua, prevenir la contaminació, promoure un ús sostenible, millorar l'estat dels ecosistemes i atenuar els efectes de les inundacions i dels episodis de sequera. La Directiva Marc imposa sistemes uniformes i comparables de mesura de la qualitat de l'aigua entre els Estats membres, amb indicadors hidrològics i ecològics, i la redacció de plans hidrològics amb mesures per a mantenir i millorar la qualitat de l'aigua a cada conca o subconca i amb estratègies per combatre i prevenir la contaminació. A més de la protecció, la Directiva Marc regla la política de fixació de preus i d'avaluació dels costos, entre els que inclou els costos ambientals i l'aplicació del principi «qui contamina, paga». (*Nota del Traductor*).

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

captació d'aigua subterrània s'ha de considerar com usufructuària (és a dir, un dret temporal d'ús que impedeixi malmetre o destruir el recurs), de manera que el règim de bombament sigui apropiat i coherent amb el balanç hídric local i la qualitat del recurs sigui l'adequada quan es retorni al medi natural.

La sobreexplotació dels aqüífers i la contaminació són problemes que traspassarem a les properes generacions i cal millorar el marc ètic de governança dels recursos hidrogeològics (Abrunhosa et al., 2018). Les normes ètiques més acceptades a tot arreu, basades en principis de justícia intergeneracional, exigeixen que no carreguem a les properes generacions amb els costos que derivin de l'actual gestió ineficient dels recursos hídrics. Això és tan fonamental que constitueix la base del concepte de desenvolupament sostenible, com ho defineixen els Objectius de Desenvolupament Sostenible de les Nacions Unides.

En el cor d'aquest objectiu ètic s'hi troba de fet, i no només de paraula, el Principi de Precaució. Aquest Principi va rebre atenció internacional l'any 1992, quan va incloure's per les Nacions Unides a la Declaració de Rio sobre el Medi Ambient i el Desenvolupament. Concretament, el Principi n. 15 de la Declaració de Rio diu: "*Per tal de protegir el medi ambient, els Estats hauran d'aplicar àmpliament el criteri de precaució conforme a les seves capacitats. Quan hi hagi perill de dany greu o irreversible, la manca de certesa científica absoluta no s'ha d'utilitzar com a raó per postergar l'adopció de mesures eficaces en funció dels costos per impedir la degradació de l'entorn*" (Bourguignon, 2015). Més recentment, aquest principi ha estat inclòs, tant explícitament com implícita, en la majoria de lleis internacionals referides als aspectes físics i ecològics del medi ambient i a la protecció i gestió ambientals i, per tant, és considerat pels Estats membres de les Nacions Unides a tots nivells: estatal, regional i municipal. També s'ha adoptat en nombroses normatives estatals i internacionals, si bé amb diferents nivells d'implicació (McCaffrey, 2007; Stirling, 2007; Eckstein, 2017; Jaeckel, 2017). El principi de Precaució és ben conegut en el context de la governança de l'aigua subterrània atès és coherent amb les incerteses associades a l'extracció de recursos hidrogeològics i a la seva recàrrega (UNESCO, 2012; Foster i Chilton, 2018; van der Gun, 2018). Malgrat tot, encara no s'ha estudiat prou bé com el Principi de Precaució ha d'adreçar els aspectes de contaminació de l'aigua subterrània associats a causes antropogèniques (Stewart et al., 2020).

Anant més enllà, el Principi de Precaució exigeix a la comunitat implicada en la gestió de l'aigua subterrània, des de científics a càrrecs polítics i administratiu i des de gestors locals a tribunals internacionals, un alt nivell de humilitat i franquesa en relació als reptes associats a la gestió ambiental i social del planeta, quan encara ens queda molt per conèixer, però quan ja sabem que hem d'estar profundament preocupats. Devem a les generacions que vindran bescanviar les preocupacions per accions decisives correctament fonamentades.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

10 Epíleg

L'aigua que "es perd" per infiltració al subsol simplement no es perd, o l'aigua que flueix per fonts no apareix a la superfície "perquè sí". Els processos hidrològics que determinen el flux de l'aigua subterrània, basats en les lleis físiques de la hidràulica de fluids i de conservació de la massa, connecten les "pèrdues per infiltració" amb "l'aparició d'aigua a les fonts". Així, sabem que l'aigua subterrània està en continu moviment, lent però incessable, en el subsol i que forma part de la component terrestre del cicle hidrològic global (Figura 72).

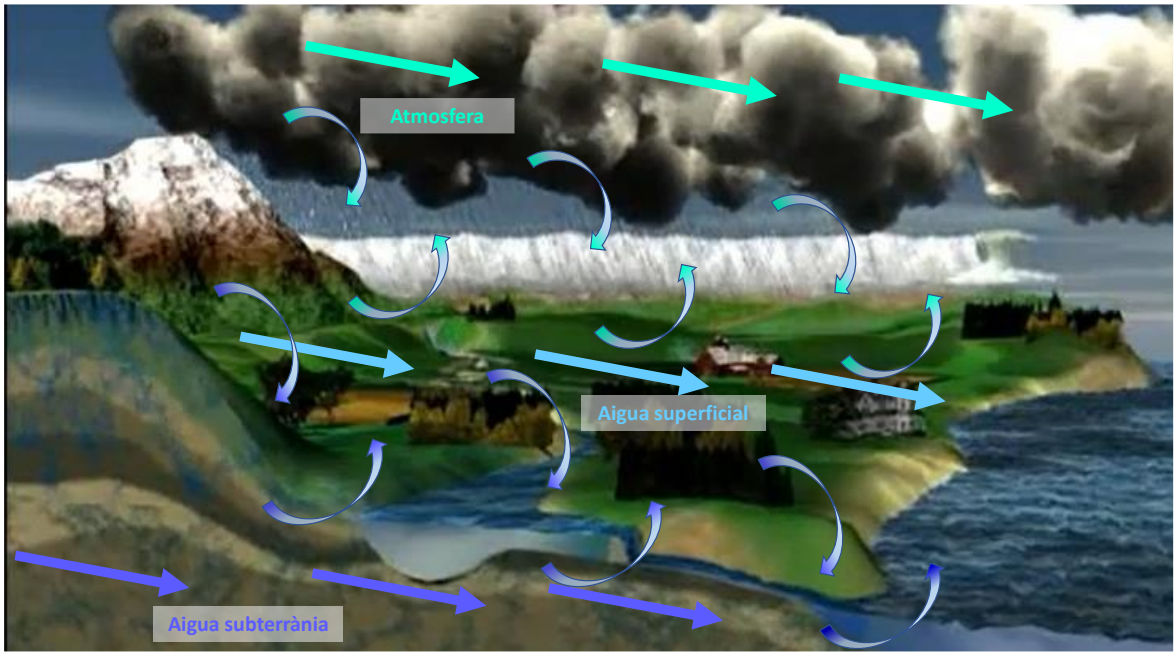


Figura 72 – Com s'ha il·lustrat a la Figura 37, existeixen tres nivells de transport d'aigua a escala continental: la circulació atmosfèrica, la xarxa de drenatge en superfície, i l'aigua subterrània al subsol, els quals estan estretament connectats i bescanvien aigua al llarg de les diverses trajectòries del cicle de l'aigua (adaptat de NASA, 2020).

La població de la Terra assolirà els 8 mil milions d'habitants a l'any 2020 i hom espera que serà de 11 mil milions a l'any 2100. Com a societat, ens caldrà aprendre a produir suficients aliments sense malmetre el sòl, l'aigua i el clima. Aquest és, potser, el repte més gran al que s'ha enfrontat la humanitat (Bourne, 2015). La gestió sostenible de l'aigua subterrània és la base de totes les solucions possibles. Un avançat coneixement científic i una gestió compromesa i apropiada són essencials, doncs l'aigua subterrània pot contribuir a resoldre molts dels problemes exposats en aquest text sempre que en fem un ús responsable basat en un bon sistema de governança on s'incloguin els aspectes ambientals, socials i econòmics associats a la gestió de qualsevol recurs natural.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

11 Qüestions i exercicis

11.1 Considereu la regió on viviu:

1. Quin tipus de clima hi ha?
2. Quant és la precipitació anual?
3. Quant és l'evapotranspiració anual?
4. A quin riu pertany la xarxa de drenatge més propera?
5. Quin és el cabal mitjà d'aquest riu?
6. Es tracta d'un riu influent, efluent, o d'un riu que varia estacionalment?
7. Com percebeu la magnitud del cabal d'aquest riu: alta, moderada, baixa; i per què?
8. D'on procedeix l'aigua potable que teniu a casa?
9. Quin tipus de formació geològica hi ha a la vostra regió?
10. On podeu observar manifestacions de l'existència d'aigua subterrània?
11. A quina profunditat se situa el nivell freàtic?
12. On se situen les zones de recàrrega dels aqüífers més propers?
13. On se situen les zones de descàrrega d'aquests aqüífers?
14. El bombament d'aigua subterrània, té lloc en aqüífers lliures, confinats o dels dos tipus?
15. Creieu que el règim d'explotació és sostenible? Què us ho indica?
16. S'ha detectat subsidència relacionada amb el bombament d'aigua subterrània?
17. Quins són els components hidroquímics majoritaris de l'aigua subterrània a la vostra regió?
18. Hi ha algun tipus de contaminació?

11.2 Considereu ara unes condicions generals a qualsevol altre lloc:

1. Quina és la distribució general dels sistemes del flux d'aigua subterrània?
2. Tots els períodes de precipitació, recarreguen l'aigua subterrània?
3. Com retorna l'aigua subterrània a la superfície?
4. Què succeeix en un sistema hidrogeològic quan l'aigua és captada per un pou de bombament?
5. Què succeeix si el règim d'extraccions supera al de recàrrega?
6. Expliqueu la diferència entre aqüífer confinat i aqüífer lliure?
7. Per què la temperatura de l'aigua del riu varia menys que la temperatura de l'aire?
8. Per què la regulació de temperatura és important pels rius?
9. Per què l'aigua de la zona vadosa és més àcida que la de la precipitació?
10. Quins mecanismes augmenten el total de sòlids dissolt (TSD) a l'aigua de recàrrega?
11. Quins són els principals components dissolts presents a l'aigua subterrània?

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

12. Per què l'aigua subterrània de regions amb formacions geològiques molt antigues té un valor de TSD baix?
13. En general, com varia la composició hidroquímica de l'aigua subterrània en sistemes hidrogeològics locals, intermedis i regionals?
14. Quins són els dos mecanismes primaris que donen lloc a un augment dels components dissolts al llarg de la trajectòria de flux?
15. Descriviu les diferències més rellevants entre l'acció de l'aigua subterrània com agent de transport en climes seques i humits
16. Com contribueix l'aigua subterrània al cicle global del carboni?
17. Quines són les causes més habituals de contaminació de l'aigua subterrània?
18. Quin és el tipus de contaminació de l'aigua subterrània més habitual al món?
19. Com podem utilitzar els sistemes hidrogeològics d'una manera positiva en relació a la contaminació?
20. Quina activitat humana consumeix la major part d'aigua al planeta? Quin percentatge es destina a aquest ús?
21. Què manté el cabal dels cursos d'aigua superficial?
22. Quins són els principals reptes de la governança de l'aigua subterrània?

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

12 Bibliografia

Abrunhosa M.J., S. Peppoloni, A. Chambel, 2018, Introducing geoethics in groundwater science, technology, and management *in* Abstracts Book, Session T1.1 Socioeconomic Aspects of Groundwater Resources Management, 45th IAH Congress, Daejeon, Korea.

Ahlenius, Hugo, 2007, United Nations Environment Programme, UNEP/GRID-Arendal, www.grida.no/resources/5279↗.

Bailey, Samuel , 2009, A cross section of a typical qanat↗ by Samuel Bailey↗ is licensed under CC BY 3.0↗.

Berry, George W., Paul J. Grimm, and Joy A. Ikelman, 1980, Thermal Springs List for the United States. National Oceanic and Atmospheric Administration Key to Geophysical Records Documentation Number 12. Retrieved from: http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/data/publications/Kgrd-12.pdf↗.

BGS (British Geologic Survey), 2020a, Arsenic contamination of groundwater, map, https://www2.bgs.ac.uk/groundwater/health/arsenic/home.html ↗.

BGS (British Geologic Survey), 2020b, Fluoride in groundwater, map, https://www2.bgs.ac.uk/groundwater/health/fluoride.html↗

Bierkens, Marc F.P. and Yoshihide Wada, 2019, Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: A review. Environmental Research Letters, volume 14, number 6, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab1a5f ↗.

Bourguignon D., 2015, The Precautionary Principle: definitions, applications and governance. European Parliament Research Services, Paris.

Bourne, J. K., 2015, The end of plenty: the race to feed a crowded world. W.W. Norton & Company, New York, New York, USA, 408 pages.

Bredehoeft, J. D., 1983, Regional flow in the Dakota aquifer. Geological Survey Water-Supply Paper 2237, https://pubs.usgs.gov/wsp/2237/report.pdf↗.

Briggs, Martin A., Zachary C. Johnson, Craig D. Snyder, Nathaniel P. Hitt, Barret L. Kurylyk, Laura Lautz, Dylan J. Irvine, Stephen T. Hurley, John W. Lane, 2018, Inferring watershed hydraulics and cold-water habitat persistence using multi-year air and stream temperature signals, Science of The Total Environment, volume 636, pages 1117-1127, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.344↗.

Burchi, Stefano, 2018, Legal frameworks for the governance of international trans boundary aquifers: Pre- and post-ISARM experience. Journal of Hydrology: Regional Studies, pages 15-20, doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.007↗.

Bunnell, Dave, 2006, Photo by Dave Bunnell showing the most common speleothems↗ by Dave Bunnell↗ is licensed under CC BY-SA 2.5↗.

Charlton, John, 2018, Field photo, Kansas Geological Survey, https://chasm.kgs.ku.edu/ords/pubcat.phd2.View_Photo?f_id=401↗.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Chen, Z., N. Goldscheider, A. Auler, M. Bakalowicz, S. Broda, D. Drew, J. Hartmann, G. Jiang, N. Moosdorf, A. Richts, Z. Stevanovic, G. Veni, A. Dumont, A. Aureli, P. Clos, M. Krombholz, 2017, World Karst Aquifer Map (WHYMAP WOKAM). BGR, IAH, KIT, UNESCO, doi: 10.25928/b2.21_sfkq-r406. BGR - WHYMAP - World Karst Aquifer Map↗.

Dai, Aiguo and K. E. Trenberth, 2002, Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations. Journal of Hydrometeorology, volume 3, pages 660-687.

Darton, N.H, 1900, United States Geological Survey website photo, www.sciencebase.gov/catalog/item/51dc3bd1e4b0f81004b7a912↗.

Elbein, P., 2019, Tree Planting Programs Can Do More Harm Than Good. National Geographic, April 26, 2019, https://pulitzercenter.org/reporting/tree-planting-programs-can-do-more-harm-good↗.

Eckstein, G., 2017, The international law of trans boundary groundwater resources. Routledge, New York.

van der Ent, R. J., H. H. G. Savenije, B. Schaefli, and S. C. Steele-Dunne, 2010, Origin and fate of atmospheric moisture over continents. Water Resources Research, volume 46, W09525, doi:10.1029/2010WR009127.

European Commission Joint Research Center, 2020, World Atlas of Desertification, https://wad.jrc.ec.europa.eu/patternsaridity↗.

Faybishenko, Boris, Jens Birkholzer, David Sassani, and Peter Swift, 2016, International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation Fifth Worldwide Review. United States Department of Energy, https://eesa.lbl.gov/tag/doi-10-21721353043/↗.

Foster, S. and J. Chilton, 2018, Groundwater management: policy principles and planning practices *in* Vilholth et al., Advances in Groundwater Governance. CRC Press, Kindle Edition, 549 pages.

Gale, J.E., 1982, Assessing the permeability characteristics of fractured rock. Geological Society of America, Special Paper 189, pages 163-181.

Galloway, Devin, David R. Jones, and S.E. Ingebritsen (editors), 1999, Land subsidence in the United States, United States Geological Survey Circular, 1182, https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/↗.

Global agriculture, 2020, Global agricultural water withdrawal, data from https://www.globalagriculture.org/report-topics/water/water.html↗.

Graber, Cynthia, 2011, Farming Like the Incas. Smithsonian Magazine, https://www.smithsonianmag.com/history/farming-like-the-incas-70263217/ ↗.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Gustafson, C., K. Key, and R.L. Evans, 2019, Scientific Reports, Aquifer systems extending far offshore on the U.S. Atlantic margin. volume 9, Article 8709, https://www.nature.com/articles/s41598-019-44611-7 ↗.

van der Gun, J., 2018, Data, information, knowledge and diagnostics on groundwater *in* Villholth and other editors, pages 193-213, Certainty and Risk. United Nations World Water Development Programme (UNWWAP), Paris, France.

van der Gun, Jac, 2019, The Global Groundwater Revolution *in* the Oxford Research Encyclopedia. Environmental Science, doi: 10.1093/acrefore/9780199389414.013.632↗.

Heath, Ralph C., 1983, Basic Ground-Water Hydrology. US Geological Survey Water Supply Paper 2220, 86 pages, https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2220 ↗.

Hinton, M., 2014, Groundwater-Surface Water Interactions in Canada *in* Rivera [editor] Canada's Groundwater Resources, pages 151-186. Fitzhenry and Whiteside Limited, Markham, Ontario, Canada.

Humboldt, Alexander von, 1825, published in French as "The Island of Cuba", then translated to English by John Sidney Thrasher in 1856 with altered politics that likely did not influence the explanation of submarine springs.

Iowa Geological Survey, 2020, http://publications.iowa.gov/34798/1/karst%20areas%20final.pdf↗.

Jaeckel, A.L., 2017, The international seabed authority and the precautionary principle: balancing deep seabed mineral mining and marine environmental protection. Boston, Brill Nijhoff, 2017, 362 pages.

Jiao, J., X. Zhang, and X. Wang, 2015, Satellite-based estimates of groundwater depletion in the Badain Jaran Desert, China. Scientific Report 5, 8960, www.nature.com/articles/srep08960↗ .

Jiao, J.J., 2017, AIH News & Information Newsletter, Winter 2018, https://iah.org/wp-content/uploads/2017/12/IAHwinter17final.pdf↗.

KGS (Kansas Geological Survey), 1998, Public Information Circular (PIC) 9, http://www.kgs.ku.edu/Publications/pic9/pic9_3.html↗.

Khokhar, Tariq, 2017, Chart: Globally 70% of Freshwater is Used for Agriculture. World Bank blog, https://blogs.worldbank.org/opendata/chart-globally-70-freshwater-used-agriculture ↗.

Kling, George, 2012, Field photograph, Professor, University of Michigan.

Kuniansky, Eve L., 2020, Computer image, Emeritus Groundwater Specialist, United States Geological Survey.

Leitz, Robert, 2009, Field photograph, Professor Emeritus, Metropolitan State University of Denver, Denver, Colorado.

Leopold, L. B., M.G. Wolman, and J.P. Miller, 1964, Fluvial Processes in Geomorphology. Freeman and Company, San Francisco, 531 pages.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

McCaffrey, S., 2007, The law of international watercourses. Oxford University Press, New York.

Margat, J., and J. van der Gun, 2013, Groundwater around the world: A geographic synopsis. CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands.

Marshak, Stephen, 2005, Earth: Portrait of a Planet, Second Edition. W. W. Norton, New Yok, New York, USA, 292 pages.

Mellin, Robert, 2013, United States Air Force Photo, afcent.af.mil/News/Photos/igphoto/2000911939/.

NADP, 2019, National (United States) Atmospheric Deposition Program, Total deposition maps, http://nadp.slh.wisc.edu/committees/tdep/tdepmaps/↗.

Naeinsun, 2012, A qanat tunnel near Isfahan, Iran↗ by Naeinsun is licensed under CC BY-SA 3.0↗.

NASA, 2020, United States National Aeronautics and Space Administration website, https://gpm.nasa.gov/education/videos/water-cycle-animation ↗.

NASA/JPL-Caltech, 2015, United States National Aeronautics and Space Administration / California Institute of Technology, www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4626↗.

Panoramastock.com↗, 2020, Field photo, purchased June 24, 2020, receipt #5MC52374F6836415K.

Pateiro, Laura Movilla, 2016, Ad hoc legal mechanisms governing transboundary aquifers: current status and future prospects. Water International, volume 41, issue 6, Legal mechanisms for water resources in practice: Select papers from the XV World Water Congress, www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02508060.2016.1201964↗.

Poeter, et al., 2020, Poeter, Eileen, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood, and Douglas Mackay, Original figures.

Poland, Joseph, 1977, United States Geological Survey website, https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/land-subsidence?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects↗.

Reitz, M., W.E. Sanford, G.B. Senay, and J. Cazenas, 2017, Annual estimates of recharge, quick-flow runoff, and evapotranspiration for the contiguous U.S. using empirical regression equations. Journal of the American Water Resources Association, volume 53, number 4, pages 961-983.

Rivera, Alfonso, 2014, Canada's Groundwater Resources, Geological Survey of Canada. Fitzhenry & Whiteside.

Shiklomanov, L.A., 1993, World Freshwater Resources *in* Gleick, P.H., editor, Water in Crisis: A Guide to World's Freshwater Resources. Oxford University Press, New York, pages 13-24.

Sneed, M., J.T. Brandt, and M. Solt, 2018, Land subsidence along the California Aqueduct in west-central San Joaquin Valley, California, 2003–10. United States Geological

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Survey Scientific Investigations Report 2018–5144, 67 pages, https://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20185144 ↗.

Stanton, J.S., D.W. Anning, C.J. Brown, R.B. Moore, V.L. McGuire, S.L. Qi, A.C. Harris, K.F. Dennehy, P.B. McMahon, J.R. Degnan, and J.K. Böhlke, 2017, Brackish groundwater in the United States. United States Geological Survey Professional Paper 1833, 185 pages, doi.org/10.3133/pp1833↗

Stewart, I., J. Cherry and M. Harding, 2020, Groundwater contamination science and the Precautionary Principle *in* M. Abrunhosa, A. Chambel, S. Peppoloni, H.I. Chaminé, editors, Advances in Geoethics and Groundwater Management: theory and practice for a sustainable development, Proceedings of the 1st Congress on Geoethics and Groundwater Management (GEOETH&GWM'20), Porto – Portugal 2020. Springer, ASTI series, www.springer.com/series/15883↗.

Stirling, A., 2007, Risk, precaution and science: towards a more constructive policy debate. EMBO Reports volume 8, number 4, pages 309-315.

Sunderland, Elsie M., Xindi C. Hu, Clifton Dassuncao, Andrea K. Tokranov, Charlotte C. Wagner, and Joseph G. Allen, 2018, A Review of the Pathways of Human Exposure to Poly- and Per- fluoroalkyl Substances (PFASs) and Present Understanding of Health Effects. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, volume 29, number 2, pages 131-147, www.nature.com/articles/s41370-018-0094-1↗.

The Old Pueblo, 2014, Riparian Forest along Sonoita Creek, southwest of Patagonia Lake, part of which can be seen in the center of the photo↗ by The Old Pueblo is licensed under CC BY-SA 4.0↗.

Thrasher, John Sidney, 1856, see Humboldt, Alexander von, 1825 in this reference list.

Tille, Andreas, 1996, Eruption of Strokkur close ↗ by Andreas Tille↗ is licensed under CC BY-SA 3.0↗.

ULARA (Upper Los Angeles River Area) Watermaster, 2018, 2016 - 2017 annual report, http://ularawatermaster.com/index.html?page_id=922↗.

UNESCO, 2012, WWAP (World Water Assessment Programme), The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk, Paris, http://www.unesco.org/new/en/naturalsciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr4-2012/↗.

UNWWAP, 2015, United Nations World Water Assessment Programme, Facts and Figures from the World Water Development Report 2015, www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_ENG_web.pdf↗.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

UNWWAP, 2016, United Nations World Water Assessment Programme, The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), Paris.

USEPA, 2012, United States Environmental Protection Agency, https://clu-in.org/download/citizens/a_citizens_guide_to_phytoremediation.pdf↗.

USGS, 2019a, United States Geological Survey, https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/thumbnails/image/wss-gw-how-groundwater-occurs-diagram.png↗.

USGS, 2019b, United States Geological Survey, www.usgs.gov/media/images/northern-atlantic-coastal-plain-aquifer-system↗.

USGS, 2019c, United States Geological Survey,www.usgs.gov/media/images/all-earths-water-a-single-sphere↗.

USGS, 2020, United States Geological Survey, www.usgs.gov/media/images/water-cycle-natural-water-cycle↗.

USNCAR, 2020, United States National Center for Atmospheric Research www.youtube.com/watch?v=n0mupl4FZsQ↗.

USNOAA (United States National Oceanic and Atmospheric Administration), 2019, National Centers for Environmental Information (NCEI), https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/hot_springs/↗, data originally published in Berry et al., 1980.

USNWS (United States National Weather Service), 2012, Field photo, https://www.weather.gov/ict/event_dryrivers2012↗.

Wada, Y., 2016, Modeling groundwater depletion at regional and global scales: Present state and future prospects. Surveys in Geophysics, volume 37, pages 419-451. https://doi.org/10.1007/s10712-015-9347-x↗.

Wikimapia, 2020, Pantanal Mato-Grossense National Park↗ by Wikimapia↗ is licensed under CC BY 4.0↗.

Wilhelm, Sheryl R., Sherry L. Schiff, William D. Robertson, 1996, Biogeochemical Evolution of Domestic Waste Water in Septic Systems: 2. Application of Conceptual Model in Sandy Aquifers. Groundwater, volume 34, number 5, https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-6584.1996.tb02080.x↗.

Wilkinson, Sophie L., 2018, Drafted image, Ph.D. student, McMaster University.

Winter, T. C., J.W. Harvey, O.L. Franke, and W.A. Alley, 1998, Ground water and surface water: A single resource. United States Geological Survey Circular 1139, 79 pages, https://pubs.er.usgs.gov/publication/cir1139↗.

Wood, W. W. and Dave Hyndman, 2018, Sea level rise cut in half?. Groundwater, volume 56, number 6, page 845, http://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gwat.12821↗

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Wood, W. W., W.E. Sandford, and A.R.S. Al Habschi, 2002, The source of solutes in the coastal sabkha of Abu Dhabi. Bulletin of the Geological Society of America Bulletin, volume 114, number 3, pages 259-268, https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<0259:SOSTTC>2.0.CO;2↗.

Wood, Warren, 1990, Field photograph, Professor Emeritus, Geosciences, Michigan State University

Zheng, Chunmiao, 2020, personal communication.

Zheng, C., Liu, J., Cao, G., Kendy, E., Wang, H. and Jia, Y., 2010, Can China Cope with Its Water Crisis? Perspectives from the North China Plain. Groundwater, volume 48, pages 350-354. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00695_3.x↗.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

13 Solucions als exercicis

13.1 Considereu la regió on viviu:

Tots els exercicis/qüestions de la Secció 11.1 són específics de la zona on viu el lector. Si aquestes qüestions formen part d'un curs, el professorat pot requerir respostes més específiques a l'estudiantat, segons ho consideri. Si es llegeix aquest text de forma individual, es convenient respondre a les qüestions incorporant la informació del text i, alhora, ampliar-la amb dades obtingudes d'altres recursos disponibles a la xarxa. Algunes propostes de possibles respostes són les següents:

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

1. Considereu la regió on viviu: Quin tipus de clima hi ha?

   Basant-vos en les vostres observacions de la quantitat de pluja on viviu i de la informació d'aquest llibre, podeu classificar el clima com humit, moderat, àrid o molt àrid?

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

2. Considereu la regió on viviu: Quant és la precipitació anual?

   Cerqueu el valor de precipitació a l'estació meteorològica més propera al vostre domicili.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

3. Considereu la regió on viviu: Quant és l'evapotranspiració anual?

   Cerqueu els percentatges de precipitació que s'evapotranspira en diferents tipus de clima i, fent servir aquest percentatge juntament amb el valor de la precipitació mitjana, feu una estimació de l'evapotranspiració total.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

4. Considereu la regió on viviu: A quin riu pertany la xarxa de drenatge més propera?

   Consulteu mapes de la vostra comarca, província o regió, segons l'escala de la conca hidrogràfica.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

5. Considereu la regió on viviu: Quin és el cabal mitjà d'aquest riu?

   Cerqueu el lloc web de la vostra Administració on es publiquen les dades hidrològiques de les estacions d'aforament de rius, canals, ... Si la conca que us és més propera no està monitoritzada, considereu el cabal (expressat en unitats de metres cúbics per segon) d'un altre riu proper amb una àrea de drenatge similar al de la vostra conca. Aquest valor pot extrapolar-se a la vostra regió.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

6. Considereu la regió on viviu: Es tracta d'un riu influent, efluent, o d'un riu que varia estacionalment?

   Per a determinar-ho, caldria disposar de dues estacions d'aforament d'un mateix riu i comparar si el cabal creix o decreix aigües avall. En el cas de el cabal creixés, indicaria que el riu és efluent; si decreix, és influent. Cal tenir en compte que en aquest tram de riu poden haver-hi aportacions (afluents, contribució d'aigua regenerada procedent de les estacions de tractament d'aigües residuals o d'indústries, ...) o extraccions (derivació per canals de reg, captació directe del riu per a regar conreus propers, ...) de cabal. Per tant, és difícil observar la dinàmica riu-aqüífer amb dades només de cabal superficial.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

7. Considereu la regió on viviu: Com percebeu la magnitud del cabal d'aquest riu: alta, moderada, baixa; i per què?

   En aquesta qüestió, es demana una opinió basada en la percepció; però us pot permetre comparar el cabal amb el d'altres rius propers o llunyans, per tenir una idea de la magnitud del seu cabal. Cercant a internet podeu trobar amb facilitat quin és el cabal d'altres rius que poden servir de referència. Sense cap problema podeu trobar, per exemple, que el cabal mitjà del riu Amazones és de 209.000 m^3/s.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

8. Considereu la regió on viviu: D'on procedeix l'aigua potable que teniu a casa?

   Pot procedir d'un pou individual o d'un sistema de captació municipal, ja sigui de captació d'aigua subterrània, d'aigua de riu o d'aigua d'un embassament.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

9. Considereu la regió on viviu: Quin tipus de formació geològica hi ha a la vostra regió? N'hi ha de diverses?

   Cerqueu una ressenya geològica o consulteu mapes geològics de la vostra regió.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

10. Considereu la regió on viviu: On podeu observar manifestacions de l'existència d'aigua subterrània?

    Per exemple, per l'existència de fonts o sorgències. La presència d'aiguamolls o zones humides diverses també indica l'existència d'aigua subterrània. Molt sovint, alguns llacs, com el de Banyoles, tenen una contribució d'aigua subterrània molt important.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

11. Considereu la regió on viviu: A quina profunditat se situa el nivell freàtic?

    Cerqueu mapes o informes hidrogeològics, sovint generats per l'Administració o per treballs de recerca, que indiquin la posició del nivell freàtic o, alternativament, a quina profunditat es troba l'aigua als pous de monitoreig. Si coneixeu veïns que disposin d'un pou, molt segurament us poden informar de la posició del nivell freàtic a la seva captació i si mostra variacions estacionals. No obstant, per un coneixement hidrogeològic regional precís, cal obtenir informació del nivell freàtic a diversos pous.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

12. Considereu la regió on viviu: On se situen les zones de recàrrega dels aqüífers més propers?

    Una situació previsible són les zones topogràficament elevades. Els informes hidrogeològics de la vostra regió molt probablement expliquin la ubicació de les zones de recàrrega.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

13. Considereu la regió on viviu: On se situen les zones de descàrrega d'aquests aqüífers?

    Una situació previsible són les zones topogràficament deprimides: valls, planes, ... Els informes hidrogeològics de la vostra regió molt probablement expliquin la ubicació de les zones de descàrrega.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

14. Considereu la regió on viviu: El bombament d'aigua subterrània, té lloc en aqüífers lliures, confinats o dels dos tipus?

    Els informes hidrogeològics de la vostra regió probablement ho expliquin o pots deduir-ho de la informació geològica extreta de mapes i talls geològics, informes de sondeigs, ...

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

15. Considereu la regió on viviu: Creieu que el règim d'explotació és sostenible? Què us ho indica?

    Podeu tractar de consultar llocs web o informes de l'Administració on es publiquin els consums d'aigua destinats al consum urbà, agrícola o industrial. També podeu consultar dades de nivells piezomètrics per identificar un descens continuat del nivell piezomètric.

Tornat a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

16. Considereu la regió on viviu: S'ha detectat subsidència relacionada amb el bombament d'aigua subterrània?

    Els informes hidrogeològics de la vostra regió, noticies de diaris o algun text científic de caire més o menys divulgatiu probablement ho comentin.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

17. Considereu la regió on viviu: Quins són els components hidroquímics majoritaris de l'aigua subterrània a la vostra regió?

    Els informes hidrogeològics de la vostra regió, noticies de diaris o algun text científic de caire més o menys divulgatiu probablement ho expliquin.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

18. Considereu la regió on viviu: Hi ha algun tipus de contaminació?

    Els informes hidrogeològics de la vostra regió, noticies de diaris o algun text científic de caire més o menys divulgatiu probablement se'n facin ressò.
    .

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

13.2 Considerant condicions generals a totes les regions:

1. Quina és la distribució general dels sistemes de flux de l'aigua subterrània?

   L'aigua subterrània flueix des de les zones amb alt nivell piezomètric a les zones amb baix nivell piezomètric. Sovint la distribució del nivell piezomètric està relacionada amb l'altitud, de manera que l'aigua subterrània flueix de zones elevades (on té lloc la recàrrega principal) a zones topogràficament deprimides: valls, planes, zones litorals, ..., on hi ha la descàrrega del sistema hidrogeològic.
   Algunes trajectòries de flux poden ser curtes de l'ordre de kilòmetres i altres molt més llargues (desenes o centenars de kilòmetres) i també molt profundes (desenes o centenars de metres).

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

2. Tots els períodes de precipitació recarreguen l'aigua subterrània?

   No, només els períodes de precipitació llargs i/o intensos produeixen un volum d'infiltració suficient per recarregar l'aqüífer, acumular reserves hídriques subterrànies i produir un ascens del nivell freàtic. Òbviament, aquest volum infiltrat ha de superar la demanda de la vegetació i de l'evapotranspiració, en general, per a produir una augment dels recursos emmagatzemats.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

3. Com retorna l'aigua subterrània a la superfície?

   Mitjançant el flux d'aigua subterrània a través dels porus entre les partícules de sediments o a través de les fractures i cavernes de les roques.

Tornar a les qüetsions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

4. Què succeeix en un sistema hidrogeològic quan l'aigua és captada per un pou de bombament?

   Un descens del nivell piezomètric.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

5. Què succeeix si el règim d'extraccions supera al de recàrrega?

   Els nivell piezomètric no s'equilibrarà en el balanç entre recàrrega i extraccions i l'aqüífer esgotarà les seves reserves. Pot produir impactes com l'assecament de trams de riu o zones humides i subsidència de la superfície del terreny.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

6. Expliqueu la diferència entre aqüífer confinat i aqüífer lliure.

   En un aqüífer confinat, el nivell piezomètric se situa per damunt del sostre de la capa o formació geològica que actua com aqüífer, en tan que en un aqüífer lliure el nivell piezomètric està situat dins de l'aqüífer i equival al nivell freàtic. Quan hi ha bombament, es produeix un descens del nivell piezomètric que, en els aqüífers lliures representa un buidat efectiu dels porus, fractures i cavernes; mentre que en un aqüífer confinat els porus romandran plens d'aigua, però es produirà una pèrdua de pressió.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

7. Per què la temperatura de l'aigua del riu varia menys que la temperatura de l'aire?

   L'aigua emmagatzema millor el calor que no pas l'aire, per tant la seva temperatura no varia ràpidament i és, en general, moderada. L'aigua subterrània està aïllada de l'atmosfera i, per tant, de les variacions diürnes i estacionals de la temperatura de l'aire. Per això sol mantenir una temperatura constant. Això influencia la temperatura dels rius que, al rebre aportacions d'aigua subterrània, és més constant i moderada que la de l'atmosfera (als rius, a l'hivern és més calenta i a l'estiu, més freda).

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

8. Per què la regulació de temperatura és important pels rius?

   Les espècies dels ecosistemes aquàtics, especialment els peixos, necessiten que la temperatura del medi variï poc per desenvolupar les seves funcions vitals, especialment la reproducció.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

9. Per què l'aigua de la zona vadosa és més àcida que la de la precipitació?

   El diòxid de carboni, produït a la zona vadosa per la respiració de les arrels de les plantes i la degradació microbiana de la matèria orgànica, es combina amb l'aigua per produir àcid carbònic, ($CO_2 + H_2O = H_2CO_3$).

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

10. Quins mecanismes augmenten el Total de Sòlids Dissolt (TSD) a l'aigua de recàrrega?

    L'àcid carbònic dissolt els minerals i l'evapotranspiració extreu aigua del sòl causant l'acumulació de sals a la zona vadosa i, per tant, produint un augment del TSD a l'aigua de recàrrega.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

11. Quins són els principals components dissolts presents a l'aigua subterrània?

    Ions de sodi, calci, magnesi, potassi, ferro, clorur, bicarbonat i sulfat. N'hi ha d'altres, però amb concentracions menors.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

12. Per què l'aigua subterrània de regions amb formacions geològiques molt antigues té un valor de TSD baix?

    Al llarg de milions d'anys, l'aigua subterrània ha anat dissolent els minerals i empobrint-los de substàncies solubles, de manera que els valors de TSD són baixos en aquests aqüífers.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

13. En general, com varia la composició hidroquímica de l'aigua subterrània en sistemes hidrogeològics locals, intermedis i regionals?

    Els sistemes de flux local tendeixen a tenir un TSD més baix i, en general, el bicarbonat és l'ió que domina la composició hidroquímica de l'aigua subterrània. Els sistemes intermedis tenen més sòlids dissolts i, habitualment, mostren un enriquiment en sulfat. Finalment, els sistemes regionals o profunds tendeixen a ser salabrosos i tenir ions sulfat i clorur en abundància.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

14. Quins són els dos mecanismes primaris que donen lloc a un augment dels components dissolts al llarg de la trajectòria de flux?

    La dissolució de minerals i la difusió de sals congènites o relictes des dels nivells de baixa permeabilitat.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

15. Descriviu les diferències més rellevants entre l'acció de l'aigua subterrània com agent de transport en climes àrids i humits.

    En climes humits, l'aigua subterrània arriba als oceans a través de la seva contribució a les xarxes de drenatge superficial. En climes àrids, l'aigua subterrània sol descarregar a zones endorreiques o tancades donant lloc a acumulacions de nivells de sals a conseqüència de l'extrema evaporació.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

16. Com contribueix l'aigua subterrània al cicle global del carboni?

Al llarg del temps geològic, el carboni ha entrat en els sistemes hidrogeològics a través de les zones de recàrrega i en surt per les zones de descàrrega, assolint un massa estable de carboni en el subsol. Actualment, hi ha un esgotament dels aqüífers a escala global i, per tant, una pèrdua de carboni als aqüífers, doncs quan s'extreu aigua subterrània el carboni retorna a l'atmosfera per diferents processos químics.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

17. Quines són les causes més habituals de contaminació de l'aigua subterrània?

    L'aplicació de fertilitzants, herbicides i plaguicides en activitats agrícoles, els lixiviats d'abocadors, la mineria, les pèrdues dels dipòsits d'emmagatzement de líquids (combustibles, dissolvents, ...) i qualsevol altre abocament de residus humans o animals.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

18. Quin és el tipus de contaminació de l'aigua subterrània més habitual al món?

    Nitrats.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

19. Com podem utilitzar els sistemes hidrogeològics d'una manera positiva en relació a la contaminació?

    Els dipòsits geològics profunds poden aïllar residus del medi ambient durant períodes de temps molt llargs, la qual cosa permet la degradació dels residus amb una llarguíssima vida mitjana.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

20. Quina activitat humana consumeix la major part d'aigua al planeta? Quin percentatge es destina a aquest ús?

    Producció d'aliments i irrigació agrícola; aproximadament un 70%.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

21. Què manté el cabal dels cursos d'aigua superficial?

La descàrrega d'aigua subterrània a través del flux subterrani.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

22. Quins són els principals reptes de la governança de l'aigua subterrània?

1) Que els efectes d'una acció nociva per a la qualitat de l'aigua no s'observen fins al cap de molt de temps,
2) Que un cop el problema s'ha identificat, la remediació necessita una acció continuada durant molts de temps (mesos, anys),
3) Que, malgrat que els problemes que afecten l'aigua subterrània són semblants arreu del món, cada problema té un fort component local que requereix una solució específica segons les característiques hidrogeològiques de l'aqüífer afectat.

Tornar a les qüestions

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

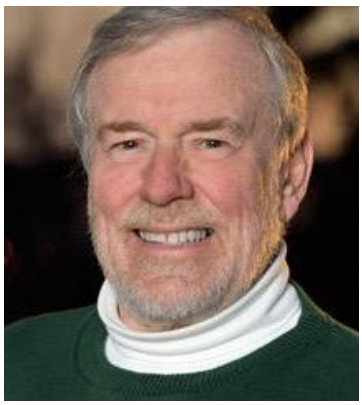
14 Els autors

Dra. Eileen Poeter és Professora Emèrita d'Enginyeria a *Colorado School of Mines*, on ha impartit diversos cursos de hidrogeologia i tutoritzat a les de 40 estudiants de doctorat en recerca sobre sistemes hidrogeològics i modelació. També ha estat Directora del *Integrated Groundwater Modeling Center*; i Presidenta retirada de *Poeter Engineering*. Amb més de 40 anys d'experiència en la modelació de sistemes hidrogeològics, ha desenvolupat projectes de consultoria per a advocats, indústries, empreses d'enginyeria, agències governamentals, centres de recerca i entitats ciutadanes en relació a projectes hidrogeològics de gestió i recàrrega d'aqüífers, accions de descontaminació, afecció hidrològica de centrals nuclears, i de molts altres aspectes associats a la hidrogeologia. La Dra. Poeter es autora d'un programari de modelació d'aigua subterrània que inclou l'avaluació de la sensibilitat del model, la valoració de les dades emprades, la calibració dels paràmetres entrats al model i de l'avaluació de la incertesa predictiva. Ha estat *NGWA Darcy Lecturer* al 2006 i ha estat guardonada amb el Premi M. King Hubbert (2017), essent membre vitalici i honorari de la NGWA (*National Ground Water Association*).

Dra. Ying Fan és Professora al *Department of Earth and Planetary Sciences* a la *Rutgers University*, New Brunswick (New Jersey). La seva recerca s'adreça a la dinàmica dels processos hidrològics i la seva influència en els cicles hidrològic, energètic i biogeoquímics; més concretament, en l'efecte sobre l'ecologia de la vegetació. Ha col·laborat amb la Comissió per les necessitats futures de recursos hídrics de la *National Academy of Science*. Ha estat membre del Comitè Editorial de la revista científica *Hydrology and Earth System Sciences*, de la Comissió del *Consortium of Universities for Advancement of Hydrologic Sciences, Inc.*, i actualment treballa amb el *NASA Earth Science Advisory Committee*, al Comitè Editorial de la revista *Hydrological Processes* i és comissionada per les Nacions Unides al *Amazon Science Panel* al Brasil.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Dr. John Cherry estudià als Estats Units i realitzà una estada post-doctoral a França. Al 1971, inicià la seva carrera a la *University of Waterloo* (Canadà) investigant en projectes de migració de contaminants en aigua subterrània i la seva remediació. És coautor del llibre "*Groundwater*" amb R.A. Freeze (1979) i coeditor / coautor de diversos capítols del llibre "*Dense Chlorinated Solvents….in Groundwater*" (1996). Ha estat Director-Fundador del *University Consortium for Field-Focused Groundwater Contamination Research*. Dins del *G360 Centre for Groundwater Research, University of Guelph*, ha participat en recerca sobre tecnologies de control i monitorització d'aigua subterrània i la creació de pous eficients en zones rurals d'àrees remotes. Ha estat C*hair of the Canadian Expert Panel on Environmental Impacts of Shale Gas development* (2012-2014) i Membre de la *U.S. Academy of Engineering*. J. Cherry ha estat guardonat amb el *Lee Kwan Yew Water Prize* al 2016, i el *Stockholm Water Prize* al 2020.



Dr. Warren Wood és actualment Professor Visitant de Hidrogeologia al *Department of Earth and Environmental Sciences*, *Michigan State University* i té la posició de *Christiansen Fellow* del *St. Catherin's College*, *Oxford University* al Regne Unit i de *Research Hydrologist* al Servei Geològic dels Estats Units (USGS). Warren ha publicat més de 120 articles de recerca referents a la hidrogeologia de zones àrides i ha estat docent a més de 100 universitats a Nord-Amèrica, Xina, Botswana, Japó, Oman, EAU, Aràbia Saudita, Israel, Jordània, Qatar, el Regne Unit, Alemany, França i Mèxic. Warren ha estat premiat amb els següents reconeixements: *Meritorious Service Award pel U. S. Department of Interior*; la medalla M. King Hubbert de la *National Ground Water Association*; *Distinguished Service Award* de la *Geological Society of America* i Membre Honorífic de la *Geological Society of America*. Warren ha estat *Editor-in-Chief* de la revista científica *Ground Water* i ha col·laborat amb diferents institucions (*U.S. Congress*, com assessor del *Secretary of Interior*, *Chairman de la Nuclear Regulatory Commission*) com expert en els aspectes hidrogeològics associats als dipòsits de residus nuclears.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Dr. Douglas Mackay és Professor Emèrit al *Department of Land, Air & Water Resources, University of California, Davis*. La seva recerca inclou treball experimental de camp i la modelització del transport de contaminants, la seva transformació i remediació. S'ha dedicat als estudis de laboratori que permeten conèixer els processos hidrogeoquímics a escala de camp, desenvolupant tecnologies de remediació de la qualitat de l'aigua subterrània i mètodes per estimar la magnitud de la contaminació i el risc que representa. La seva recerca s'adreça a una gran varietat de contaminants orgànics, incloent petroli cru, productes del petroli refinat i de la gasolina, pesticides, solvents halogenats i de substàncies altament hidrofòbiques associades a dissolvents i altres espècies químiques. La seva docència inclou cursos de transport de contaminants orgànics i de mètodes naturals i tecnològics de remediació de la qualitat de l'aigua subterrània. Ha estat membre de dues comissions del *US National Research Council* i ha col·laborat en recerca aplicada de proves pilot amb empreses i consultories, essent co-responsable de dues patents en tècniques de remediació de l'aigua subterrània.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

15 El traductor

Dr. Josep Mas-Pla és Professor al Departament de Ciències Ambientals de la Universitat de Girona i Investigador Sènior a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua. Realitzà un doctorat en Geologia a la Universitat Autònoma de Barcelona (1988) i un PhD en Hidrologia i Recursos Hídrics al *Department of Hydrology and Water Resources, The University of Arizona* (EUA; 1993). La seva tasca de recerca tracta sobre la hidrogeologia de depressions intramuntanyoses i sobre la contaminació per nitrat en base a dades hidrogeològiques, hidroquímiques, isotòpiques i la modelació numèrica. Actualment, enfoca la recerca a la presència de contaminants emergents (concretament, antibiòtics) a l'aigua subterrània. També ha participat en els tres informes del canvi climàtic a Catalunya realitzats pel Consell Assessor pel Desenvolupament Sostenible, concretament en els capítols relacionats amb recursos hídrics, i és membre del grup d'experts en Canvi Climàtic de Catalunya. Ha estat investigador visitant a la *University of California, Davis* (EUA; 2002) i a *Lincoln University* (Nova Zelanda; 2015) i ha impartit docència i estades breus de recerca a altres universitats de l'Estat espanyol, Itàlia, Suïssa i Tunísia. Des de 2019, col·labora com Editor Associat de la revista *Hydrogeology Journal.* És membre de la Institució Catalana d'Història Natural.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Consideri subscriure's a la llista de distribució del *Groundwater Project* per a informar-se de les noves publicacions, així com de les possibilitats de participar en el projecte. Afegint-se a la llista de correu electrònic, contribueix al creixement de la comunitat global dedicada a les aigües subterrànies. Signeu↗.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Modificacions respecte a l'original en anglès

pàgina i, ii, x, S'ha eliminat les lletres majúscules de mida petita.

pàgina iii, S'han eliminat les paraules clau.

pàgina iii, S'ha afegit l'enllaç a per unir-se al *Groundwater Project* per correu electrònic.

pàgina iii, S'ha afegit informació a la referència bibliogràfica.

pàgina iii, S'ha modificat el nom de Steven Moran per Stephen Moran.

pàgines v-vii, S'ha actualitzat la taula de contingut.

pàgina 8, El rang de valor d'IA per zones semiàrides s'ha canviat de 0,2 i 0,5.

pàgina 8, Figura 7, els noms Àrid i Semiàrid estaven intercanviats.

pàgina 16, peu de la Figura 14. S'han revisat les referències a The Old Pueblo i a Wikimapia per fer-les més específiques.

pàgina 22, peu de la Figura 18. S'han revisat les cites a Bailey i a Naeinsun per fer-les més específiques.

pàgina 22, darrera frase. "temperatura de l'aire" s'ha canviat a "temperatura de la superfície"

pàgina 23, peu de la Figura 19. "aire" s'ha canviat a to "superfície"

pàgina 27, peu de la Figura 25. S'ha revisat la referència a Tille per fer-la més específica.

pàgina 45, peu de la Figura 43. S'ha revisat la referència a Bunnell per fer-la més específica.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

Pàgina 68, el paràgraf que comença i acaba amb "Podem determinar la ubicació ... tractament d'aigua per fer-la potable" ha estat reemplaçat pel paràgraf que comença i acaba amb "Un indicador rellevant per determinar ... ingerint mescles dels diferents contaminants abocats al medi."

pàgina 85, Bibliografia: s'han realitzat canvis de format menors per coherència amb l'actual estil dels *Groundwater Project Books*.

pàgina 85, S'ha corregit l'enllaç al lloc web per les referències BGS (British Geological Survey), 2020a, i BGS (British Geological Survey), 2020b.

pàgina 85, La referència a Bailey s'ha escrit de forma més clara i completa.

pàgina 86, La referència a Bunnell s'ha escrit de forma més clara i completa.

pàgina 87, La referència a Khokhar s'ha escrit de forma més clara i completa.

pàgina 88, La referència a Naeinsun s'ha escrit de forma més clara i completa.

pàgina 89, La referència a The Old Pueblo s'ha escrit de forma més clara i completa.

pàgina 89, La referència a Tille s'ha escrit de forma més clara i completa.

pàgina 90, La referència a Wikimapia s'ha escrit de forma més clara i completa.

pàgina 136, S'ha afegit l'enllaç a per unir-se al *Groundwater Project* per correu electrònic.

Notes del traductor a la versió catalana:

Aquest traducció al català del llibre "Groundwater in Our Water Cycle" correspon a l'original en llengua anglesa en la seva versió de 02 de novembre de 2021.

Les modificacions del text original inclouen:

- La definició del termes inclosos a la Figura 31

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.

- La nota aclaridora al peu de la pàgina 87, atès que la versió en anglès fa esment a la legislació als EUA que és diferent a la de la Unió Europea, fet que s'ha cregut convenient aclarir als lectors en llengua catalana.
- Finalment, s'ha afegit una breu ressenya biogràfica del traductor a la pàgina 143.

The GROUNDWATER PROJECT ©Els Autors Descàrrega gratuïta a gw-project.org.
Qualsevol persona pot usar i compartir l'enllaç gw-project.org. La distribució directa del llibre està estrictament prohibida.