

Le Acque Sotterranee nel nostro Ciclo dell'Acqua Conoscere la più Importante Fonte di Acqua Dolce della Terra

Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood
and Douglas Mackay

Traduzione: Costanza Cambi, Daniela Ducci, Paolo Fabbri, Alessandro Gargini, Maria Filippini, Marco Masetti, Marco Petitta, Vincenzo Piscopo, Maurizio Polemio, Elisabetta Preziosi, Sergio Rusi, Daniela Valigi



THE
GROUNDWATER
PROJECT

*Le Acque Sotterranee
nel nostro Ciclo
dell'Acqua*

*Conoscere la più Importante
Fonte di Acqua Dolce della Terra*

The Groundwater Project

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*

Traduzione italiana a cura di:

*Costanza Cambi, Daniela Ducci, Paolo Fabbri, Alessandro Gargini, Maria Filippini,
Marco Masetti, Marco Petitta, Vincenzo Piscopo, Maurizio Polemio, Elisabetta Preziosi,
Sergio Rusi, Daniela Valigi*

***LE ACQUE SOTTERRANEE
NEL NOSTRO CICLO DELL'ACQUA
CONOSCERE LA PIÙ IMPORTANTE
FONTE DI ACQUA DOLCE DELLA TERRA***

*The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada*

Tutti i diritti riservati. Questa pubblicazione è coperta da copyright. Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta in alcuna forma o mezzo senza il permesso scritto degli autori (per richiedere il permesso contattare: permissions@gw-project.org). LA distribuzione e la riproduzione commerciale sono severamente proibite.

I lavori del GW-Project possono essere scaricati gratuitamente dal sito gw-project.org. Chiunque può utilizzare e diffondere i link al sito gw-project.org links per scaricare i lavori del GW-Project. Non è consentito rendere i documenti del GW-Project disponibili su altri siti web, né tantomeno spedire copie direttamente a terzi.

Copyright © 2020 Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood, and Douglas Mackay (Gli autori)

Publicato dal Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020.

Tradotto in lingua italiana dal Comitato Italiano IAH, 2022.

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, and Douglas Mackay – Guelph, Ontario, Canada, 2020.

136 p.

Traduzione di Costanza Cambi, Daniela Ducci, Paolo Fabbri, Alessandro Gargini, Maria Filippini, Marco Masetti, Marco Petitta, Vincenzo Piscopo, Maurizio Polemio, Elisabetta Preziosi, Sergio Rusi, Daniela Valigi, 2023.

146 pagine

ISBN: 978-1-77470-050-1

Siete invitati ad iscrivervi alla mailing-list di the Groundwater Project per essere informati su nuove pubblicazioni, eventi e modalità per collaborare al progetto. Iscrivervi alla mailing-list ci aiuta a costruire una comunità internazionale di studiosi degli acquiferi [Registratevi](#).

Citation: Poeter, E., Y. Fan, J. Cherry, W. Wood, and D. Mackay, 2020, [Groundwater in our water cycle – getting to know Earth’s most important fresh water source](#), The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.



Editori: Eileen Poeter and John Cherry

Direzione: John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira e Eileen Poeter

Comitato organizzatore: John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood, and Yan Zheng.

Copertina: Adapted from Hinton (2014)

Traduzione italiana a cura di: Costanza Cambi, Daniela Ducci, Paolo Fabbri, Alessandro Gargini, Maria Filippini, Marco Masetti, Marco Petitta, Vincenzo Piscopo, Maurizio Polemio, Elisabetta Preziosi, Sergio Rusi, Daniela Valigi

Dedica

Dedichiamo questo libro agli studenti, ai professionisti e ai docenti che prima di noi hanno discusso di cosa conosciamo dell'acqua sotterranea, e a tutti i futuri studenti, professionisti ed educatori che si sforzano di creare un percorso sostenibile per il nostro splendido, solo e unico, Pianeta Terra.

Prefazione all'edizione italiana

A partire dal 2012 i ricercatori e i professionisti italiani interessati alle risorse idriche sotterranee hanno intrapreso un percorso di condivisione delle conoscenze, svolto sotto l'egida del Comitato Italiano della Associazione Internazionale Idrogeologi (IAH), che li ha portati progressivamente a riconoscersi in una comunità fondata su intenti comuni. Il supporto reciproco che ne è scaturito ha consentito una crescita culturale e scientifica che ha oltrepassato i confini nazionali, collocando l'idrogeologia italiana a livello degli altri Paesi europei e extraeuropei. Cinque congressi nazionali della serie "Flowpath" e un congresso mondiale di idrogeologia ("AQUA2015: Back to the Future") testimoniano i risultati raggiunti, con particolare riferimento alla crescita di una generazione di giovani ricercatori dotati di visibilità nel panorama scientifico internazionale.

A fine 2021, il naturale processo di rinnovamento ha portato ad un ricambio quasi totale dei membri del Comitato Italiano. Ci fa piacere pensare che la traduzione di questo primo volume del Groundwater Project, oltre che un riconoscimento all'iniziativa fortemente voluta da John Cherry, rappresenti il testimone da consegnare al nuovo Comitato, con l'augurio di poter proseguire e migliorare quanto finora fatto per la comunità idrogeologica italiana.

Non poteva esserci occasione migliore dell'anno in cui la Giornata Mondiale dell'Acqua viene dedicata per la prima volta alle Acque Sotterranee ("Making the invisible visible").

I traduttori della versione italiana

A nome del Comitato Italiano IAH (2012-2016 , 2017-2021 e 2022-2026)

Indice

DEDICA	IV
PREFAZIONE ALL'EDIZIONE ITALIANA	V
INDICE	VI
LA PREFAZIONE DI THE GROUNDWATER PROJECT	VIII
PREMESSA	IX
RINGRAZIAMENTI	X
RINGRAZIAMENTI DEL TEAM DEI TRADUTTORI	XI
1 PREMESSA	1
2 OBIETTIVO	2
3 L'IMPIANTO IDRAULICO DELLA TERRA	4
4 LA PARTE SOTTERRANEA DEL NOSTRO CICLO DELL'ACQUA	13
4.1 IL PUNTO DI VISTA DELLA SUPERFICIE	13
4.2 IL PUNTO DI VISTA DEL SOTTOSUOLO	16
4.2.1 <i>Relazioni tra acque sotterranee e paesaggio</i>	19
4.2.2 <i>Relazioni tra acque sotterranee e corsi d'acqua</i>	21
4.2.3 <i>Modulazione della temperatura delle acque di superficie da parte delle acque sotterranee</i>	25
4.2.4 <i>Connessione tra acque sotterranee e sorgenti</i>	27
4.2.5 <i>Acque sotterranee e pozzi</i>	31
4.3 LA VISIONE A SCALA REGIONALE.....	33
4.3.1 <i>Acquiferi ed unità confinanti</i>	34
4.3.2 <i>Immagazzinamento nell'acquifero</i>	38
4.4 LA VISIONE A SCALA CONTINENTALE	40
5 TEMPI DI RESIDENZA DELLE ACQUE SOTTERRANEE	45
6 LE ACQUE SOTTERRANEE HANNO UN RUOLO IN TUTTE LE CONDIZIONI GEOLOGICHE DELLA TERRA 48	
6.1 LE ACQUE SOTTERRANEE IN AMBIENTE MONTANO.....	48
6.2 LE ACQUE SOTTERRANEE IN AREE CARSICHE.....	49
6.3 LE ACQUE SOTTERRANEE IN AREE DI PERMAFROST	51
7 IL RUOLO PECULIARE DELLE ACQUE SOTTERRANEE NEL SISTEMA IDROLOGICO TERRESTRE	53
7.1 LE ACQUE SOTTERRANEE COME REGOLATORE IDROLOGICO.....	53
7.2 LE ACQUE SOTTERRANEE SONO UNA FABBRICA GEOCHIMICA E UN NASTRO TRASPORTATORE	58
7.2.1 <i>Costituenti chimici naturali delle acque sotterranee</i>	59
7.2.2 <i>Origine dei contaminanti disciolti nelle acque sotterranee</i>	63
7.2.3 <i>Presenza di acque sotterranee salate e ricche di minerali</i>	69
7.2.4 <i>Fabbriche geochimiche e nastri trasportatori in climi asciutti e umidi</i>	72
7.3 LE ACQUE SOTTERRANEE COME SISTEMA DI SUPPORTO ALLA VITA	83
8 ACQUE SOTTERRANEE IN ESAURIMENTO	86
9 LE SFIDE NELLA GOVERNANCE DELLE ACQUE SOTTERRANEE	89
10 EPILOGO	93
11 ESERCIZI	94
11.1 CONSIDERA L'AREA IN CUI VIVI:	94
11.2 CONSIDERA LE CONDIZIONI GENERALI IN TUTTE LE AREE:.....	94
12 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	96

13	SOLUZIONI DEGLI ESERCIZI	103
13.1	CONSIDERA L'AREA IN CUI VIVI:	103
13.2	CONSIDERA LE CONDIZIONI GENERALI IN TUTTE LE AREE:.....	122
	SUGLI AUTORI.....	144
	ABOUT THE TRANSLATORS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
	I TRADUTTORI.....	147

La Prefazione di The Groundwater Project

I Membri e i Partner del Comitato Acqua delle Nazioni Unite stabiliscono il loro tema annuale della Giornata Mondiale dell'Acqua con qualche anno di anticipo. Il tema per il 22 Marzo 2022 è "Acque Sotterranee: rendere l'invisibile visibile". Questa coincidenza è particolarmente appropriata per il lancio nel 2020 del primo dei libri del Groundwater Project (GW-Project) che ha proprio l'obiettivo di rendere visibili le acque sotterranee.

Il GW-Project, un'organizzazione no-profit registrata in Canada nel 2019, ha lo scopo di contribuire all'avanzamento educativo e di fornire un nuovo approccio alla produzione e alla disseminazione delle conoscenze per capire e risolvere problemi. Il GW-Project utilizza il sito web <https://gw-project.org/> come piattaforma globale per la democratizzazione della conoscenza idrogeologica, essendo fondato sul seguente principio:

"La conoscenza dovrebbe essere libera e la migliore conoscenza è la libera conoscenza" (Anonimo)

La missione del GW-Project è quella di fornire materiale educativo accessibile, coinvolgente, di alta qualità, gratuitamente disponibile online in diverse lingue, a tutti coloro che vogliono imparare l'idrogeologia e capire come le risorse idriche sotterranee siano in relazione e sostengano i sistemi ecologici e il genere umano. Questo approccio rappresenta un nuovo tipo di tentativo educativo globale, basato sul volontariato di professionisti di diverse discipline, che includono accademici, professionisti e pensionati. Il GW-Project conta su diverse centinaia di volontari provenienti da più di 200 organizzazioni da almeno 14 nazioni e sei continenti, con partecipazione crescente.

Il GW-Project è un tentativo in corso e ha l'obiettivo di continuare con centinaia di libri da pubblicare online nei prossimi anni, dapprima in lingua inglese e successivamente in altre lingue, da poter essere scaricati ovunque ci sia una connessione internet. Le pubblicazioni del GW-Project includono anche materiale di supporto, come video, lezioni, test di laboratorio e altri strumenti didattici, oltre a produrre o fornire collegamenti in rete per software di pubblico dominio per le più diverse applicazioni di idrogeologia, supportando il processo educativo.

Il GW-Project è un'entità vivente, di conseguenza edizioni successive dei libri verranno progressivamente pubblicate. I lettori sono invitati a suggerire revisioni.

Vi ringraziamo per essere parte della comunità del GW-Project. Speriamo di essere contattati in merito alla vostra esperienza nell'utilizzo dei libri e del materiale relativo. Idee e volontari sono i benvenuti!

The GW-Project Steering Committee

Agosto 2020

Premessa

Questo libro riguarda il ruolo e l'importanza delle acque sotterranee nel nostro ciclo planetario dell'acqua, e rappresenta il prodotto portabandiera del GW-Project. Molti libri sono stati pubblicati nel decennio passato portando l'attenzione sulla crisi globale dell'acqua. Sebbene molti abbiano sottolineato l'immensa importanza delle acque dolci per l'umanità e la moltitudine di problemi idrici che stiamo fronteggiando, nessuno è stato scritto da esperti delle scienze idrologiche in merito alla parte sotterranea del nostro ciclo dell'acqua in modo così omnicomprensivo da raggiungere la più ampia fascia di lettori. L'intento di questo testo, intitolato "Le acque sotterranee nel nostro ciclo dell'acqua: conoscere la più importante fonte di acqua dolce della Terra", è di portare all'attenzione del lettore la "nascosta" risorsa idrica sotterranea.

La stesura del testo è stata promossa da Eileen Poeter, che ha progressivamente coinvolto gli altri coautori, man mano che una più ampia esperienza era richiesta per coprire obiettivi in via di espansione. Il risultato finale è un testo preparato da esperti di fama mondiale, specializzati in rilievi di terreno, in analisi e modellazione del flusso idrico sotterraneo, in geochimica e inquinamento delle falde. Quanto prodotto è il risultato di uno sforzo collaborativo del tipo che il GW-Project incoraggia con l'obiettivo di sintetizzare le conoscenze e di raggiungere la semplicità di esposizione partendo da concetti complessi.

Tutti gli autori sono membri del Comitato Direttivo del GW-Project. Mentre preparavano il libro, gli autori hanno ricevuto consigli da esperti nel governo delle acque sotterranee, tra gli altri argomenti. Il libro è stato sottoposto ad un processo completo di revisione tra pari. Di conseguenza, il materiale contenuto è figlio di collaborazioni interdisciplinari che sono necessarie per trasferire la conoscenza sulle acque sotterranee, e al contempo ampliare la coscienza sul tema a supporto di una migliore gestione e protezione delle acque sotterranee.

John Cherry, Direttore del GW-Project
Guelph, Ontario, Canada, August 2020

Ringraziamenti

Abbiamo apprezzato le continue e utili revisioni, nonché i suggerimenti per la stesura di questo testo, da parte dei seguenti esperti:

- ❖ Hugh Whiteley, Independent Civil Engineering Professional and Emeritus Adjunct Professor, University of Guelph, Kitchener, Canada;
- ❖ Kamini Singha, Professor, Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA;
- ❖ Ineke Kalwijn, Groundwater Consultant, Kalwijn Water Dynamics Incorporated, Vancouver, British Columbia, Canada;
- ❖ Garth van der Kamp, Research Associate, Global Institute for Water Security, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada; Formerly, Research Scientist, Environment Canada;
- ❖ Ian Stewart, Assistant Professor, Humanities, King's College, London, Ontario, Canada;
- ❖ Allan Freeze, Emeritus Professor, Geological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada; and,
- ❖ Fred Phillips, Emeritus Professor, Department of Earth and Environmental Science, New Mexico Tech, Socorro, New Mexico, USA.

Siamo grati ad Amanda Sills per la supervisione e produzione di questo libro e ad Elhana Dyck per la revisione editoriale, ambedue facenti parte del Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada. Abbiamo inoltre apprezzato le linee guida e i contributi di Everton de Oliveira, Diego Nogueira e Bruna Soldera del Groundwater Project, São Paulo, São Paulo, Brazil, che ci hanno incoraggiato a completare questo libro.

Eileen Poeter
Ying Fan
John Cherry
Warren Wood
Douglas Mackay

Ringraziamenti del team dei traduttori

Si ringraziano tutti i membri del Comitato Italiano IAH dei diversi mandati e lo staff di The Groundwater Project per il supporto e l'assistenza fornita nella fase di traduzione.

1 Premessa

La presenza dell'acqua sul nostro pianeta è un elemento essenziale che permette la vita per quanto sappiamo in merito alla sua comparsa. La circolazione dell'acqua sul pianeta continua a controllare lo sviluppo vitale di tutti gli organismi e rappresenta il fondamento della salute umana individuale e collettiva, così come il benessere ecologico. Conoscere come e dove l'acqua circola tramite il ciclo dell'acqua è la base su cui si fonda una consapevole gestione dell'acqua.

Gli effetti delle attività umane sui processi geologici del Pianeta Terra sono oggi così intensi che un nuovo periodo della scala cronostratigrafica, l'Antropocene, è stato proposto per un riconoscimento formale. La conoscenza dei processi naturali è sempre stata di fondamentale importanza per la sopravvivenza umana attraverso culture prosperose e resilienti. Ora l'attività antropica sta alterando questi processi non modalità imprevedute, e quindi la comprensione di questi processi naturali e degli effetti provocati dall'uomo su di essi è di cruciale importanza per sviluppare una conoscenza adeguata alla loro gestione sostenibile.

Il rapporto sullo sviluppo idrico mondiale delle Nazioni Unite del 2016 (UNWWAP, 2016) prevede che il mondo dovrà fronteggiare un deficit idrico globale del 40 per cento entro il 2030. Questa sconcertante rivelazione potrebbe anche peggiorare a causa dell'innalzamento delle temperature globali dovuta ai cambiamenti climatici, dell'espansione dei centri urbani e della crescita della popolazione. Entro il 2025, i due terzi della popolazione mondiale vivrà in condizioni di stress idrico. La Crisi Idrica Globale è urgente e richiede innovazione per identificare, stabilire le priorità e accelerare soluzioni a scala globale.

Le acque sotterranee devono necessariamente essere incluse nella soluzione della crisi idrica globale, perché costituiscono il 99 per cento delle acque liquide dolci della Terra (Shiklomanov, 1993), e sono vitali per il sostentamento di fiumi, laghi, aree umide e ecosistemi. Nonostante ciò, poche persone sono in grado di "vedere" le acque sotterranee perché sono nascoste sotto la superficie terrestre. Per svelare questo mondo nascosto, invitiamo il lettore a pensare alle acque dolci della Terra seguendo un approccio nuovo, comprendendo come tutte le acque superficiali che vediamo nei fiumi, nei laghi e nelle aree umide siano soltanto la punta del vasto serbatoio di acqua dolce della Terra; ecco, giusto la punta dell'iceberg, dove la parte nascosta dell'iceberg sono acque liquide sotterranee e non il ghiaccio.

2 Obiettivo

Questo è un testo introduttivo all'idrogeologia nel più ampio contesto del nostro ciclo dell'acqua, chiamato anche "ciclo idrologico". Il ciclo idrologico è il continuo movimento dell'acqua sul pianeta, sopra e sotto la superficie, come riassunto in Figura 1.

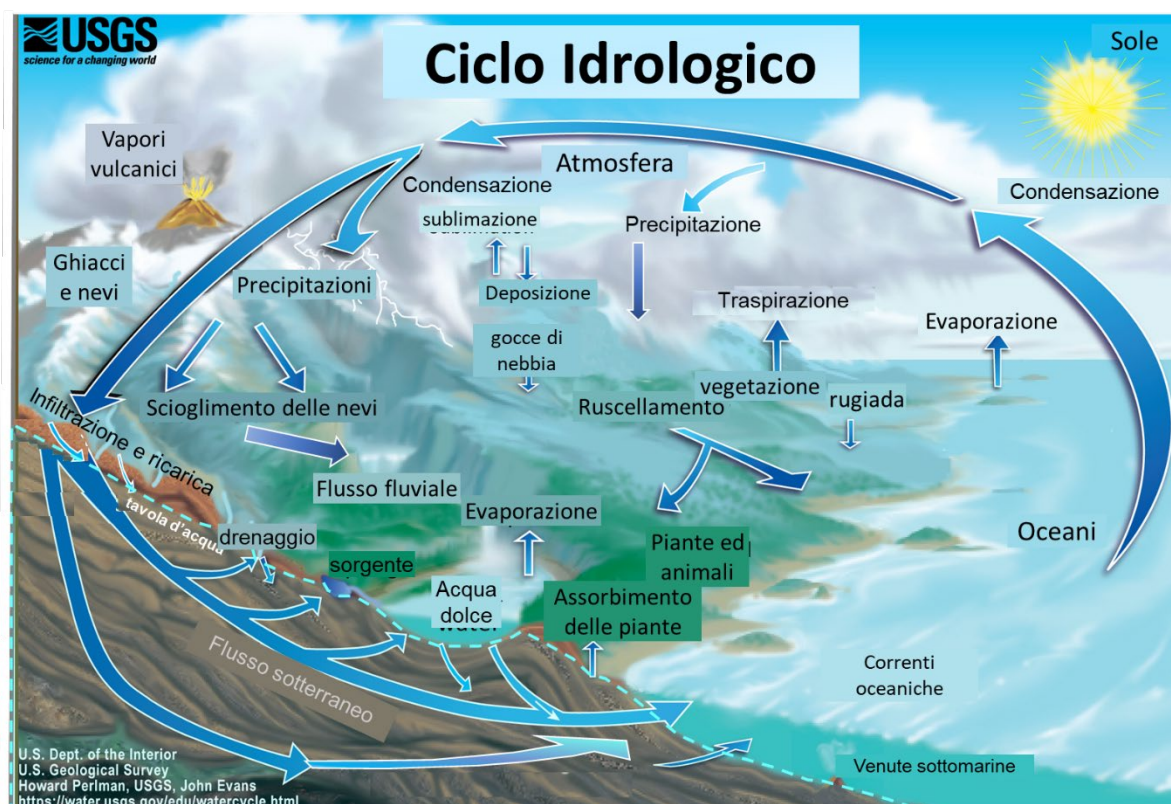


Figura 1 - Il ciclo idrologico corrisponde al continuo movimento dell'acqua dentro, sopra e sotto la superficie della Terra (modificato da USGS, 2020).

Questo volume spiega come, anche se le acque sotterranee rappresentano il 99 per cento delle nostre acque liquide dolci, soltanto una loro frazione è accessibile senza sovrasfruttare gli acquiferi. Conseguentemente, solo una piccola porzione dell'enorme serbatoio di acque sotterranee può essere utilizzata annualmente senza intaccare questa risorsa vitale. Nonostante ciò, l'estrazione globale di acque sotterranee è aumentata più di quattro volte negli ultimi 50 anni causando approssimativamente il 25 per cento dell'attuale tasso di aumento del livello del mare pari a 3.1 mm/anno (Wood e Hyndman, 2018).

Le acque sotterranee modificano la Terra attraverso processi di alterazione e geomorfologici. Fiumi, laghi e aree umide sono manifestazioni superficiali delle acque sotterranee, scambiando flussi idrici con i serbatoi sotterranei che li alimentano quando richiedono acque e viceversa ricevono parte del loro flusso quando le acque superficiali si presentano in eccesso. Questo testo si focalizza sulle modalità con le quali l'acqua superficiale che possiamo vedere è in connessione e alimenta il serbatoio idrico sotterraneo,

che a sua volta fluendo alimenta continuamente il ciclo idrologico. Questo flusso continuo di acque sotterranee agisce come un nastro trasportatore dei composti chimici naturali, come di quelli determinati dall'azione umana. La distribuzione di questi costituenti influisce sulla potabilità delle acque sotterranee e la capacità dei suoli di garantire prodotti agricoli è a sua volta fortemente dipendente da come le acque sotterranee interagiscono con i terreni.

Questo volume propone un'ampia visione dell'argomento "acque sotterranee nel ciclo idrologico" per includere il tema del trasporto di composti chimici naturali e antropici da parte del flusso idrico sotterraneo, introducendo molti argomenti che vengono più esaurientemente trattati in altri volumi del Groundwater Project. Le acque sotterranee forniscono inoltre molteplici servizi, ad esempio regolando il flusso idrico superficiale, supportando le funzionalità degli ecosistemi e fornendo acqua per tutta la vita sulla Terra. In breve, possiamo considerare le acque sotterranee come il sistema di supporto della vita sulla Terra.

3 L'impianto idraulico della Terra

Nella maggior parte dei casi, le acque sotterranee derivano dalle precipitazioni che si infiltrano nel terreno e percolano fino alla superficie piezometrica, una superficie concettuale che si trova ovunque sulla terra, ad una certa profondità al di sotto del piano campagna (Figura 2). La profondità della superficie piezometrica varia da zona a zona e si può misurare perforando un pozzo (o se la superficie piezometrica è vicina a quella topografica, scavando) fino alla profondità a partire dalla quale l'acqua comincia a fluire nel pozzo e misurando il dislivello tra la superficie piezometrica e quella topografica. Le superfici di un lago o di un fiume diventano superfici piezometriche in corrispondenza delle rive del lago o delle sponde del fiume (Figura 2). Ciò implica che la superficie piezometrica lungo una riva o una sponda si estenda al di sotto del piano campagna. Lungo le rive e le sponde l'acqua si muove generalmente da terra verso il lago (o il fiume) ma, in qualche caso, il flusso è diretto dal corpo idrico superficiale verso terra.

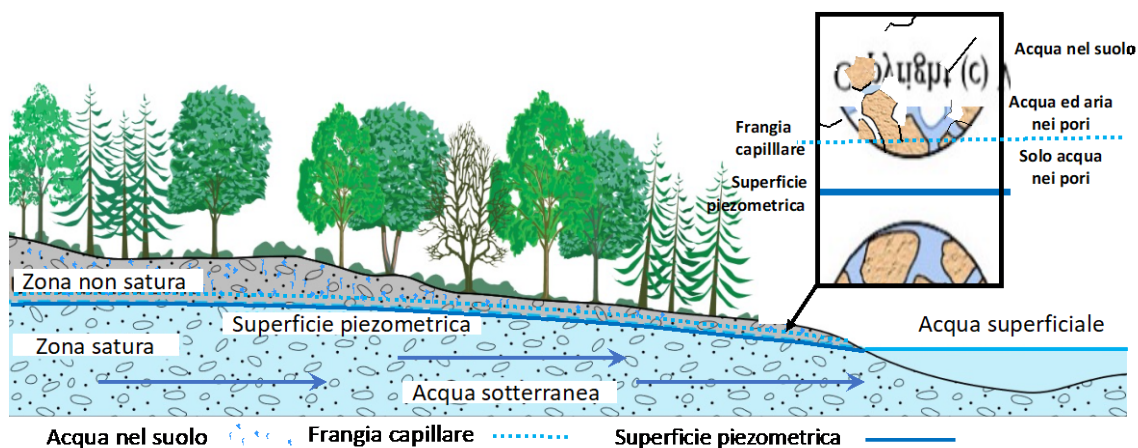


Figura 2 - La superficie piezometrica si estende al di sotto di quella topografica in corrispondenza delle rive di un corpo idrico superficiale, come un lago o un fiume (modificato da USGS, 2019a).

L'acqua risale nei pori del terreno poco al di sopra della superficie piezometrica a causa delle forze capillari, che derivano dall'adesione delle molecole d'acqua alla superficie dei granuli e dalla coesione tra una molecola d'acqua e l'altra. Queste forze capillari spingono l'acqua contenuta nel terreno verso l'alto, opponendosi alla forza di gravità, che la spinge verso il basso. Il meccanismo è simile a quello che si verifica in una spugna asciutta che tira l'acqua verso l'alto da un piano di lavoro di cucina, riempiendo i pori interni alla spugna. Questa zona è chiamata frangia capillare. Al di sopra della frangia capillare, e fino alla superficie topografica, si trova la zona non satura o vadosa, nella quale parte dei vuoti sono riempiti da acqua ed altri da aria.

Al di sotto della superficie piezometrica l'acqua occupa tutti gli spazi tra i granuli dei sedimenti (pori), tutte le fratture e i canali delle rocce, come mostrato in Figura 3. Tutti i sedimenti e le rocce che occupano le poche migliaia di metri più superficiali della terra

contengono vuoti aperti ed interconnessi tra le particelle, fratture o cavità e questi vuoti sono chiamati porosità. La porosità è la parte del materiale geologico costituita da vuoti aperti che possono contenere fluidi. I pori aperti ed interconnessi rendono i materiali geologici permeabili; ciò fa sì che l'acqua possa muoversi attraverso le rocce ed i sedimenti.

La permeabilità è una misura della facilità con cui l'acqua si muove attraverso le fratture ed i pori del materiale geologico.

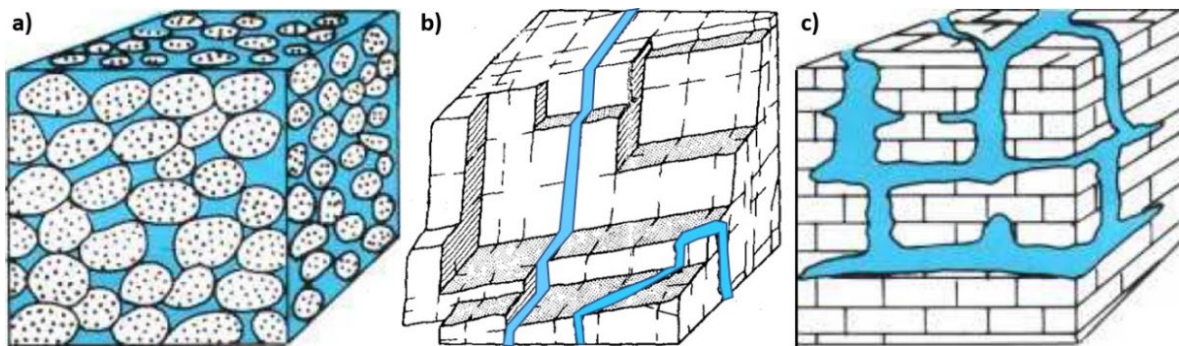


Figura 3 - Al di sotto della superficie piezometrica, l'acqua riempie i materiali sotterranei occupando: a) i pori tra le particelle dei sedimenti sciolti; b) le fratture delle rocce; c) le cavità delle rocce carbonatiche carsiche (a e c da Heat, 1983; b adattata da Gale, 1982).

Gli acquiferi sono definiti come formazioni geologiche che immagazzinano e trasmettono volumi di acqua utile sfruttabili. Gli acquiferi sono più porosi e permeabili delle formazioni geologiche che li circondano. Uno strato di sabbia grossolana pulita al di sotto della superficie piezometrica è un buon esempio di acquifero.

Le unità confinanti costituiscono un impedimento al flusso dell'acqua sotterranea da e verso gli acquiferi. Uno strato di argilla a bassa permeabilità interposto tra livelli di sabbia grossolana o uno strato di basalto non fratturato compreso tra strati di basalto fratturato sono esempi di unità confinanti.

I pozzi scavati a mano sono frequenti in molte regioni della terra dove la superficie piezometrica è abbastanza superficiale da essere raggiunta utilizzando pale, picconi o piccoli escavatori. La superficie piezometrica si può vedere ispezionando l'interno di un pozzo scavato molto tempo fa dai nomadi nel deserto del Gobi (Figura 4). In molti casi, i pozzi per acqua sono più profondi e vengono scavati con perforatrici montate su camion per carichi pesanti piuttosto che a mano. I pozzi hanno tipicamente un diametro piccolo, e può essere difficile o impossibile vedere la superficie piezometrica al loro interno, cosicché un pozzo scavato a mano è appropriato per l'immagine di Figura 4.

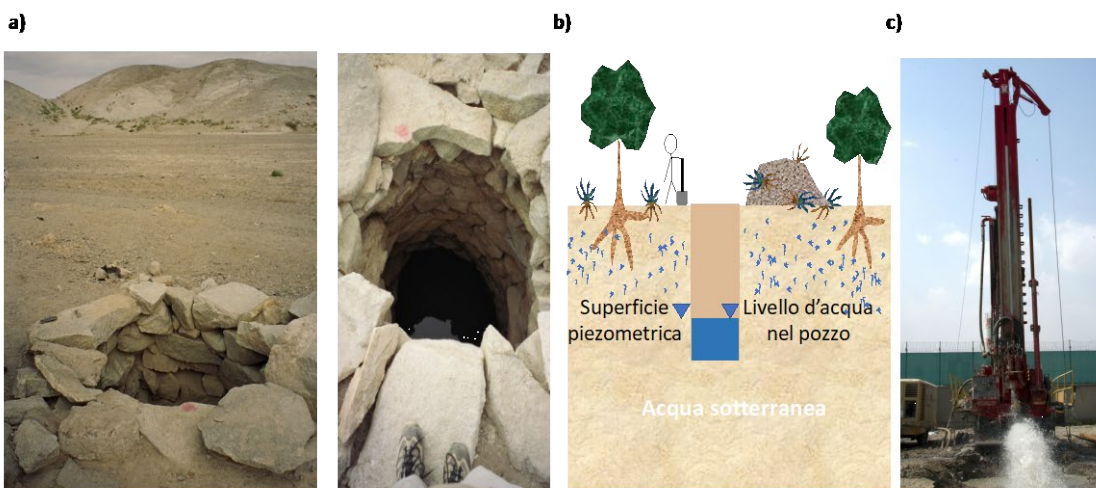


Figura 4 - I pozzi vengono costruiti per intercettare la superficie piezometrica a) Un pozzo scavato a mano nel deserto del Gobi, con il cielo riflesso dall'acqua (foto da Cherry, 2019). b) Schema di un pozzo scavato a mano che intercetta la superficie piezometrica (Poeter et al., 2020, gw-project.org). c) Immagine di una perforatrice a motore che scava un pozzo (foto da Mellin, 2013).

Le acque sotterranee sono parte integrante del ciclo idrologico. La Figura 5 fornisce il link ad un video che mostra un'animazione del ciclo idrologico.



Figura 5 - [Cliccare per vedere](#) ▶ l'animazione del ciclo idrologico (NASA, 2020).

Nel ciclo idrologico l'acqua entra nell'atmosfera per evaporazione e ne esce attraverso le precipitazioni. Il movimento dell'acqua nell'atmosfera è azionato dal sole e controllato dal continuo scambio di molecole d'acqua tra i corpi idrici superficiali (p.e., laghi, fiumi ed oceani) ed il vapore acqueo presente nell'aria.

L'energia del sole scalda i corpi idrici superficiali facendo sì che le singole molecole d'acqua rompano i loro legami con le molecole circostanti e sfuggano nell'atmosfera. Allo stesso tempo, le singole particelle d'acqua allo stato gassoso entrano in contatto con l'acqua liquida e vengono assorbite. A seconda della temperatura dell'aria e dell'acqua, e della quantità di vapore acqueo presente nell'aria, questo scambio si traduce o in evaporazione (un movimento netto di acqua dalla superficie terrestre all'atmosfera) o in condensazione (un movimento netto di acqua dall'atmosfera alla superficie terrestre). L'aria ha una

capacità limitata di trattenere il vapore acqueo, così che se la quantità di vapore d'acqua è maggiore della massima quantità che l'aria può contenere ad una data temperatura (saturazione), il vapore d'acqua in eccesso si condensa come acqua liquida, formando rugiada o nebbia.

L'evaporazione crea aria umida. Man mano che l'aria vicino alla superficie terrestre è scaldata dal sole, si espande e si solleva. L'atmosfera della Terra è più calda vicino alla superficie e più fredda in alto, così che l'aria umida, salendo, raggiunge una quota in cui si è raffreddata al punto che il contenuto di vapore acqueo è superiore alla saturazione. Il vapore acqueo in eccesso, quindi, si condensa sotto forma di piccole goccioline, le nuvole (o la nebbia se vicino alla superficie). Le goccioline crescono di dimensione collidendo l'una con l'altra o a causa della condensazione di vapore acqueo sulla loro superficie. Se diventano grandi abbastanza, sono troppo pesanti per essere sorrette dalla capacità portante dall'atmosfera e cadono dalle nuvole come precipitazione, sotto forma di pioggia, neve, nevischio o grandine.

Quando le precipitazioni raggiungono la superficie terrestre possono:

- 1) tornare all'atmosfera per evaporazione;
- 2) defluire, o sulla superficie terrestre (deflusso superficiale) o attraverso strati di terreno poco profondi temporaneamente saturi al di sopra della superficie piezometrica (deflusso ipodermico), fino a raggiungere i corpi idrici superficiali, come i corsi d'acqua, e diventare deflusso di piena; o,
- 3) infiltrarsi nel sottosuolo.

L'acqua infiltrata entra nella zona vadosa e una parte di essa è utilizzata dalla vegetazione. Quando nella zona vadosa c'è acqua in eccesso, questa percola fino alla superficie piezometrica e diventa ricarica per i sistemi idrici sotterranei. Quando c'è ricarica la superficie piezometrica sale, l'acqua viene immagazzinata nei sistemi idrici sotterranei e defluisce lentamente verso fiumi, laghi, paludi ed oceani, tornando in superficie. Questa acqua in lento movimento è accumulata nel sottosuolo, si muove verso le aree di recapito, e funziona da regolatore (o ammortizzatore), fornendo acqua ai corpi idrici superficiali anche durante i periodi siccitosi. Il deflusso che perdura durante la stagione secca è chiamato deflusso di base. In molti bacini il deflusso sotterraneo è la principale, e spesso unica fonte di alimentazione del deflusso di base.

L'acqua si muove tra la superficie, il sottosuolo e l'atmosfera aprendosi la strada attraverso i continenti e gli oceani. Gran parte dell'acqua sotterranea raggiunge gli oceani sotto forma di deflusso di base dei corsi d'acqua, mentre parte dell'acqua sotterranea si riversa direttamente negli oceani filtrando lungo le coste e una parte rientra nell'atmosfera per evaporazione. Gran parte del ritorno dell'acqua sotterranea all'atmosfera senza il passaggio attraverso gli oceani si verifica nelle depressioni chiuse. Il lago di Aral (tra Kazakhstan e Uzbekistan), il Mar Caspio (tra Europa ed Asia) e il Mar Morto (nella Rift Valley in Giordania), così come i laghi salati e le paludi della Valle della Morte (nel sud-ovest degli Stati Uniti) sono esempi di questo tipo di sistemi di drenaggio chiusi.

L'evaporazione si verifica sia dalla superficie terrestre che dagli oceani, ma gli oceani occupano il 71 per cento del nostro pianeta e, a differenza delle terre emerse, gli oceani non si asciugano mai, così che gli oceani rappresentano una fonte perenne di acqua sempre disponibile per l'evaporazione, per cui spesso semplifichiamo il ciclo idrologico dicendo che comincia dagli oceani. In ogni modo l'evapotraspirazione dalle terre emerse, che comprende la traspirazione delle piante, può spostare ingenti quantità di acqua dagli strati più superficiali del sottosuolo all'atmosfera. Le radici delle piante prelevano acqua dal terreno e dalla falda e la trasportano verso l'alto attraverso la pianta (Figura 6). Non è raro che un singolo albero sposti 500 litri di acqua al giorno dal terreno all'atmosfera. Complessivamente tra il 70 ed il 75 per cento dell'acqua che cade sulle terre emerse torna all'atmosfera per evaporazione o traspirazione (Dai e Trenberth, 2002). Ciò significa che solo tra il 25 ed il 30 per cento della pioggia defluisce, nel sottosuolo e lungo i fiumi, fino a tornare negli oceani. In media, in un anno, approssimativamente metà del deflusso fluviale che raggiunge gli oceani è costituito da acque sotterranee (Reitz et al., 2017) e circa la metà da "deflusso veloce", superficiale o ipodermico.

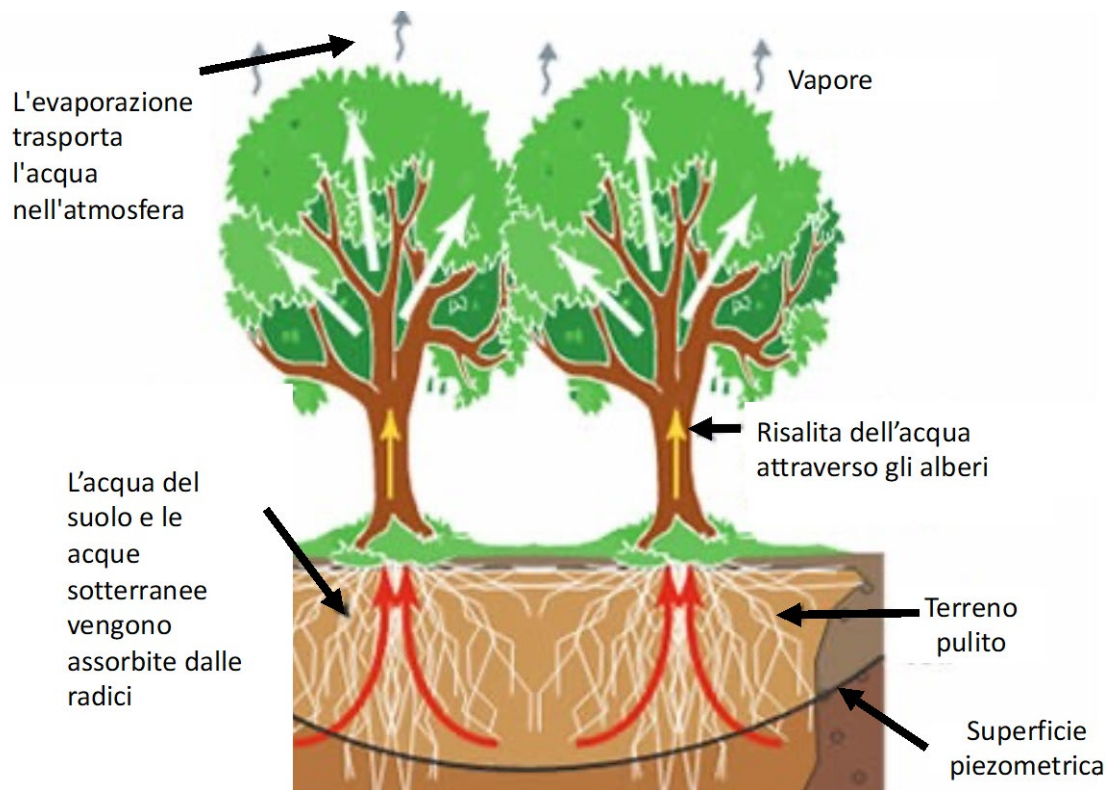


Figura 6 - Gli alberi trasportano acqua dal terreno o dalla superficie piezometrica all'atmosfera. Non è raro che un singolo albero sposti 500 litri di acqua al giorno dal terreno all'atmosfera, generando una depressione della superficie piezometrica come illustrato qui al di sotto di un gruppo di alberi (modificato da USEPA, 2012).

L'insieme dell'evaporazione da piccoli corpi idrici come laghi, stagni e corsi d'acqua, così come dalla superficie terrestre, e della traspirazione dell'acqua attraverso i pori delle piante è chiamato complessivamente evapotraspirazione e costituisce il movimento dell'acqua dalla Terra all'atmosfera.

L'aridità del clima è definita come rapporto tra la precipitazione annuale (P) e la evapotraspirazione potenziale (PET) di un luogo. La PET è la quantità di acqua che potrebbe evapotraspirare se ci fosse una disponibilità illimitata di acqua nel terreno. La PET è più elevata nelle zone con temperature più alte, umidità più bassa e velocità del vento maggiori. Il grado di aridità è definito dall'Indice di Aridità (AI), che è la quantità di precipitazione divisa per l'evapotraspirazione potenziale.

Le aree umide sono quelle con AI maggiore di 0,65 e tipicamente ricevono più di 500 millimetri di precipitazione all'anno (mm/a). Sebbene ci siano notevoli differenze da zona a zona, nelle aree umide:

- la ricarica si verifica tipicamente varie volte all'anno.

Le zone sub umide hanno un AI tra 0,5 e 0,65.

Le zone semi-aride si definiscono come aree con AI compreso tra 0,2 e 0,65. In queste zone le precipitazioni sono tipicamente comprese tra 250 e 500 mm/a. Le zone aride hanno AI compreso tra 0,05 e 0,2. Le zone aride e semi-aride:

- perdono una larga parte delle precipitazioni per evapotraspirazione e solo una piccola quantità di esse raggiunge la superficie piezometrica (dallo 0 a circa il 4 per cento delle precipitazioni); e

- la ricarica sotterranea si verifica raramente.

Le zone iper-aride hanno un AI minore di 0,05 e:

- la ricarica sotterranea si verifica solamente nelle depressioni che raccolgono, a seguito di piogge intense, un deflusso superficiale capace di produrre infiltrazione nel terreno in quantità sufficienti perché ci sia acqua in eccesso che raggiunge la superficie piezometrica; e,

- quelle sotterranee sono spesso le uniche risorse idriche disponibili, perché le acque superficiali tendono ad essere saline, dato che l'evaporazione rimuove le particelle di acqua lasciando i sali disciolti nel corpo idrico.

La distribuzione delle regioni semi-aride ed aride è mostrata in Figura 7. Nelle regioni aride vivono circa 2,5 miliardi di persone, viene prodotto circa il 44 per cento del cibo mondiale e viene allevato circa il 50 per cento del bestiame.

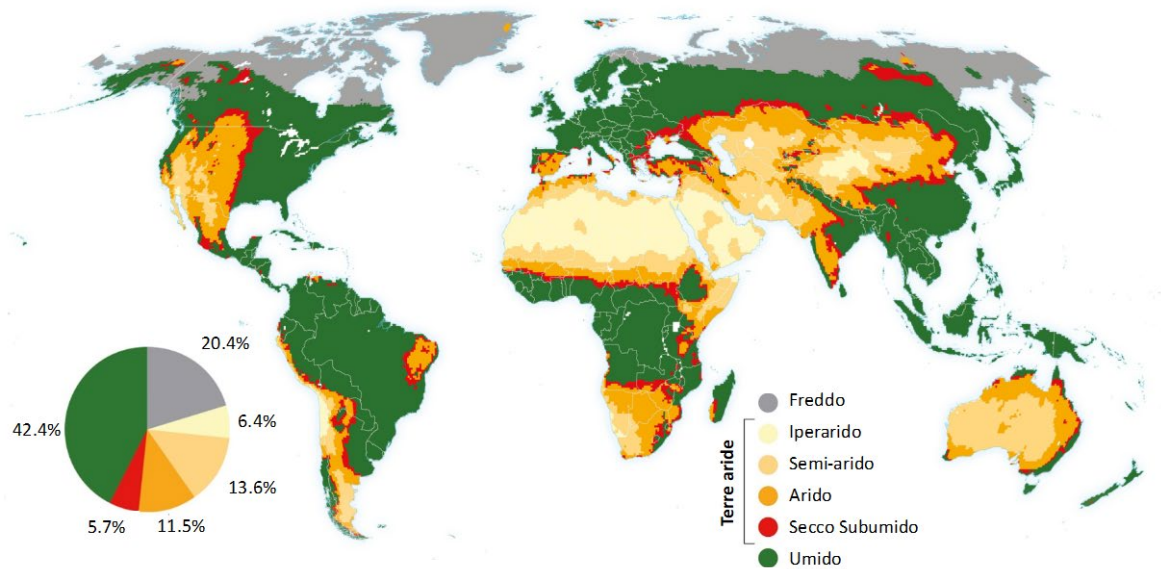


Figura 7 - Distribuzione dell'aridità sulla Terra (modificato dal Centro Unificato di Ricerca della Commissione Europea, 2020).

La distribuzione dell'evapotraspirazione sulla Terra è illustrata dal video di Figura 8. Il video è stato realizzato utilizzando una simulazione di vapore acqueo e precipitazioni secondo il modello "Community Climate System Model (CCSM)" del Centro Nazionale degli Stati Uniti per la Ricerca sull'Atmosfera (USNCAR). Nel video, le nuvole (fasci bianchi) si originano sia dagli oceani che dai continenti, specialmente dalle foreste tropicali, come quella amazzonica. Le fiammate arancioni nel video indicano l'inizio delle precipitazioni quando le nuvole diventano cariche di acqua e comincia la pioggia. Queste precipitazioni sono spesso alimentate dall'evaporazione sia dagli oceani che dai continenti. Come si vede nel video, il vapore acqueo che sale da una certa zona dell'entroterra può aggiungersi alle masse d'aria che si muovono in alto, incrementandone il contenuto in vapore, per poi essere trasportato dal vento e "piovere" in un'altra zona continentale. Questo processo è chiamato riciclo delle precipitazioni perché queste piogge sono inizialmente cadute sulle terre emerse, sono poi evaporate e sono nuovamente diventate pioggia.

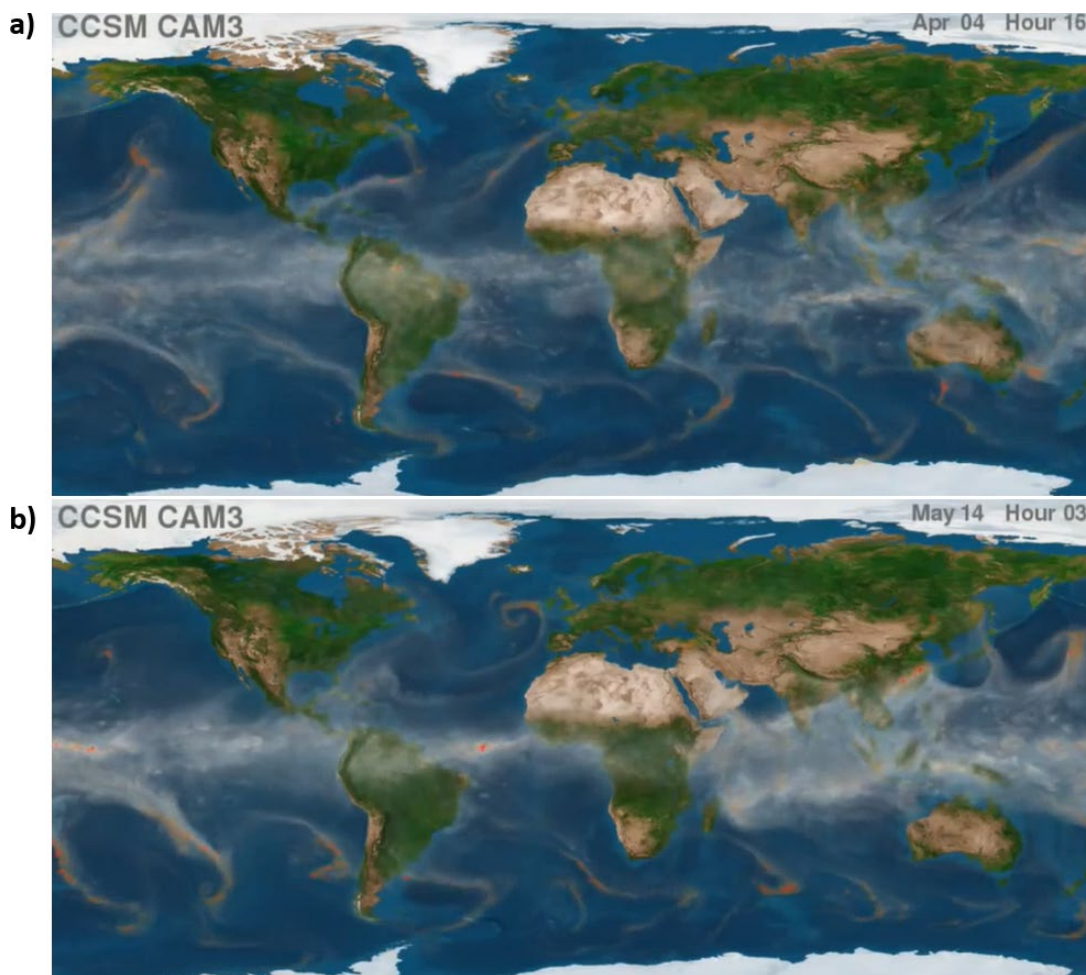


Figura 8 - [Cliccare per vedere](#) ▶ un'animazione di evaporazione ed evapotraspirazione (in bianco) e delle precipitazioni (in arancione) creata da un modello di simulazione del clima per un certo periodo dell'anno 2010. Le chiazze arancioni indicano l'inizio della pioggia a) nel nord della foresta amazzonica, in Sud America e b) nell'Oceano Atlantico a nord-est del Sud America così come nella Cina sud-orientale. L'inizio della pioggia è mostrato chiaramente nel video dai lampi arancioni (USNCAR, 2020).

Le precipitazioni di riciclo possono costituire una parte rilevante delle piogge totali che cadono nelle zone lontane dagli oceani (Figura 9a). Ad esempio, più della metà delle precipitazioni sulla parte meridionale del Sud America è generata da acqua traspirata dalla foresta amazzonica (van der Ent et al., 2010). Il collegamento video della Figura 8 mostra che il vapore sale dal bacino amazzonico e si muove verso sud, guidato dalla Cordigliera delle Ande lungo il suo versante orientale, generando, alla fine, precipitazioni nel bacino del Rio de la Plata, molto più a sud. Un bacino idrologico è l'area drenata da un corso d'acqua e dai suoi affluenti, delimitata dallo spartiacque topografico che separa differenti sistemi fluviali, così che una goccia d'acqua che si trova da un lato dello spartiacque defluisce verso un fiume mentre quella che si trova dall'altro lato defluisce all'altro fiume. I bacini idrogeologici possono coincidere o meno con i bacini idrografici e sono delimitati dalla linea di ugual quota dei punti di livello dell'acqua più elevati tra bacini idrogeologici contigui. Le frecce della Figura 9b indicano le direzioni di trasporto del vapore acqueo atmosferico simulate nel video di Figura 8. Più una regione è lontana dal punto in cui l'aria

umida marina raggiunge il continente, più le sue precipitazioni dipendono dall'evapotraspirazione dalla terraferma sopravento rispetto alla sua posizione. Poiché il bacino del Rio della Plata, nel sud, dipende dalla traspirazione che avviene in Amazonia, l'Amazonia è chiamata "oceano verde".

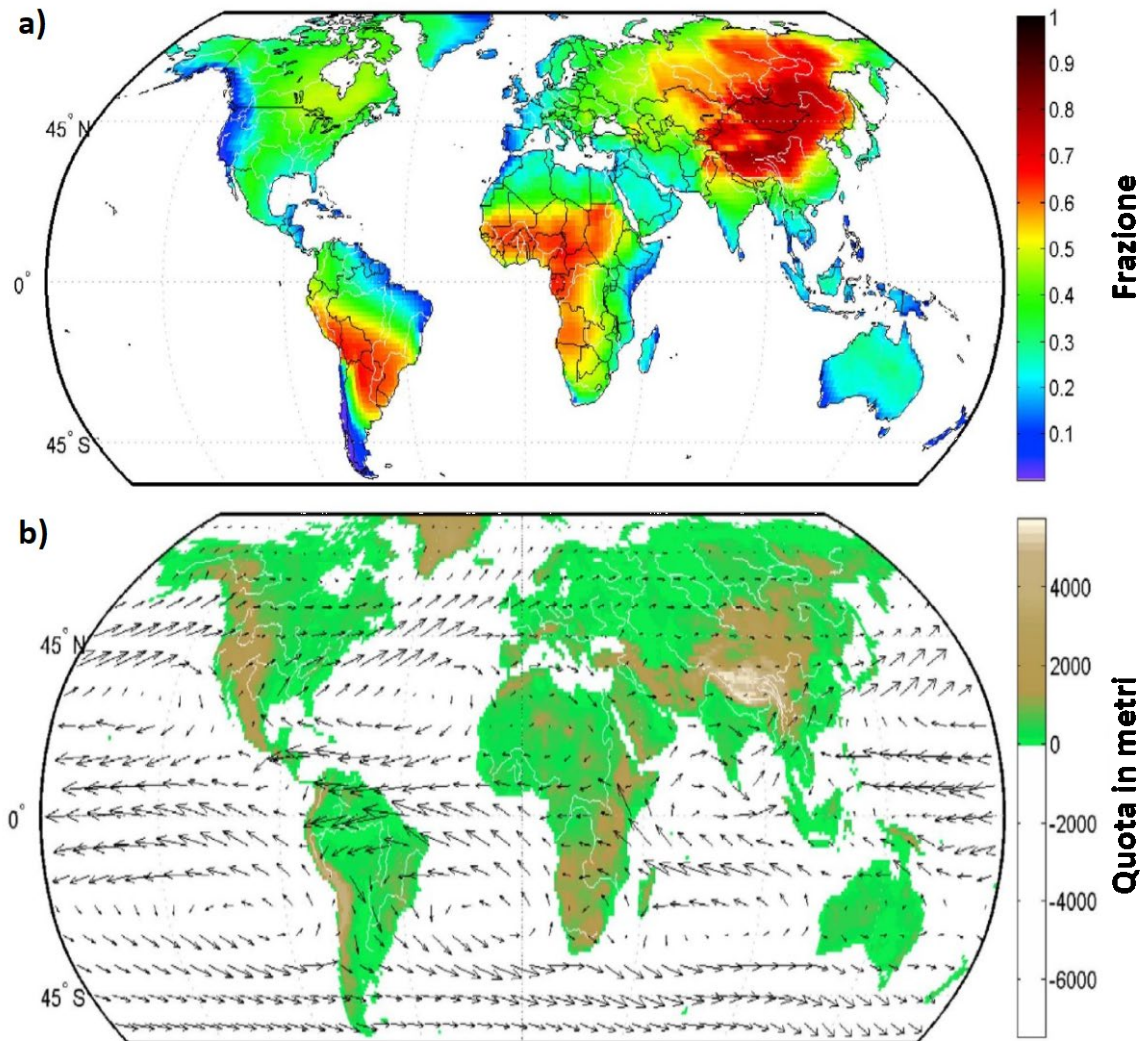


Figura 9 - Precipitazioni di riciclo: a) i colori indicano la frazione stimata di precipitazione che si origina dall'evaporazione sulla terraferma b) la dimensione e la direzione delle frecce indicano l'ammontare e la direzione di trasporto del vapore acqueo atmosferico, sovrapposti ad una carta topografica che indica le quote in metri (van der Ent et al., 2010).

4 La parte sotterranea del nostro ciclo dell'acqua

Per esaminare il ruolo delle acque sotterranee nel ciclo idrologico, consideriamo la parte opaca, sfuggente e sotterranea del ciclo idrologico a cui è dedicata la maggior parte dei libri del Groundwater Project (GWP).

4.1 Il punto di vista della superficie

Quando la precipitazione penetra al di sotto della superficie topografica, si parla di infiltrazione (freccie blu scuro tratteggiate verso il basso in Figura 10). La Figura 10 mostra un mezzo fratturato a sinistra ed un mezzo poroso a destra. Nelle rocce fratturate, l'acqua si muove attraverso le discontinuità della roccia, mentre nei mezzi porosi l'acqua si muove attraverso gli spazi vuoti presenti tra i granuli. I processi di flusso sono gli stessi in entrambi i sistemi, ma le caratteristiche del materiale geologico sono diverse.

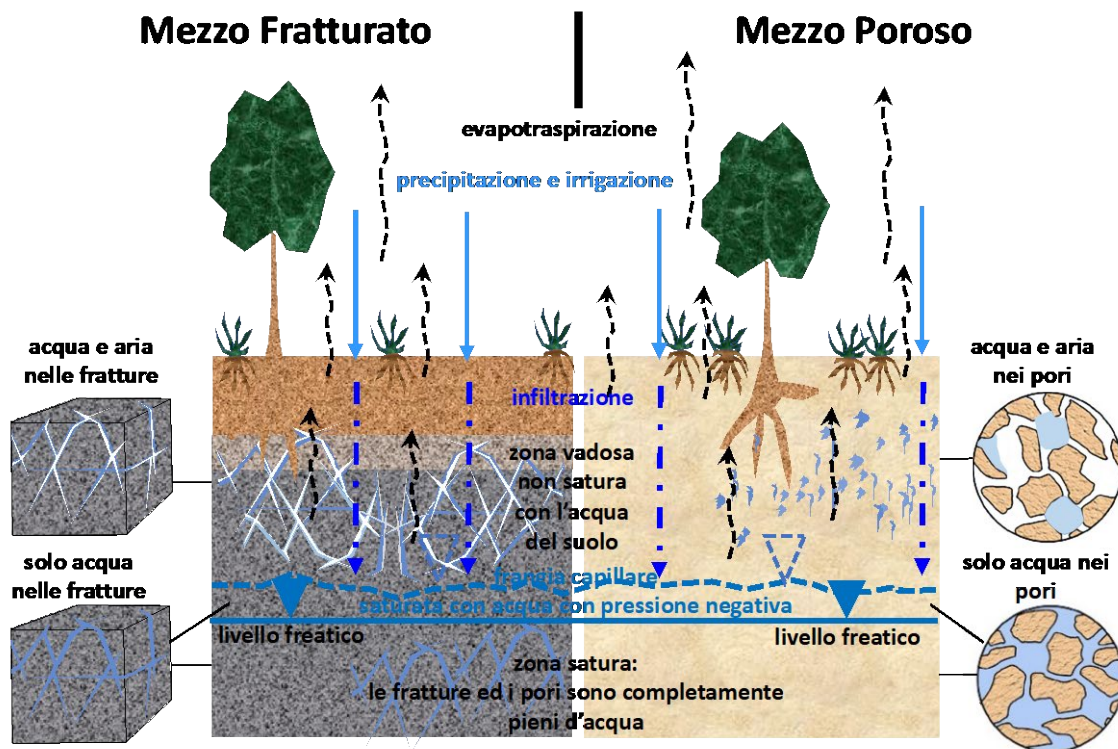


Figura 10 - Schema che mostra l'infiltrazione attraverso la zona non satura fino alla frangia capillare ed al livello freatico, dove avviene la ricarica delle acque sotterranee. L'acqua nella zona non satura si muove generalmente verso il basso come infiltrazione (freccie blu) o verso l'alto come evapotraspirazione (freccie nere), quindi il flusso è spesso considerato mono-dimensionale anche se ci sono localmente movimenti laterali dell'acqua (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

L'acqua proveniente da un evento di pioggia breve si infila solo ad una ridotta profondità, mentre piogge di lunga durata e ridotta intensità si infiltrano più in profondità, raggiungendo prima o poi il livello freatico (linea orizzontale continua contrassegnata da un triangolo pieno in Figura 10) dove diventano ricarica delle acque sotterranee. Sebbene

vi siano zone localizzate con movimento laterale dell'acqua, il flusso è principalmente mono-dimensionale nella zona sopra il livello freatico.

Al di sotto del livello freatico, le fratture ed i pori sono riempiti d'acqua e la pressione dell'acqua è maggiore della pressione atmosferica (pressione positiva). Al contrario, sopra il livello freatico, i pori e le fratture sono riempiti con una miscela di acqua e aria e la pressione dell'acqua è inferiore alla pressione atmosferica (pressione negativa).

La zona sopra la frangia capillare è chiamata zona non satura, perché i pori del suolo sono solo parzialmente riempiti d'acqua; essa è anche chiamata zona vadosa (Figura 10). Anche se il materiale del sottosuolo può essere roccia o sabbia (cioè diverso dal suolo superficiale), l'acqua nella zona vadosa è spesso chiamata acqua del suolo per differenziarla dalle acque sotterranee della zona satura sotto il livello freatico. L'acqua del suolo è indicata con colore blu in tutta la zona vadosa nella Figura 10. La pressione negativa dell'acqua nella zona vadosa è dovuta alle forze capillari.

Vicino il livello freatico, le forze capillari creano una frangia capillare (Figura 10) in cui i pori e le fratture sono completamente pieni d'acqua, ma la pressione dell'acqua è negativa. La frangia capillare si estende per alcune decine di millimetri sopra il livello freatico in pori di grandi dimensioni, come quelli dei depositi sabbiosi, e per diversi metri sopra il livello freatico in pori di piccole dimensioni, come quelli dei depositi argillosi o di piccolissime e filiformi fratture delle rocce. Sebbene la frangia capillare sia satura di acqua come la zona delle acque sotterranee, è considerata parte della zona non satura perché l'acqua ha una pressione negativa. Questo è il motivo per cui il termine zona vadosa include la frangia capillare.

Quando il serbatoio suolo è completamente saturo al punto che l'acqua non può più essere trattenuta dalle forze capillari, la gravità richiama l'acqua in eccesso verso il livello freatico. Questo processo è indicato come ricarica delle falde sotterranee perché le precipitazioni infiltrate vanno a reintegrare il serbatoio delle acque sotterranee. L'acqua sotterranea viene ricaricata solo dove e quando c'è un surplus idrico nel suolo. L'acqua ricaricata viene immagazzinata nel sistema idrico sotterraneo scorrendo lentamente verso i punti di recapito.

Le forze capillari hanno meno influenza quando è più alto il contenuto idrico; quindi è più probabile che l'acqua migri verso il basso, verso il livello freatico, quando il sottosuolo più superficiale ha un più alto contenuto idrico. Di conseguenza, nelle stagioni umide e fredde, o durante periodi di pioggia costante o di scioglimento della neve, l'acqua infiltrata può raggiungere il livello freatico e aggiungere acqua al serbatoio delle acque sotterranee. Chiaramente, non tutti gli eventi di pioggia ricaricano il serbatoio delle acque sotterranee; la maggior parte degli eventi ha solo influenza sulla zona vadosa, reintegrando il serbatoio idrico del suolo e alimentando la traspirazione della vegetazione. I tempi e l'entità della ricarica che raggiungono il livello freatico dipendono dalle proprietà del suolo e dalla profondità del livello freatico, oltre che dalla durata e dall'intensità delle

precipitazioni, come mostrato dalla risalita del livello freatico in seguito alle precipitazioni (Figura 11).

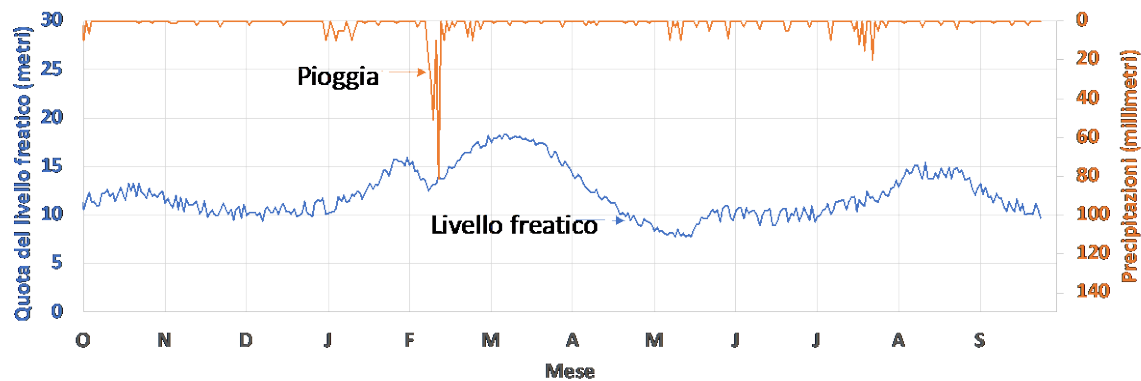


Figura 11 - Esempio di relazione temporale tra precipitazione e risalita e abbassamento del livello freatico. La quantità di precipitazione è mostrata su un asse con valori crescenti verso il basso, in modo tale che eventi di precipitazione più consistenti abbiano un picco discendente maggiore. La risalita del livello freatico è tipicamente ritardata rispetto all'evento meteorico (si noti, nel caso in esame, che il picco del livello freatico si verifica circa un mese dopo la precipitazione) e i livelli idrici più alti hanno una durata superiore rispetto all'evento meteorico. Altri fattori, come il locale pompaggio, influenzano le quote del livello freatico, quindi la corrispondenza tra i principali eventi di precipitazione e la quota del livello freatico non è univoca (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

La vegetazione terrestre utilizza il serbatoio della zona vadosa per il suo approvvigionamento idrico. Le radici delle piante occupano questa zona perché contiene aria e l'ossigeno essenziale per la respirazione delle radici (proprio come la nostra respirazione). Le piante drenano acqua dal suolo attraverso le loro radici, abbassando la pressione effettiva dell'acqua nelle loro radici per favorire il richiamo dell'acqua dal suolo alla pianta.

Nelle zone aride, le acque sotterranee poco profonde possono contenere troppo sale per far crescere la maggior parte dei tipi di piante, quindi la vegetazione sarà costituita solo da specie tolleranti al sale. Inoltre, nelle zone aride, alcune piante, chiamate freatofite, hanno radici abbastanza profonde tali da attingere dalle acque sotterranee. Esempi di freatofite includono pioppi neri americani, salici, eucalipti e ulivi russi, gli arbusti come il cedro salato e le colture come l'erba medica. Le radici delle freatofite si sviluppano comunemente fino a 15 metri di profondità, tuttavia è stato scoperto che alcune radici di cedro salato si estendono fino a 30 metri di profondità lungo il Canale di Suez.

C'è una ampia consapevolezza sul fatto che l'introduzione di alcune specie animali da un continente all'altro può provocare un estremo squilibrio ecologico (per esempio, i conigli portati dall'Inghilterra in Australia). Tuttavia, c'è meno consapevolezza dell'effetto che l'introduzione di vegetazione non autoctona, che consuma acque sotterranee (per esempio, gli alberi di eucalipto dall'Australia o cedro salato dall'Eurasia e dall'Africa), ha sulle regioni aride di altri continenti. Queste piante possono diventare consumatori indesiderati di acque sotterranee, influenzando le piante autoctone e l'agricoltura.

4.2 Il punto di vista del sottosuolo

Una volta che la precipitazione infiltrata raggiunge il livello freatico, questo risale. La gravità fa sì che l'acqua sotterranea fluisca lateralmente da posizioni in cui la quota del livello freatico è più alto verso le zone dove esso è a quote più basse, come mostrato nella sezione frontale della Figura 12. Il riquadro marrone sulla verticale della sezione di Figura 12 rappresenta il precedente flusso mono-dimensionale attraverso la zona vadosa (Figura 10) in un più ampio modello di flusso spaziale bidimensionale. Il flusso delle acque sotterranee avviene nelle tre dimensioni, ma per semplificare la visualizzazione e la discussione consideriamo dapprima il flusso in una sezione trasversale bidimensionale.

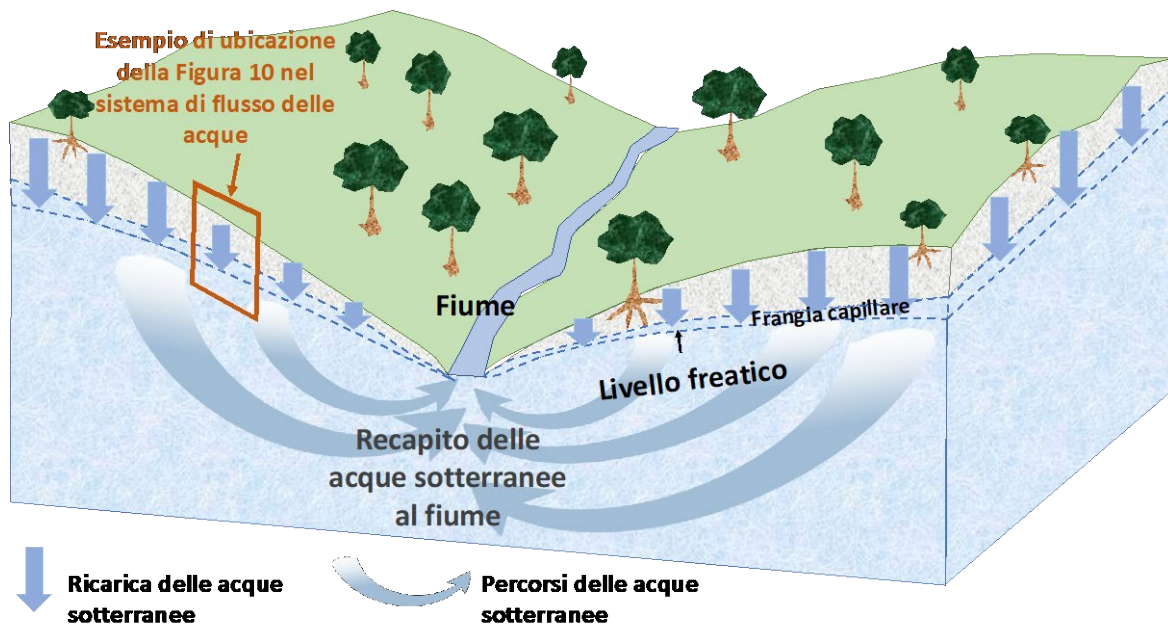


Figura 12 - Dopo che l'acqua ha ricaricato il sistema idrico sotterraneo, la pendenza del livello freatico da luogo al movimento laterale dell'acqua dalle colline alle valli, dove ha recapito nei corsi d'acqua. Il riquadro nella figura colloca il flusso mono-dimensionale della Figura 10 in un contesto spaziale più ampio (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Il livello freatico è più profondo nelle zone montane, poiché le precipitazioni si sono infiltrate nel terreno ad una quota più elevata, e l'acqua sotterranea scorre verso il basso nel sistema idrico sotterraneo e verso le pianure. La quantità del flusso idrico dalle aree montane verso le zone di recapito dipende dall'entità della ricarica (acqua che si infiltra verso il livello freatico), dalla differenza di quota tra le aree di ricarica e quelle di recapito, dalla permeabilità dei suoli e delle rocce attraverso le quali scorre l'acqua sotterranea. In caso di siccità, il livello freatico negli altipiani si abbassa perché l'acqua scorre verso i torrenti, non permettendo la ricarica da infiltrazione attraverso la superficie; quindi l'acqua che viene immagazzinata nei pori o nelle fratture delle unità geologiche viene rilasciata ed il livello freatico si abbassa. Quando il livello freatico si abbassa nelle zone ad alta quota, la quantità del flusso idrico sotterraneo verso i corsi d'acqua diminuisce, ma l'acqua continua

a scaricarsi nel torrente finché il livello freatico non scende al di sotto del livello idrico del corso d'acqua.

Un piezometro è un pozzo di piccolo diametro aperto all'ingresso di acque sotterranee per un breve tratto della sua lunghezza. La quota del livello idrico in un piezometro rispetto al livello del mare è nota come carico idraulico (spesso è chiamato semplicemente "carico"), che è una misura dell'energia potenziale dell'acqua.

Le acque sotterranee si muovono dai punti con alto carico idraulico (alta energia potenziale) a quelli con basso carico idraulico (bassa energia potenziale). Quando l'acqua, che ricarica il livello freatico al di sotto di un altopiano, si sposta verso il basso e verso le pianure perde energia a causa dell'attrito tra l'acqua in movimento e la parte solida dell'acquifero, quindi il carico idraulico diminuisce lungo il percorso del flusso mentre l'energia potenziale viene convertita in calore, sebbene il calore sia troppo piccolo per essere misurato.

Il sistema di flusso sulla parte anteriore della Figura 12 rappresenta una sezione schematica con il flusso che si muove lungo una sezione perpendicolare alle culminazioni dei rilievi, a sinistra e a destra, di una valle con al centro il corso d'acqua. L'acqua si infiltra dalla superficie del suolo e percola fino al livello freatico, quindi scorre con percorsi dovuti alla combinazione di componenti del flusso verso il basso, laterali e verso l'alto per scaricarsi nel torrente. La rappresentazione nella parte anteriore della Figura 12 è da considerare "schematica" perché tutto il flusso sembra avvenire nel piano del disegno. Cioè il flusso è bidimensionale con l'acqua che entra ed esce solo dal limite superiore, non muovendosi l'acqua dentro o fuori dal piano della pagina. In ambienti naturali, il flusso delle acque sotterranee è tridimensionale, come illustrato nello schema della Figura 13. Le linee tratteggiate blu nella Figura 13 collegano punti di uguale carico idraulico e le frecce blu piene rappresentano il flusso dell'acqua sotterranea che si muove lungo il gradiente del carico idraulico. Concettualmente la Figura 12 segue la linea bianca spessa che taglia perpendicolarmente rispetto al torrente nella Figura 13. Sebbene la Figura 12 indichi che il flusso è perpendicolare alle culminazioni del rilievo ed al torrente, in un sistema naturale il flusso non è perpendicolare ad essi come mostrato nella Figura 13. Cioè le componenti del flusso entrano dalle aree di monte ai piedi delle colline ed escono nelle aree di valle delle pianure.

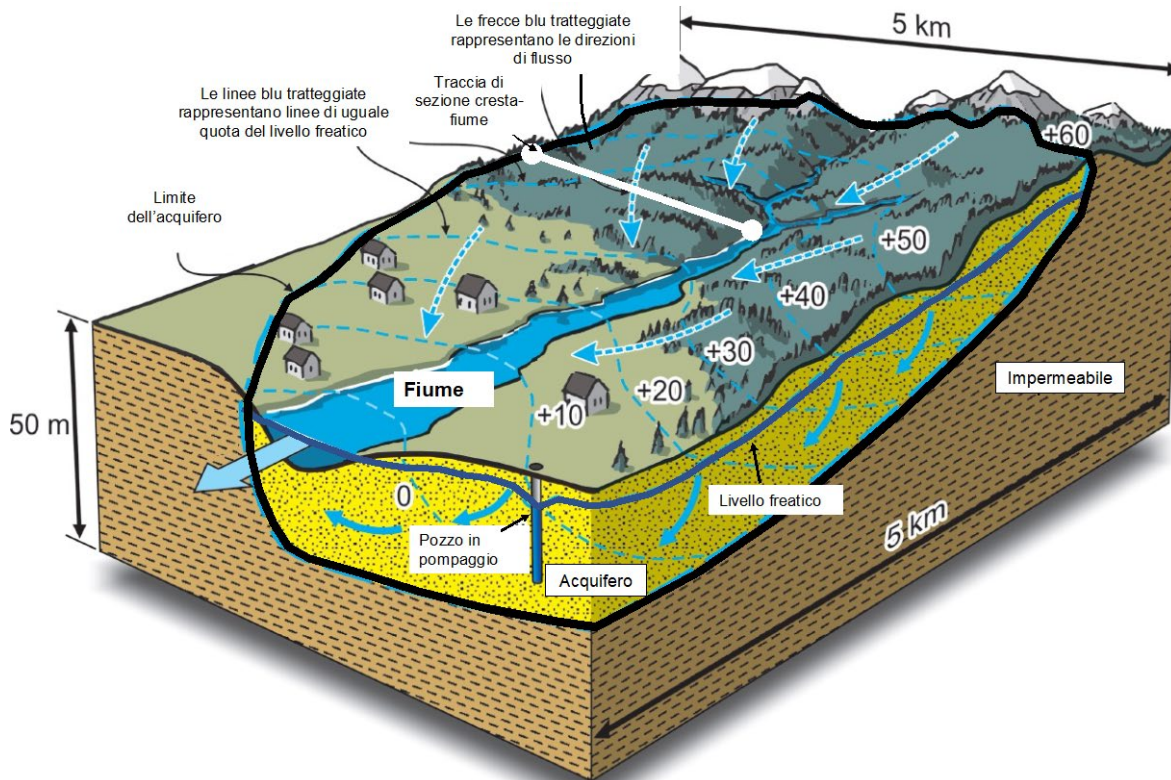


Figura 13 - Il flusso delle acque sotterranee è tridimensionale come mostrato in un bacino sotterraneo (delimitato in nero nella figura, con il livello freatico rappresentato da una linea spessa blu scuro, le linee sottili blu tratteggiate di uguale carico idraulico in tre dimensioni e le frecce blu tratteggiate che mostrano le direzioni del flusso dell'acqua sotterranea). Il diagramma bidimensionale della Figura 12 rappresenta il flusso lungo una sezione che è perpendicolare alle culminazioni del rilievo ed al corso d'acqua come indicato dalla traccia di sezione bianca. Sebbene la Figura 12 rappresenti l'andamento generale del flusso dalle culminazioni del rilievo al corso d'acqua, essa non considera il flusso in entrata e in uscita dalle facce anteriore e posteriore della sezione nel suo assetto tridimensionale, quindi la Figura 12 rappresenta uno schema di flusso concettuale delle acque sotterranee (modificato da Rivera, 2014).

Questo flusso laterale dalle colline alle valli è importante. Il livello freatico in una valle è più vicino alla superficie che negli altipiani e non sale e scende tanto quanto i livelli freatici nelle zone ad alta quota, perché è regolato dalla ricarica dell'intero versante sovrastante. Se non piove per molti giorni, le colline possono essere aride, ma le valli continuano a ricevere l'acqua sotterranea dagli altipiani, perché il flusso delle acque sotterranee è relativamente lento. In periodi secchi, l'acqua di ricarica delle colline di molti giorni fa, o anche di molti anni fa, è ancora "in viaggio" verso le valli. Pertanto, il recapito ritardato delle acque sotterranee dalle colline alle valli garantisce che le valli riceveranno l'acqua nei periodi secchi.

Di conseguenza, il sistema delle acque sotterranee è simile a un conto bancario, l'acqua viene immagazzinata al di sotto delle colline come "fondi in un conto" che invia costantemente "contanti" verso le valli, attraverso un lento "servizio postale", arrivando a valle quando non riceve "contanti da clienti locali". Pertanto, la valle ha un reddito costante, quindi è preparata per i periodi di magra. Questo è in parte il motivo per cui gli alberi nelle valli sono più grandi e più sani degli alberi sulle colline in località caratterizzate da lunghe stagioni secche.

4.2.1 Relazioni tra acque sotterranee e paesaggio

La profondità del livello freatico è in parte responsabile delle diverse specie vegetali che occupano posizioni diverse lungo i pendii da monte a valle, poiché solo le piante resistenti alla siccità possono vivere sulle colline nelle regioni aride e le piante tolleranti all'acqua vicino ai corsi d'acqua (Figura 14). Nelle aree di recapito di pianura con climi aridi, l'acqua viene persa in atmosfera per evapotraspirazione causando l'accumulo di sale. Questi ambienti sviluppano una vegetazione tollerante al sale.

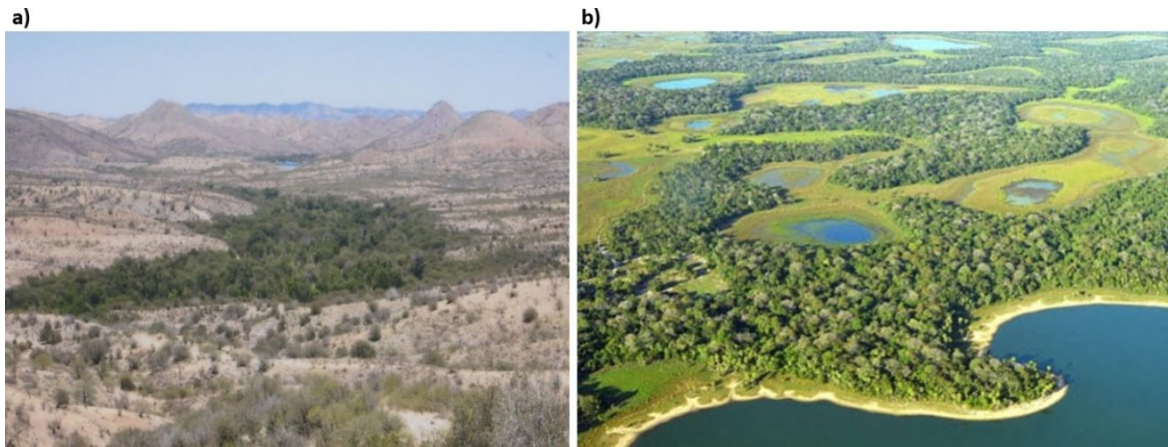


Figura 14 - La profondità del livello freatico può influenzare i tipi di vegetazione che crescono in un luogo. a) In un ambiente con stress idrico come l'Arizona, Stati Uniti (immagine a sinistra), gli alberi crescono lungo il corridoio del ruscello, dove il livello freatico è poco profondo; mentre sulle colline, dove il livello freatico è troppo profondo per essere raggiunto dalle radici delle piante, crescono arbusti ed erba del deserto (foto di The Old Pueblo, 2014). b) In luoghi con troppa acqua come le zone umide del Pantanal nel Mato Grosso do Sul, Brasile, gli alberi si sviluppano sulle colline, dove le loro radici hanno spazio per crescere nella zona insatura ricca di ossigeno sopra il livello freatico; mentre vicino alle rive del lago, il livello freatico è così vicino alla superficie topografica che le radici degli alberi non riescono a ricevere ossigeno sufficiente a causa della carenza di aria nei pori del suolo (foto da Wikimapia, 2020).

Il livello freatico si trova ovunque sotto di noi e quando gli esseri umani cambiano la forma del paesaggio, la vegetazione o drenano intenzionalmente le acque sotterranee per l'agricoltura e le costruzioni, si hanno variazioni della profondità del livello freatico. Ciò ha spesso conseguenze problematiche per gli esseri umani e i sistemi ecologici. Tuttavia, siamo in grado di prevedere le conseguenze prima di apportare modifiche, in modo da prendere decisioni consapevoli delle nostre azioni. A seconda delle conseguenze previste, potremmo decidere di non procedere o riprogettare le modifiche per ridurre gli effetti negativi.

La profondità del livello freatico può avere un forte impatto sul modo in cui il terreno risponde al calore. Ad esempio, nelle zone calde e aride dell'Australia, dove gli alberi di eucalipto sono la vegetazione autoctona, la posizione naturale del livello freatico è più profonda sotto la superficie rispetto a dopo che gli alberi di eucalipto sono stati disboscati. Ciò si verifica perché gli alberi consumano l'umidità del suolo catturando l'acqua infiltrata, con conseguente ricarica minima delle acque sotterranee. Dopo il disboscamento, le coltivazioni consumano meno acqua sotterranea, quindi la ricarica

aumenta ed il livello freatico risale. Quando il livello freatico è vicino alla superficie del suolo, l'acqua evapora lasciando le sostanze disciolte per formare precipitati salini che si accumulano nel terreno rendendolo inadatto alle colture. La salinizzazione del suolo è una causa di perdita di terreni coltivati ogni anno in tutto il mondo. In molte regioni agricole, la gestione dell'uso del suolo per evitare la salinizzazione è fondamentale per la produttività agricola.

Un altro esempio di influenza sul paesaggio della profondità del livello idrico è il verificarsi di incendi, come descritto da Elbein (2019) nel suo articolo sul National Geographic vincitore del Premio Pulitzer "I programmi di piantagione di alberi possono fare più danni che benefici". L'Autore spiega che un livello freatico poco profondo nelle zone umide può fare la differenza tra i normali incendi e gli eventi devastanti che causano una distruzione massiccia. Questo è stato il caso dell'incendio di Fort McMurray in Alberta, Canada, nel 2016, che è stato il più costoso incendio nella storia del Canada. Le paludi ricoperte di muschio, un tipo di zona umida nota come torbiera, coprono un'ampia parte del Canada settentrionale e della Russia. La torba è composta da materiale organico parzialmente decomposto come il muschio. Le torbiere contengono grandi quantità di carbonio che viene gradualmente sequestrato dall'atmosfera nel corso di migliaia di anni. Man mano che si forma la torba, l'area sostiene meno alberi tipici (abete rosso nel caso dell'Alberta). Con meno alberi, più ricarica raggiunge il livello freatico in modo che esso si avvicina alla superficie. Il livello freatico superficiale rende la torbiera resiliente agli incendi. Le torbiere sono generalmente caratterizzate da incendi a bassa intensità e sono in grado di recuperare il carbonio perso durante l'incendio in un periodo di tempo relativamente breve, perché il livello freatico superficiale impedisce al fuoco di bruciare in profondità la torba. Quando le torbiere sono state drenate allo scopo di creare una foresta di abeti rossi nell'area di Fort McMurray, si è verificato un cambiamento ambientale: gli alberi di abete rosso hanno utilizzato più acqua, il livello freatico si è abbassato, la torba meno profonda è stata sostituita da una specie di muschio più secco (accendendo invece di ritardare di fiamma), i grandi alberi sono diventati un enorme deposito di carburante, e poi è scoppiato l'incendio di Fort McMurray. Le torbiere pesantemente bruciate richiedono lunghi periodi di tempo per recuperare il carbonio rilasciato dal fuoco nell'atmosfera (Figura 15). I media hanno attribuito questo incendio agli eventi estremi della natura legati al cambiamento climatico, senza riconoscere che l'intervento umano nel sistema di flusso delle acque sotterranee poco profondo ha svolto un ruolo chiave nell'evento.

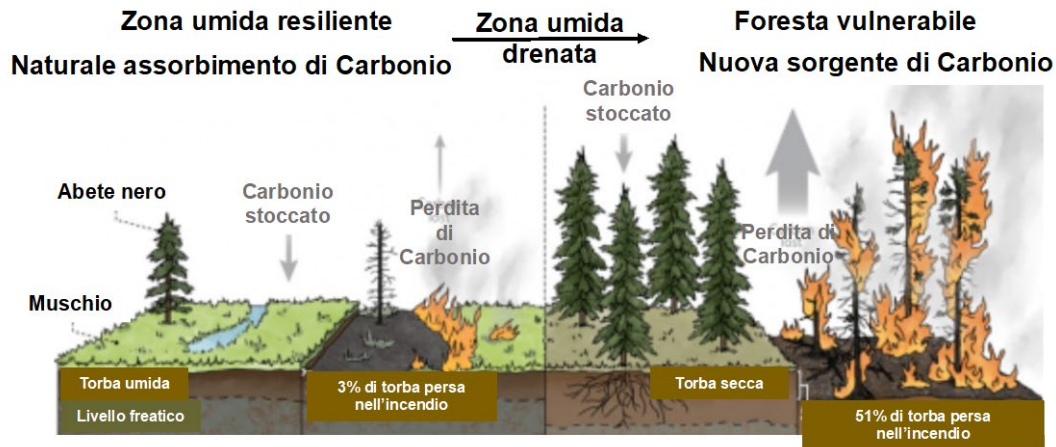


Figura 15 - Gli scienziati hanno studiato il paesaggio dopo l'incendio di Fort McMurray del 2016 e hanno scoperto che dove il livello freatico è stato abbassato sotto le torbiere dagli esseri umani, in modo da poter piantare una foresta di abeti rossi, l'incendio era più intenso e bruciava più in profondità, causando una grande perdita di carbonio che impiega migliaia di anni per immagazzinarsi (da Elbein, 2019; immagine Wilkinson, 2018).

4.2.2 Relazioni tra acque sotterranee e corsi d'acqua

Il movimento da monte verso valle delle acque sotterranee continua se il livello freatico al di sotto le colline è superiore al livello dell'acqua all'interno o al di sotto dei corsi d'acqua. Le sezioni dei corsi d'acqua che ricevono le acque sotterranee sono chiamate drenanti (o alimentate) (Figura 16a). Immaginando una zattera che galleggia lungo un torrente, i corsi d'acqua drenanti aumentano il volume d'acqua man mano lungo il percorso fluviale (diventando il fiume più ampio e/o più profondo e/o fluendo più velocemente). Questo è il principale meccanismo di recapito in superficie delle acque sotterranee. L'acqua che entra nel fiume dal sistema idrico sotterraneo sostiene il flusso di base del corso d'acqua. Dove il livello freatico è più profondo del livello idrico del corso d'acqua, l'acqua fluisce dal torrente nel sottosuolo. Le sezioni dei corsi d'acqua in cui l'acqua filtra nel sottosuolo sono chiamate alimentanti (o perdenti) (Figura 16b e c). Immaginando una zattera che galleggia lungo un torrente, i corsi d'acqua alimentanti trasportano un volume d'acqua decrescente, la loro portata diminuisce lungo il percorso (diventando il corso d'acqua meno profondo e/o più stretto e/o fluendo più lentamente) ed il letto del fiume può eventualmente diventare asciutto (Figura 16d). I corsi d'acqua che si seccano durante alcuni periodi dell'anno, come gli arroyos negli Stati Uniti sud-occidentali, sono chiamati torrenti intermittenti o effimeri. I corsi d'acqua drenanti per tutto l'anno, perché la ricarica delle acque sotterranee riesce a sostenere il deflusso superficiale anche durante i periodi secchi, sono chiamati corsi d'acqua perenni.

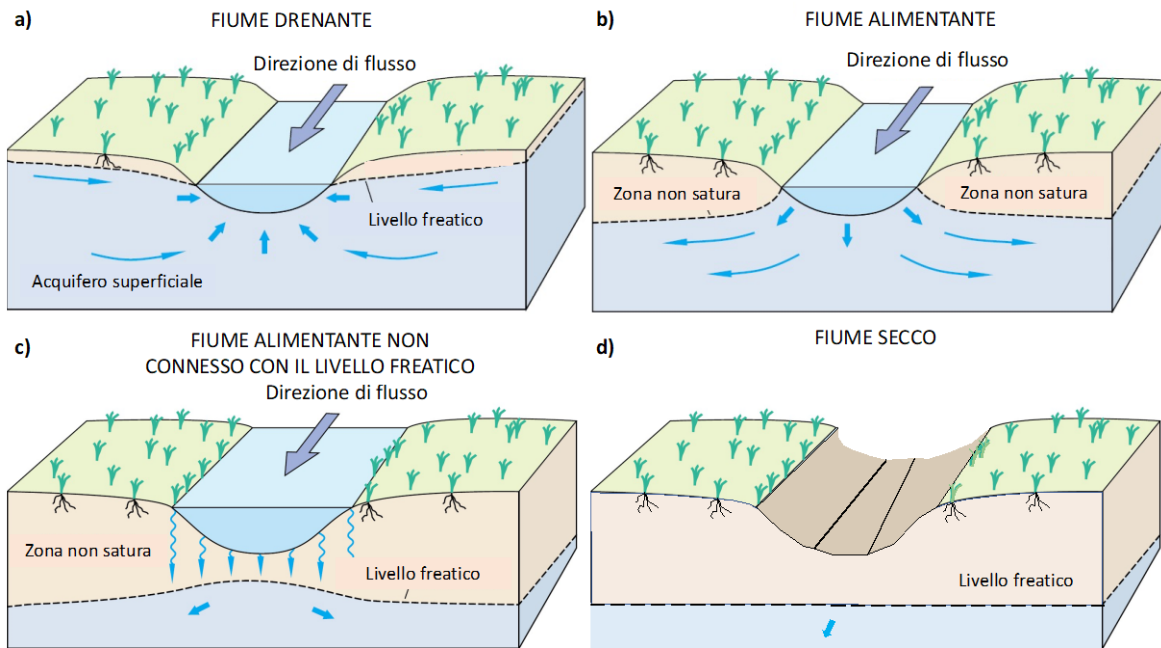


Figura 16 - Schemi di corsi d'acqua a) drenante, b) alimentante, c) alimentante non connesso con il livello freatico e d) asciutto (modificato da Winter et al., 1998).

L'acqua che scorre nei corsi d'acqua è dovuta a diverse componenti fornite da:

- precipitazioni che ruscellavano in superficie;
- acque di infiltrazione che hanno attraversato zone di suolo temporaneamente sature al di sopra del livello freatico (costituenti il deflusso ipodermico o deflusso rapido);
- acque sotterranee;
- attività antropica (principalmente flusso da fognature di acqua piovana, scarichi puntuali da industrie e impianti di trattamento delle acque e drenaggio agricolo).

Lo scarico delle acque sotterranee nei corsi d'acqua è la ragione principale per cui essi non si seccano nonostante giorni o mesi senza pioggia. Il flusso continua perché l'acqua ricaricata al sistema idrico sotterraneo in tempi passati e in aree distanti dal torrente scorre lentamente e costantemente verso il corso d'acqua.

Sebbene le proporzioni delle componenti naturali del flusso del torrente siano variabili a seconda delle locali condizioni climatiche e geologiche, globalmente circa la metà dell'acqua che scorre nei fiumi proviene dal recapito del flusso a lungo termine nella parte costantemente satura del sistema idrico sotterraneo e metà proviene dal ruscellamento superficiale o dal deflusso ipodermico. Alcuni eventi di ruscellamento interessano esclusivamente la superficie del suolo, sebbene la maggior parte implichi l'attraversamento della parte più superficiale del sottosuolo dell'acqua, spesso avviata nella zona vadosa attraverso zone temporaneamente sature sospese su strati a bassa permeabilità. La zona della frangia capillare vicino ai corsi d'acqua può fornire una componente di deflusso ipodermico, quando l'infiltrazione raggiunge la frangia capillare cambiando in questa zona

la pressione dell'acqua da negativa a positiva. In questo caso l'acqua contenuta nella frangia capillare viene mobilitata e si sposta rapidamente verso il corso d'acqua. Questo fenomeno è noto come effetto frangia capillare.

È utile notare che alcuni idrologi si riferiscono al flusso nei corsi d'acqua come ruscellamento, ma qui chiamiamo quel flusso portata del corso d'acqua; mentre il termine ruscellamento è riservato all'acqua piovana che si dirige verso i corsi d'acqua scorrendo sulla superficie del suolo o attraverso strati poco profondi di suolo temporaneamente saturo.

Un segmento di un corso d'acqua, come mostrato nella Figura 16, può drenare in un giorno o in una stagione e alimentare in un altro periodo, a seconda della quota relativa tra l'acqua nel fiume ed il livello freatico circostante. Le condizioni lungo il corso d'acqua possono variare molte volte tra quelle drenanti e quelle alimentanti. L'acqua che scorre in una sezione del torrente dipende da due condizioni. In primo luogo, dipende dalle precipitazioni e/o dallo scioglimento della neve, avvenuti forse molti giorni fa, nelle parti alte del bacino del torrente e poi confluenti verso il corso d'acqua. In secondo luogo, dipende dalla quota del livello freatico direttamente sotto il torrente. Il livello freatico al di sotto del torrente può essere alto a causa del forte flusso di acque sotterranee o può essere depresso a causa della siccità o dell'intenso uso da parte delle freatofite vicino al torrente. Pertanto, vicino al corso d'acqua, la quota dell'acqua del torrente e quella del livello freatico possono salire e scendere per motivi diversi e con tempi diversi, a seconda delle condizioni meteorologiche locali e regionali, del clima, della vegetazione e del terreno.

Lo scambio continuo, dinamico e bi-direzionale tra acque sotterranee e corpi idrici superficiali evidenzia la stretta connessione tra acque sotterranee e acque superficiali. In un momento una molecola d'acqua appartiene al serbatoio delle acque sotterranee e in un momento successivo appartiene al serbatoio delle acque superficiali, solo per tornare nuovamente nelle acque sotterranee. Apprezzare questa continuità tra acque superficiali e acque sotterranee è importante per la gestione delle nostre risorse idriche.

I corsi d'acqua alimentanti giocano un ruolo importante nella ricarica dei serbatoi idrici sotterranei nei bacini aridi. In molte regioni aride del mondo, i rilievi circostanti ricevono più precipitazioni delle valli, fornendo acqua ai torrenti di montagna. I letti dei torrenti montani sono spesso a quota più alta del livello freatico. Quando questi corsi d'acqua passano dalle montagne sopra i sedimenti del fondovalle asciutto ai piedi del pendio, perdono la loro acqua, ricaricando così le acque sotterranee come mostrato nella Figura 17. La mancanza di precipitazioni dirette nel fondovalle rende l'acqua sotterranea in tali aree preziosa. Il livello freatico superficiale in queste valli aride può dar luogo a torrenti drenanti, nonché sostenere la vita vegetale e animale che altrimenti sarebbe impossibile come mostrato nella Figura 17.

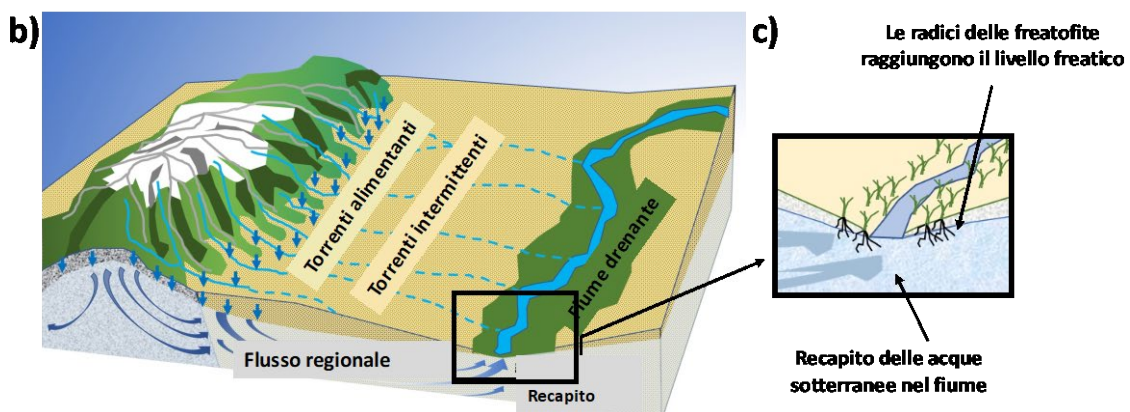
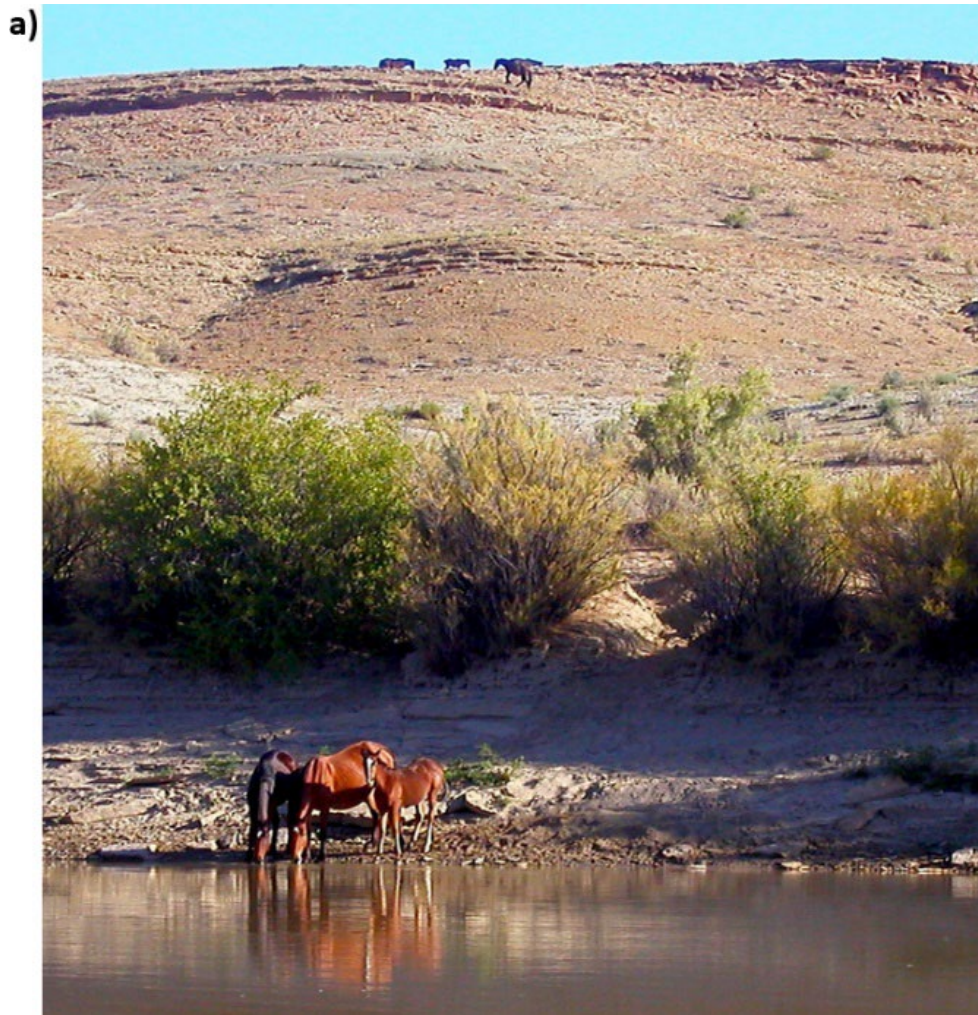


Figura 17 - Il livello freatico superficiale nelle valli aride è il risultato del recapito delle acque sotterranee ricaricate in aree distanti a quota elevata. Questo recapito di acque sotterranee sostiene la vita vegetale e animale che sarebbe altrimenti impossibile: a) il cedro salato spinge le radici abbastanza in profondità da attingere l'acqua direttamente dal livello freatico vicino al fiume ed i cavalli selvatici sono in grado di sopravvivere grazie al flusso regionale delle acque sotterranee nel Green River in Utah, Stati Uniti (foto di Leitz, 2009); b) i corsi d'acqua alimentanti vicino ai rilievi montuosi contribuiscono alla ricarica delle acque sotterranee che scorrono per lunghe distanze fino a scaricarsi nel fiume di questa regione arida; c) lo schema mostra il livello freatico vicino al fiume dal quale attingono acque le radici delle freatofite (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Gli esseri umani nelle zone aride hanno attinto da questo tipo di risorsa idrica sotterranea sin dall'antichità, scavando pozzi nelle montagne attraverso tunnel lunghi e a

bassa pendenza per convogliare l'acqua verso le pianure desertiche e sviluppando grandi civiltà basate sull'agricoltura (Figura 18). Queste strutture, conosciute come Qanat o Kariz, furono create per la prima volta in Medio Oriente circa 3000 anni fa.

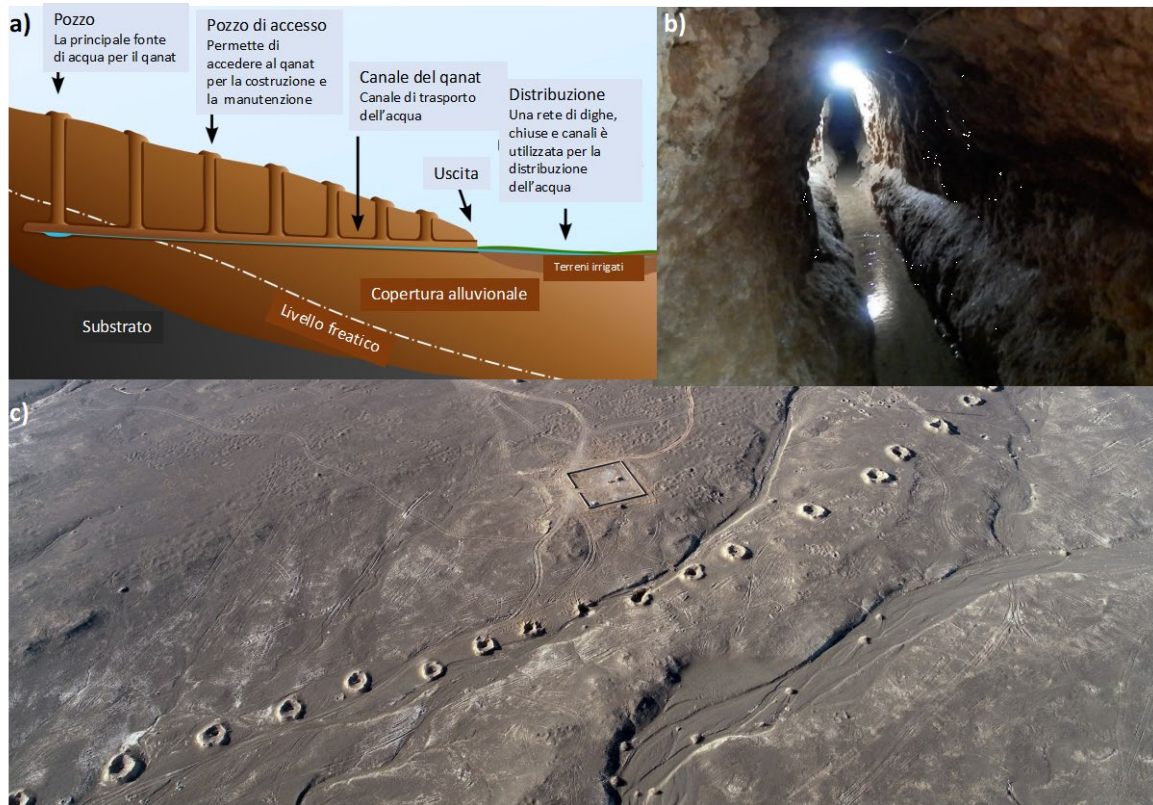


Figura 18 - Antiche culture costruiscono Qanat per portare l'acqua dalle montagne al deserto: a) schema di Qanat (Bailey, 2009); b) foto all'interno di un Qanat (Naeinsun, 2012); c) sistema Qanat a Xingjiang, Cina (panoramastock.com, 2020).

In alcune località, gli esseri umani derivano l'acqua direttamente dai corsi d'acqua, spesso per l'irrigazione. Quando l'acqua viene derivata da un corso d'acqua alimentante le acque sotterranee, la derivazione umana priva il sistema idrico sotterraneo della ricarica che avrebbe ricevuto dal corso d'acqua.

4.2.3 Modulazione della temperatura delle acque di superficie da parte delle acque sotterranee

L'arrivo ritardato della ricarica delle acque sotterranee nei corsi d'acqua fornisce una fonte affidabile di acqua per i corsi d'acqua drenanti del mondo. Questo è importante per la salute degli ecosistemi acquatici, perché i pesci e le piante acquatiche, che costituiscono la base della catena alimentare per molte specie animali, non sarebbero in grado di vivere in un torrente che diventa secco non appena smette di piovere. La costante alimentazione delle acque sotterranee nei corsi d'acqua regola anche la temperatura del flusso idrico superficiale, poiché l'acqua sotterranea è isolata dal riscaldamento e dal raffreddamento giornaliero (e stagionale) dell'atmosfera. Di conseguenza, la sua temperatura non varia tanto quanto la temperatura dell'aria come mostrato nella Figura 19.

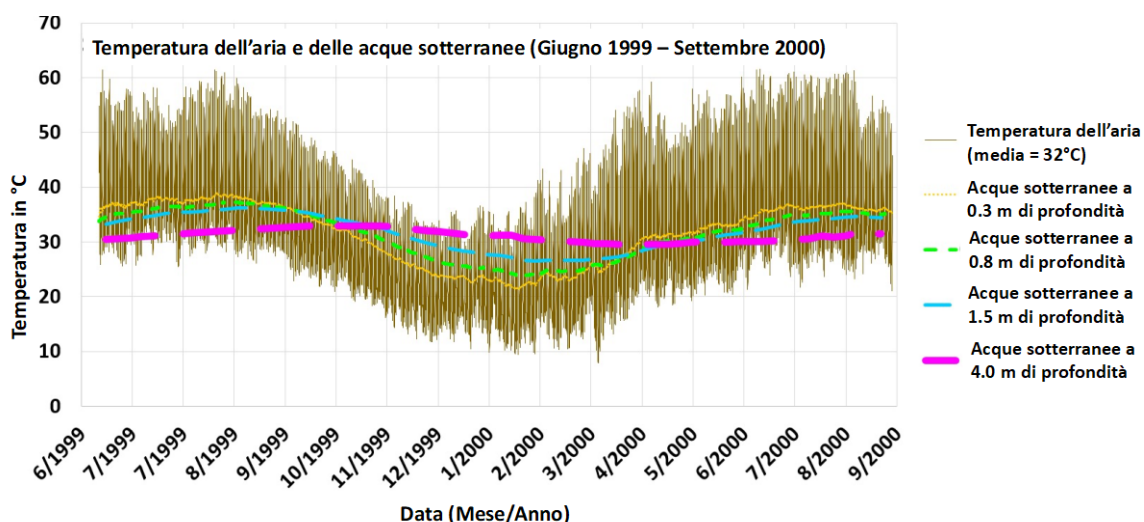


Figura 19 - La temperatura delle acque sotterranee poco profonde varia stagionalmente, ma non tanto quanto la temperatura dell'aria in superficie. L'entità della variazione della temperatura diminuisce con la profondità. Inoltre, con la profondità (linee dal giallo al verde, al blu e al rosa, ciascuna con un trattino più lungo), la temperatura di picco calda e fredda delle acque sotterranee mostra un ritardo maggiore rispetto alle temperature di picco dell'aria. A profondità intermedie (ad esempio 4 metri, linea rosa spessa) la temperatura delle acque sotterranee è abbastanza costante con un valore vicino alla temperatura media annuale dell'aria in superficie (32 °C in questa località). In generale, la temperatura delle acque sotterranee più profonde di circa 10 metri è superiore alla temperatura media dell'aria, perché esse sono riscaldate dall'energia geotermica emanata dal nucleo della Terra (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Pertanto, l'acqua sotterranea che ha recapito in un corso d'acqua è più fredda dell'acqua del corso d'acqua in estate e più calda in inverno, come illustrato nella Figura 20. L'acqua sotterranea più calda sotto il corso d'acqua impedisce il congelamento del fondo del fiume. Ancora una volta, questo è importante per i pesci e le altre forme di vita acquatica, molte delle quali sopravvivono solo in un intervallo ristretto di temperatura. L'acqua sotterranea che filtra attraverso il fondo di un ruscello o di un lago può contenere ossigeno e quindi essere favorevole alla deposizione delle uova da parte dei pesci, oppure l'acqua può essere priva di ossigeno (anossica) e quindi sfavorevole per i pesci. Possono svilupparsi condizioni anossiche a causa di cambiamenti nell'uso del suolo nelle aree di ricarica come compattazione del suolo, pavimentazione o smaltimento di rifiuti organici.

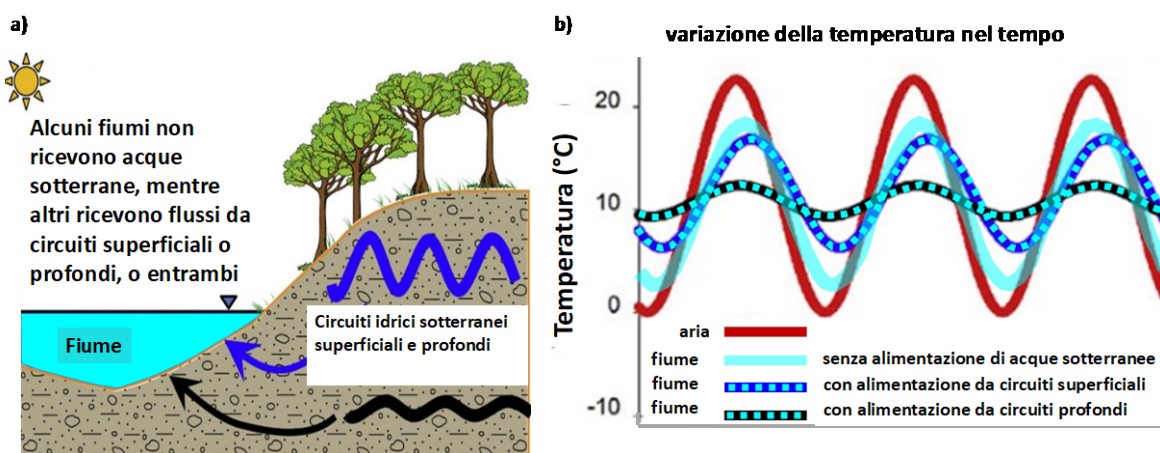


Figura 20 - Schema del rapporto tra temperatura dell'aria, delle acque superficiali e di quelle sotterranee: a) alcuni corsi d'acqua non ricevono afflusso di acque sotterranee, altri ricevono afflussi di acque sotterranee poco

profonde o afflussi di acque sotterranee profonde, o entrambi; b) la fluttuazione della temperatura dell'aria (linea rossa) è più significativa di quella dell'acqua; in un corso d'acqua non alimentato da acqua sotterranea, si ha una fluttuazione leggermente attenuata della temperatura (linea azzurra), rispetto alla temperatura dell'aria; in un corso d'acqua alimentato da acque sotterranee poco profonde, si hanno fluttuazioni di temperatura meno evidenti (linea tratteggiata blu scuro); infine in un corso d'acqua alimentato da acque sotterranee profonde, le fluttuazioni di temperatura sono ancora più attenuate (linea tratteggiata blu chiaro e nero) (modificata da Briggs et al., 2018).

4.2.4 Connessione tra acque sotterranee e sorgenti

Le sorgenti sono alimentate dal recapito di acqua sotterranea. Esse si ritrovano dove la superficie piezometrica interseca la superficie topografica. Possono formarsi in una depressione superficiale lungo un pendio che interseca il livello freatico, come in Figura 21a, oppure possono formarsi dove un'unità geologica di permeabilità inferiore sostiene l'acqua al di sopra, come illustrato in Figura 21b.

Le sorgenti rappresentano una parte importante della storia dell'umanità, ed oggi forniscono acqua potabile a più di cento milioni di persone nonché alle compagnie di imbottigliamento d'acqua. Enormi sorgenti rifornivano di acqua gli acquedotti dell'antica Roma ed ancora oggi forniscono acqua a Roma. Le Oasi (sorgenti nel deserto) sono state la principale fonte di acqua lungo la maggior parte della Via della Seta, rotta commerciale tra Cina ed Europa. La Via della Seta Settentrionale attraversava il Deserto del Badain Jaran in Cina (il quarto deserto al mondo per estensione) dove, ancora oggi, sono presenti oltre 100 laghi alimentati da acqua sotterranea che rappresentano sorgenti annidate tra le più grandi dune di sabbia del mondo (Figura 22 e Figura 23). Questi laghi provvedono al sostentamento delle oasi vitali e dell'ecologia nel deserto. Analogamente, la convergenza di lunghi percorsi di flusso sotterraneo verso la Rift Valley dell'Africa orientale, ed il recapito di tale acqua nella valle in forma di sorgenti, è stato ipotizzato essere il sistema di supporto alla vita di società dei primi antenati umani a fronte di siccità secolari.

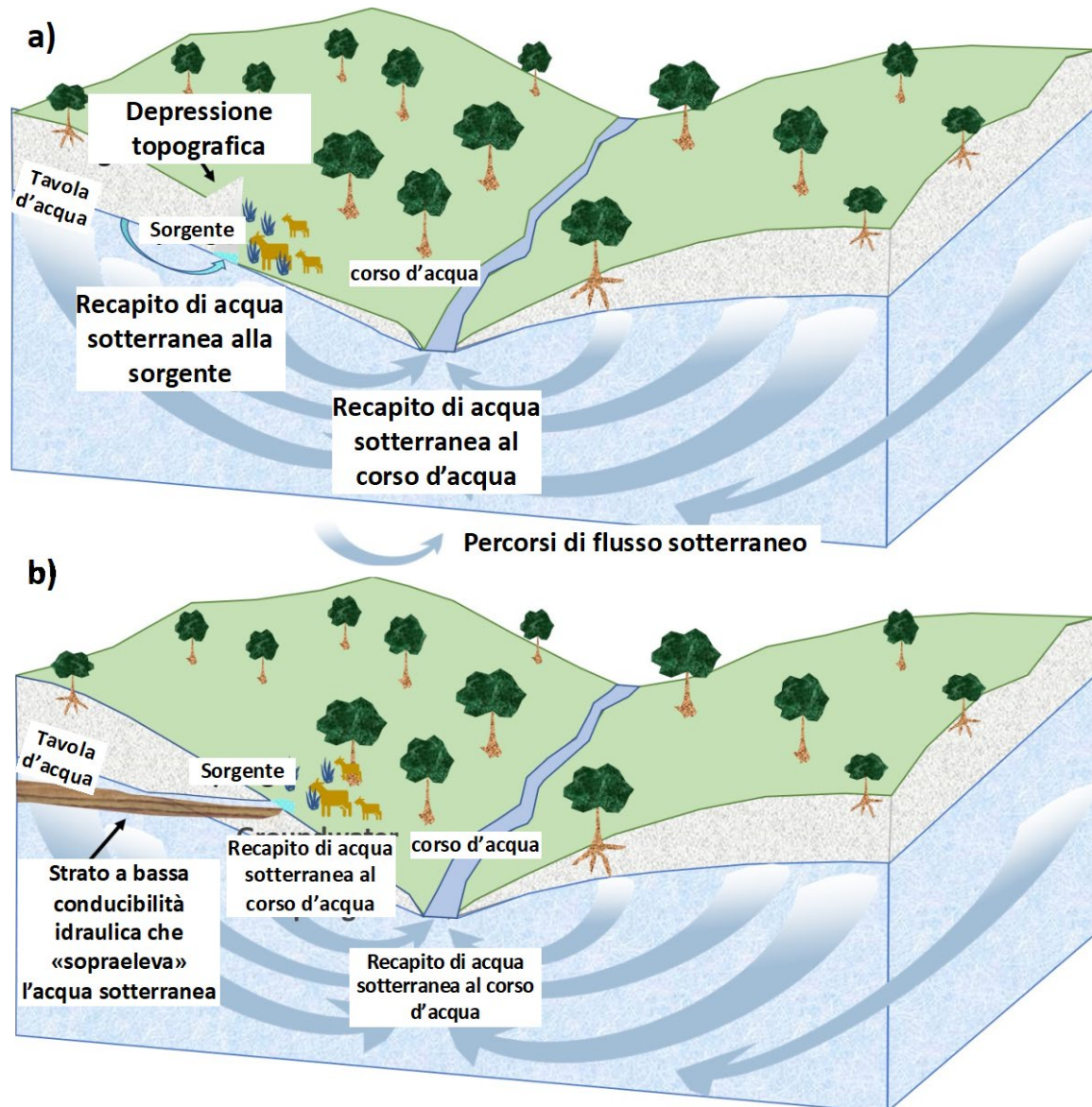


Figura 21 - Le sorgenti si ritrovano dove la superficie piezometrica interseca la superficie topografica: a) in corrispondenza di una depressione topografica; oppure, b) dove una formazione geologica poco permeabile che sostiene l'acqua sotterranea affiora in superficie (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

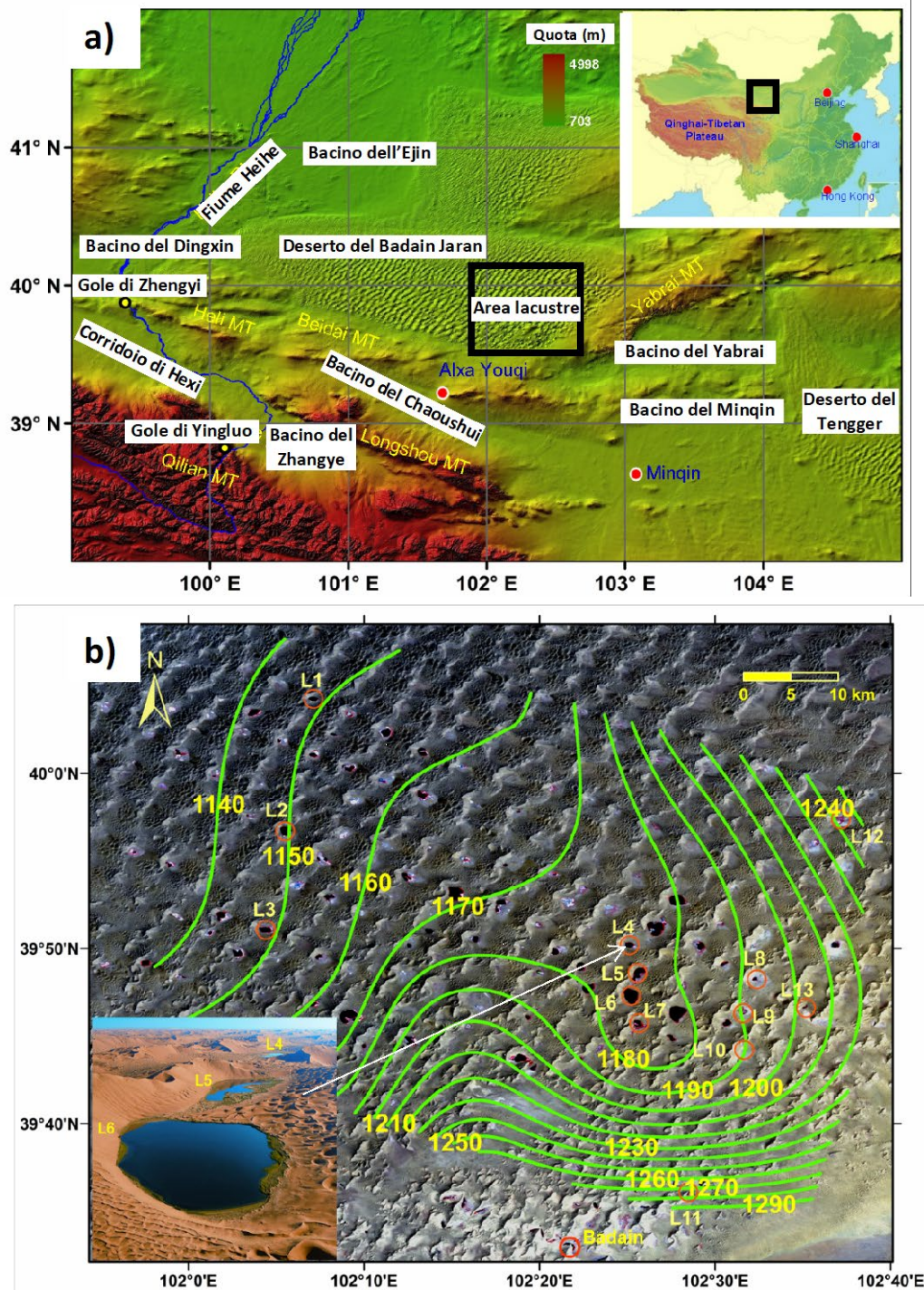


Figura 22 - Sorgenti di acqua sotterranea in forma di laghi tra le dune di sabbia più alte del mondo nel Deserto del Badain Jaran in Cina. Le acque di questi laghi spaziano da dolci ad estremamente saline e mantengono le oasi vitali e l'ecologia del deserto. a) Collocazione del Deserto del Badain Jaran ed area dei laghi (Jiao, 2015); (b) immagine da Landsat Thematic Mapper dell'area che comprende la maggior parte dei laghi nel deserto, catturata il 24 maggio 2003, con indicazione di linee isopiezometriche ogni 10 m stimate tramite dati ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation satellite) (Jiao, 2015).



Figura 23 - Fotografia di uno dei laghi tra le dune di sabbia del Deserto del Badain Jaran in Cina (Jiao, 2017).

L'acqua recapitata da alcune sorgenti è molto più calda rispetto alle acque superficiali nella stessa zona. Nel contesto di queste sorgenti termali, l'acqua sotterranea scorre ad una profondità tale da essere scaldata da rocce sotterranee fuse associate ad attività vulcaniche o, in alternativa, da rocce profonde a loro volta riscaldate tramite il calore che per conduzione viaggia dal nucleo terrestre in raffreddamento, verso la superficie del pianeta. La densità dell'acqua diminuisce all'aumentare della temperatura, così che l'acqua riscaldata migra verso l'alto e, quando raggiunge la superficie, si manifesta come sorgente termale. Le sorgenti termali sono generalmente collocate nei pressi di attività ignea geologicamente recente, come suggerito dal frequente ritrovamento delle stesse nelle porzioni tettonicamente attive del Nord America occidentale (Figura 24).

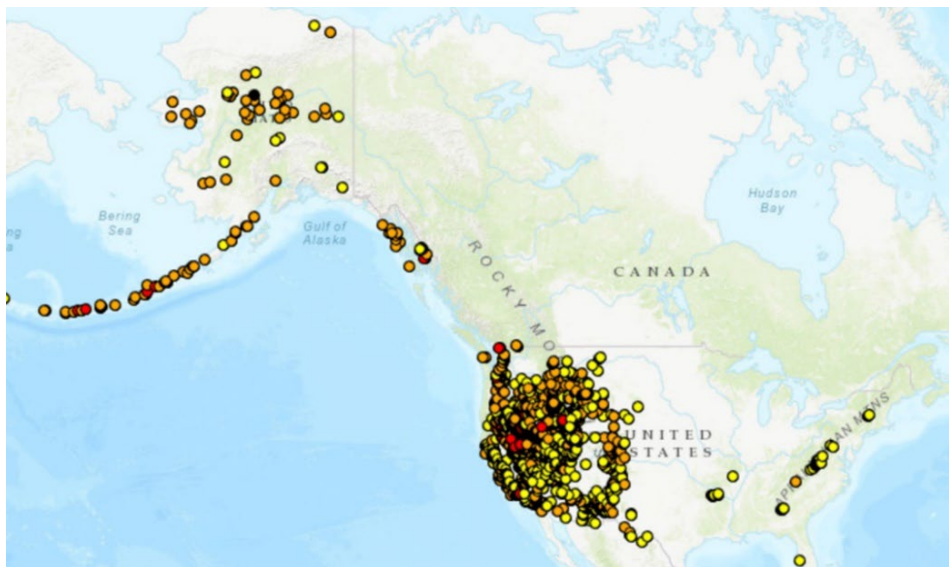


Figura 24 - Le sorgenti termali si ritrovano generalmente nei pressi di attività ignea geologicamente recente, come indicato da questa mappa di Google Earth delle sorgenti termali in Nord America (mappa tratta da USNOAA, 2019; dati provenienti da Berry et al., 1980).

In alcuni casi l'acqua riscaldata in profondità segue un percorso di flusso preferenziale verso la superficie attraverso una zona di fratture o una faglia, formando un geyser che periodicamente eietta un grande volume d'acqua. L'acqua raffreddata dall'eiezione rifluisce nel serbatoio sotterraneo, dove viene nuovamente scaldata diventando meno densa e maggiormente pressurizzata a causa del riscaldamento dei gas disciolti. Ad un certo punto, il peso della colonna d'acqua sovrastante diventa insufficiente a trattenere l'acqua riscaldata, che viene espulsa. Questi elementi (Figura 25) sono meno comuni rispetto alle sorgenti termali.



Figura 25 - Il celebre geyser Strokkur in Eruzione in Islanda (Tille, 1996).

4.2.5 Acque sotterranee e pozzi

L'uomo introduce un altro fattore nel dinamico interscambio tra acqua sotterranea e superficiale, che è il pompaggio di acqua da sottosuolo attraverso l'utilizzo di pozzi. Il pompaggio abbassa i livelli piezometrici nei dintorni del pozzo, causando un flusso d'acqua dal bacino sotterraneo verso il pozzo. Questo provoca un abbassamento dei livelli piezometrici che si estende fino ad una certa distanza dai pozzi, dando origine ad una superficie piezometrica a forma di cono attorno al pozzo. La differenza di livello piezometrico prima e dopo il pompaggio è chiamata abbassamento e la superficie piezometrica a cono è chiamata cono di depressione o cono di abbassamento (Figura 26a e b). Se il pompaggio prosegue nel tempo, il cono di depressione cresce finché i flussi in ingresso si equilibrano con il volume pompato al pozzo. Quando il cono di abbassamento raggiunge un corso d'acqua, l'acqua superficiale si infiltra attraverso il letto fluviale fino a raggiungere il sistema sotterraneo (Figura 26c).

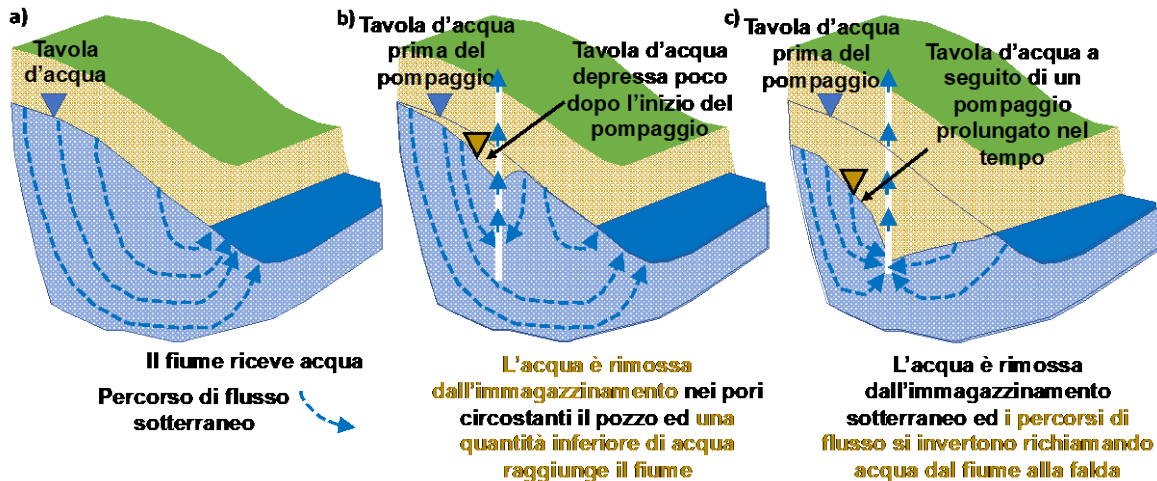


Figura 26 - Illustrazione schematica che mostra un pompaggio da un pozzo vicino a un corso d'acqua che causa la depressione del livello freatico: a) prima del pompaggio; b) poco dopo l'inizio del pompaggio l'acqua arriva al pozzo dall'immagazzinamento sotterraneo e si osserva una diminuzione del flusso verso il fiume; c) al procedere del pompaggio, la superficie piezometrica viene depressa al punto da richiamare flusso dal fiume, causando una diminuzione della portata del nel corso d'acqua ed una diminuzione del livello del pelo libero dell'acqua (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

L'acqua sotterranea, a differenza della maggior parte delle risorse estraibili, può essere rinnovabile. Per questa ragione, è possibile sviluppare un approvvigionamento di acqua sotterranea con una durata indefinita, il che rappresenta un risultato sociale altamente auspicabile. L'acqua sotterranea, d'altra parte, è una risorsa condivisa in cui l'utilizzo da parte di un soggetto può essere di grande beneficio al soggetto stesso, ma dannoso ad altri soggetti e/o alla variabilità della risorsa sul lungo termine. Per questo motivo, una gestione sociale è necessaria per scongiurare la "tragedia dei beni comuni" (la situazione in cui l'azione collettiva di utilizzatori individuali di una risorsa condivisa, che agiscono secondo interessi propri, produce un risultato contrario al bene comune di tutti gli utilizzatori depauperando o guastando la risorsa condivisa). Il termine sostenibilità è stato proposto per questo tipo di gestione sociale. La sostenibilità nell'ambito dello sfruttamento dell'acqua sotterranea è spesso interpretata come un prelievo di acqua sotterranea inferiore rispetto alla ricarica naturale. Questo approccio gestionale viene chiamato produttività sicura (safe yield). Ciononostante, l'espansione del cono di depressione può causare una diminuzione dell'evapotraspirazione, indurre infiltrazione da corpi d'acqua superficiali adiacenti ed intercettare acqua che naturalmente avrebbe raggiunto punti di recapito. Se il prelievo di acqua sotterranea è controilanciato da queste sorgenti, viene raggiunto un nuovo equilibrio e si parla di produttività sostenibile (sustained yield). Una gestione basata sulla produzione sostenibile ignora gli impatti del prelievo di acqua sotterranea che sono connessi al medesimo sistema attraverso il più ampio ciclo idrologico. Una modifica ad un elemento del ciclo idrologico crea impatti su altri elementi del ciclo ed a causa di questo può avere implicazioni di tipo culturale o legale.

Le risorse idriche sotterranee non possono essere mantenute se il prelievo di acqua supera la ricarica sotterranea perché in questo caso i livelli piezometrici decrescono, e, nel

tempo, l'acqua immagazzinata nei pori degli acquiferi e nei corsi d'acqua della stessa area non sarà più disponibile. Se l'aliquota di acqua pompata supera l'aliquota di ricarica, il cono continua ad espandersi e ad approfondirsi finché l'acquifero cessa di essere una valida risorsa idrica. Un esempio è il pompaggio eccessivo di acqua sotterranea dall'acquifero di Ogallala in Kansas, Stati Uniti. Questo prelievo superiore alla ricarica è noto come impoverimento della risorsa idrica sotterranea, estrazione di acqua sotterranea, o sovra sfruttamento di acqua sotterranea. Il sovra utilizzo di acqua sotterranea in Kansas ha causato un declino dei livelli piezometrici tale per cui i corsi d'acqua in un'area di circa 20 milioni di ettari si sono completamente seccati, come mostrato in Figura 27.

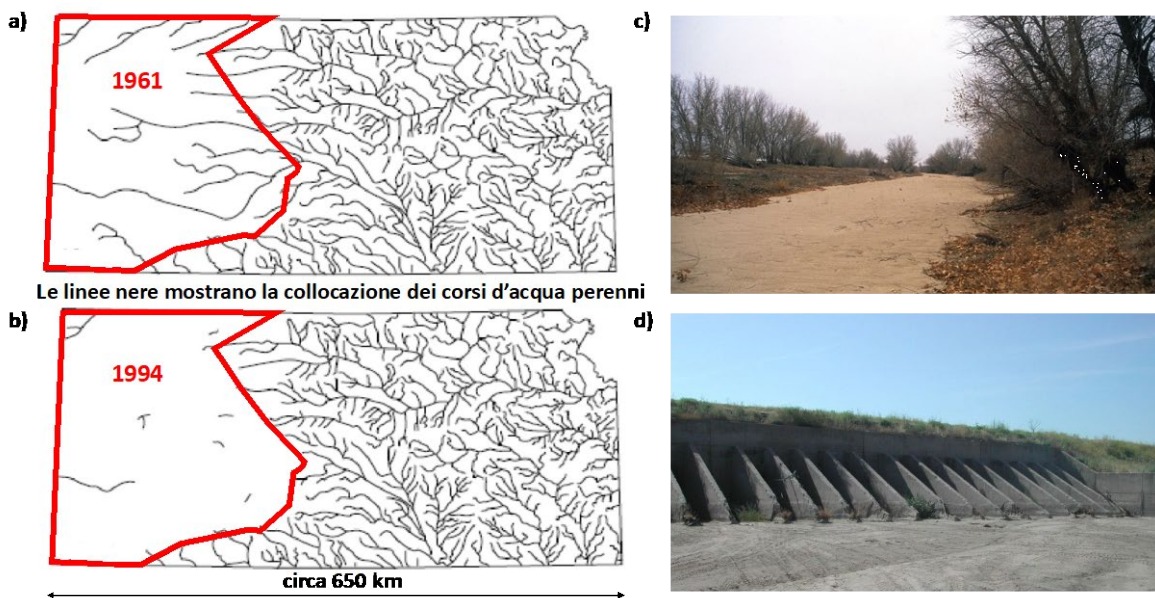


Figura 27 - Il pompaggio di acqua sotterranea ha rimosso acqua dall'immagazzinamento nell'acquifero di Ogallala al di sotto del Kansas, negli Stati Uniti, abbassando la superficie piezometrica ad un livello tale da causare una modifica di: a) corsi d'acqua perenni nel 1961 (KGS, 1998) che b) si sono completamente seccati entro il 1994 (KGS, 1998), come mostrato nelle immagini c) (Charlton, 2018) e d) (USNWS, 2012).

A volte l'azione umana complica ulteriormente il ciclo idrologico esportando acqua da un luogo all'altro. Raramente questo implica la movimentazione di acqua attraverso tubature che trasferiscono la risorsa da un bacino di drenaggio ad un altro, mentre più spesso gli uomini trasportano acqua "virtuale". L'acqua virtuale è l'acqua contenuta in un prodotto che arriva in un paese dopo essere stata coltivata, imbottigliata o prodotta in un altro paese, utilizzando acqua pompata in quel paese.

4.3 La visione a scala regionale

Zoomando ulteriormente indietro (Figura 28), si possono identificare unità geologiche tridimensionali, di estensione regionale, spesso stratificate, che contengono sistemi di flusso sotterraneo. La stratificazione geologica avviene perché: 1) i sedimenti sono depositi ad opera dell'acqua o del vento; e 2) le rocce sedimentarie, che occupano circa il 73 per cento della crosta continentale superiore, si consolidano mantenendo la loro struttura stratificata

originaria. Questa struttura stratificata è significativa poiché sia il volume di immagazzinamento sotterraneo che la propensione al flusso sotterraneo variano a seconda della porosità e permeabilità degli strati, dando origine ad una sequenza di acquiferi ed unità confinanti.

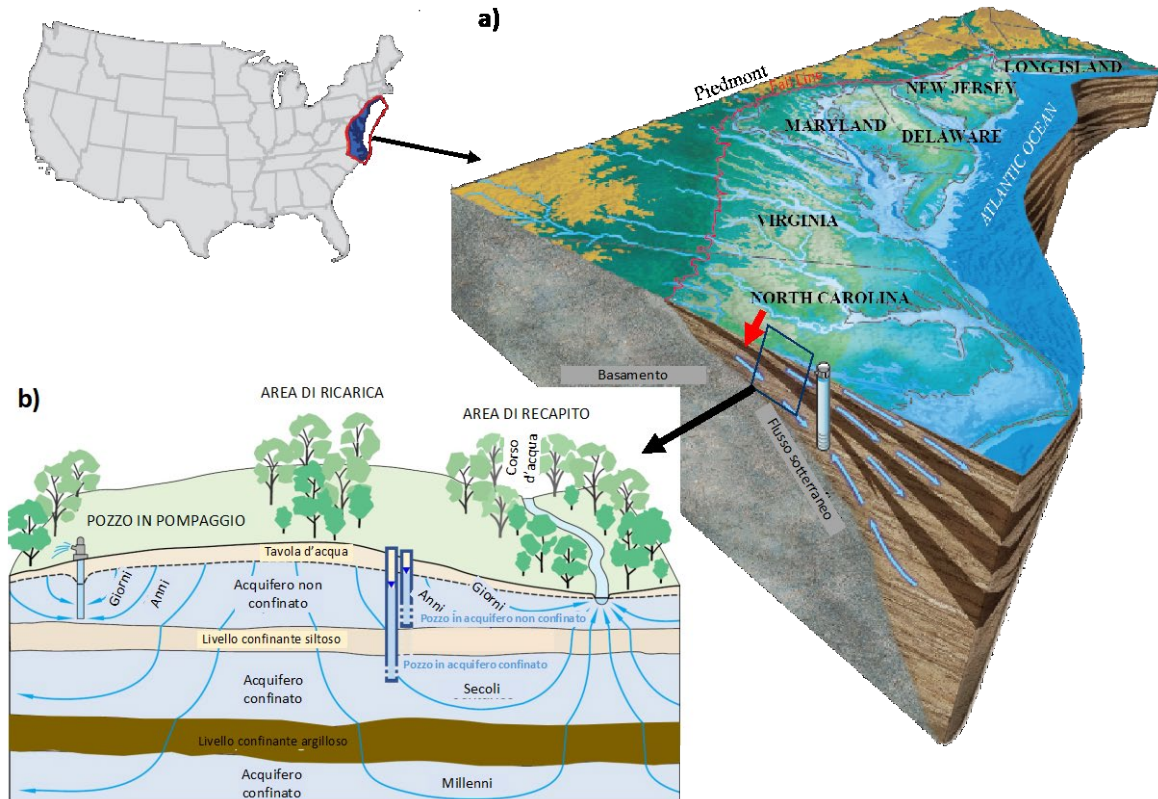


Figura 28 - Visione alla scala regionale di sistemi di flusso sotterraneo. a) la piana medio-Atlantica di sedimenti costieri negli Stati Uniti, che immerge verso mare (adattato da USGS, 2019b), con una finestra di dettaglio su; b) gli acquiferi locali che costituiscono una piccola parte del più ampio sistema di flusso sotterraneo e la stratificazione tra acquiferi ed unità confinanti (Winter et al, 1998, a sua volta modificato da Heath 1983).

4.3.1 Acquiferi ed unità confinanti

Durante la perforazione di un pozzo, ad un certo punto si intercettano condizioni sature. Questa è la collocazione del livello freatico, che corrisponde al tetto della zona satura ed al tetto di un acquifero non confinato. In questo caso, l'acqua sotterranea è immagazzinata in un acquifero non confinato, etichettato in Figura 28 come l'acquifero immediatamente al di sotto della superficie topografica. Al procedere della perforazione a profondità maggiori, tipicamente si incontra il tetto del primo strato confinante (Figura 28b). Se il pozzo venisse rivestito con un tubo in modo che l'acqua sotterranea dell'acquifero non confinato fosse impossibilitata a filtrare all'interno del pozzo, ci ritroveremmo con un tubo vuoto con del limo fangoso al letto. Al procedere della perforazione verso il basso, attraverso l'unità confinante, l'acqua non è in grado di filtrare all'interno del pozzo ad una velocità sufficiente da riempire il tubo poiché l'unità

confinante è costituita da limo o argilla a bassa permeabilità. Ad un certo punto, la perforazione raggiunge la base dell'unità confinante ed entra nello strato sabbioso sottostante. A quel punto, l'acqua entra velocemente nel foro e il livello piezometrico sale fino ad una quota che è più alta del tetto dell'unità sabbiosa sottostante. Questa unità sabbiosa costituisce un altro acquifero, poiché è porosa e permeabile, ma in questo caso il livello piezometrico nell'acquifero è più alto del tetto dell'acquifero stesso poiché l'acqua è sotto pressione, così che l'unità viene chiamata acquifero confinato o artesiano (Figura 28b). È confinato nel senso che l'acqua sotterranea viene trattenuta all'interno dell'acquifero per azione del limo sovrastante. I livelli confinanti non sono molto permeabili e l'acqua si muove lentamente attraverso di essi, così che una pressione dell'acqua elevata viene mantenuta nell'unità confinata sottostante. Quando il pozzo viene perforato attraverso un'unità confinante, l'acqua pressurizzata contenuta nell'acquifero confinato fluisce verso l'alto nel rivestimento del pozzo fino a raggiungere il livello del carico idraulico dell'acquifero confinato (la Figura 29 mostra un dettaglio dei pozzi nell'acquifero confinato e non confinato). Al contrario, il livello freatico nell'acquifero superiore non è confinato da un livello a bassa permeabilità sovrastante, e dunque l'acqua sale nel pozzo di questo acquifero non confinato fino al livello freatico. L'acquifero non confinato è anche chiamato acquifero libero poiché contiene al suo interno un livello freatico crescente e calante. Il livello dell'acqua più alto nel pozzo dell'acquifero superficiale in Figura 29 rispetto al livello più basso del pozzo nell'acquifero collocato al di sotto dell'unità confinante, indica che in quest'area l'acqua deve scorrere verso il basso attraverso l'unità confinante.

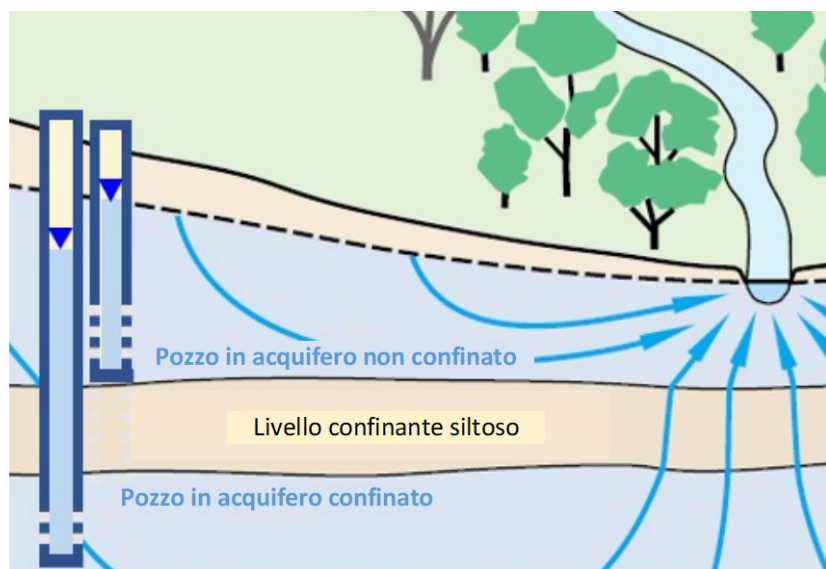


Figura 29 - Dettaglio sui pozzi mostrati in Figura 28b. Le linee tratteggiate indicano sezioni "filtrate" dei pozzi, attraverso cui l'acqua dalla formazione può entrare nel pozzo. L'acqua nel pozzo dell'acquifero non confinato risale al livello freatico, mentre il livello piezometrico nel pozzo dell'acquifero confinato risale al di sopra del tetto dell'acquifero a causa della pressione mantenuta dall'unità confinante (adattato da Winter et al., 1998, modificato a sua volta da Heath, 1983).

Per investigare le cause della pressione a cui è sottoposta l'acqua sotterranea nell'acquifero confinato, basta fare uno zoom all'indietro dalla Figura 28b ed arrivare alla visione più allargata mostrata in Figura 28a, dove diventa evidente che la sovrapposizione di acquiferi ed unità confinanti è una piccola parte di un più ampio sistema idrico sotterraneo. I livelli alternati di sabbia, limo ed argilla immergono dolcemente verso il mare. Questa struttura geologica con limi e argille fini interposti a materiali più grossolani come sabbie e ghiaie, è tipica delle piane costiere di tutto il mondo. La visione più allargata rivela che, spostandosi verso terra, l'acquifero confinato inclina verso l'alto (verso sinistra in Figura 28a) e ad un certo punto intercetta la superficie topografica. In questa zona, demarcata con la freccia rossa in Figura 28a, l'acquifero non è più confinato poiché il sovrastante strato di limo non è presente. L'acquifero diventa quindi non confinato e la ricarica da precipitazione si infila fino al suo livello freatico. Dal momento che questa zona di ricarica è a quota più elevata rispetto al luogo in cui era stato scavato il pozzo, questa eccedenza di quota si traduce in peso dell'acqua (pressione) che si trasmette verso il basso fino a luogo in cui era stato perforato l'acquifero confinato. Questo è parzialmente analogo al sistema di approvvigionamento di acqua in una piccola cittadina con un'alta torre di acquedotto dove il carico idraulico dell'acqua è più alto nella torre, facendo sì che l'acqua scorra verso tutte le case della città (Figura 30). Nonostante le tubature per l'approvvigionamento siano al di sotto del livello stradale, quando un rubinetto viene aperto al secondo piano di una casa, l'acqua sgorga fuori perché il livello dell'acqua nella torre è più alto rispetto a quello del rubinetto nella casa.

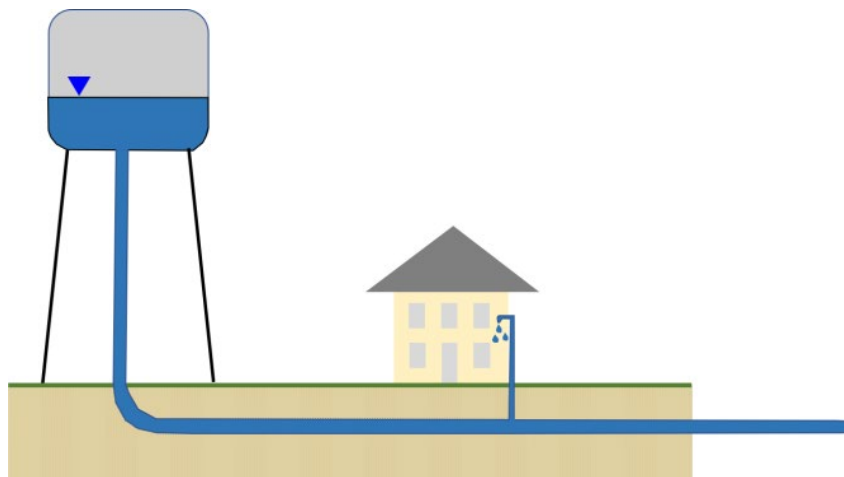


Figura 30 - Una torre di acquedotto più alta di una casa fornisce un'elevata pressione dell'acqua ai rubinetti, nonostante le tubature dell'acquedotto siano al di sotto del livello stradale (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Si è detto che la torre d'acquedotto è "parzialmente analoga" al sistema idrico sotterraneo perché, a differenza del sistema di flusso sotterraneo, le tubature per l'approvvigionamento d'acqua non sono riempite di materiale poroso. Comparando le due situazioni, l'acqua perde sostanzialmente più energia fluendo da un punto ad un altro attraverso un materiale poroso rispetto che in una tubatura aperta. In un sistema di flusso

sotterraneo, anche l'acquifero non confinato è in pressione ad una certa profondità in aree in cui l'acqua sotterranea fluisce verso l'altro raggiungendo corsi d'acqua. Inoltre, un pozzo aperto solo nella porzione più profonda dell'acquifero può presentare un livello piezometrico non solo più alto del livello freatico, ma a volte più alto anche della superficie topografica, così che l'acqua fluisce fuori dal pozzo senza l'utilizzo di una pompa. Un pozzo che presenta un livello dell'acqua più elevato della superficie topografica è detto pozzo fluente. I pozzi fluenti possono essere associati sia ad acquiferi non confinati che confinati.

Un celebre pozzo fluente artesiano è stato perforato in un acquifero con acqua sotterranea ad elevata pressione nel 1888 a Woonsocket, in South Dakota, Stati Uniti, causando un'"eruzione d'acqua" (Figura 31a). La pressione era creata dall'acqua che ricaricava la zona affiorante dell'acquifero del Dakota al margine occidentale in Figura 31b, per poi fluire attraverso l'acquifero del Dakota al di sotto scisti a bassa permeabilità che impedivano un rilascio di pressione dovuto a fuoriuscite di acqua dall'acquifero lungo il percorso di flusso. Quando il pozzo di Woonsocket fu perforato nell'acquifero (rappresentato dalla linea rossa nel lato orientale della Figura 31b), l'acqua eruttò fuori con una portata elevata (Figura 31a). Nel corso del tempo, il volume di acqua immagazzinata nell'acquifero è diminuito così come la pressione, fino al punto che il pozzo ha cessato di essere un pozzo fluente (questo è accaduto quando il livello dell'acqua nel pozzo è sceso al di sotto della superficie piezometrica). Dopo quel momento, è stata necessaria una pompa per prelevare acqua dal pozzo. I pozzi artesiani fluenti erano comuni in molte parti del pianeta, ma sono ora meno frequenti poiché il pompaggio ha ridotto la pressione dell'acqua negli acquiferi.

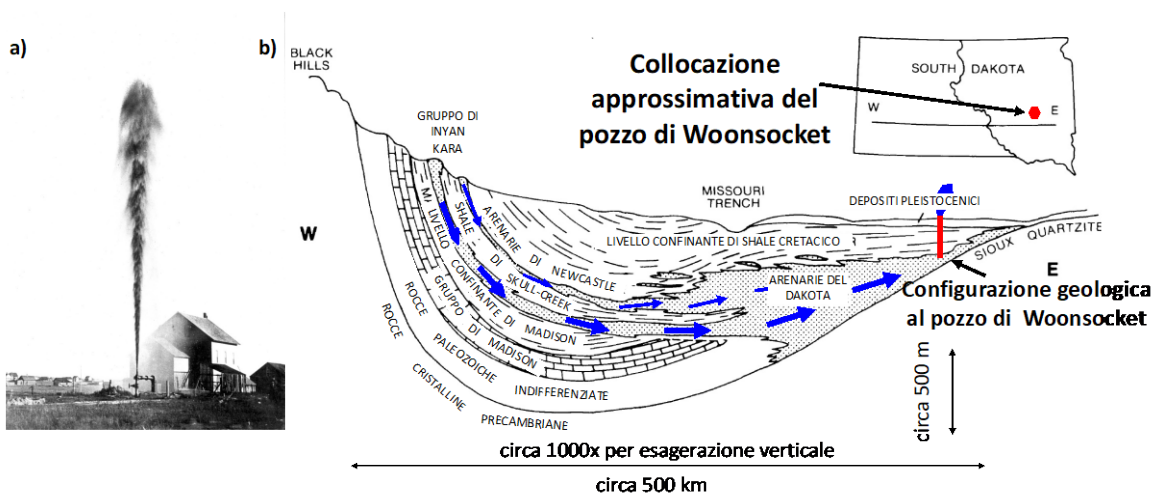


Figura 31 - Un pozzo artesiano fluente: a) il pozzo di Woonsocket nell'acquifero del Dakota è stato perforato nel 1888 con una fuoriuscita fotografata nel 1900 (Darton, 1900); e, b) sezione trasversale dell'acquifero del Dakota che mostra una ricarica ad ovest che fluisce al di sotto del livello confinante di scisti, producendo una pressione elevata ad est (modificato da Bredehoeft, 1983).

La distinzione tra acquifero non confinato e confinato è importante per molteplici ragioni. Ad esempio, essendo strettamente connesso alla superficie del terreno, un acquifero non confinato è più vulnerabile alla contaminazione, ed il suo livello dell'acqua

fluttua maggiormente in risposta a piogge e siccità. Un acquifero confinato è in un qualche modo schermato, l'acqua tende ad essere meno contaminata, ed i livelli piezometrici non sono così reattivi a variazioni a breve termine delle precipitazioni. L'acqua di un acquifero confinato spesso ha tempi di residenza più lunghi nel sistema sotterraneo, come mostrato in Figura 28b. Benchè l'acqua non confinata possa essere caratterizzata da tempi di residenza molto lunghi in alcune aree, questo tempo è più tipicamente nell'ordine dei giorni o degli anni. Al contrario, l'acqua in acquiferi confinati granulari (non in rocce fratturate) ha tipicamente tempi di residenza molto più lunghi, spesso nell'ordine delle centinaia o migliaia di anni; questo significa che l'acqua scaricata nei punti di recapito è acqua precipitata centinaia o migliaia di anni fa.

4.3.2 Immagazzinamento nell'acquifero

Un'altra distinzione importante tra acquiferi non confinati e confinati è il modo in cui rispondono al pompaggio d'acqua. Quando avviene un pompaggio da un pozzo in un acquifero non confinato, l'acqua pompata viene rimpiazzata da aria che entra dall'alto nei pori drenati, come illustrato delle immagini "prima" e "dopo" di Figura 32. Al contrario, quando l'acqua è pompata da un acquifero confinato, l'aria non entra nei pori, ma piuttosto la pressione dell'acqua viene rilasciata e gli strati geologici si compattano (specialmente i livelli argillosi all'interno degli acquiferi, o interposti ad essi). Questo avviene perchè la pressione elevata dell'acqua sosteneva le particelle sopportando parte del peso degli strati geologici e dell'acqua sovrastanti (Figura 33).

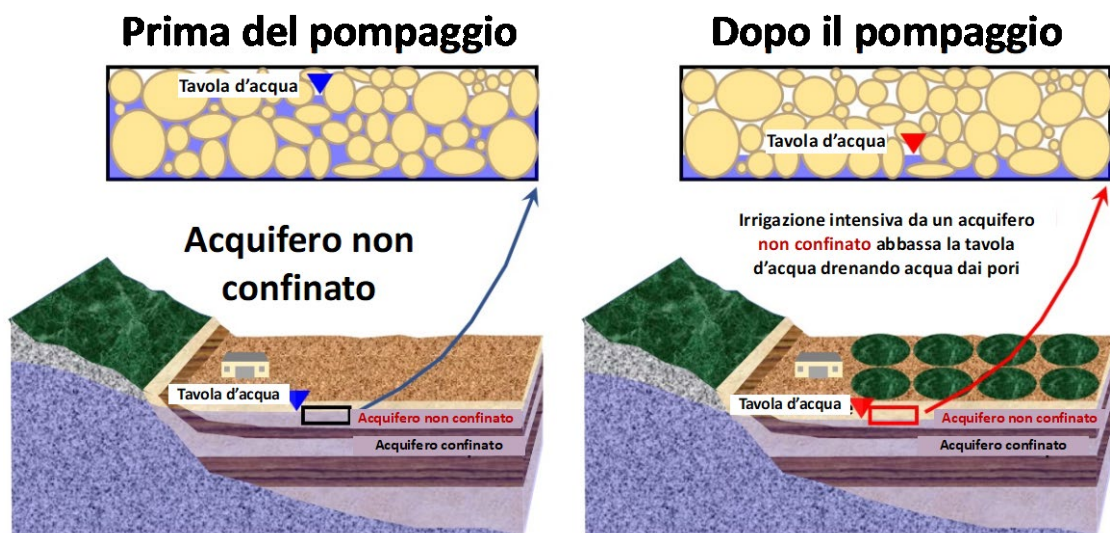


Figura 32 - Rappresentazione schematica che mostra i cambiamenti nelle condizioni dell'acquifero prima (a sinistra) e dopo (a destra) un significativo pompaggio da acquifero non confinato (drenaggio dei pori) (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

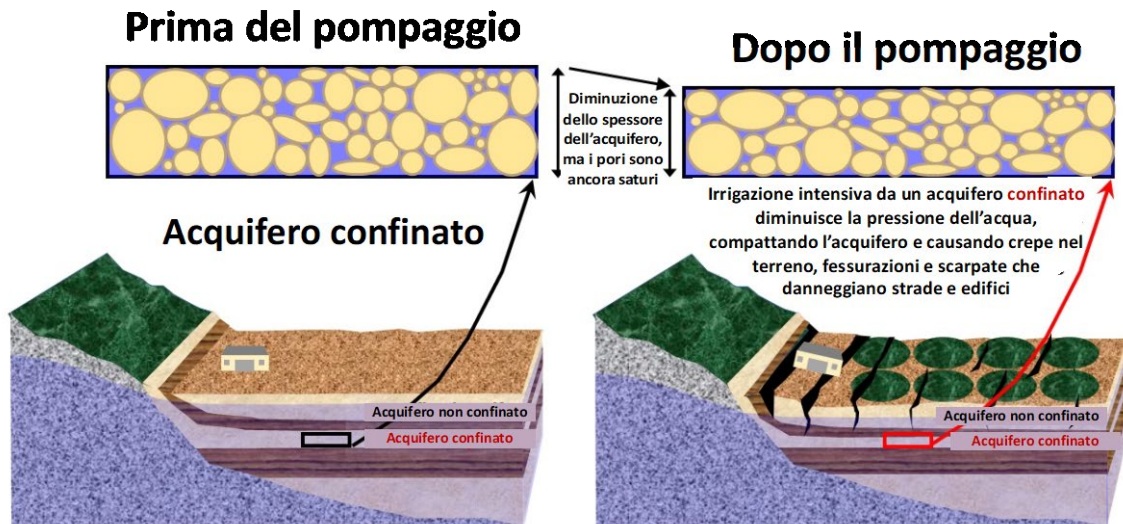


Figura 33 - Rappresentazione schematica che mostra i cambiamenti nelle condizioni dell'acquifero prima (a sinistra) e dopo (a destra) un significativo pompaggio da acquifero confinato (depressurizzazione dei pori e compattazione degli strati geologici) (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Dal momento che i pori vengono drenati quando avviene un pompaggio in acquiferi non confinati mentre i pori si depressurizzano quando il pompaggio avviene in acquifero confinato, la risposta al pompaggio si propaga verso l'esterno molto più rapidamente in acquiferi confinati rispetto ad acquiferi non confinati. **La diminuzione dei livelli piezometrici in risposta al pompaggio si manifesta a distanze di centinaia di metri fino a chilometri, entro poche ore o giorni (a seconda delle proprietà dell'acquifero), nonostante l'acqua nei dintorni del pozzo potrebbe essersi mossa soltanto di alcuni metri durante quel tempo.** Questo è in qualche modo analogo ad un'onda nell'oceano: l'onda viaggia velocemente mentre le molecole d'acqua rimangono essenzialmente nella stessa posizione perché l'onda è un trasferimento di energia tra le molecole d'acqua, non un viaggio delle molecole.

Un'importante conseguenza della differenza tra drenaggio dei pori negli acquiferi non confinati e compressione nei confinati è che **a parità di diminuzione di livello dell'acqua, un acquifero non confinato fornirà molta più acqua rispetto ad un acquifero confinato.** Tipicamente, una diminuzione unitaria di livello dell'acqua (es. 1 m) in un acquifero non confinato produrrà migliaia di volte più acqua rispetto alla stessa diminuzione di livello in un acquifero confinato.

In alcune regioni del pianeta in cui grandi volumi d'acqua sono stati pompati da acquiferi confinati, è avvenuta una significativa compattazione delle formazioni geologiche, che si è spesso manifestata come uno sprofondamento della superficie chiamato subsidenza. Viene mostrato un esempio dalla Valle Centrale in California dove decenni di pompaggio di acqua sotterranea per l'irrigazione di coltivazioni intensive nelle calde estati siccitose, hanno causato uno sprofondamento del pavimento vallivo fino a 10 metri tra il 1925 ed il 1977, come mostrato in Figura 34. Questo sprofondamento della superficie causato dal rilascio di pressione in acquiferi confinati non è avvenuto soltanto negli Stati

Uniti occidentali, ma anche in altre località, in particolare a Città del Messico, Messico; Giacarta, Indonesia; Venezia, Italia; e Pechino, Cina. Quando la subsidenza avviene vicino alle coste, causa un'accelerazione della locale intrusione salina in acquiferi costieri. Quando il pompaggio viene ridotto al punto che i livelli dell'acqua non diminuiscono più, la superficie smette di abbassarsi. D'altra parte, se avviene un'ulteriore riduzione del pompaggio tale per cui il livello dell'acqua aumenta, la subsidenza non si inverte completamente (cioè la superficie topografica non si rialza) poiché i grani di argilla non possono ritornare alla loro disposizione precedente, come mostrato in Figura 34c e d.

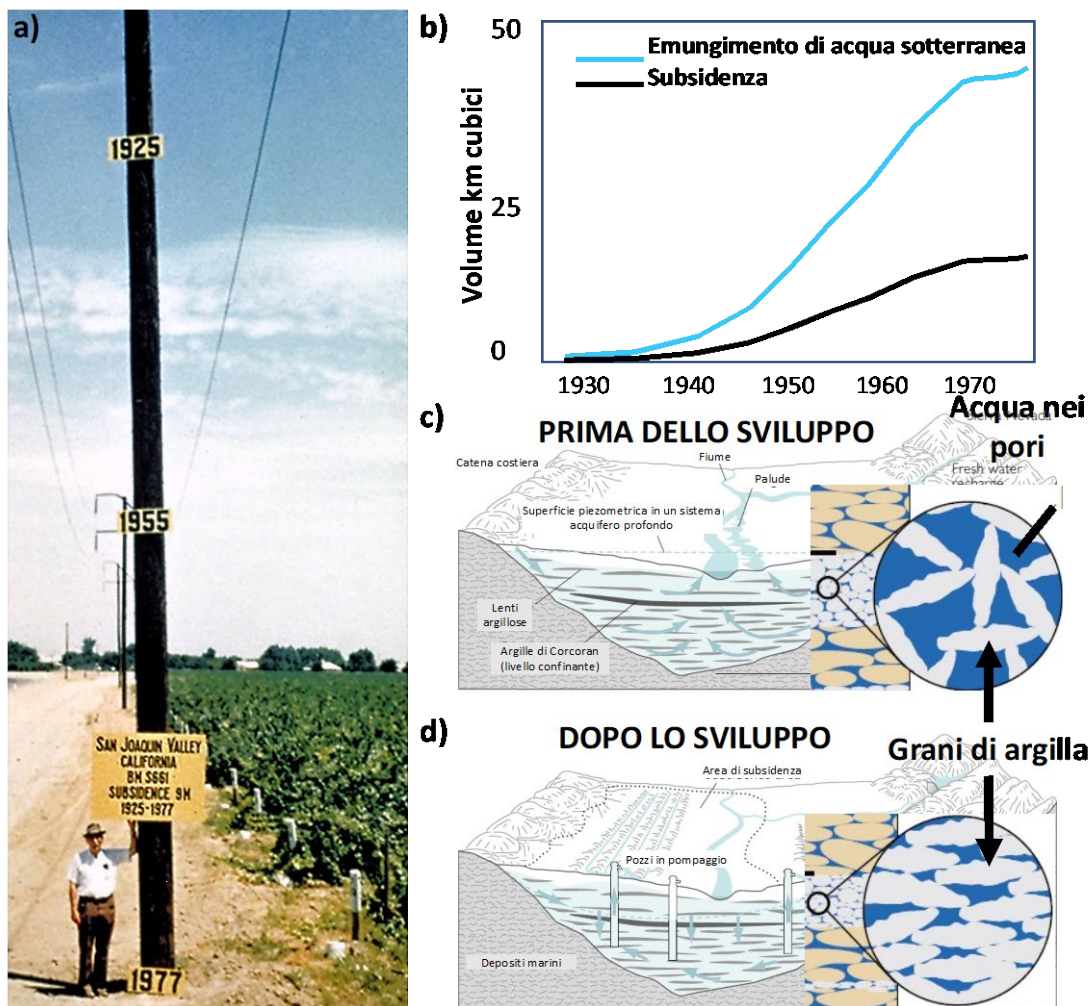


Figura 34 - Subsidenza nella valle di San Joaquin, California, USA. a) fotografia della superficie del terreno in sprofondamento a causa di irrigazione intensiva tra il 1925 ed il 1977 (Poland, 1977); b) Volume d'acqua prelevato e volume di subsidenza su un'area di circa 2000 chilometri quadrati tra il 1925 ed il 1977 (Galloway et al., 1999); c) Rappresentazione schematica della valle prima del pompaggio, che mostra la disposizione delle particelle fini in lenti argillose (adattato da Sneed et al., 2018); e, d) Rappresentazione schematica della valle dopo un pompaggio a lungo termine, che mostra grani fittamente impacchettati nelle lenti argillose, successivamente alla riduzione di pressione dell'acqua causata dal pompaggio (modificato da Sneed et al., 2018).

4.4 La visione a scala continentale

Zoomando ancora più indietro, si ottiene una visione ancora più ampia della porzione di flusso sotterraneo nel ciclo idrologico, che si estende dallo spartiacque continentale fino

alla zona costiera oceanica (Figura 35). In generale, ci sono due situazioni distinte e separate nel sistema alla scala continentale:

- le sorgenti fluviali in regioni montane vicino allo spartiacque continentale; e,
- i bacini a bassa quota in regioni pianeggianti vicino alla costa.

A connettere le sorgenti fluviali con i bacini a bassa quota ci sono due ampi sistemi terrestri di trasporto dell'acqua a scala continentale: uno è al di sopra della superficie e l'altro è sotterraneo.

- Il Sistema superficiale è la rete di corsi d'acqua, facilmente osservabile, concentrata (in canali) e fondamentalmente bidimensionale (abbraccia la superficie topografica). Piccoli corsi d'acqua scorrono sulla superficie dagli altipiani verso il basso, convergendo in maniera ordinata.

- Il sistema sotto la superficie è il sistema di flusso sotterraneo, difficilmente osservabile, diffuso (assenza di canali o tunnel, ad eccezione dei terreni carsici, ma piuttosto flusso diffuso in pori e fratture dei materiali geologici), tridimensionale rispetto al sistema di corsi d'acqua superficiali (con percorsi di flusso che non seguono necessariamente la forma della superficie topografica). I pattern di flusso sotterraneo sono meno ordinati rispetto alla rete di corsi d'acqua poiché l'acqua sotterranea è guidata da gradienti di carico idraulico a varie scale, che sono fortemente deviati o ritorti a causa di strutture geologiche complesse.

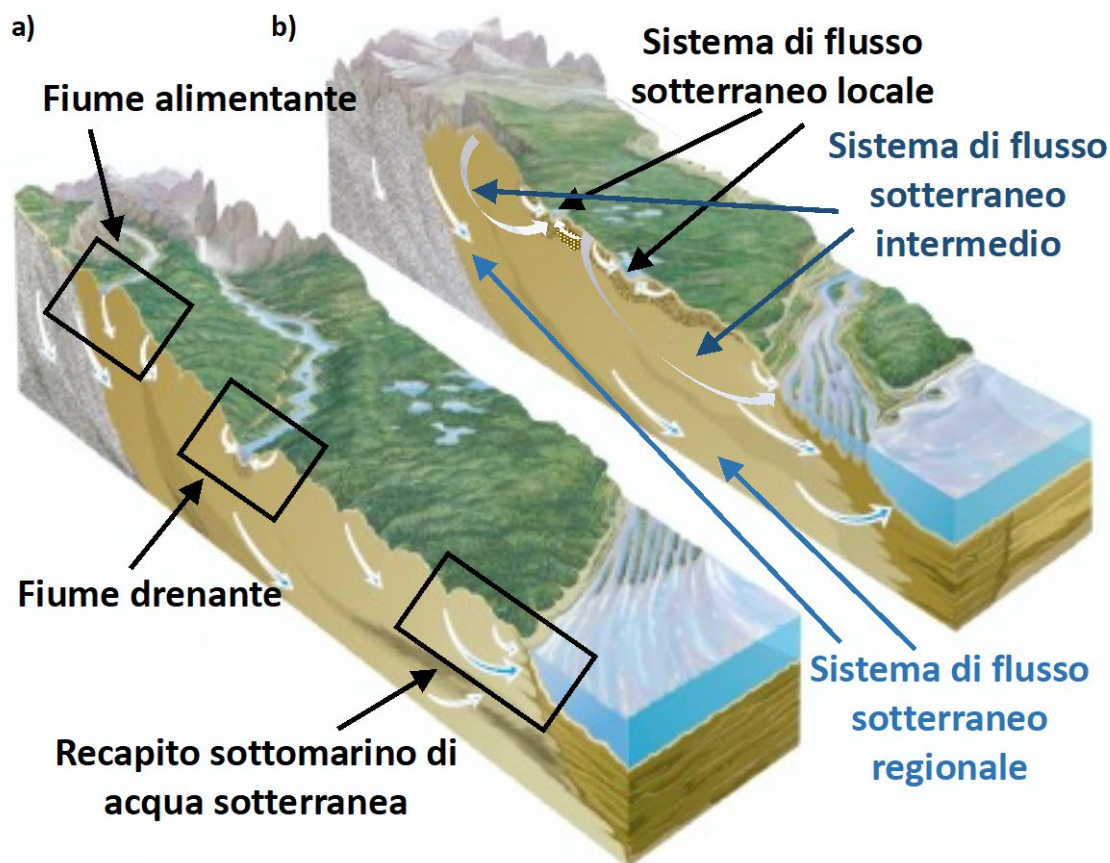


Figura 35 - La visione continentale che mostra il contesto spaziale di: a) corsi d'acqua sia alimentanti che drenanti, nonché il recapito sottomarino; e, b) la natura multi-scalare del sistema di flusso sotterraneo, con sistemi di flusso superficiali e locali annidati all'interno di sistemi intermedi più profondi, annidati a loro volta in sistemi di flusso regionali. Questo illustra la connessione idrologica a lunga distanza tra il sistema idrico superficiale e sotterraneo, attraverso scambi tra fiumi e acqua sotterranea, e recapito dei fiumi e dell'acqua sotterranea negli oceani (modificato da Winter et al. 1998).

L'acqua viene scambiata tra la superficie ed il sottosuolo, come mostrato nel caso dei fiumi alimentanti e drenanti e delle infiltrazioni sottomarine (Figura 35a), e si sviluppano sistemi di flusso sotterraneo locali e regionali (Figura 35b). I sistemi locali tendono ad essere superficiali e brevi, e rispondono ad eventi meteorici a breve termine ed ai cambiamenti stagionali delle condizioni climatiche. I sistemi regionali sono più profondi e più lunghi. I sistemi regionali tendono a "registrare" le condizioni climatiche di decenni, secoli o millenni fa. Per esempio, un fiume drenante nelle porzioni di valle di un bacino, che è alimentato da un sistema di flusso regionale, potrebbe non seccarsi mai, neanche dopo lunghi periodi siccitosi, poichè l'acqua sotterranea è stata ricaricata migliaia o decine di migliaia di anni fa, quando il clima era differente.

Come mostrato nella visione continentale a larga scala di Figura 35, l'acqua sotterranea può essere direttamente recapitata negli oceani lungo la zona costiera continentale. Questo fenomeno è noto come recapito sottomarino di acqua sotterranea. Queste caratteristiche erano state comprese ed utilizzate popolazioni marinare molto tempo addietro per individuare l'acqua dolce, come illustrato in Figura 36. La maggior

parte del recapito sottomarino di acqua sotterranea avviene vicino alla linea di costa, come ad esempio in baie ed estuari.

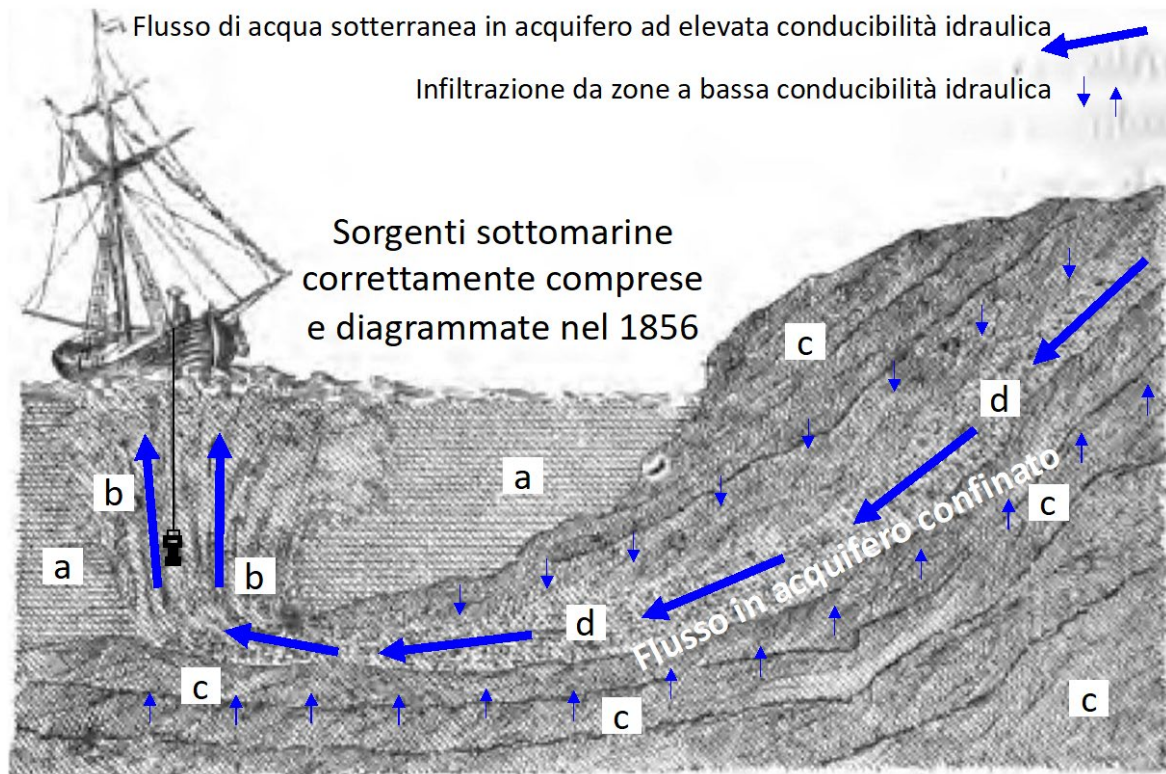


Figura 36 - Le sorgenti sottomarine erano state correttamente comprese ed utilizzate come fonte di acqua potabile dalle popolazioni marinare molto tempo fa: a) acqua salata; b) acqua dolce; c) strati geologici a bassa permeabilità; e d) strati geologici permeabili (modificato da Humboldt (1825) che disegnò il diagramma delle sorgenti sottomarine come pubblicato nella traduzione di Thrasher nel 1856).

In sintesi, ci sono **tre sistemi di trasporto dell'acqua a scala continentale**:

- 1) **L'atmosfera;**
- 2) **La rete di corsi d'acqua superficiali e,**
- 3) **Il sistema di flusso sotterraneo.**

Questi sistemi alla scala continentale non sono isolati. Essi non si limitano a recapitare acqua di pioggia indietro verso gli oceani seguendo sistemi di flusso paralleli, ma sono piuttosto intimamente connessi e si scambiano acqua molte volte lungo il percorso (Figura 37).

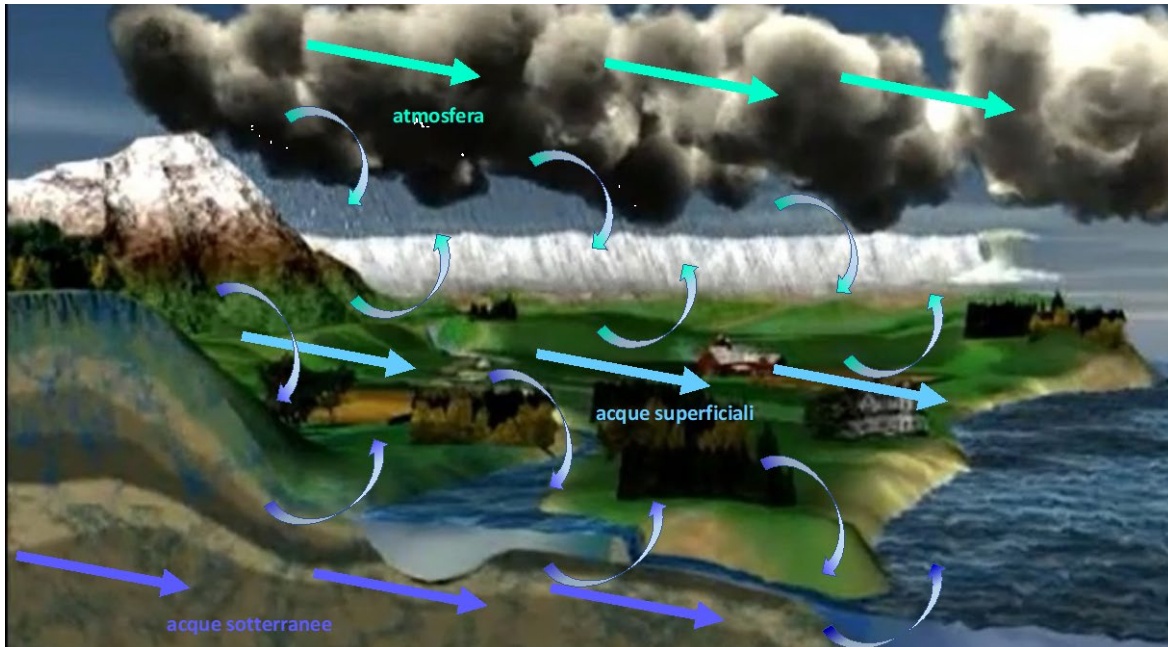


Figura 37 - I tre sistemi di trasporto di acqua alla scala continentale: circolazione di aria nell'atmosfera, rete di corsi d'acqua in superficie e acqua sotterranea sono intimamente connessi e si scambiano acqua molte volte lungo il percorso (modificato da NASA, 2020).

I meccanismi di scambio includono trasferimento di acqua dall'atmosfera alla superficie ed al sottosuolo, e ritorno dal sottosuolo alla superficie ed all'atmosfera; attraverso precipitazione, infiltrazione, evapotraspirazione, ed un nuovo ciclo di precipitazione, così come attraverso corsi d'acqua alimentanti e drenanti. Questi tre sistemi di trasporto "cambiano ruolo" periodicamente in termini di trasporto di una goccia d'acqua dal suo primo punto di caduta sul continente fino al suo punto d'arrivo nell'oceano. **Queste interazioni "alimentano" il sistema globale di flusso dell'acqua.**

5 Tempi di residenza delle acque sotterranee

Le acque sotterranee si muovono lentamente rispetto alle acque superficiali, quindi risulta particolarmente importante considerare il tempo necessario all'acqua per muoversi in quella parte del ciclo idrologico che compete alle acque sotterranee (Figura 38). Il tempo necessario ad una molecola d'acqua per muoversi in un acquifero da un punto ad un altro lungo una linea di flusso è chiamato tempo di percorrenza. Il tempo necessario ad una molecola d'acqua contenuta in una falda acquifera per passare da un'area di ricarica fino al punto in cui fuoriesce in superficie (come riportato in Figura 38) è detto tempo di residenza dell'acqua sotterranea ed è il tempo in cui la molecola d'acqua "risiede" nella porzione di ciclo idrologico che compete alle acque sotterranee. I titoli sulle frecce della Figura 38 indicano che le acque sotterranee che scorrono lungo percorsi più lunghi, lenti e profondi trascorrono più tempo nel sottosuolo ed hanno quindi un maggior tempo di residenza. Come mostrato nella Figura 38, l'acqua si infiltra nel sottosuolo in molte zone su di una vasta area, ma generalmente i flussi convergono tutti verso un'area più limitata. Quindi, le acque sotterranee che alimentano un corso d'acqua comprendono acque con diversi tempi di residenza.

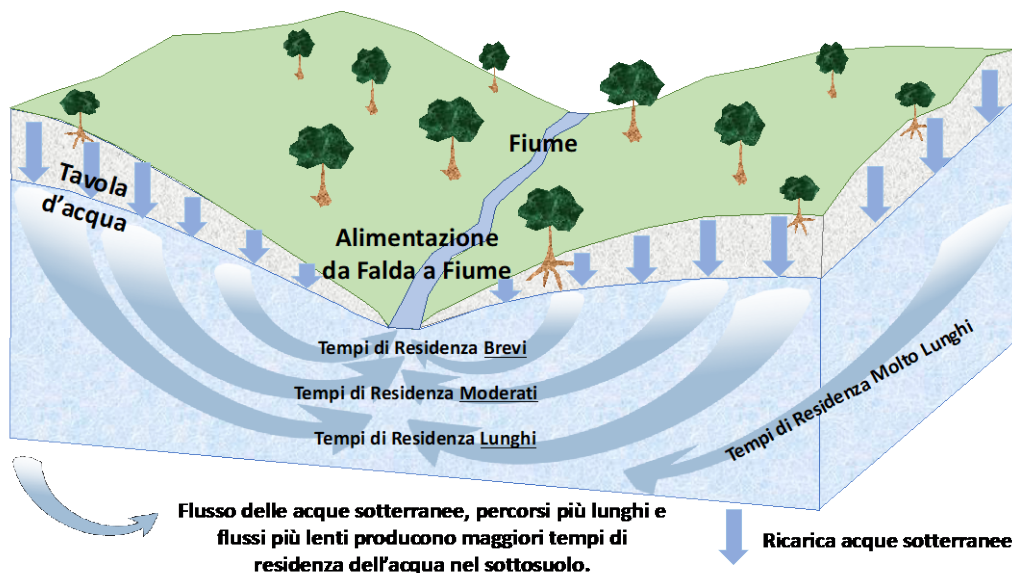


Figura 38 - Le acque sotterranee che percorrono tragitti più lunghi, più lenti e più profondi rimangono per più tempo nel sottosuolo, e presentano quindi tempi di residenza maggiori quando raggiungono un fiume. L'acqua si infiltra nel sottosuolo su un'area vasta, ma le linee di flusso in uscita si concentrano su un'area più piccola, quindi le acque sotterranee in uscita da un sistema acquifero presentano diversi tempi di residenza (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Le caratteristiche geologiche di un serbatoio acquifero influenzano notevolmente la velocità delle acque sotterranee, influenzando i tempi di percorrenza e di residenza. Le velocità di flusso nelle tre grandi categorie di serbatoi geologici (rocce sciolte o granulari, rocce fratturate e carsiche) sono generalmente molto diverse tra loro. La velocità di flusso può variare notevolmente anche entro serbatoi geologicamente simili, essendo essa il risultato

di una combinazione tra la facilità dell'acqua di attraversare un materiale geologico e la differenza di carico idraulico presente nel sistema idrogeologico. Nella parte più superficiale di un sistema idrogeologico le tipiche velocità sono dell'ordine di 0,01-1 m/giorno in presenza di serbatoi in materiali granulari, da 0,5 a 50 m/giorno in serbatoi fratturati e da 10 a 500 m/giorno in serbatoi carsici. Ancora una volta, considerando il tempo di residenza delle acque sotterranee nel sistema di flusso mostrato in Figura 38, se il serbatoio fosse in sabbia, i tempi di residenza delle acque sotterranee potrebbero essere dell'ordine di anni o di decenni, ma se il serbatoio geologico fosse composto da limo e/o argilla, che è molto meno permeabile della sabbia, i tempi di residenza sarebbero molto più lunghi, come ad esempio decenni o molti millenni.

Il tempo di residenza delle acque sotterranee nel ciclo idrologico è molto più lungo rispetto ad altre sue componenti, come ad esempio le acque superficiali o l'acqua dell'atmosfera. Il tempo di residenza dell'acqua nel sottosuolo è più simile a quello dell'acqua stoccata nei grandi ghiacciai rispetto a quello delle acque superficiali. Il tempo di residenza per l'immagazzinamento in un qualsiasi comparto del ciclo idrologico è stimato come il volume d'acqua diviso per il flusso medio in entrata e in uscita. I valori esatti sono incerti, ma il loro ordine di grandezza è facilmente stimabile. Per esempio, il tempo medio di permanenza di una molecola d'acqua nell'atmosfera è dell'ordine di 10 giorni, mentre una molecola trascorre circa 1 anno nella zona vadosa, da una decina ad un centinaio di anni nei laghi, diverse migliaia di anni nell'oceano, e nell'ordine di centinaia di migliaia di anni nelle calotte glaciali (Figura 39). Al contrario, i tempi di residenza delle acque dolci sotterranee variano da qualche anno a centinaia di anni fino a migliaia di anni, mentre le acque saline profonde, poste al di sotto delle acque dolci, hanno tempi di residenza ancora più lunghi, nell'ordine dei milioni di anni. La maggior parte di queste acque profonde saline non partecipano al ciclo idrologico se non in concomitanza di eventi geologici che però avvengono nell'arco di decine di milioni di anni. La profondità alla quale si rinvencono queste acque saline può variare a seconda della topografia e della conducibilità idraulica, ma generalmente è tra i 200 e i 1000 metri.

L'acqua scorrendo nella porosità è in grado di portare in soluzione gli elementi chimici presenti nelle rocce del sottosuolo, quindi in generale, più a lungo l'acqua staziona nel sottosuolo, maggiore sarà il suo carico salino. Di conseguenza, le acque sotterranee possono presentare composizioni chimiche molto differenti tra loro, considerando i possibili tempi di residenza molto diversi ed i differenti tipi di rocce incontrate durante il loro percorso prima di arrivare ad alimentare un fiume.

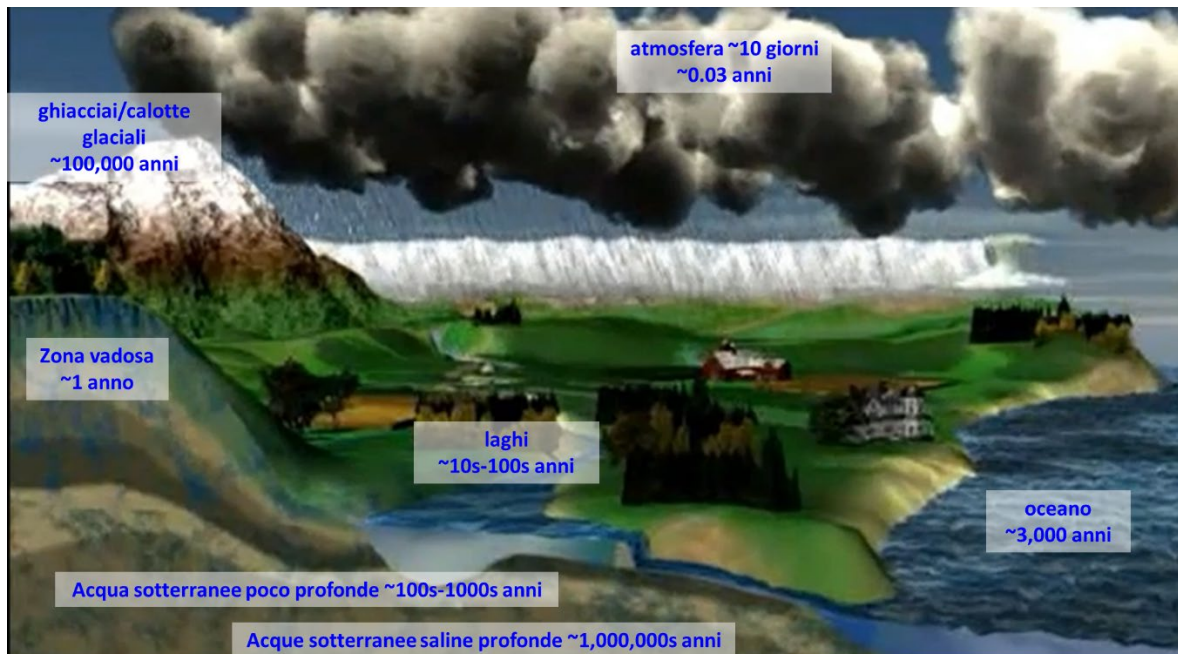


Figura 39 - Tempi di residenza dell'acqua nei diversi compartimenti di un ciclo idrologico (modificato da NASA, 2020).

I tempi di transito e quelli di residenza sono importanti anche per quanto riguarda il movimento dei contaminanti nelle acque sotterranee. Se i contaminanti si infiltrano nel sottosuolo delle aree di ricarica e non sono facilmente adsorbiti o filtrati dai materiali geologici, o biodegradati da microbi presenti nel sottosuolo, potrebbero arrivare ad un fiume in anni o in decine di anni (quindi presentare una minaccia per un fiume in un arco temporale paragonabile alla vita umana) oppure potrebbero essere necessari centinaia o migliaia di anni (diventando quindi una minaccia per un fiume in un lontano futuro).

L'acqua sotterranea ha una "memoria" a lungo termine, perché ci vuole molto tempo per riempire e svuotare un grande serbatoio, quindi le acque sotterranee hanno un lungo tempo di residenza nel sottosuolo. Infatti, alcuni dei nostri acquiferi contengono acque che si sono infiltrate durante i periodi più umidi e freddi della storia della Terra attraverso i cicli glaciali-interglaciali del passato, quindi stiamo parlando di decine di migliaia o centinaia di migliaia di anni. Queste acque sotterranee sono dette fossili, dato che si tratta di acque contenute in acquiferi che non sono soggetti ad alimentazione come avviene per i combustibili fossili che estraiamo dal sottosuolo.

Dopo aver parlato di sistemi acquiferi risulta utile considerare alcuni esempi di acque sotterranee in vari contesti per aiutare il lettore ad avere una maggiore familiarità con le acque sotterranee presenti nel nostro pianeta. A tal fine, il prossimo capitolo illustrerà come le acque sotterranee si presentino in alcuni ambienti particolari, tra cui le aree montuose, quelle carsiche (dove nel sottosuolo sono presenti condotti e caverne) ed aree con permafrost.

6 Le acque sotterranee hanno un ruolo in tutte le condizioni geologiche della Terra

Le acque sotterranee hanno un ruolo in tutte le condizioni geologiche della Terra. Per illustrare la variabilità delle condizioni delle acque sotterranee in diverse situazioni geologiche, questa sottosezione fornisce uno sguardo sulle acque sotterranee in alcuni contesti geologici: in aree montane, carsiche ed in presenza di permafrost.

6.1 Le acque sotterranee in ambiente montano

Le sorgenti hanno rappresentato per molti anni la fonte d'acqua per gli abitanti delle zone montane, dove le colture si sono sviluppate in zone terrazzate sostenendo civiltà come quella degli Incas nelle Ande del Sud America (Figura 40). Queste civiltà hanno progettato delle strutture intorno alle sorgenti ed ai canali in montagna per irrigare i terrazzamenti e portare l'acqua alle fontane in città per la popolazione.



Figura 40 - Storici terrazzamenti agricoli (Graber, 2011).

Circa il 12 per cento della popolazione mondiale vive oggi in zone montane e, in larga misura, dipende dalle acque sotterranee per l'approvvigionamento idrico. La maggior parte delle aree montane presenta pendii scoscesi, costituiti da rocce fratturate con

una bassa capacità di immagazzinare acqua. Di conseguenza, le acque sotterranee circolano in genere rapidamente e spesso scaturiscono da sorgenti poste sui versanti delle montagne, dove la falda freatica interseca la superficie del terreno o vanno ad alimentare i torrenti di montagna. Le zone montane vegetate presentano terreni con un ecosistema forestale che impedisce il rapido deflusso delle acque piovane, favorendo così la ricarica delle acque sotterranee e lo stoccaggio dell'acqua nel sottosuolo che poi viene rilasciata lentamente nei corsi d'acqua. La deforestazione inverte questa tendenza e favorisce il deflusso superficiale determinando una minore disponibilità di acqua in grado di sostenere il deflusso fluviale e l'ecologia. Sebbene l'idrologia montana sia importante per più di un miliardo di persone, non è ben studiata a causa delle difficoltà legate alle perforazioni di pozzi in aree montane.

6.2 Le acque sotterranee in aree carsiche

Con un substrato carbonatico che costituisce circa il 15 per cento della superficie terrestre priva di ghiaccio, come visibile in Figura 41, più del 25 per cento della popolazione mondiale o vive in queste zone oppure ne utilizza gli acquiferi carsici.

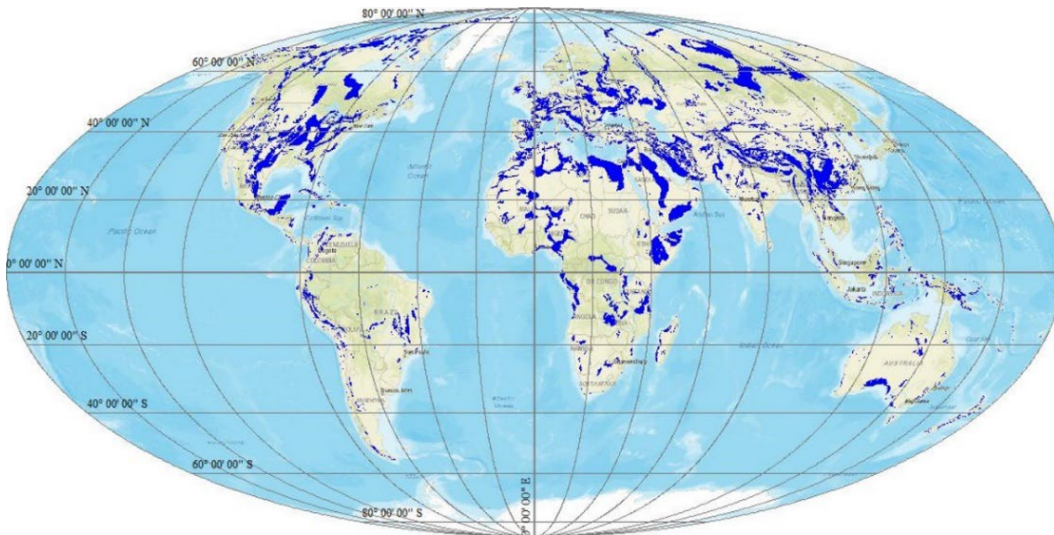


Figura 41 - Affioramenti di rocce carbonatiche ed evaporitiche nel mondo che possono ospitare acquiferi carsici (Kuniansky, 2020, creato dal set di dati spaziali World Karst Aquifer Map di Chen et al., 2017).

Gli acquiferi carsici presentano grandi condotti nel sottosuolo collegati da grotte e sprofondamenti (strutture in cui il tetto della grotta è crollato) come illustrato nella Figura 42. Questi si formano in tempi geologici per effetto dell'acqua acida presente nella zona vadosa che porta in soluzione notevoli quantità di minerali nel calcare e nella dolomia. In seguito, il processo di dissoluzione dell'acqua si arresta quando i minerali disciolti neutralizzano l'acidità dell'acqua riducendo la sua capacità di dissoluzione. Successivamente, quando il clima diventa più arido e/o il livello del mare si abbassa, anche il livello freatico si abbassa e l'acqua di infiltrazione acida crea ulteriori cavità a livelli più profondi. Durante i periodi più umidi e/o quando il livello del mare si innalza, le cavità si riempiono d'acqua creando un acquifero carsico saturo. Le variazioni del livello freatico nel

corso dei tempi geologici hanno prodotto acquiferi carsici profondi in molte parti del mondo.

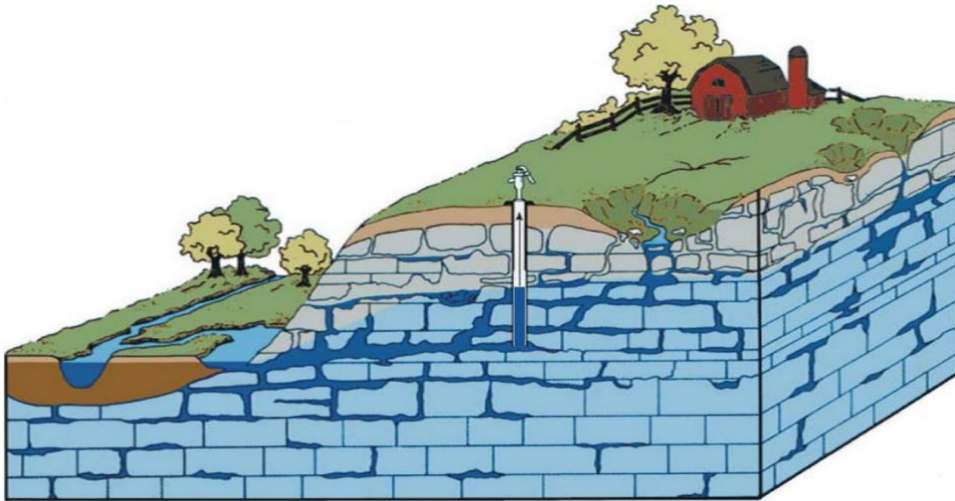


Figura 42 - In aree carsiche grandi condotti ben collegati tra loro provocano un rapido deflusso delle acque sotterranee e un loro ridotto tempo di residenza, rendendole facilmente soggette a contaminazione (Iowa Geological Survey, 2020).

L'acqua che si infiltra nei condotti carsici scorre molto più rapidamente verso le sorgenti ed i fiumi rispetto ad altri acquiferi in rocce sedimentarie. Date le grandi dimensioni dei condotti carsici, il flusso delle acque sotterranee risulta molto più simile a quello dei torrenti che a quello nei sedimenti o nelle rocce fratturate. Nelle aree carsiche è spesso difficile trovare una sufficiente disponibilità di acqua superficiale perché l'acqua si infiltra velocemente. Il rapido movimento dell'acqua entro gli acquiferi carsici li rende facilmente soggetti ad estese contaminazioni.

Il carsismo è l'unico ambiente in cui l'uomo può esplorare grandi distanze nel sottosuolo percorrendo grotte collegate tra loro in ambienti subaerei oppure usando attrezzature subacquee in zone sommerse. I sistemi carsici, oltre al loro valore per l'approvvigionamento idrico, risultano importanti anche da un punto di vista turistico, presentando maestose caverne adornate con stalattiti e stalagmiti, che si formano quando l'acqua sotterranea è satura in carbonati e li deposita (Figura 43).

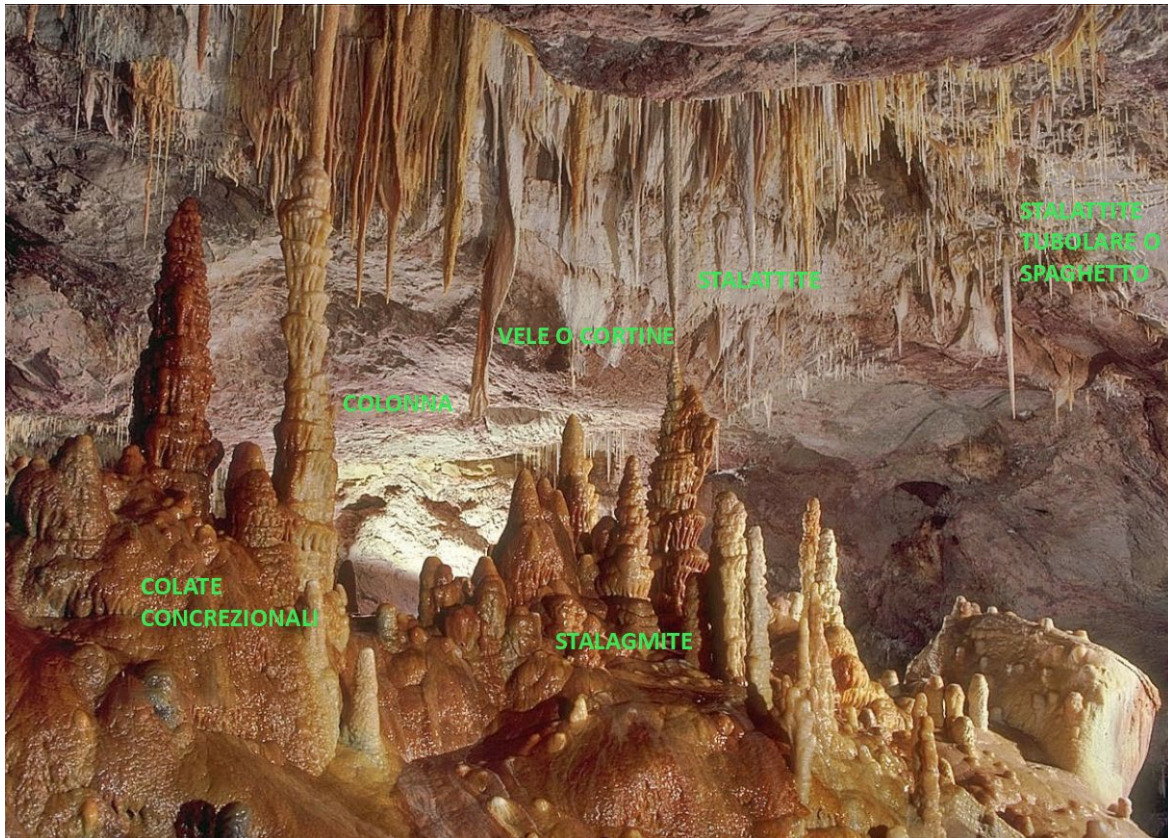


Figura 43 - Foto di una grotta che evidenzia strutture derivanti da precipitazioni di minerali presenti nelle acque sotterranee (foto di Dave Bunnell, 2006).

6.3 Le acque sotterranee in aree di permafrost

Il permafrost si forma, nei sistemi acquiferi sotterranei, nelle zone fredde del globo (Figura 44). Il permafrost può essere presente nel suolo, nella roccia o nei sedimenti sia saturi che insaturi, ma per definizione è congelato per più di due anni consecutivi.



Figura 44 - Distribuzione mondiale della criosfera (la parte di acqua congelata nel globo terrestre). La distribuzione del permafrost è mostrata in tonalità viola (Ahlenius, 2007).

Dove la superficie è priva di ghiaccio, il permafrost si localizza sotto lo "strato attivo" che può essere costituito da suolo, roccia o sedimento che ogni anno congela e

scongela. Il movimento delle acque sotterranee avviene sopra e sotto lo strato di permafrost che è essenzialmente impermeabile. Questo ostacolo al drenaggio verso il basso crea una parte superficiale paludosa. Per avere una circolazione idrica sotterranea di una certa importanza è necessario che ci siano porzioni di sottosuolo scongelato entro il permafrost (Figura 45).

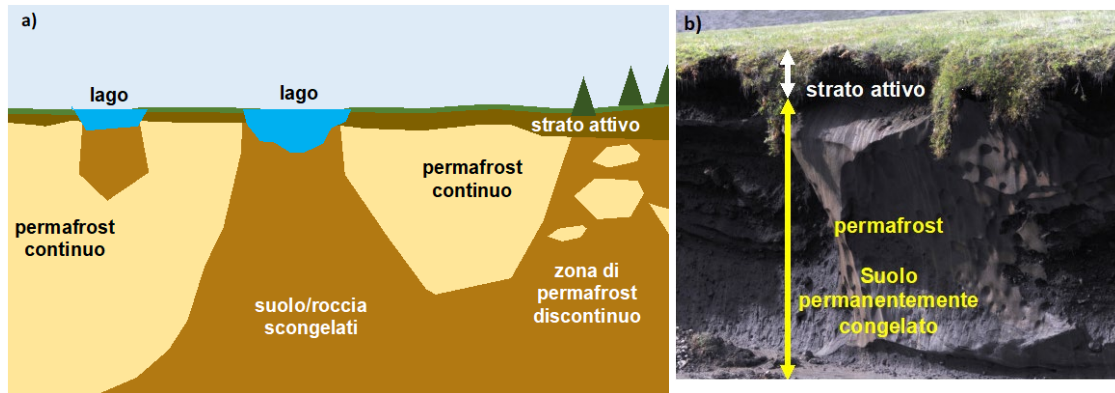


Figura 45 - Il permafrost è costituito da porzioni di sottosuolo congelato vicino alla superficie terrestre: a) schema della distribuzione del materiale congelato e scongelato, dove si nota meno materiale congelato l'acqua superficiale si infila nel sottosuolo o la copertura forestale isola il terreno; b) foto di un sottile strato attivo sopra il permafrost sul versante nord dell'Alaska (foto di Kling, 2012).

7 Il ruolo peculiare delle acque sotterranee nel sistema idrologico terrestre

La componente idrica sotterranea del ciclo idrologico è un grande serbatoio di acqua dolce a movimento lento (nella sua componente meno profonda) che reagisce chimicamente con la roccia serbatoio lungo il proprio percorso, interfacciandosi con l'atmosfera e con il sistema di trasporto dell'acqua nei fiumi. Questo vasto serbatoio idrico sotterraneo funge da: 1) regolatore del ciclo idrologico attraverso la modulazione del flusso delle acque continentali superficiali; 2) fabbrica chimica e nastro trasportatore rispettivamente per la lavorazione e il trasporto dei materiali terrestri dal continente agli oceani; 3) impianto di deposito e trattamento di rifiuti; 4) un sistema globale di supporto alla vita.

7.1 Le acque sotterranee come regolatore idrologico

In Figura 46 è illustrato il volume relativo delle riserve idriche terrestri. La bolla più grande mostra il volume di tutta l'acqua liquida presente sulla superficie, nel sottosuolo e nell'atmosfera della Terra relativamente all'intero volume del pianeta (Figura 46a). Solo il 2,5 per cento del volume d'acqua totale è dolce e la maggior parte della vita terrestre dipende da essa. Di tutta l'acqua dolce della Terra, circa il 70 per cento è intrappolato nei ghiacci polari ed è inaccessibile alla vita terrestre (Figura 46b). Il rapporto 99:1 tra acque sotterranee e acque superficiali ha un importante significato. Utilizzando ancora la similitudine bancaria, il flusso di cassa pronto (acqua superficiale) è solo l'1 per cento dell'intero bilancio bancario. Questa è una buona notizia per la sicurezza "finanziaria" idrologica perché fiumi, laghi, terre umide e tutta la vita che dipende da loro, ha riserve idriche disponibili nei serbatoi idrici sotterranei. Cioè, le acque superficiali non si prosciugherebbero se non piovesse per un po', perché le acque sotterranee continuerebbero ad alimentarle come flusso di base. In tal senso, il volume di acque dolci sotterranee funge da tampone (compensazione) per mantenere fiumi e zone umide attraverso le variazioni del tempo e del clima. Tuttavia, quando cambiamo il paesaggio per consentire un flusso maggiore verso gli oceani e minore verso la ricarica delle acque sotterranee (ad esempio con la deforestazione, l'urbanizzazione, l'agricoltura eccessivamente irrigua), c'è meno acqua sotterranea per sostenere il ciclo dell'acqua dolce.

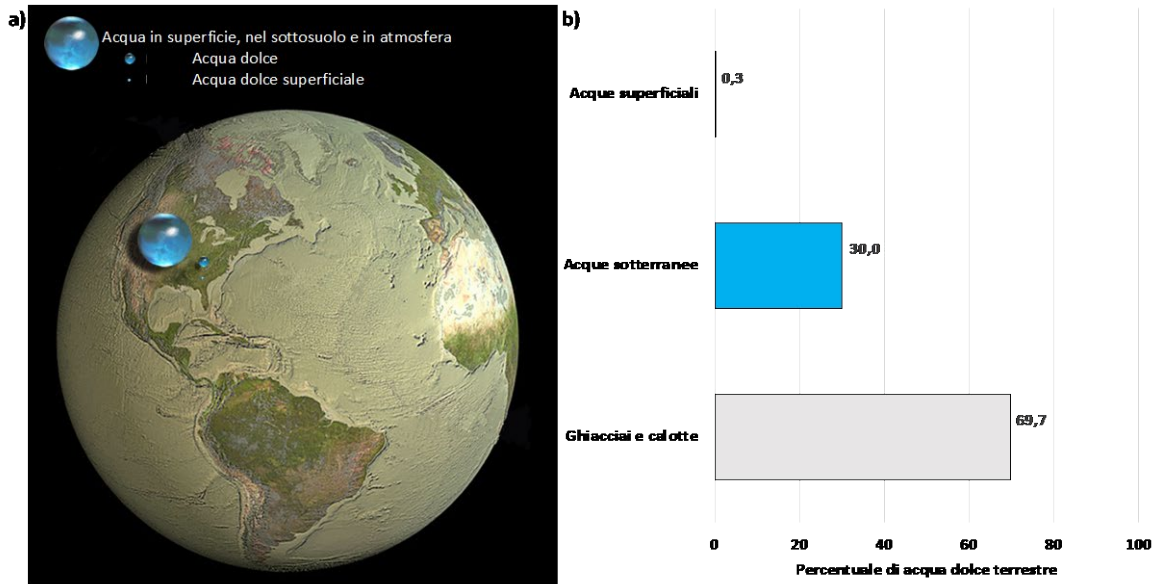


Figura 46 - Volume proporzionale di a) acqua rispetto alla Terra (adattato da USGS 2009c) e b) percentuale di acqua dolce terrestre immagazzinata come acqua superficiale, sotterranea e nei ghiacci (Poeter et al., 2020, gw-project.org, sulla base di valori da Shiklomanov, 1993).

Come discusso in precedenza, il livello delle acque sotterranee (livello freatico) non è impattato solo dalle variazioni meteorologiche e climatiche, ma anche dai pompaggi umani da pozzi. Anche in questo caso, le grandi dimensioni e la capacità di immagazzinamento delle risorse idriche sotterranee fungono da compenso quando il livello diminuisce a causa degli emungimenti, perché l'acqua viene prelevata dallo stoccaggio sotterraneo a causa dell'abbassamento del livello freatico dovuto al flusso verso i pozzi di emungimento, che avviene prima che diminuisca il flusso verso i fiumi o che avvenga il richiamo di acqua dai fiumi. Inoltre, in alcune aree, l'abbassamento del livello freatico riduce la quantità di evapotraspirazione (Figura 47), migliorando così la ricarica a supporto della portata verso i pozzi in emungimento e verso il flusso di base ai corsi d'acqua. Questo è un ulteriore modo in cui il sistema delle acque sotterranee compensa i flussi d'acqua superficiali. Naturalmente non viene creata nuova acqua, quindi la vegetazione dipendente dalla evapotraspirazione morirà e verrà sostituita da vegetazione che richiede meno acqua e i corpi idrici superficiali presenti nelle aree con abbassamento del livello freatico possono rimpicciolirsi o seccarsi. In effetti accade che l'acqua venga "rubata" da altre parti del ciclo dell'acqua.

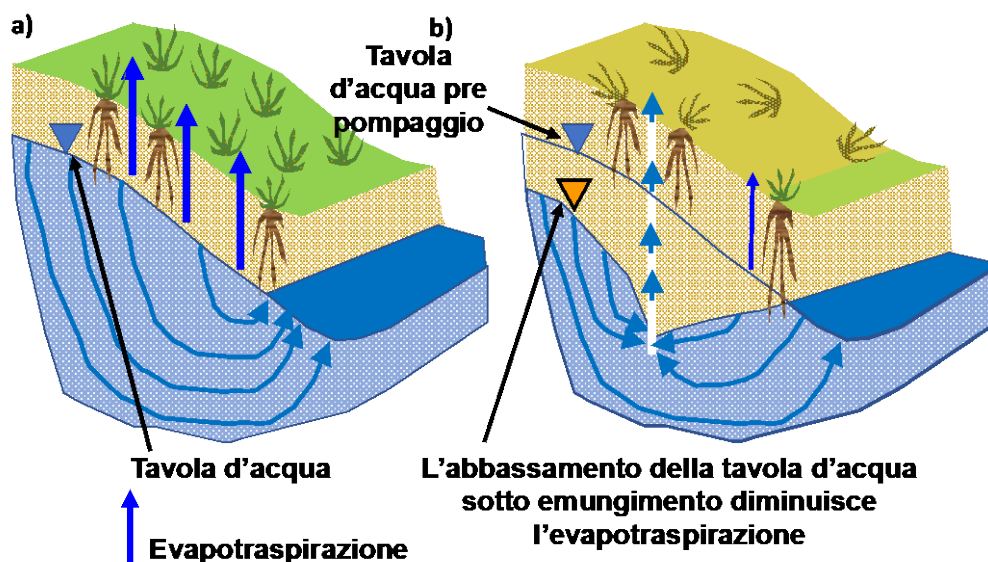


Figura 47 - L'abbassamento attorno ai pozzi di emungimento può causare la depressione del livello freatico e diminuire l'evapotraspirazione. Ciò migliora la ricarica, supporta l'afflusso ai pozzi in emungimento ed al flusso di base nei corsi d'acqua senza ulteriore depressione del livello piezometrico. La diminuzione dell'evapotraspirazione dovuta all'abbassamento del livello freatico può causare la morte della vegetazione (Poeter et al. 2020, gw-project.org).

In tutto il mondo il continuo declino del livello di falda indica che le acque sotterranee sono pompate più rapidamente di quanto sono ricaricate. L'esaurimento delle acque sotterranee è stimato essere dell'ordine di $283 \pm 40 \text{ km}^3$ all'anno (Wada 2016) con implicazioni globali. Quando l'estrazione di acqua sotterranea è maggiore della ricarica naturale, il volume dell'acqua sulla superficie terrestre aumenta al diminuire del volume nel sottosuolo. L'aumento di volume dell'acqua superficiale, come risultato del sovrappompaggio, ha fornito un sostanziale contributo all'aumento del livello dei mari, approssimativamente di $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/a}$, che è circa il 25 per cento del corrente tasso di risalita degli oceani pari a $3,1 \text{ mm/a}$ (Wood and Hyndman, 2018).

Un esempio di estrema riduzione di acque sotterranee è stato segnalato nella Pianura Cinese Settentrionale (Zheng et al., 2010), un'area di circa 40.000 Km^2 , in cui a partire dal 1950 il livello delle acque sotterranee è diminuito in media di 15 metri con punte di 90 metri in alcuni pozzi come risultato di pompaggi insostenibili (Figura 48). L'abbassamento del livello idrico ha provocato il disseccamento dei corsi d'acqua e la subsidenza.

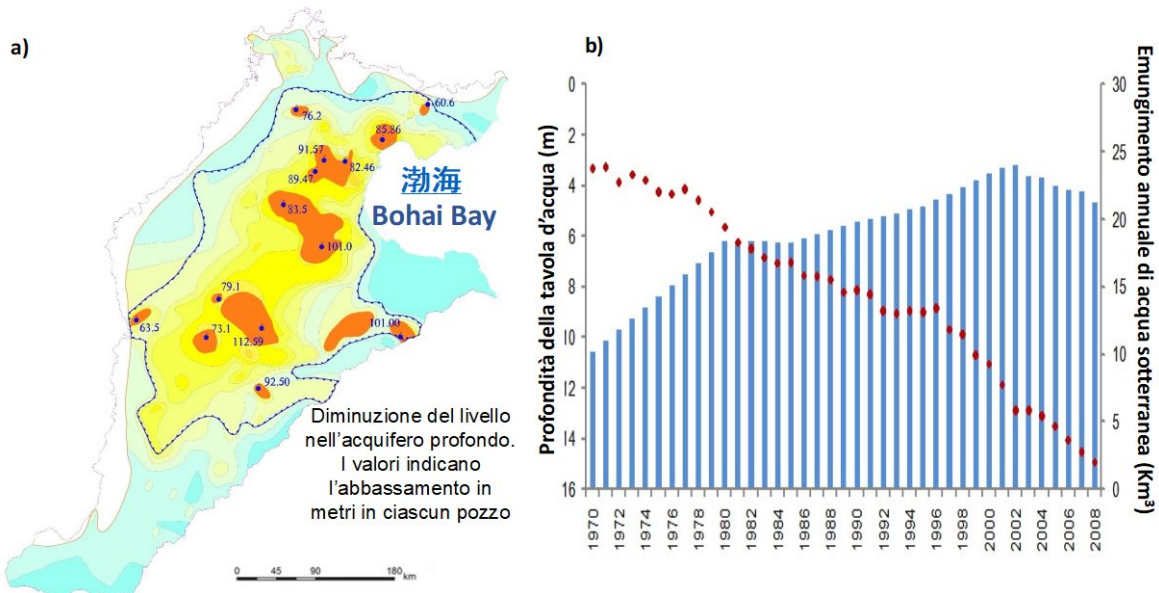


Figura 48 - La Pianura Cinese Settentrionale presenta un esteso cono di depressione delle acque sotterranee dovuto all'insostenibile emungimento principalmente per usi agricoli: a) diminuzione del livello idrico in metri dal 1950 con abbassamenti in singoli pozzi dell'ordine di 90 metri e con media spaziale di circa 15 m (Zheng et al., 2010); b) profondità media spaziale del livello idrico e volumi annui di pompaggio dal 1970 al 2008 (Zheng, 2020).

Dato che l'esaurimento delle falde acquifere in tutto il mondo sta riducendo i flussi di base dei fiumi e causando l'innalzamento del livello del mare, si stanno attuando interventi di geoingegneria nel ciclo idrologico nel tentativo di invertire questi impatti negativi gestendo l'innalzamento delle falde acquifere in alcuni bacini idrici. La gestione richiede meno pompaggi o maggiore ricarica o entrambi. Per ottenere una ricarica media più alta nell'arco di più anni, una quantità maggiore di precipitazioni deve raggiungere la falda freatica mentre una quantità minore di precipitazione deve lasciare il bacino idrico come acqua di scorrimento superficiale. Le procedure specifiche per migliorare la ricarica variano da luogo a luogo, ma possono includere: opere di ingegneria del paesaggio per impedire il deflusso e captarlo; infiltrazione di acque reflue trattate attraverso zone umide appositamente predisposte o bacini di infiltrazione con fondi permeabili; uso di pozzi di iniezione nelle falde acquifere di acqua piovana o acque reflue trattate. Programmi per la gestione della ricarica degli acquiferi stanno diventando molto comuni per la riduzione dell'esaurimento degli acquiferi perché l'alternativa che prevede la diminuzione dei prelievi, è difficile da raggiungere in un mondo con incremento della popolazione e conseguente crescita dell'agricoltura e dell'industria. Tuttavia, tali programmi si basano sulla capacità di immagazzinamento dell'acquifero disponibile e gli unici acquiferi che offrono elevata capacità di immagazzinamento sono gli acquiferi liberi in cui l'acqua inserita va a riempire i pori della zona insatura.

Per ottenere un approvvigionamento di acque sotterranee sostenibile, i livelli delle falde (e quindi di immagazzinamento delle stesse) possono variare notevolmente di anno in anno, ma la media deve essere costante a lungo termine. Negli anni umidi le falde ricevono una maggiore ricarica, così il loro immagazzinamento aumenta. Questo può

bilanciare la diminuzione di immagazzinamento durante anni aridi, se il tasso medio di pompaggio a lungo termine viene gestito correttamente per molti anni (o decenni) per far fronte a cicli siccitosi di lunga durata.

Un esempio di tale tipo di gestione è stato sperimentato nel 1968 nel tentativo per fermare il sovrasfruttamento delle acque sotterranee nel Bacino di San Fernando che fornisce acqua potabile per la città di Los Angeles, California, negli Stati Uniti. Il livello idrico era stato misurato dal 1929 ed era stato usato per stimare la quantità di acqua immagazzinata negli acquiferi del bacino (Figura 49). Lo sviluppo aveva causato l'abbassamento della superficie piezometrica dal 1945 fino agli anni '60, l'esteso depauperamento dell'immagazzinamento sotterraneo suggerì l'adozione di un piano di gestione. Il piano richiedeva approssimativamente lo stoccaggio di $0,44 \text{ km}^3$ di acque sotterranee nell'acquifero (linea tratteggiata verde in Figura 49). Per tenere conto dei periodi umidi e aridi, fu specificato che lo stoccaggio minimo poteva essere fino a $0,18 \text{ km}^3$ inferiore allo stoccaggio richiesto (linea tratteggiata rossa inferiore della Figura 49) per lasciare a disposizione il volume di stoccaggio per l'aggiunta di acqua negli anni umidi. Lo stoccaggio massimo poteva essere fino a $0,26 \text{ km}^3$ in più rispetto allo stoccaggio richiesto (linea tratteggiata rossa superiore della Figura 49) per impedire che il livello raggiungesse il punto di travaso verso bacini adiacenti.

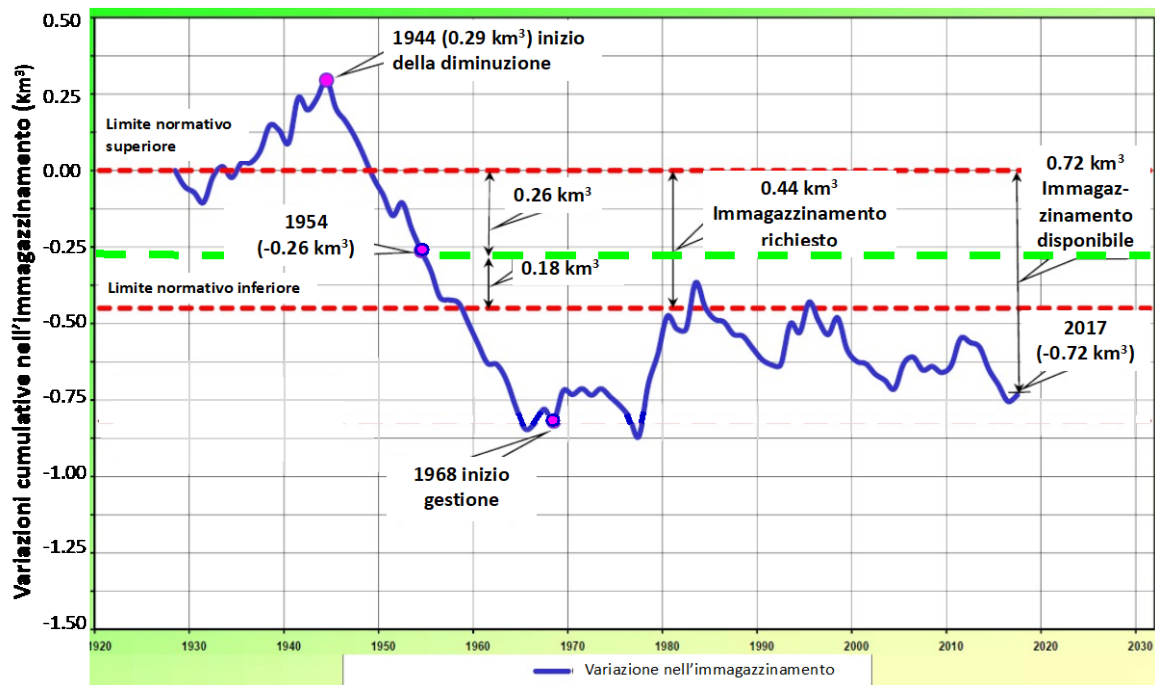


Figura 49 - Variazioni cumulative dell'immagazzinamento di acque sotterranee nell'acquifero di San Fernando utilizzato a fini potabili tramite pozzi a servizio della città di Los Angeles, California, USA. La linea blu mostra le variazioni di immagazzinamento dal 1929 al 2016. Il volume di immagazzinamento nel 1929 costituisce il punto iniziale con valore di variazione pari a 0. Il piano di gestione consisteva nel controllare l'uso e contemporaneamente nell'introduzione di acqua attraverso punti di infiltrazione al fine di mantenere circa $0,44 \text{ km}^3$ di acque sotterranee nell'acquifero (linea verde tratteggiata) con una variazione accettabile compresa tra le linee tratteggiate rosse (modificato da ULARA Watermaster, 2018).

Come mostrato in Figura 49, con solo poche brevi eccezioni, il volume di immagazzinamento è raramente rientrato nell'intervallo previsto. Tuttavia, l'esaurimento si è interrotto e la comunità continua a promuovere la ricarica dell'acquifero per aumentare la quantità di acqua che può essere aggiunta al sistema.

L'acqua sotterranea immagazzinata rappresenta il "risparmio" messo in "banca" dalla natura per un periodo di tempo profondamente lungo. Ma, come per i combustibili fossili, stiamo "prelevando" e "spendendo" quanto risparmiato da lungo tempo in un periodo di tempo estremamente breve rispetto a quello necessario a mettere l'acqua in deposito. In molte regioni agricole del pianeta, l'acqua che risiedeva negli acquiferi da decine di migliaia di anni si è esaurita nell'ultimo mezzo secolo. Tale "spesa" di riserve di lungo periodo, sia che si tratti di antiche acque sotterranee che sono entrate nel sottosuolo decine di migliaia di anni fa, o di depositi di carbone e serbatoi di petrolio che si sono formati da antiche piante sepolte centinaia di milioni di anni fa, significa che ne lasciamo continuamente meno alle generazioni future.

7.2 Le acque sotterranee sono una fabbrica geochimica e un nastro trasportatore

Tutte le acque dolci sotterranee contengono componenti disciolti e sono in movimento trasportando il loro carico disciolto, attraverso il sistema di flusso, verso le aree di recapito. Questo processo è andato avanti per tutto il tempo geologico. Il tipo e l'entità di questi costituenti disciolti rendono le acque sotterranee utili o non utili per i processi potabili, agricoli e industriali. Le caratteristiche principali della superficie terrestre, così come esiste oggi, sono il risultato di eventi geologici del passato, da milioni a miliardi di anni fa, quando le forze all'interno della crosta terrestre formavano montagne mentre l'erosione e la deposizione di sedimenti creavano valli e pianure. Nel nord e nell'estremo sud, i ghiacciai hanno plasmato il paesaggio e spalmato miscele di materiale geologico sulla terra per formare gli strati geologici di superficie di oggi. Il ciclo idrologico si è costituito molto tempo fa in sincronia con il clima e il paesaggio, evolvendosi insieme nel tempo geologico. L'acqua che scorre sulla superficie terrestre è il principale agente che controlla l'evoluzione del paesaggio attraverso l'erosione e la deposizione. Leopold et al. (1964) affermavano che "i fiumi sono i canali di scolo che fanno scorrere le rovine dei continenti", in riferimento alla massa di sedimenti trasportati dai sistemi fluviali verso l'oceano. Questa concisa affermazione potrebbe essere adattata in "L'acqua sotterranea è l'enigmatica rete attraverso la quale scorre la decimazione delle rocce", in riferimento alla massa di soluto trasportata nell'oceano dalle acque sotterranee.

Le acque sotterranee fluenti costituiscono la base che fornisce l'approvvigionamento continuo di acqua al sistema idrico superficiale attraverso periodi sia umidi che secchi e occasionalmente alterano il paesaggio attraverso lo sviluppo di croste saline in zone aride e la formazione di grotte con relative cavità di sprofondamento (sink hole) in aree carsiche.

Circa la metà dell'acqua che scorre nei fiumi proviene dal flusso a lungo termine attraverso la porzione satura del sistema idrico sotterraneo e l'altra metà proviene dal deflusso da precipitazioni (ruscellamento). Un'aliquota del ruscellamento avviene in superficie, anche se la maggior parte del flusso avviene nella porzione più superficiale del sottosuolo e si innesca nella frangia capillare o in zone temporaneamente sature sospese su strati a bassa permeabilità.

7.2.1 Costituenti chimici naturali delle acque sotterranee

L'acqua naturale contiene elementi disciolti noti collettivamente come Solidi Totali Disciolti (TDS), quasi tutti sali inorganici naturali. L'acqua con meno di 1000 milligrammi per litro (mg/L) di TDS è considerata dolce, mentre l'acqua con più TDS (> 4000 mg/L) è classificata come salmastra, l'acqua con TDS più alto (> 10.000 mg/L) è salata (acqua di mare ~ 35.000 mg/L) e la salamoia (> 35.000 mg / L) è estremamente salata. La Tabella 1 sintetizza i termini utilizzati per descrivere il livello di TDS dell'acqua. Quando un pozzo viene perforato praticamente ovunque nel globo, l'acqua sotterranea poco profonda ha un basso TDS (è "dolce") ed è buona da bere se non è eccessivamente influenzata dalle sostanze chimiche derivanti da attività umane. A grandi profondità, l'acqua è salmastra, ancora a maggiore profondità è salata e al di sotto di questa, l'acqua è tipicamente una salamoia. Tale variazione di acqua con la profondità da dolce a salmastra a salata a salamoia è pressoché universale, tranne che in alcune zone dove non è presente né acqua dolce né acqua salmastra a qualsiasi profondità perché tutta l'acqua sotterranea è salata.

Tabella 1 - Classificazione delle acque per diversi valori di Solidi Totali Disciolti

Solidi Totali Disciolti (mg/L)	Classificazione dell'acqua
< 1.000	dolce
1.000 ÷ 4.000	valori inferiori possono essere potabili
4.000 ÷ 10.000	salmastra
10.000 ÷ 35.000	salata
35.000	acqua marina
> 35.000	salamoia

Le acque dolci sotterranee contengono elementi disciolti di tre categorie: costituenti maggiori; costituenti minori; costituenti in tracce. La quantità degli elementi maggiori, minori e in tracce dipende dal clima presente nell'area di ricarica, dalle condizioni chimiche della zona vadosa e dalla geologia del sistema delle acque sotterranee attraverso il quale avviene il flusso. È utile conoscere le tipologie di elementi che potrebbero essere presenti nelle acque sotterranee perché non è possibile misurare ogni elemento della tavola periodica in un campione d'acqua. In genere, solo 8 o 9 elementi costituiscono oltre il 95 per cento della massa di solidi disciolti nelle acque sotterranee. Indipendentemente dal tipo di acqua e dallo scopo dell'analisi, alcuni elementi sono così pervasivi da far sempre parte di un'analisi chimica di base delle acque sotterranee.

Il TDS delle acque sotterranee è espresso prevalentemente in forma ionica (cioè, ioni con carica positiva o negativa). Ioni H^+ e OH^- sono sempre presenti in acqua in quanto le

molecole dell'acqua, H_2O , si dissociano in H^+ e OH^- . Questo fenomeno apparentemente semplice è in realtà affascinante e complesso, sebbene qui vengano discussi solo alcuni concetti e la terminologia di base. La quantità di ioni H^+ in un campione d'acqua viene solitamente espressa come pH. Come forse saprai, un pH pari a 7 in acqua pura è definito come "neutro", che è una condizione in cui gli ioni H^+ e OH^- sono bilanciati. Il pH dell'acqua sotterranea naturale è variabile. La Figura 50 mostra come la variazione del pH nelle acque sotterranee vari da 6 a 9, con l'intervallo più tipico quello tra 7 e 8. Per un pH di 7 in acqua pura ci sono 0,0001 mg/L di ioni H^+ . Sebbene presenti a concentrazioni molto basse rispetto alle altre specie, H^+ e OH^- sono molto importanti per una moltitudine di reazioni che avvengono nelle acque sotterranee, inclusa la degradazione meteorica, la dissoluzione, le precipitazioni e le trasformazioni microbiologiche e abiotiche.

Molti componenti chimici sono dissolti nelle acque sotterranee come illustrato in Figura 50. I sei costituenti chimici tipicamente presenti ad alte concentrazioni nelle acque sotterranee sono noti come ioni principali: comprendono ioni positivi chiamati cationi (sodio, Na^+ ; calcio, Ca^{2+} ; magnesio, Mg^{2+}) e ioni negativi chiamati anioni (bicarbonato, HCO_3^- ; solfato, SO_4^{2-} ; cloruro, Cl^-). Questi costituiscono normalmente quasi tutta la massa del TDS misurato. I costituenti minori che possono essere presenti comprendono: potassio, K^+ ; manganese, Mn^{2+} ; ferro, Fe^{2+} ; ione silicio, Si^{4+} ; nitrato, NO_3^- ; fluoruro, F^- e carbonio organico disciolto, DOC. I costituenti minori hanno, generalmente, concentrazioni variabili da 0,1 a 5 mg/L. Molti elementi in tracce sono presenti a concentrazione inferiore, talora al di sotto della nostra capacità di rilevarli con le comuni tecniche di analisi.

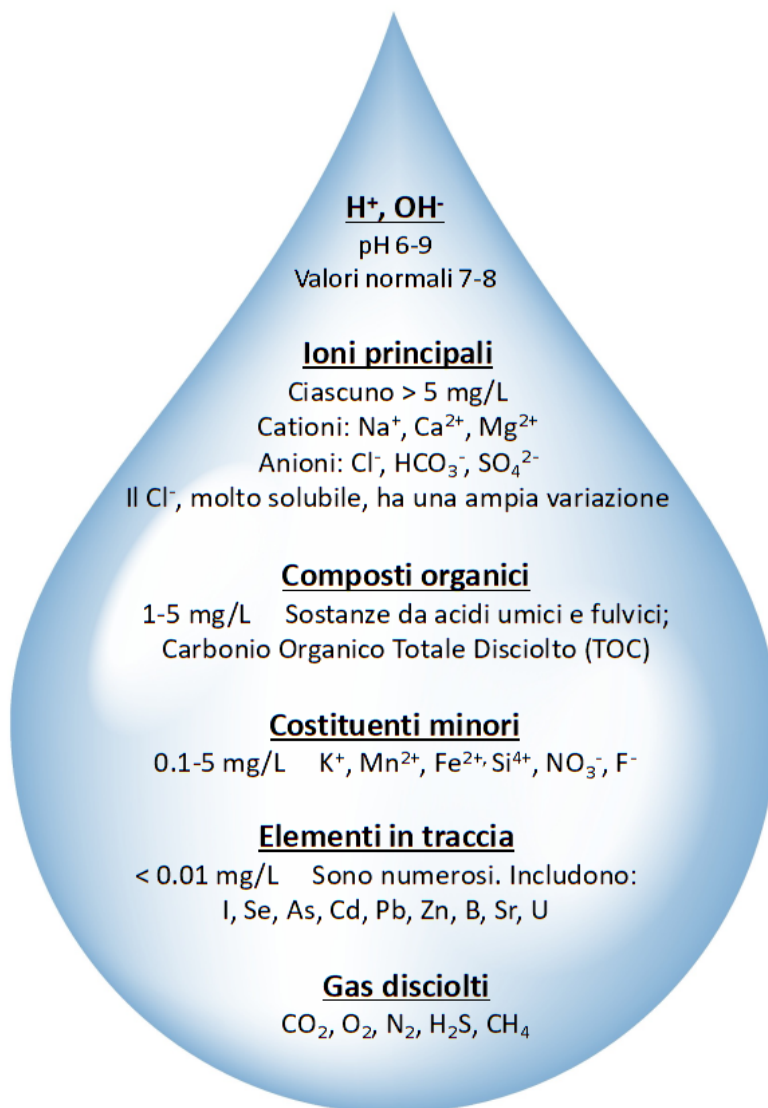


Figura 50 - Le acque dolci sotterranee contengono molti costituenti disciolti noti come ioni principali, costituenti minori ed elementi in tracce come composti organici e gas disciolti. La maggior parte dei costituenti disciolti sono contenuti in forma di ioni carichi positivamente o negativamente (Poster et al., 2020, gw-project.org)

L'ammontare e la tipologia dei costituenti nelle tre categorie ioni principali, costituenti minori ed elementi in traccia, forniscono all'acqua la parte chimica della sua "qualità" naturale. Ulteriori componenti della qualità delle acque sono: la temperatura, il colore, l'odore, la torbidità ed il contenuto microbico. Alcuni dei componenti naturali nelle

acque sotterranee possono essere dannosi a concentrazioni elevate, ma risultano salutari se contenuti a concentrazioni basse (ad esempio, iodio, fluoruri e selenio).

Quasi tutte le acque dolci sotterranee, che non hanno contaminazione significativa da attività umane, sono sicure da bere, ma ci sono importanti eccezioni, in particolare laddove le acque sotterranee naturali contengono quantità eccessive di arsenico o fluoruro o nei sistemi carsici. Bere acqua con eccessivo contenuto in arsenico causa numerosi problemi di salute incluso il cancro. L'arsenico è contenuto in concentrazioni naturali nocive nelle acque sotterranee in più di 60 paesi e colpisce oltre 150 milioni di persone. Mentre è stato dimostrato che bassi livelli di fluoruri (da 1 a 2 mg/L) riducono l'insorgenza di carie dentali, un eccesso di fluoruri causa fluorosi dentale o, peggio, la fluorosi scheletrica invalidante. È stato stimato che più di 200 milioni di persone consumano acqua con alta concentrazione in fluoruri incluso le popolazioni di Cina, India, Stati Uniti, Canada, e parte dell'Africa e del Sud America.

Sebbene siano stati stabiliti livelli di sicurezza per molti altri elementi naturali, come il cadmio, il mercurio, il piombo e l'argento, questi raramente si ritrovano a concentrazioni nocive nelle acque sotterranee naturali. La presenza di livelli nocivi di arsenico e fluoruri deriva da una combinazione di due fattori: la presenza di minerali ricchi in arsenico e fluoruri nell'acquifero e il verificarsi di condizioni chimiche che ne facilitano la dissoluzione e il rilascio nelle acque.

In paesi che dipendono fortemente dai pozzi domestici per l'approvvigionamento idrico come il Bangladesh, l'arsenico può causare danni. Se un pozzo viene perforato in una formazione geologica in cui sono presenti minerali contenenti arsenico e l'ossigeno è assente, nelle acque sotterranee estratte saranno presenti arsenico e ferro disciolti. L'acqua estratta da pozzi poco profondi ha in genere abbastanza ossigeno disciolto da far precipitare i minerali di ferro, rimuovendo l'arsenico dall'acqua. Tuttavia, altri rischi per la salute e fonti di preoccupazione possono derivare da pozzi scavati a mano poco profondi e mal costruiti, a causa della contaminazione batterica dal deflusso superficiale.

L'arsenico e i fluoruri nelle acque sotterranee hanno causato e continuano a causare gravi effetti sulla salute in molte aree rurali dove la povertà non impedisce che si verifichino. Ma minacciano anche la salute nelle aree più ricche dove milioni di proprietari di pozzi domestici consumano acque sotterranee ricche in arsenico o fluoruri senza consapevolezza perché i pozzi privati non sono inclusi in censimenti ed in analisi previste da regolamenti governativi. I luoghi noti per avere quantità eccessive di arsenico e fluoruro di origine naturale sono indicati nella Figura 51a e b.

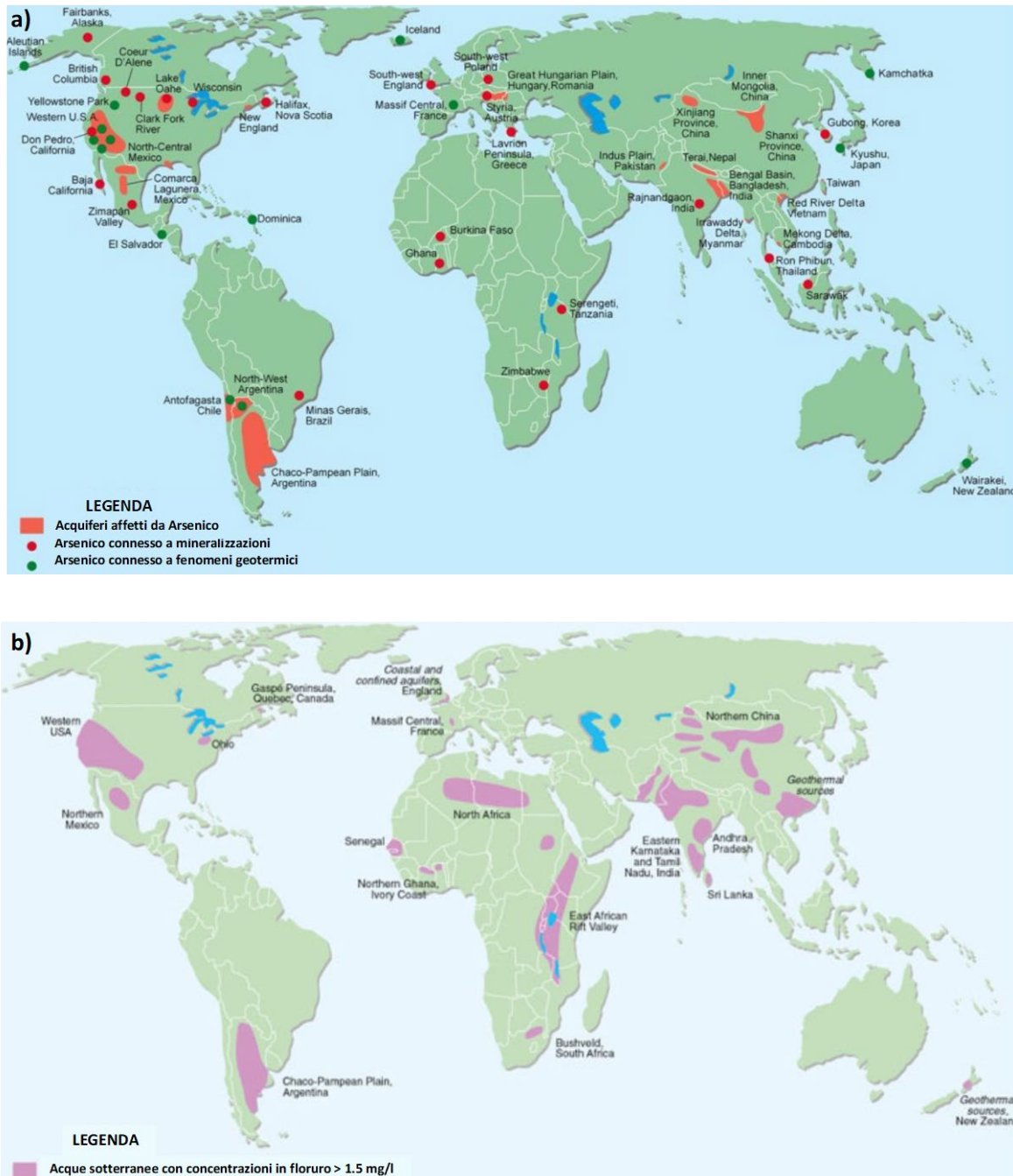


Figura 51 - Il contenuto eccessivo di arsenico e fluoruri di origine naturale sono esempi del motivo per cui le acque sotterranee potrebbero non essere potabili anche in assenza di significative contaminazioni da attività umane: a) distribuzione di problemi documentati da arsenico in acque sotterranee (> 50 µg/L) relativi ad attività mineraria e geotermica (BGS, 2020a); b) ubicazione della presenza documentata di acque sotterranee ad alto contenuto in fluoruri (1,5 mg/L) (BGS, 2020b).

7.2.2 Origine dei contaminanti disciolti nelle acque sotterranee

Il contenuto chimico disciolto nelle acque sotterranee deriva non solo dall'interazione con le rocce in cui scorre, ma anche dai costituenti dell'atmosfera, a cui l'acqua di ricarica era esposta prima di infiltrarsi. Le precipitazioni che si infiltrano attraverso la zona vadosa per formare la ricarica delle acque sotterranee trasportano aerosol umidi e secchi che l'atmosfera trasporta sui continenti. Questi aerosol provengono da spray oceanico, fumo,

vulcani, polvere continentale e fulmini, nonché da sostanze chimiche provenienti da attività umane, come la combustione di combustibili fossili e l'applicazione di erbicidi e pesticidi agricoli. A causa delle loro piccole dimensioni, inferiori al micron, e della natura acida della pioggia dovuta alla presenza di anidride carbonica (CO_2) nell'atmosfera, gli aerosol vengono disciolti nell'acqua di precipitazione. Questo materiale disciolto include molti elementi della tavola periodica in concentrazioni molto basse. La concentrazione di ogni elemento nell'atmosfera varia con la distanza dalla sua origine. Ad esempio, la distribuzione di cloruro precipitato negli Stati Uniti, come mostrato nella Figura 52, indica quantità maggiori di cloruro vicino alle coste e al Gran Lago Salato a causa degli aerosol contenuti negli spray di quei corpi idrici.

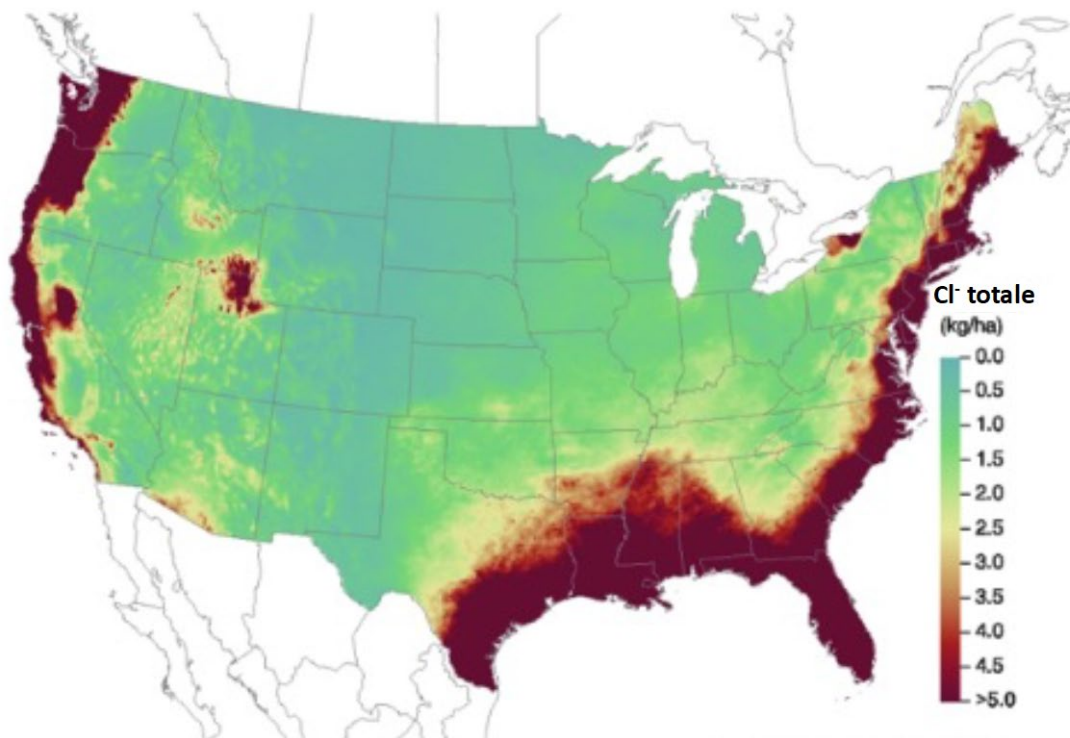


Figura 52 - Mappa delle particelle di flusso umido di cloruro precipitate dall'atmosfera negli Stati Uniti continentali nel 2016 (chilogrammi/ettaro/anno). Le basse concentrazioni sono in verde e le alte in rosso (NADP, 2019).

Sebbene il chimismo delle acque sotterranee naturali derivi inizialmente dal contributo dei costituenti disciolti in atmosfera, quasi tutte le acque sotterranee si arricchiscono di una quantità aggiuntiva di costituenti in soluzione quando l'acqua si infiltra attraverso la zona vadose, come rappresentato schematicamente nella Figura 53. Il chimismo dell'acqua che si infiltra è influenzato nella zona vadosa in due modi: per effetto dell'amplificazione correlata all'evapotraspirazione e per effetto delle reazioni geochimiche (Figura 53). Anche se la zona vadose fosse chimicamente e microbicamente inerte in modo da non apportare alcun componente chimico all'acqua di ricarica, le concentrazioni chimiche nell'acqua di infiltrazione aumenterebbero sostanzialmente (aumentando il TDS) per effetto dell'amplificazione dell'evapotraspirazione.

L'evapotraspirazione trasferisce nell'atmosfera gran parte dell'acqua della zona vadosa (la media globale è di circa il 70 per cento), ma le sostanze disciolte in quell'acqua rimangono nell'umidità del suolo, quindi le concentrazioni di sostanze disciolte nell'acqua rimasta aumentano rispetto a quelle nella precipitazione. Nelle zone aride e semi aride la maggior parte dei soluti derivano dalle precipitazioni. Tuttavia, la zona vadosa non è inerte; è chimicamente reattiva perché l'ossigeno entra dall'atmosfera e l'anidride carbonica (CO_2) viene prodotta all'interno della zona vadosa dal decadimento microbico della materia organica nel suolo e dalla respirazione delle radici delle piante. Per la combinazione di queste reazioni e dell'effetto di amplificazione dell'evapotraspirazione, il contenuto di gas CO_2 nella zona vadosa è da 10 a 100 volte superiore a quello dell'atmosfera terrestre nelle regioni con clima più secco e da 2 a 5 volte superiore nei climi più umidi. Questa CO_2 si scioglie nell'acqua, formando acido carbonico e l'umidità del suolo acida dissolve i minerali. In molte regioni, la zona vadosa accoglie minerali contenenti zolfo, oppure minerali contenenti ferro come la pirite, e questi minerali vengono ossidati in presenza di ossigeno gassoso per produrre acido solforico, aumentando ulteriormente l'acidità dell'umidità del suolo e la sua capacità di portare in soluzione i minerali. Questo processo di dissoluzione dei minerali nella zona vadosa è una parte importante del processo di alterazione chimica. La presenza di ossigeno e anidride carbonica nella zona vadosa la rende particolarmente reattiva geochimicamente.



Figura 53 - La zona vadosa è particolarmente reattiva geochimicamente a causa della produzione di acido carbonico (H_2CO_3) che aumenta la dissoluzione dei minerali, con conseguente produzione di ione bicarbonato (HCO_3^-) e dissoluzione di minerali come la calcite ($CaCO_3$) (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Quasi senza eccezioni, il TDS delle acque sotterranee aumenta con il movimento dell'acqua sotterranea lungo la direzione di flusso dalle aree di ricarica a quelle della loro

venuta a giorno (Figura 54). Questo aumento è dovuto in gran parte al rilascio di salinità residua dalle zone a bassa permeabilità all'interno delle quali l'acqua sotterranea è quasi stagnante. La salinità residua include soluti derivanti da ere geologiche passate, quando l'acqua di mare era presente nelle formazioni geologiche. Alcune quantità minori di soluti possono essere acquisite da ulteriori agenti atmosferici, ma la maggior parte proviene dalla salinità residua e dalle salamoie sottostanti.

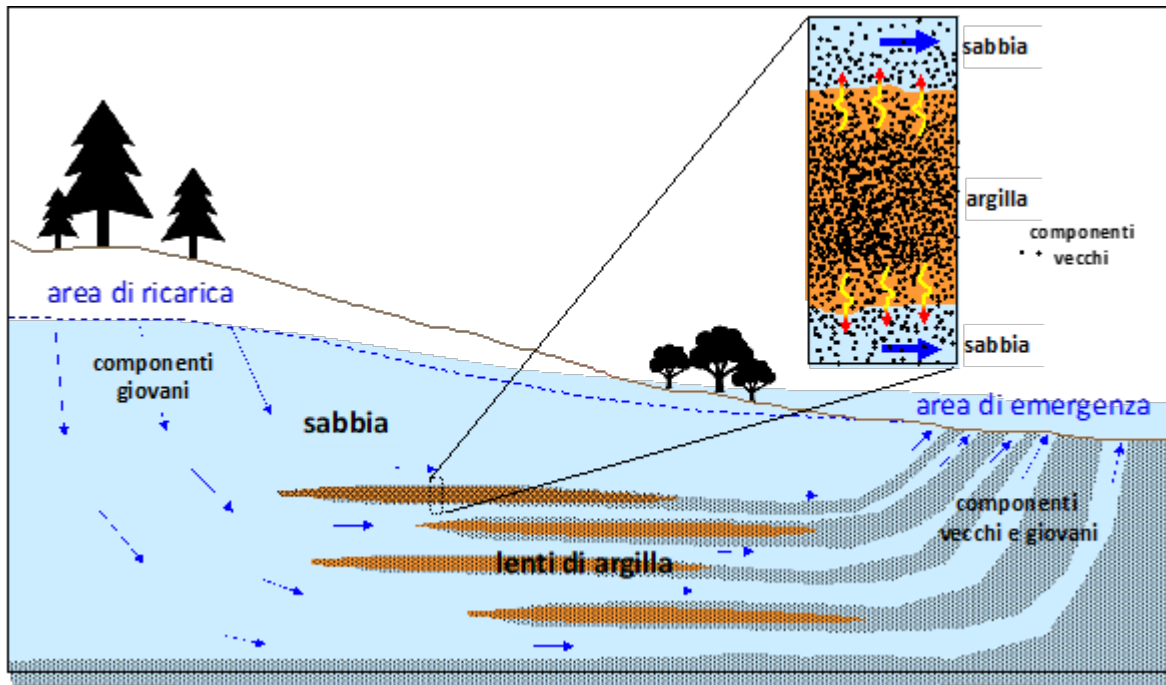


Figura 54 - arancioni / marroni), possono contribuire con i sali disciolti al flusso attivo delle acque sotterranee (frecche blu) nelle parti più permeabili del sistema di flusso delle acque sotterranee. Le unità geologiche a bassa permeabilità con flusso attivo quasi assente (es, letti di argilla) possono rilasciare vecchi sali disciolti (salinità residua, rappresentata qui come ombreggiatura / punti grigi) per diffusione (frecche gialle con punta rossa nello schema di dettaglio) da acque quasi stagnanti nei pori dell'argilla a zone di acque sotterranee che fluiscono in materiali ad alta permeabilità (es. sabbie, con sali giovani, rappresentate in azzurro). Pertanto, le acque sotterranee che vengono a giorno sono una miscela di componenti disciolti giovani e vecchi. Nella figura sono rappresentate per chiarezza solo poche grandi lenti di argilla, ma nella realtà ci sono molte lenti di piccole dimensioni, e di conseguenza le acque sotterranee che vengono a giorno comprendono acque provenienti da zone a diversa reattività geochimica con diversi tempi di residenza (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

I paesaggi geologici più antichi diventano nel tempo geologico meno reattivi dal punto di vista geochimico, poiché i minerali solubili vengono espulsi dal flusso delle acque sotterranee. Nelle aree umide, le acque sotterranee hanno un TDS relativamente basso in questi paesaggi eccezionali, anche dopo aver percorso lunghi tratti di flusso con un lungo tempo di permanenza, perché milioni di anni di dilavamento delle acque sotterranee hanno fatto diminuire le fonti di sali solubili. Al contrario, i paesaggi geologicamente giovani hanno tipicamente acque sotterranee con TDS più elevato perché non c'è stato tempo sufficiente per dilavare i componenti solubili dalle rocce. Ad esempio, le aree soggette a glaciazione durante le ultime centinaia di migliaia di anni come il Canada, parti degli Stati Uniti settentrionali, l'Europa settentrionale e gran parte della Russia, sono paesaggi geologicamente giovani formati dai ghiacciai. Generalmente questi materiali geologici sono

costituiti da minerali e frammenti rocciosi che sono stati esposti alle acque sotterranee solo 10.000 - 15.000 anni dopo che i ghiacciai più recenti si sono ritirati dalle medie latitudini. Di conseguenza, ingenti quantità di minerali facilmente solubili, come calcite, dolomite e pirite, tra gli altri, sono disponibili per la dissoluzione ad opera delle acque di infiltrazione e in alcune di queste aree anche le acque sotterranee che hanno avuto un breve tempo di permanenza hanno valori elevati di TDS, che le rendono salmastre. Le acque sotterranee si muovono più lentamente nelle zone profonde, per cui c'è minore dilavamento e quindi le acque più profonde sono generalmente più salate. Nelle zone aride, le acque sotterranee tendono a contenere più sali disciolti a causa della concentrazione per evaporazione.

Generalmente, le acque sotterranee che hanno percorsi di flusso brevi e ben dilavati hanno bicarbonato (HCO_3^-) come anione dominante e solitamente calcio (Ca^{2+}) come catione dominante (Figura 55). Questa composizione è principalmente il risultato di processi che avvengono nella zona vadosa, come mostrato nella Figura 53. Come discusso in precedenza, la zona vadosa è particolarmente attiva geochimicamente perché la respirazione delle radici e il decadimento microbico producono abbondante CO_2 che si dissolve per formare acido carbonico (H_2CO_3), che favorisce la dissoluzione del minerale producendo così ione bicarbonato (HCO_3^-). Anche se non ci sono minerali reattivi nella zona vadosa, in questa zona viene prodotto un po' di HCO_3^- . Le acque sotterranee che costituiscono quasi tutto il flusso di base di fiumi e torrenti provengono da sistemi di acque sotterranee locali in cui l'anione dominante è HCO_3^- . Su percorsi di flusso più lunghi, più tipici dei sistemi di flusso intermedi, il solfato (SO_4^{2-}) spesso supera HCO_3^- come anione dominante (Figura 55), ma ci sono molte eccezioni. In alcuni sistemi di acque sotterranee, SO_4^{2-} diminuisce a causa di processi microbiologici naturali (riduzione dei solfati) che consumano i solfati e producono CO_2 che a sua volta provoca un aumento di HCO_3^- e una diminuzione del pH. I sistemi di flusso regionali (Figura 55) generalmente hanno cloruri (Cl^-) come anione dominante e sodio (Na^+) come catione dominante perché questi percorsi di flusso più lunghi hanno maggiori opportunità di essere influenzati dal rilascio di salgemma (cloruro di sodio) da zone a bassa permeabilità e formazioni sottostanti. Inoltre, i comuni minerali clorurati hanno solubilità più alta di tutti i principali minerali. La minore solubilità dei principali minerali che producono HCO_3^- e SO_4^{2-} fa sì che questi ioni siano presenti in concentrazioni da basse a moderate.

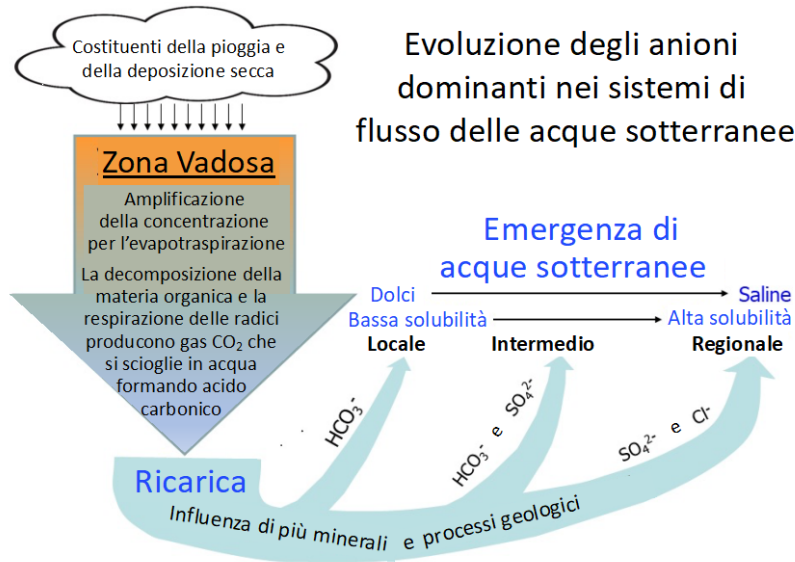


Figura 55 - Gli anioni presenti alle concentrazioni più elevate variano lungo il flusso delle acque sotterranee in funzione delle condizioni geologiche tra le aree di ricarica e di emergenza. (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

I minerali dei cloruri sono così solubili che nei tempi geologici i cloruri vengono rimossi dalle zone a maggiore permeabilità, che sono state dilavate da grandi volumi di acqua dolce di ricarica. Nelle zone a bassa permeabilità e nei sistemi a flusso profondo invece i cloruri si trovano comunemente come "cloruri residui" (Figura 56). In generale, più lungo è il percorso del flusso, più è probabile che le zone di acque sotterranee a flusso lento rilascino cloruri residui nelle zone di flusso attivo.

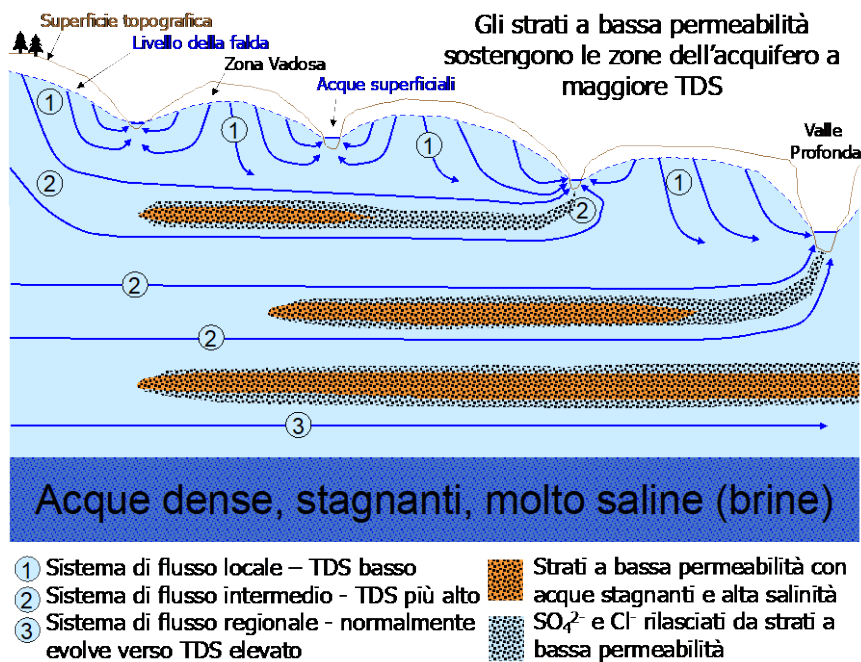


Figura 56 - Riepilogo schematico della distribuzione del TDS con la profondità nelle acque sotterranee (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

7.2.3 Presenza di acque sotterranee salate e ricche di minerali

Le acque sotterranee mineralizzate sono comuni nelle falde profonde. Acque sotterranee dolci sono la norma in falde poco profonde, sebbene nei climi aridi siano comuni acque sotterranee mineralizzate in falde poco profonde.

Dopo il dilavamento dei cloruri residui per lunghi periodi di tempo geologico, le zone di acqua dolce poco profonda si estendono fino a una profondità considerevole in tutto il mondo, a causa di secoli di dilavamento delle acque sotterranee. Ci sono molte regioni in cui le acque sotterranee sono poco mineralizzate fino a profondità di 500 metri o più (Bierkens e Wada, 2019). Al di sotto di queste profondità, le acque sotterranee sono molto probabilmente salmastre o più salate. La profondità della base della zona di acqua dolce (cioè la sommità delle zone di acqua salmastra) varia notevolmente in tutto il mondo. Per illustrare ciò, in Figura 57 è mostrata la profondità stimata dell'acqua salmastra negli Stati Uniti continentali.

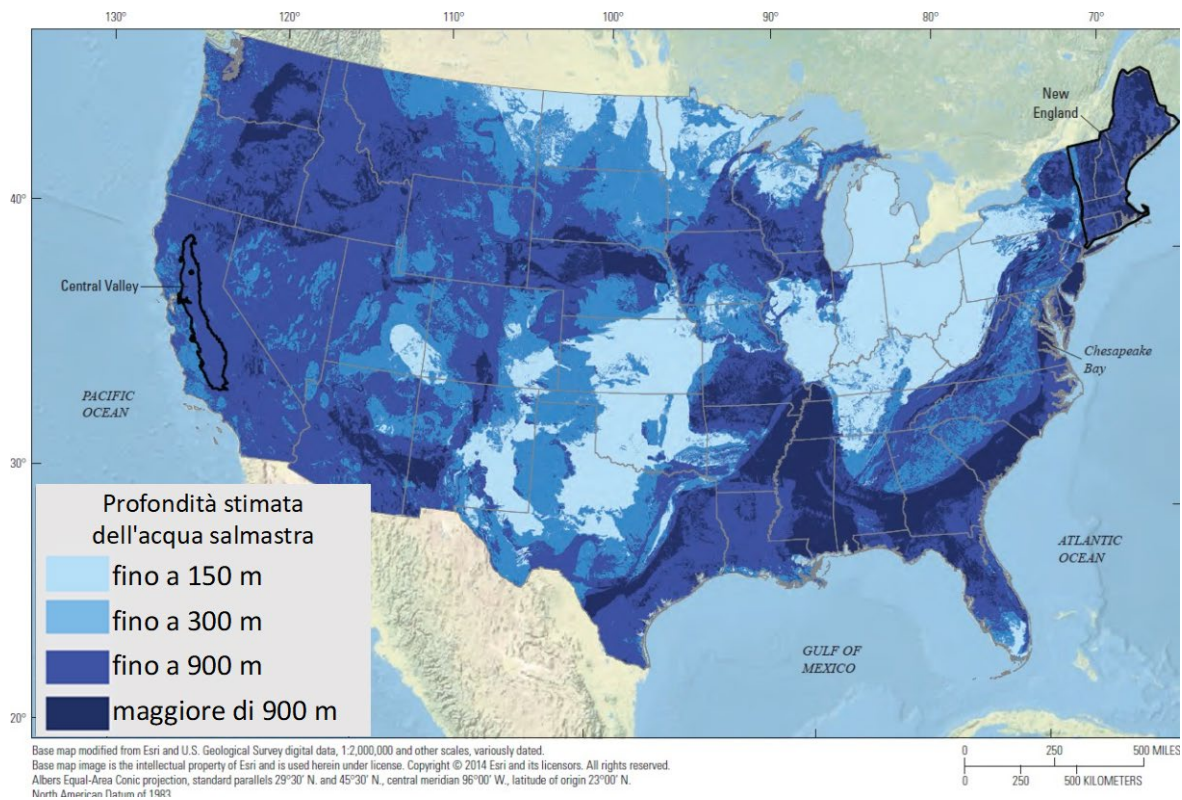


Figura 57 - Profondità stimata dell'acqua salmastra negli Stati Uniti continentali. Nelle aree blu più chiare è probabile che si incontrerà acqua salmastra a meno di 150 m di profondità, mentre nelle aree blu più scure è probabile che l'acqua salmastra si incontrerà solo a profondità maggiori di 900 m (modificato da Stanton et al., 2017).

E' stata riscontrata la presenza imprevista di acqua dolce fossile sotto il fondo dell'oceano al largo della costa nord-orientale degli Stati Uniti. Ciò indica che resta ancora molto da scoprire sull'estensione e le caratteristiche delle acque sotterranee in alcune aree del globo (Gustafson et al., 2019).

Quando il sistema di flusso delle acque sotterranee emerge in superficie, i costituenti chimici terminano il loro viaggio nelle acque sotterranee ed entrano nella porzione superficiale del ciclo idrologico. Nelle regioni con un clima umido, questo viaggio si conclude con travasi in torrenti, fiumi, zone umide e laghi, raggiungendo infine gli oceani. Nelle regioni aride e semi aride, il viaggio finisce come filtrazione verso pianure e valli aride. L'evaporazione da tali aree può concentrare i soluti nelle falde poco profonde da centinaia a migliaia di volte, lasciando tali aree inadeguate per l'agricoltura. In breve, il chimismo delle emergenze delle acque sotterranee governa sia il chimismo della maggior parte delle acque superficiali sia gli accumuli di sali sulla terra e nei suoli delle regioni aride.

Nei climi aridi la vegetazione è scarsa, la ricarica è minima, le falde acquifere sono generalmente più profonde, i gradienti idraulici possono essere bassi e i tempi di permanenza delle acque sotterranee sono lunghi. Di conseguenza, i costituenti disciolti nelle acque sotterranee delle aree aride differiscono e le concentrazioni sono generalmente superiori a quelle delle aree umide, in cui l'acqua sotterranea si ricarica e scorre attraverso le unità geologiche. La maggior parte dei costituenti delle acque sotterranee provenienti da climi aridi derivano da aerosol atmosferici che vengono concentrati per evaporazione e si accumulano sulla superficie fino a quando un raro e importante evento di ricarica li riversa nella falda freatica. La mancanza di vegetazione riduce la quantità di anidride carbonica nella zona di ricarica; quindi, l'alterazione chimica delle rocce costituenti l'acquifero da parte dell'acido carbonico è più lenta e le concentrazioni dei costituenti prodotti dall'alterazione chimica sono inferiori. Di conseguenza, le acque sotterranee sono ricche di cloruro di sodio, solfato di calcio o carbonato di sodio e hanno meno carbonato di calcio rispetto alle acque sotterranee provenienti dalle zone umide. Oltre a queste differenze, il flusso più lento delle acque sotterranee dà il tempo ai componenti delle falde acquifere saline residue e sottostanti di migrare nel sistema delle acque sotterranee superficiali, aumentando ulteriormente la sua salinità.

In alcuni luoghi aridi dove le acque sotterranee emergono in superficie, l'acqua libera non è visibile; l'acqua infatti evapora in superficie e si formano depositi di sale. Ciò si verifica in molti luoghi della Terra. Uno studio delle saline di Abu Dhabi mostra che l'acqua che evapora dalla frangia capillare raggiunge la superficie formando una distesa di sale che copre circa 36.000 km² (Figura 58). Gran parte dei costituenti chimici disciolti provengono dalle acque sotterranee che si infiltrano verso la superficie creando una concentrazione che è circa 10 volte quella dell'acqua di mare. La vegetazione rada o assente nelle aree aride consente ai processi eolici (vento) di agire di concerto con la falda acquifera per sviluppare morfologie uniche come i sabkhas (in arabo, saline). Con la vegetazione scarsa, l'attività eolica erode in profondità i sedimenti superficiali, ma non può spostare il materiale al di sotto della zona capillare, poiché è completamente saturo e quindi non viene sollevato dal vento. In un luogo così, la superficie terrestre riflette la forma e la pendenza della falda freatica sottostante. Queste superfici diventano quindi aree di emergenza ampie e piatte dove l'evaporazione provoca accumuli di sale che formano croste saline (Figura 58).



Figura 58 - Saline (sabkha) degli Emirati di Abu Dhabi, United Arab Emirates. Sebbene questa foto possa sembrare a bassa risoluzione, non lo è; l'aspetto granuloso dell'immagine è dovuto alla temperatura superficiale estremamente elevata di 65 ° C (foto di Wood et al., 2002).

Le sorgenti alcaline (a pH elevato), a volte denominate "piscine blu" a causa del loro colore blu intenso, si trovano in aree in cui i minerali ad alta temperatura dal mantello terrestre sono stati portati vicino alla superficie dall'attività tettonica della Terra (Figura 59). Questi minerali si sono formati ad alta temperatura e pressione e sono instabili nell'ambiente prossimo alla superficie, quindi sono facilmente esposti agli agenti atmosferici. Il weathering, in questo caso senza anidride carbonica, comporta la scissione di molecole d'acqua con rimozione di uno ione idrogeno (H^+) per formare acido silicico (H_4SiO_4) a ione idrossido (OH^-) che aumentano l'alcalinità (cioè aumentano il pH). Quando l'acqua effluisce in superficie, gli ioni calcio in quest'acqua alcalina reagiscono con l'anidride carbonica nell'atmosfera e la calcite minerale ($CaCO_3$) precipita in straterelli molto sottili sulla superficie dell'acqua. Questi straterelli poi affondano sul fondo della piscina formando un sedimento bianco soffice e morbido. Le piscine sono blu perché l'acqua assorbe la parte rossa dello spettro luminoso lasciando i colori della parte blu dello spettro luminoso visibili ai nostri occhi, e questo effetto è accentuato dall'acqua poco profonda sovrastante il fondo bianco di carbonato di calcio. In molte di queste piscine si possono osservare bolle di metano inorganico e idrogeno che salgono in superficie.



Figura 59 - Una piscina blu nel nord dell'Oman si è formata dove i minerali del mantello terrestre hanno raggiunto la superficie e sono stati esposti agli agenti atmosferici, creando acqua alcalina che reagisce con l'atmosfera per far precipitare sottili straterelli di calcite bianca sulla superficie della piscina. Gli straterelli si depositano sul fondo della piscina formando un soffice e morbido sedimento bianco che ne esalta il colore blu (foto fornita da Warren Wood, 1990).

7.2.4 Fabbriche geochimiche e nastri trasportatori in climi asciutti e umidi

In sintesi, con alcune eccezioni, le acque sotterranee evolvono da uno stato quasi incontaminato (basse concentrazioni di specie disciolte) in cui le precipitazioni cadono sulla terra e le concentrazioni delle specie disciolte aumentano man mano che l'acqua attraversa la zona vadosa. Nella zona vadosa, l'acido carbonico è generato dalla dissoluzione del gas CO_2 ad opera delle radici, della materia organica in decomposizione e dei microbi. L'acido carbonico dissolve i minerali, aumentando il totale dei solidi disciolti (TDS) nell'acqua della zona vadosa. L'evapotraspirazione aumenta ulteriormente il TDS perché le molecole d'acqua vengono rilasciate nell'atmosfera mentre tutti i sali si concentrano nell'acqua che alimenta il sistema di flusso delle acque sotterranee sottostanti. Le acque sotterranee mentre si muovono lungo i percorsi di flusso nella zona satura possono subire un aumento minimo o nullo del TDS prima di venire a giorno in superficie, come spesso accade nei sistemi di flusso locali delle acque sotterranee, oppure possono acquisire quantitativi elevati di TDS, come è comune nei sistemi di flusso regionali. **L'acqua sotterranea in movimento costituisce il "nastro trasportatore" per i componenti disciolti, trasportando il carico disciolto dalle aree di ricarica alle aree di emergenza.**

Esistono due categorie di nastri trasportatori (Figura 60). In primo luogo, ci sono quelli che operano in climi secchi, dove tutta la portata delle acque sotterranee evapora o

evapotraspira mentre i sali vengono lasciati indietro per accumularsi in terreni salini, saline o laghi salati come il Grande Lago Salato in Nord America, il Lago Eyre in Australia, il Lago Titicaca in Sud America e il Lago Ciad in Africa. La natura chimica della zona di venuta a giorno delle acque sotterranee nei climi secchi è influente, forse la più influente, sull'ecologia della vegetazione superficiale e dei sistemi acquatici. Al contrario, il secondo, cioè il clima umido, dove i nastri trasportatori scaricano i loro carichi chimici in corpi idrici superficiali come sorgenti, torrenti, fiumi, paludi e acquitrini e gran parte di quest'acqua alla fine sfocia negli oceani.

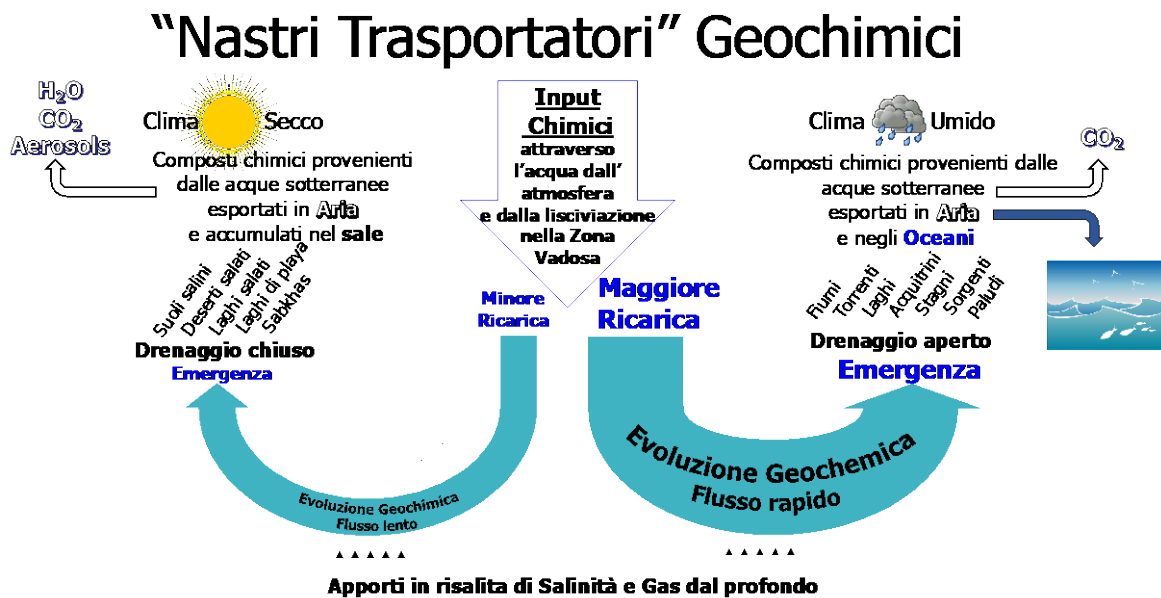


Figura 60 - In recharge areas, aerosols enter the vadose zone with infiltrating water, bicarbonate (HCO_3^-) is created in. Nelle aree di ricarica, gli aerosol entrano nella zona vadosa con l'acqua di infiltrazione, il bicarbonato (HCO_3^-) viene creato nella zona vadosa e i costituenti disciolti entrano nella zona satura. Nei climi secchi, quando l'acqua sotterranea ricca di ioni HCO_3^- defluisce verso aree di drenaggio chiuse, HCO_3^- e CO_2 vengono rilasciati e si formano depositi minerali durante l'evaporazione. Il vento erode i depositi minerali introducendo aerosol nell'atmosfera. Nei climi umidi, quando le acque sotterranee ricche di ioni bicarbonato (HCO_3^-) defluiscono verso corpi idrici superficiali, la CO_2 viene rilasciata nell'atmosfera e si forma calcite ($CaCO_3$), parte della quale si deposita sul fondo dei corsi d'acqua e il resto viene trasportato negli oceani come sedimento fine sospeso insieme a HCO_3^- disciolto (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Quando si considerano le portate e la distribuzione del carico idraulico, i sistemi di acque sotterranee sono generalmente in equilibrio con le attuali condizioni idrologiche del paesaggio odierno. In altre parole, la distribuzione delle pressioni idriche nella zona delle acque sotterranee è in una condizione quasi stazionaria, stabilita dalle condizioni medie del clima attuale, tranne dove c'è un eccessivo pompaggio delle acque sotterranee. Invece, non è questo il caso della composizione chimica delle acque sotterranee, che, quasi ovunque, non è in condizioni stazionarie e generalmente non in equilibrio geochimico con i minerali che l'acqua sotterranea incontra lungo i nastri trasportatori. In luoghi che non hanno raggiunto l'equilibrio geochimico, i processi geochimici si combinano con il flusso delle acque sotterranee per estrarre continuamente massa chimica dalle formazioni rocciose per portarla in superficie. Al contrario, in parti del mondo che sono state geologicamente stabili

da decine di milioni di anni, la fabbrica geochimica e i nastri trasportatori hanno estratto essenzialmente tutti i materiali solubili disponibili. In quei luoghi l'acqua sotterranea è poco mineralizzata, anche a profondità di uno o due chilometri. Questa acqua dolce sotterranea ha un TDS eccezionalmente basso, influenzato principalmente dal carico chimico fornito dall'atmosfera.

7.3 Le acque sotterranee come recettore di rifiuti (occhio non vede, cuore non duole)

In numerose aree della Terra dove esiste un'attività antropica, vengono prodotti composti chimici che possono infiltrarsi nel sottosuolo causando variazioni nelle caratteristiche chimiche delle acque sotterranee. Ogni anno nel mondo vengono prodotti nuovi composti chimici che si aggiungono a quelli già esistenti. Ne deriva che molti composti chimici di diversa tipologia sono stati progressivamente rilasciati nel sottosuolo negli ultimi 100 anni, ma solo qualche migliaio sono quelli effettivamente riconosciuti come causa di contaminazione delle acque sotterranee. La Figura 62 mostra i tipi di composti chimici che sono causa del degrado qualitativo delle acque sotterranee. I composti chimici prodotti dall'attività umana sono conosciuti come composti antropici che si distinguono dagli elementi naturali (elementi geogenici) nelle acque sotterranee. Gran parte delle variazioni chimiche delle acque sotterranee non hanno effetti dannosi sull'uomo e sugli ecosistemi: ma quelli che possono essere dannosi per la salute e per l'ambiente sono ormai diventati causa di grandi problemi in molte regioni. La prima scoperta documentata di una contaminazione delle acque sotterranee che causò numerosi problemi di salute e alcuni morti fu fatta dal fisico John Snow, che nel 1854 attribuì la causa di un'epidemia di colera a Londra (Inghilterra) alla presenza di un pozzo ad uso potabile le cui acque erano state contaminate dai reflui fognari. Sebbene dopo quell'episodio le acque sotterranee siano state più protette ed abbiano causato poche epidemie, i casi di malattie e morti riconducibili alla contaminazione delle acque sotterranee è piuttosto diffusa in tutto il mondo.

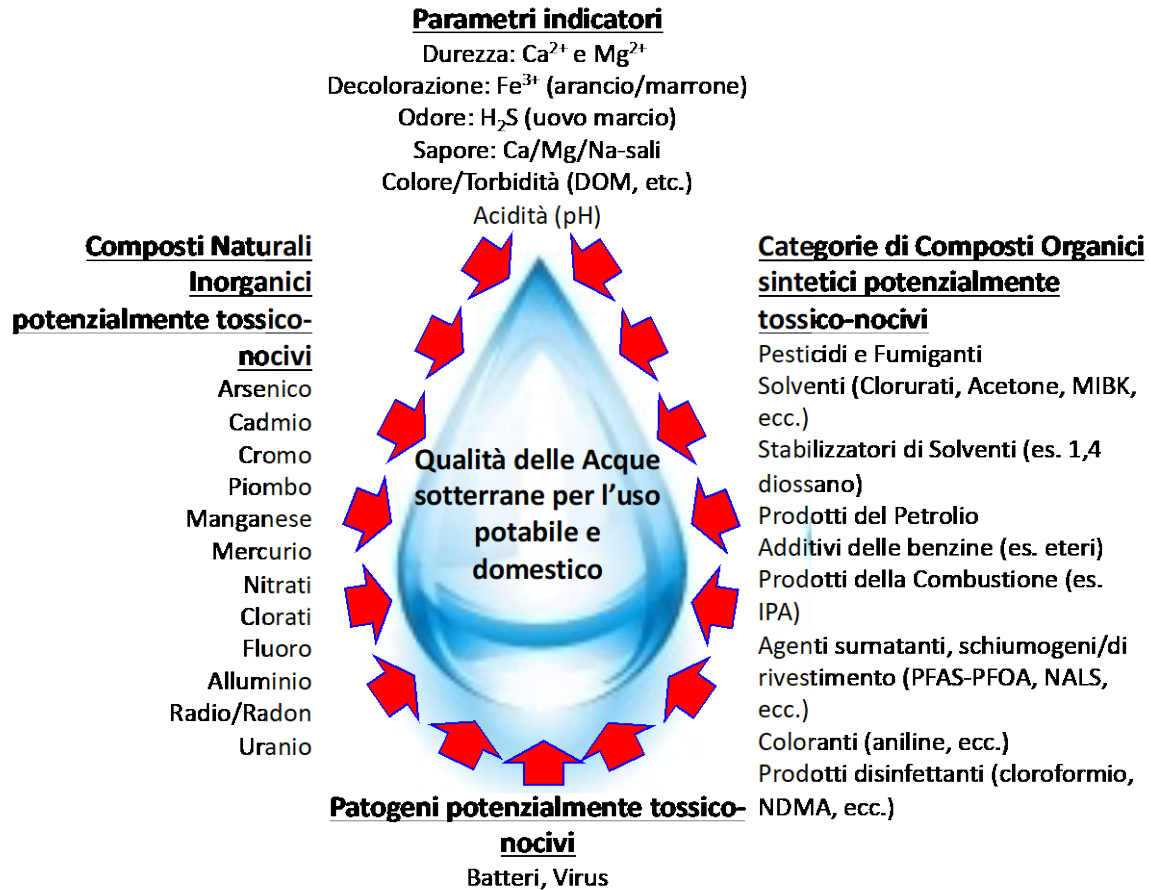


Figura 61 - Categorie di composti chimici che possono deteriorare la qualità delle acque sotterranee (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

La Figura 62 mostra molte delle attività e delle fonti di composti chimici associate alle aree urbane e a quelle rurali, che sono comunemente causa di contaminazione delle acque sotterranee. In aggiunta ai contaminanti riportati in Figura 62, le aree urbane presentano estese reti fognarie che spesso perdono attraverso i giunti di allacciamento dei tubi o eventuali difetti nei tubi stessi. Le aree rurali e periurbane hanno fosse settiche che contribuiscono alla contaminazione delle acque sotterranee. Ogni categoria di contaminazione, mostrata in Figura 62, causa una zona di contaminazione delle acque sotterranee che si estende dalla sorgente in direzione del flusso di falda; questa zona è detta, in virtù della sua forma, pennacchio. Come i costituenti naturali, quelli di origine antropica migrano nelle acque sotterranee dalla zona di ricarica verso i recettori superficiali o verso i pozzi. Alcuni pennacchi arrivano verso il recettore nel giro di pochi anni o decenni, mentre altri effettuano percorsi più lunghi permanendo nelle acque sotterranee per secoli o più. Questi percorsi più lunghi e profondi sono rappresentati in Figura 35 e Figura 38. Alcuni pennacchi si attenuano e possono scomparire per effetto della degradazione naturale, per l'assimilazione da parte dell'ambiente chimico nel sottosuolo, per processi microbiologici o per diluizione. D'altra parte, in alcuni pennacchi i contaminanti non possono essere rimossi o trasformati da processi chimici e microbiologici in altri contaminanti; pertanto persistono e continuano a migrare fino ad arrivare al recettore finale.



Figura 62 - Costituenti chimici derivanti da attività antropiche possono entrare nel sottosuolo cambiando il chimismo delle acque sotterranee e creando in essi pennacchi di contaminazione (adattato da Marshak, 2005).

Prima della Rivoluzione Industriale di due secoli fa, i composti chimici derivanti dalle attività antropiche che entravano nel sottosuolo erano principalmente composti naturali azotati e organici derivanti dai reflui umani e animali. Questi composti chimici sono raramente stati dannosi poichè rapidamente assimilati o degradati da processi naturali. In generale, il sottosuolo ha un'elevata capacità di assimilazione (vale a dire capacità di neutralizzare la contaminazione) su vari contaminanti di origine antropica, il che si traduce in un certo grado di protezione da molte sostanze chimiche prodotte dalla società moderna. Nonostante ciò, nei tempi recenti sono state rilasciate quantità di composti chimici superiori alle capacità di assimilazione del sottosuolo. A partire dalla Rivoluzione Industriale degli inizi del diciannovesimo secolo, una nuova varietà di composti è stata rilasciata nelle acque sotterranee, incluso metalli e catrami, grazie alla estesa capacità di estrarre sostanze utili dal carbone e da altri materiali geologici. Questa dinamica fu di limitato interesse sociale ai tempi, a causa della minore densità di popolazione, dello scarso uso di acque sotterranee e della minore presenza di zone industriali. La sensibilità sulle problematiche relative alla contaminazione delle acque sotterranee incominciò a svilupparsi in Europa ed in America del Nord negli anni '50, quando:

- 1) la crescita della produzione industriale creò la società dei consumi e l'ampio rilascio di composti chimici nel sottosuolo;
- 2) le municipalità incominciarono a spargere i reflui fognari in superficie e a costruire depositi per i rifiuti liquidi e solidi che divennero poi le moderne discariche;
- 3) la "rivoluzione verde" portò allo sviluppo e all'espansione di un'agricoltura dipendente dalle macchine e con un cospicuo uso di fertilizzanti, erbicidi e pesticidi;
- 4) le industrie incominciarono a produrre complessi composti organici per l'utilizzo nelle pulizie, la protezione dal fuoco, l'igiene personale, farmaci e altre applicazioni che divennero di uso comune; questi in alcuni casi erano rilasciati

direttamente nell'ambiente (e.g. nella lotta agli incendi) in altri erano presenti nelle acque di scarico che comunemente percolavano dalle fognature o venivano direttamente rilasciate nel sottosuolo tramite le vasche settiche;

- 5) l'aumento dell'utilizzo delle acque sotterranee per evitare l'uso di quelle superficiali provenienti da fiumi e laghi contaminati.

Gran parte dei milioni di composti organici prodotti o hanno una scarsa mobilità nelle acque sotterranee perché tendono a legarsi alle componenti minerali del sottosuolo o tendono a essere rapidamente degradate da batteri e microbi e hanno solo un lieve impatto. Tuttavia, alcuni di essi, stimabili in qualche migliaio, hanno un'elevata mobilità, degradano lentamente o sono trasformati in altri contaminanti più dannosi. Molti di questi composti sono stati presi in carico dalle acque sotterranee e sono responsabili di estesi pennacchi (fino a qualche chilometro di lunghezza) legati a lunghi periodi di migrazione nelle acque sotterranee.

E' possibile determinare l'età delle acque che si sono infiltrate nel passato in una determinata area, analizzando la presenza di bassi livelli di trizio (molecola radioattiva dell'acqua) che furono rilasciati in atmosfera durante i test nucleari negli anni '50 e '60, e presi poi in carico dalla precipitazione che ricarica gli acquiferi. Nella maggior parte dei paesi industrializzati, quasi tutti i principali acquiferi mostrano la presenza di trizio atmosferico e tracce di altri composti chimici di origine antropica. In generale, un numero crescente di tipi di composti chimici continua a essere trovato nelle acque sotterranee, ma le conseguenze a lungo termine di questa dinamica non sono ben note, specialmente relativamente agli impatti dell'esposizione contemporanea ad una molteplicità di contaminanti. Nel mondo industrializzato e densamente abitato, gran parte delle risorse idriche, inclusi laghi, fiumi e acque sotterranee, sono recettori della crescente diversità di composti chimici. Questo aumenta la difficoltà nel mantenere adeguati processi di trattamento che consentano di rendere le acque potabili.

Una delle caratteristiche che differenzia le acque sotterranee da quelle superficiali è che la contaminazione delle prime ha tempi di permanenza molto più lunghi. Se noi fossimo in grado di fermare improvvisamente ogni rilascio di contaminanti nel sottosuolo, i pennacchi esistenti tenderebbero a scomparire per diluizione e/o assimilazione. Ma per molti pennacchi il tempo richiesto sarebbe di secoli o millenni. Un esempio è il fumigante dibromocloropropano (DBCP), il cui uso nelle aree agricole è stato proibito negli Stati Uniti nel 1979. In California esso è stato trovato nelle acque sotterranee ancora nel 2017, 38 anni dopo il divieto di uso. Al contrario, la diluizione e l'attenuazione nei fiumi e nei laghi richiede tipicamente solo settimane o mesi dall'evento di rilascio della contaminazione nelle acque. Per queste ragioni risulta strategico prevenire il possibile rilascio nelle acque sotterranee di contaminanti in modo tale che essi non possano iniziare il loro lungo viaggio nel sottosuolo.

Molti dei motivi per cui le acque sotterranee si sono degradate nel tempo dipendono dal fatto che l'uomo ha spesso adottato una prospettiva "occhio non vede cuore non duole". In ogni caso, anche quando le acque sotterranee sono uscite da questa prospettiva, ci sono stati errori nelle nostre assunzioni, che hanno portato a attese irrealistiche sul destino dei rifiuti rilasciati nel sottosuolo. Si prenda ad esempio un sistema di trattamento dei rifiuti in situ con una fossa settica per la gestione degli scarichi di un'abitazione che è installata nel sottosuolo. Tipicamente il sistema è composto da un serbatoio e un sistema drenante composto da tubi orizzontali forati che permettono alle acque reflue di infiltrarsi nella zona vadosa e poi in falda. (Figura 63). Mentre il sistema settico fornisce la prima linea di difesa dalla diffusione di malattie, tramite la rimozione dei maggiori patogeni (batteri e virus), non è efficiente nella rimozione dei composti azotati e di molti altri contaminanti di uso comune nelle case oltre ai farmaci. La Figura 63 mostra un sistema settico ed il pennacchio nelle acque sotterranee che si genera a seguito dell'installazione del sistema. Col tempo il pennacchio con contaminanti più persistenti aumenta di dimensioni fino a quando raggiunge un recettore, quale un pozzo, un fiume un lago o un estuario.

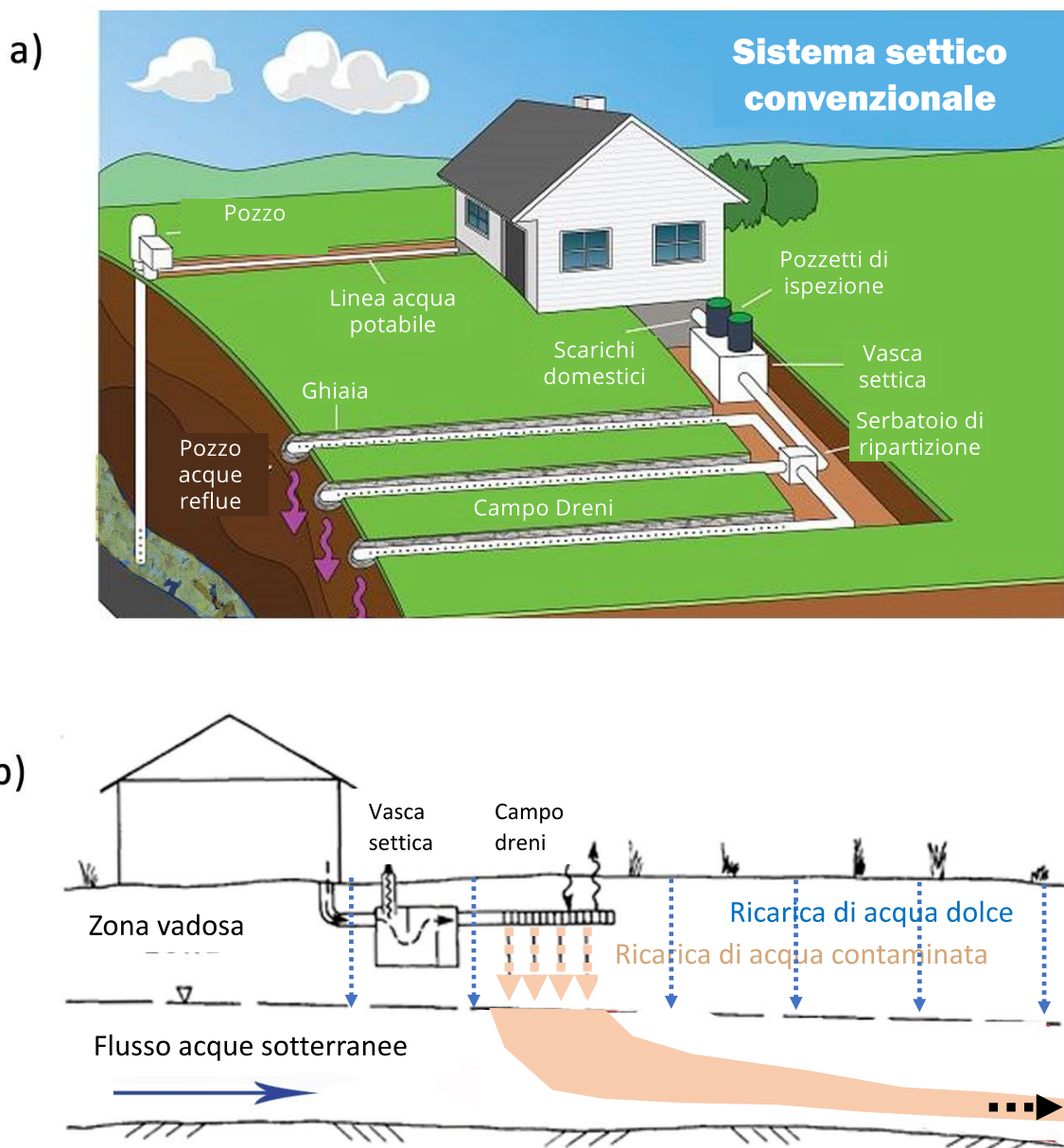


Figura 63 - Schema di: a) un tipico sistema settico residenziale con un pozzo domestico nelle vicinanze; e b) il pennacchio associato, che si ha a seguito dell'installazione del sistema (modificato da Wilhelm et al, 1996).

Circa un quinto delle abitazioni negli Stati Uniti, Canada e paesi della Comunità Europea è dotato di sistemi settici. I pennacchi associati a questi sistemi contengono nitrati, fosforo, prodotti farmaceutici, legati all'igiene personale e alla produzione e conservazione di alimenti. Negli anni '50 i sistemi settici divennero uno standard per le abitazioni in molte aree periurbane di rapido sviluppo negli Stati Uniti. La scelta era basata su criteri ingegneristici che però assumevano un sensibile grado di attenuazione dei pennacchi di contaminazione legato alla forte capacità di assimilazione del sottosuolo. Si presumeva che i pennacchi si estendessero molto limitatamente a partire dal sistema settico e che nitrati, fosfati, prodotti farmaceutici e di conservazione del cibo non fossero persistenti. Infatti molte abitazioni con sistemi settici avevano anche un pozzo per acqua nella stessa proprietà

non lontano dal sistema stesso. Nel complesso l'entità dell'impatto dei contaminanti nelle acque sotterranee provenienti dai sistemi settici sulla salute umana non è ancora ben conosciuta. Ma ciò che è invece ben conosciuto è che questo tipo di contaminazione sta danneggiando la qualità dell'acqua e l'ecologia di molti laghi, fiumi, estuari e baie, a seguito del rilascio all'interno di essi di composti azotati e fosforo che causano eutrofizzazione. Questo effetto è anche causato dai pennacchi che si originano dai sistemi fognari perdenti nelle città.

Si può dire che il maggior problema causato dai reflui umani e animali che finiscono nelle acque sotterranee siano i patogeni, quali *Escherichia coli* (*E. coli*), batteri e virus. I batteri sono generalmente poco mobili negli acquiferi sabbiosi poichè sono abbastanza grandi da essere trattenuti nei piccoli pori tra i granuli, ma possono essere mobili negli acquiferi ghiaiosi, carsici, e fessurati, così come i virus che sono più piccoli e quindi generalmente più mobili dei batteri. Virus dannosi possono rimanere attivi fino a tre anni e possono viaggiare vari chilometri in acquiferi ad elevata permeabilità. E' facile determinare nei campioni di acqua la presenza di *E. coli*, che a sua volta è indice di elevata potenziale presenza di virus. Al contrario, sebbene siano disponibili diversi metodi efficaci per riscontrare la presenza di virus nelle acque, tali analisi vengono raramente eseguite cosicché la frequenza di malattie attribuibile alla presenza di virus nelle acque sotterranee è poco conosciuta. *E. coli* è comunemente presente in molti pozzi domestici.

La cosiddetta rivoluzione verde nella produzione alimentare è un altro esempio di come la scienza doveva portare grandi benefici, a cui però seguirono forti danni indiretti per le acque sotterranee. Tutto cominciò negli anni '40 con i grandi cambiamenti nella dinamica delle coltivazioni (miglioramento genetico delle piante), ma quell'aspetto della rivoluzione finì presto quando l'agricoltura divenne fortemente meccanizzata e dipendente dalla produzione di fertilizzanti, erbicidi e pesticidi. Rilevanti quantità di composti azotati nei fertilizzanti finirono nelle acque sotterranee come Nitrati (NO_3^-), potenzialmente dannosi per l'uomo e per gli ecosistemi. Come effetto combinato dell'agricoltura moderna e dei sistemi fognari perdenti, i nitrati sono il contaminante più comune e diffuso nel mondo.

Quando si esplora la storia della contaminazione delle acque sotterranee degli ultimi 70 anni, si scopre che lo sviluppo e la produzione di nuovi prodotti chimici ha spesso avuto conseguenze negative sulla qualità delle acque sotterranee (Figura 64).

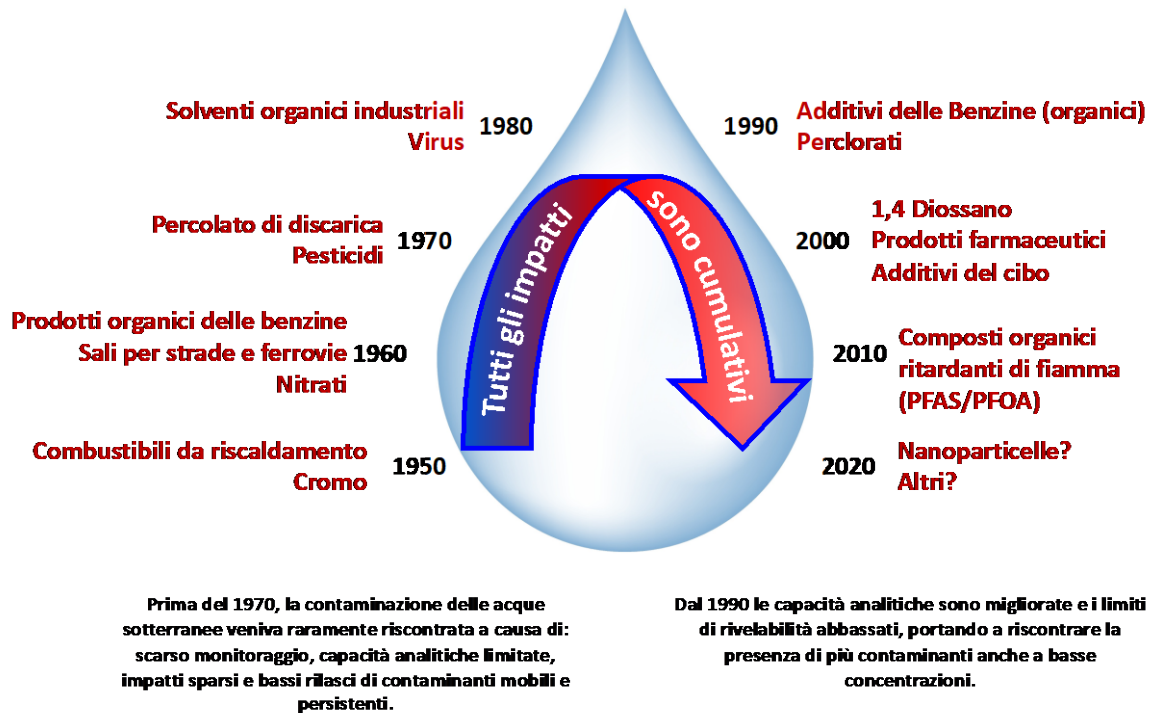


Figura 64 - Evoluzione delle fonti di contaminanti che hanno impattato le acque sotterranee negli ultimi 100 anni. Esempi di contaminanti sono riportati in Figura 65 (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

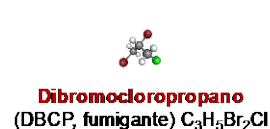
Il più recente esempio di progresso scientifico fatto per migliorare le nostre vite quotidiane a cui poi è seguito un impatto negativo sulle acque sotterranee è lo sviluppo dei composti organici fluorati, conosciuti come PFAS (sostanze per- e poli-fluoroalchili), come mostrato in Figura 65. Questi sono essenziali per la produzione di moderni prodotti commerciali come Teflon, Gore-Tex, schiume anti-incendi e tessuti e vestiti ignifughi. I PFAS sono diffusi globalmente nelle acque sotterranee, all'interno delle quali sono mobili e persistenti. Tendono a fare bio-accumulo (si accumulano negli organismi che sono esposti a essi) e sono pertanto presenti nelle cellule e nel sangue di molte persone e di animali. L'accumulo di PFAS in questi casi è stato messo in relazione a problemi come la distruzione dei sistemi metabolici e immunitari, le complicazioni a livello di sviluppo neuronale e l'insorgere di tumori (Sunderland et al., 2019).

Esempio di contaminanti organici

a) Idrocarburi aromatici



b) Pesticidi



c) Solventi Clorurati



d) Surnatanti, incluso le schiume anti-incendio come i PFAS (PFOS e PFOA)

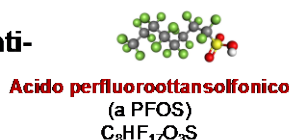


Figura 65 - Esempi di tipologie di contaminanti organici trovati nelle acque sotterranee. (ne vengono mostrati solo due per tipologia, altri sono discussi in altri libri del Groundwater Project): a) idrocarburi aromatici da sversamenti di benzina; b) pesticidi (un erbicida e un fumigante); c) solventi clorurati; e, d) surnatanti, incluso le schiume anti-incendio. In alto viene mostrata una molecola d'acqua a comparazione di dimensioni e complessità strutturale. I PFAS riportati sono solo due delle migliaia di composti creati per un'ampia varietà di prodotti di uso quotidiano (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Un altro progresso scientifico che può avere impatti negativi sulle acque sotterranee è lo sviluppo delle nanoparticelle che sono usate nella produzione di diverse merci, che includono le lenti antigraffio, le vernici resistenti alle micro-crepe, le coperture anti-graffiti per i muri, le protezioni solari trasparenti, i tessuti anti-macchia, i vetri auto-pulenti e le coperture in ceramica per i pannelli solari. Le nanoparticelle si trovano nei nostri rifiuti e verosimilmente finiranno nelle acque sotterranee. Se ciò incominciassero a verificarsi con continuità, non sapremmo ancora quali potrebbero essere le conseguenze.

In questa discussione sulla contaminazione delle acque sotterranee, gli effetti considerati sono tutti negativi, ma c'è anche un aspetto positivo legato all'utilizzo degli acquiferi come depositi di rifiuti. Questo riguarda lo sviluppo di depositi geologici profondi (DGR) per lo stoccaggio di scorie nucleari ad alta intensità. Questi rifiuti devono rimanere confinati per milioni di anni. Perciò l'obiettivo è di stoccare i rifiuti in zone profonde dove la radioattività è confinata con riferimento ad una base temporale geologica. Vale a dire stoccare i rifiuti dove le acque sotterranee non sono parte del ciclo idrologico attivo alle condizioni attuali. Molti paesi stanno progettando e alcuni realizzando dei DGR in strati geologici a permeabilità molto bassa alla profondità di circa 450-600 metri sotto la superficie topografica, dove le acque sotterranee sono saline, stagnanti e mostrano tempi di residenza negli strati di milioni di anni (Figura 66). Ci sono molti altri tipi di rifiuti pericolosi che non sono radioattivi ma degradano lentamente e i DGR sono anche per essi un'opzione per il loro isolamento dall'ambiente.

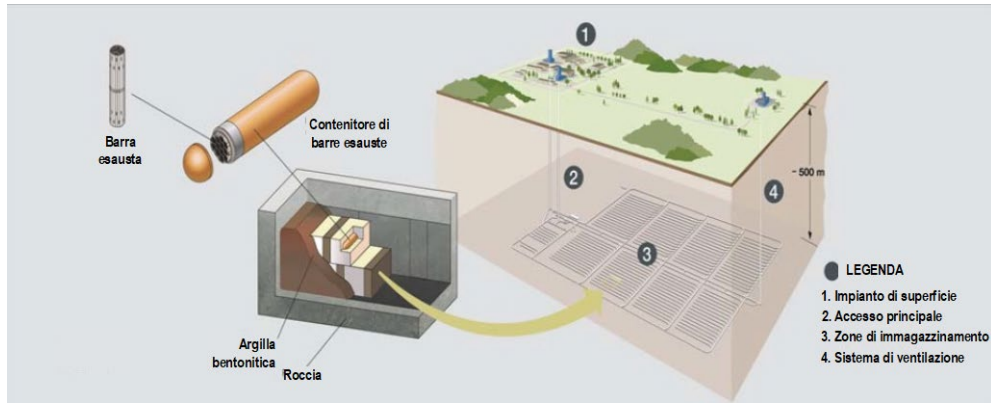


Figura 66 - In depositi geologici profondi per le scorie nucleari solide, le scorie sono stoccate in cavità scavate in ammassi rocciosi a permeabilità molto bassa (Faybishenko et al., 2016).

7.3 Le acque sotterranee come sistema di supporto alla vita

La vita sulla Terra è resa possibile dalla presenza di acqua dolce. La ricerca di segni di vita extra-terrestre nel nostro Sistema solare, e oltre, è fondamentalmente la ricerca di presenza di acqua dolce.

Le acque sotterranee per l'agricoltura e l'acqua potabile agricole. Nel 2019, anche l'Organizzazione Mondiale dell'Agricoltura valutò al 70 per cento la percentuale di acqua dolce usata a scopo agricolo nelle maggiori regioni del mondo, come mostrato in Figura 67. Le acque sotterranee forniscono acqua potabile totalmente o parzialmente a circa la metà della popolazione mondiale e rappresentano il 43 per cento di quelle usate per l'irrigazione (UNWWAP, 2015). Due miliardi e mezzo di persone dipendono esclusivamente dalle risorse idriche sotterranee per soddisfare i requisiti di base quotidiani (UNWWAP, 2015).

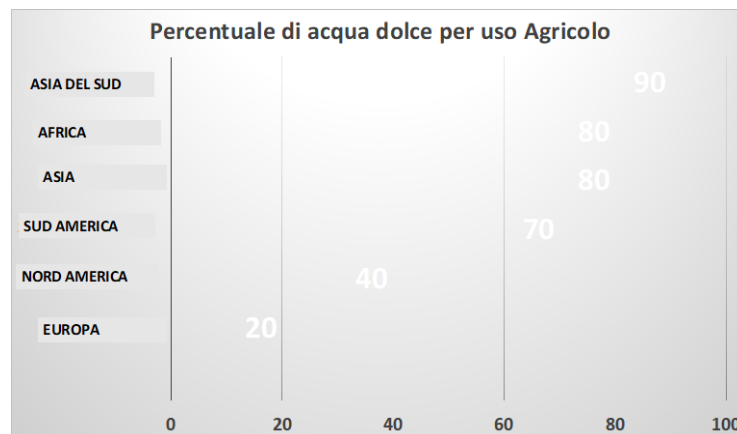


Figura 67 - Percentuale di acqua dolce utilizzata in agricoltura nelle maggiori regioni del mondo (dati da Global Agriculture, 2020).

L'acqua sotterranea è strategica per la produzione del cibo necessario a soddisfare i bisogni dell'attuale popolazione mondiale e ha ottemperato molto bene a questo scopo, fino ad ora, ma mostra segnali di grande crisi. Attualmente circa il 10 per cento della produzione di cibo mondiale è sostenuta dalle acque sotterranee e la popolazione è sempre in aumento.

L'agricoltura per irrigazione è generalmente produttiva il doppio rispetto a quella senza, ma c'è solo una limitata quantità di acqua che non è ancora stata già allocata allo scopo.

La popolazione mondiale di 8 miliardi di persone nel 2020, è previsto che diventi 11 miliardi alla fine del XXI secolo. La disponibilità di cibo in molti paesi è al limite della crisi. I miglioramenti portati dalla Rivoluzione Verde stanno svanendo e, in alcune regioni, c'è una diminuzione della quantità di produzione di cibo legata alla salinizzazione e erosione dei suoli. La Cina, che detiene il 7 per cento della terra arabile a fronte del 19 per cento (1.4 miliardi) della popolazione mondiale, sta per completare il più grande progetto di derivazione dell'acqua nel mondo per risolvere il problema della scarsità di acqua nella Pianura della Cina settentrionale. Le acque del fiume Yahtzee verranno deviate 1000 km più a nord, dove gran parte dell'acqua verrà usata per ricaricare i grandi acquiferi dell'area. Dall'altra parte l'India, la cui popolazione si prevede superi quella della Cina nel 2024, ha un bisogno di acqua ancora maggiore, ma le iniziative per la soluzione del problema sono ancora poche. L'India usa il doppio di risorse idriche sotterranee rispetto alla Cina, con l'89 per cento dell'acqua a scopo irriguo. Gran parte dell'uso di acque sotterranee in India non è più sostenibile poiché sta prosciugando gli acquiferi. Estese aree in India ricevono precipitazioni molto intense ma gran parte di queste va velocemente negli oceani senza poter essere utilizzata per la produzione di cibo. Infine si valuta che le variazioni climatiche aumenteranno le criticità in molti paesi che già presentano situazioni di sovrasfruttamento idrico.

Come evidenziato da questo libro, i corpi idrici superficiali sono sostenuti dal continuo apporto di acque sotterranee (Figura 68). Questo è il motivo principale per cui i fiumi possono mantenere portate apprezzabili anche in prolungati periodi aridi. Inoltre le acque sotterranee non sono soggette a rapide variazioni di temperatura, permettendo di fornire condizioni di habitat stabili a flora e fauna acquatiche. Sia lungo fiumi e laghi sia in zone topograficamente depresse, si sviluppano zone umide (che includono marcite, stagni, torbiere) che formano zone di transizione tra l'ambiente acquatico e quello terrestre. Queste zone forniscono un ambiente unico per disponibilità di aria e acqua, permettendo lo sviluppo di specie che vivono in ambienti umidi con minime disponibilità di ossigeno.



Figura 68 - Molte tipologie di corpi idrici superficiali in diversi contesti naturali sono alimentati dall'apporto continuo di acque sotterranee (Poeter et al., 2020, gw-project.org).

Le zone umide si trovano in diverse zone della Terra e coprono più di 12 milioni di km², un'area grande come la Groenlandia. Le zone umide sono in generale declino che è stimabile attorno al 35 per cento nel periodo dal 1970 al 2015; un tasso di decrescita pari a circa 3 volte quello delle foreste. Le zone umide non esistono perchè sono in zone dove le precipitazioni sono maggiori, ma perchè poste in aree dove le acque sotterranee sono affioranti o sub-affioranti. Vale a dire che sono le acque sotterranee a creare e mantenere le zone umide ed il loro habitat. Nelle zone un po' più alte dove il livello delle acque sotterranee è più profondo e le radici delle piante più piccole non sono immerse nella zona satura, le acque sotterranee mantengono ancora una funzione positiva per le piante ad alto fusto con radici profonde che possono avere sempre acqua anche nei periodi aridi, quando le acque superficiali tendono a scarseggiare.

Le acque sotterranee forniscono una molteplicità di servizi dalla regolazione del flusso nei corpi idrici superficiali, al supporto agli ecosistemi e alla fornitura di acqua per i

vari utilizzi antropici. In breve le acque sotterranee sono il supporto per la vita sulla Terra. Nel 2019 Van der Gun ha classificato i servizi che le acque sotterranee forniscono in accordo la classificazione degli ecosistemi del Millennium Ecosystem Assessment (Figura 69).

Servizi di fornitura

- Acqua Domestica
- Irrigazione
- Acqua Industriale
- Energia Geotermica



Servizi di supporto

- Sorgenti
- Flusso di base dei fiumi
- Sostegno alla flora idrofila
- Mantenimento aree umide
- Mantenimento comunità microbiche superficiali

Servizi di Regolazione

- Attenuazione effetti periodi aridi e umidi
- Attenuazione effetti cambiamenti climatici
- Riduzione erosione e piene
- Attenuazione variazione qualità dell'acqua e temperatura
- Purificazione acqua (assimilazione di patogeni e contaminanti)

Servizi Culturali

- Acque minerali
- Sorgenti termali
- Grotte turistiche

Figura 69 - Prospetto degli importanti servizi forniti dalle acque sotterranee classificati in funzione della classificazione dei servizi ecosistemici definiti dal Millennium Ecosystem Assessment (adattato da Van der Gun, 2019).

In conclusione, le acque sotterranee forniscono l'acqua vitale per l'uomo, direttamente come acqua potabile e indirettamente attraverso l'irrigazione a grande scala per la produzione di cibo e beni. Come gli ecosistemi naturali, l'uomo richiede risorse sostenibili di acqua. La convergenza di flussi sotterranei a lunga distanza e la portata delle sorgenti hanno fornito il supporto vitale alla nostra specie da milioni di anni. Oggi la differenza è che l'uomo è in grado di prelevare direttamente dal sottosuolo ingenti volumi di acqua e di trasportare l'acqua su distanze molto lunghe, superando in molte zone le capacità del ciclo idrologico naturale. Perciò oggi l'uomo sfrutta le acque sotterranee ad un tasso che non è compensato dalla ricarica naturale e allo stesso tempo introduce nel sistema masse di contaminanti che non riescono ad esse naturalmente degradati. E' indubbio che la nostra vita dipenda dalle acque sotterranee e che la crescita della popolazione creerà ancora maggiore richiesta di questa risorsa, ampia ma non infinita. La necessità di conoscere i nostri sistemi idrici sotterranei per gestirli in maniera efficace in sintonia con il ciclo idrologico è grande più che mai.

8 Acque sotterranee in esaurimento

La Terra ha migliaia di acquiferi ma solo alcune decine sono considerati rilevanti. Grazie ai dati satellitari raccolti nel decennio 2003-2013 dalla missione di osservazione della Terra della NASA chiamata Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), è stato possibile approfondire le conoscenze sullo svuotamento delle falde idriche di molti

acquiferi principali. A differenza di altri studi di telerilevamento basati sull'analisi di immagini visive, GRACE ha misurato le modeste variazioni spazio-temporali del campo gravitazionale terrestre, pesando le variazioni di massa d'acqua degli acquiferi principali. La Figura 70 illustra la perdita (-) o l'accumulo (+) di acque sotterranee (millimetri di acqua all'anno), sulla base dei dati di GRACE per i 37 acquiferi più grandi della Terra.

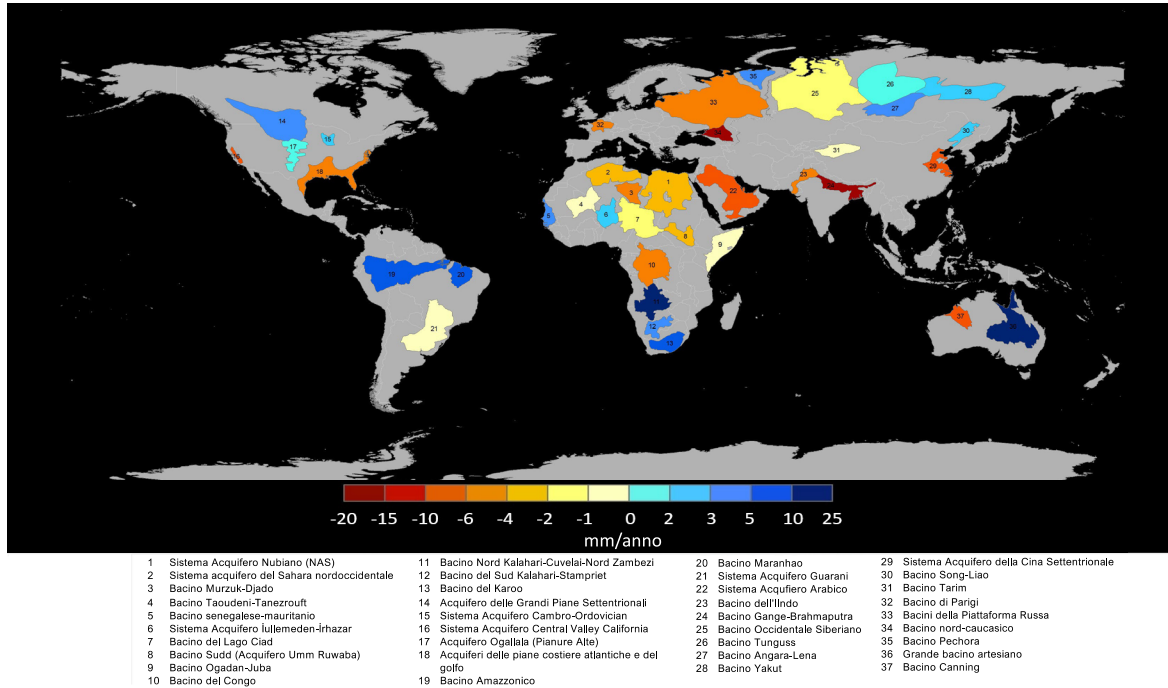


Figura 70 - Perdita (-) o accumulo (+) di acque sotterranee, in millimetri di acqua per anno, per i 37 acquiferi più estesi della Terra sulla base dei dati GRACE, raccolti dal 2003 al 2013 (NASA / JPL-Caltech, 2015).

I risultati del progetto GRACE sono coerenti con le stime dell'emungimento di acque sotterranee a lungo termine. La stima del prelievo di acque sotterranee in India dal 1950 al 2010 è rappresentata nella Figura 71 con le medesime serie temporali di un gruppo di paesi selezionati. Il tasso di prelievo di acque sotterranee dell'India nel 2010 è stato di circa 251 km³/anno, equivalente a un quarto del tasso globale. Il bacino del Gange-Brahmaputra, che comprende zone dell'India, della Cina, Nepal, Bangladesh e Bhutan, che insieme ospitano circa il 10 per cento della popolazione del pianeta, risente dell'impovertimento e dell'inquinamento delle acque sotterranee. Quasi il 50 per cento delle falde acquifere del mondo potrebbe essere "oltre il loro punto di non ritorno", il che significa che un recupero naturale richiederebbe secoli.

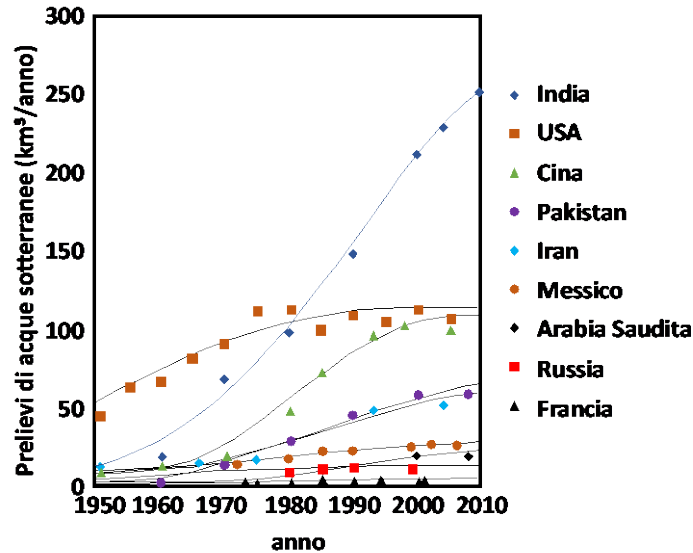


Figura 71 - Stima del prelievo di acque sotterranee dal 1950 al 2010 nei paesi selezionati (modificato da Van Der Gunn 2019, con dati di Margat e Van Der Gun, 2013).

Il sistema acquifero nubiano, il più vasto del mondo, le cui acque sotterranee non sono rinnovabili (acque fossili), si estende tra Sudan, Ciad, Libia ed Egitto. Principalmente in relazione a questi due ultimi paesi, l'acquifero nubiano è soggetto a forte stress per gli insostenibili tassi di emungimento legati alla crescita della popolazione. La Libia dipende da tale acquifero per circa il 95 per cento del suo fabbisogno idrico.

Il sistema acquifero nubiano è inoltre uno dei pochi acquiferi transfrontalieri sottoposto ad accordo internazionale. In tutto il mondo esistono sei acquiferi transfrontalieri per cui sono presenti accordi ratificati a livello internazionale e due con accordi informali. Il sistema acquifero del Sahara nordoccidentale, che soggiace al 60 per cento del territorio dell'Algeria, a quasi un terzo di quello libico e a parte di quello tunisino, risulta essere un altro acquifero transfrontaliero con livelli di emungimento molto elevati. E' oggetto anch'esso di un accordo o patto di cooperazione internazionale ed è simile al sistema nubiano in quanto ospita risorse idriche fossili e quindi non rinnovabili. Queste acque sotterranee sono utilizzate principalmente per l'irrigazione ed il fabbisogno industriale.

Le proiezioni, basate sull'attuale utilizzo dell'acqua, sulle previsioni di incremento della popolazione e sugli scenari di crescita economica, prevedono carenze sostanziali di disponibilità idrica nel prossimo decennio, includendo i circa 600 acquiferi transfrontalieri. Lo svuotamento delle falde acquifere è il più evidente delle due principali problematiche legate alle acque sotterranee del pianeta; l'altro riguarda l'inquinamento. Quest'ultimo comporta la diminuzione dell'utilità delle acque sotterranee residue per effetto che rimane dopo lo svuotamento dell'acquifero. La mancata gestione delle risorse idriche sotterranee della Terra rappresenta quindi una minaccia per la stabilità globale della società umana.

9 Le sfide nella governance delle acque sotterranee

I numerosi libri in corso di preparazione e che saranno inseriti nel "Groundwater Project" perseguono l'obiettivo comune di portare alla luce le molte componenti ancora "nascoste" del puzzle delle acque sotterranee. Per risolvere i problemi connessi alle acque sotterranee affinché queste possano svolgere adeguatamente il ruolo strategico ed essenziale di sostegno all'ecologia e alle attività umane, dobbiamo conseguire una conoscenza scientifica più che approfondita di tali risorse; per evitare tragiche criticità legate a beni comuni essenziali risulta inoltre necessario avere un quadro di governance (leggi, regolamenti, linee guida) coerente con la loro natura e la loro complessità.

La risoluzione dei problemi relativi alla più efficaci forme di governance per la gestione ottimale della risorsa idrica deve iniziare con il riconoscimento che l'acqua e l'aria sono fluidi che circolano a livello globale e sono essenziali per la vita. Entrambe queste risorse non si rigenerano e la loro quantità non cambia nel tempo. Il quantitativo di acqua disponibile sulla terra è costante da centinaia di milioni di anni. Quello che può cambiare, e quindi è necessario sia gestito, è la velocità di movimento dell'acqua nel ciclo idrologico e la qualità chimico/biologica dell'acqua disponibile in un determinato luogo e in un determinato momento in cui risulta indispensabile per il sostegno della vita.

Poiché l'acqua e l'aria sono fluidi che circolano a livello globale, l'effetto dell'attività antropica su questi fluidi non è limitato al luogo in cui si verifica l'attività stessa, ma piuttosto all'impatto che esso provoca a livello globale. L'espressione "Think Globally, Act Locally" è particolarmente rilevante per la gestione della risorsa idrica.

La definizione più comunemente utilizzata per il termine "locale" in merito alla gestione della risorsa idrica è il bacino idrografico (ossia, una porzione della superficie terrestre da cui l'acqua potrebbe potenzialmente defluire verso il reticolo idrografico, raggiungendo una specifica sezione di valle lungo lo stesso). Il ricorso ai bacini idrografici come unità di gestione semplifica la quantificazione delle acque superficiali ma non tiene conto del complesso sistema delle acque sotterranee.

Fortunatamente, in molti casi, e in particolare nei bacini idrografici con estensione maggiore di 1000 km², il sistema di flusso delle acque sotterranee risulta essere caratterizzato da un flusso attraverso la proiezione verticale dello spartiacque idrografico molto basso o trascurabile. In questi casi è giustificato l'utilizzo, come unità di riferimento per la gestione delle acque sotterranee, del bacino idrografico. Ad ogni modo, la maggior parte dei sistemi acquiferi più estesi ed importanti del mondo eccede 100.000 km², superficie che include molti bacini idrografici superficiali differenti. La gestione di questi sistemi acquiferi dovrebbe comprendere l'intero bacino idrogeologico.

Molti bacini idrografici e sistemi acquiferi si estendono oltre i confini politici locali, regionali e nazionali. La gestione multi-giurisdizionale delle acque crea notevoli criticità per la governance delle acque sotterranee ed è attualmente il più grande ostacolo a una

gestione efficace. Sono pochi gli esempi di successo di governance transnazionale di lunga durata: 1) la Convenzione per la protezione del Reno; e 2) l'accordo "Great Lakes Quality" per i Grandi Laghi Laurenziani. Questi sono esempi di accordi transnazionali che hanno raggiunto ottimi risultati, ma riguardano principalmente le problematiche relative alle acque superficiali e non quelle sotterranee.

L'attuale scarsità di politiche gestionali degli acquiferi transfrontalieri è documentata da Pateiro (2017). Burchi (2018) elenca gli accordi di gestione di sei acquiferi transfrontalieri. L'accordo più antico (1977) riguarda Francia e Svizzera per la gestione dell'acquifero di Ginevra. Gli altri cinque accordi sono più recenti, ratificati generalmente dopo il 2007 e per la maggior parte dei quali non è stata realizzata una piena attuazione.

Nella maggior parte dei paesi, le acque sotterranee non sono gestite in modo ottimale a causa della mancata conoscenza delle principali problematiche che le caratterizzano, di seguito riassunte:

- I problemi delle acque sotterranee si manifestano tipicamente con un forte ritardo tra la causa e il momento in cui si scopre che una determinata problematica è sufficientemente grave da attrarre l'attenzione. Troppo spesso le relazioni di causa-effetto non sono così chiare da poter indurre ad azioni correttive mirate. Tali caratteristiche sono diverse da quelle relative alle acque superficiali di fiumi e laghi, casi nei quali la causa e l'effetto, come ad esempio le morie ittiche, sono di solito evidenti e si verificano in un lasso temporale molto breve, per cui si possono intraprendere subito azioni correttive mirate per un rapido miglioramento della situazione.

- Per molti dei problemi legati acque sotterranee, soprattutto quelli riguardanti la contaminazione, le azioni correttive richiedono tempi molto lunghi prima che se ne possano osservare i benefici (spesso decenni), e pertanto buona parte dei risultati delle attività intraprese dalla generazione attuale andranno a beneficio di quella futura. Questo aspetto inibisce l'adozione di misure e azioni correttive lì dove non è presente una forte sensibilità ambientale ed un ampio impegno sociale per la sostenibilità.

- Sebbene i problemi delle acque sotterranee costituiscano una parte rilevante della crisi idrica a scala globale, quasi tutti i problemi relativi alle acque sotterranee risultano localizzati in quanto riguardano di solito un singolo acquifero, una singola comunità, pozzi specifici o singole famiglie. Poiché ogni problematica risulta avere una predominante caratteristica sito-specifica, risulta necessario considerare le peculiarità locali anche nelle soluzioni del problema. La struttura di governance delle acque sotterranee, quindi, deve essere sufficientemente flessibile per rispondere a problemi che possono essere a tutte le scale, dall'intero acquifero a singoli pozzi.

I casi citati mostrano che gli approcci convenzionali alla governance delle acque sotterranee offrano prestazioni modeste. Ciò è dovuto in parte alla mancanza di una conoscenza complessiva delle acque sotterranee ma è principalmente dovuto all'inadeguatezza delle politiche di governance. Pertanto, il "Groundwater Project" non

solo persegue l'obiettivo di elucidare la conoscenza delle "scienze delle acque sotterranee", ma anche quello di studiare i criteri di governance, in modo da identificare i fattori di criticità e le buone pratiche che si sono dimostrate maggiormente efficaci in tutto il mondo.

L'introduzione di pratiche di governance efficaci per le risorse idriche deve necessariamente iniziare riconoscendo l'acqua e l'aria come fluidi che circolano a livello globale e sono essenziali alla vita. Questo riconoscimento comporta che acqua ed aria debbano essere gestiti come "beni comuni" non assoggettabili a proprietà privata, con gestione affidata a qualsiasi ente pubblico governativo purché abbia autorità di rilievo costituzionale. Risulta infatti che la gestione dell'aria nell'atmosfera come bene comune non sia stata messa in discussione, ma la classificazione della risorsa idrica come bene comune è soggetta a varie interpretazioni.

In particolare, le acque sotterranee sono state considerate in alcune giurisdizioni come una "risorsa fuggitiva" come petrolio o gas naturale, che può essere estratta da un pozzo da una proprietà privata, indipendentemente dall'effetto del pompaggio sul flusso idrico sotterraneo nelle proprietà circostanti o sull'ambiente in superficie.

La governance delle acque sotterranee può avere successo solo se tutte le acque, comprese quelle sotterranee, siano esplicitamente riconosciute nella legislazione come "bene comune", in quanto tale non soggetto a possibili privatizzazioni. Inoltre, l'estrazione di acqua dai sistemi naturali deve essere riconosciuta come diritto di usufrutto (ossia un utilizzo temporaneo senza danneggiarla o distruggerla), soggetta a regolamentazione sia per quanto concerne modalità e quantità di estrazione e sia per quanto riguarda la qualità quando viene reimessa nel sistema naturale.

L'impoverimento e la contaminazione delle risorse idriche sotterranee sono problemi che tramandiamo alle generazioni future e vi è la necessità di implementare un migliore quadro etico della governance delle acque sotterranee (Abrunhosa et al., 2018). Le norme etiche derivanti dai principi della giustizia intergenerazionale richiedono infatti che non si facciano pagare alle generazioni future gli insuccessi passati o presenti nel buon governo. Questo aspetto è talmente importante da essere al centro del concetto di sviluppo sostenibile, come sancito dagli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite.

Per il raggiungimento di questo obiettivo sarà importante l'adozione diffusa nei fatti, e non solo a parole, del Principio di precauzione. Questo principio ha ricevuto l'attenzione internazionale nel 1992, come il 15° Principio della Dichiarazione di Rio delle Nazioni Unite sull'ambiente e lo sviluppo: "Al fine di proteggere l'ambiente, l'approccio precauzionale deve essere ampiamente applicato dagli Stati in base alle loro capacità. In presenza di minacce di danni gravi o irreversibili, la mancanza di una piena certezza scientifica non deve essere usata come motivo per rinviare misure economicamente efficaci per prevenire il degrado ambientale" (Bourguignon, 2015). Più di recente, questo principio è stato incluso esplicitamente o implicitamente nel diritto internazionale riguardante l'ambiente fisico e biofisico, la protezione dell'ambiente e la gestione ambientale, ed è stato

implementato a livello nazionale nelle leggi federali, provinciali e persino comunali degli Stati membri delle Nazioni Unite. È stato inoltre citato in numerose politiche gestionali e linee guida sia nazionali che internazionali, anche se in forme diverse (McCaffrey, 2007; Stirling, 2007; Eckstein, 2017; e Jaeckel, 2017). Il principio è ben chiaro in tutti gli aspetti connessi alla governance delle acque sotterranee, in quanto riguarda in particolare le incertezze relative alla gestione dei valori di emungimento e di ricarica delle acque sotterranee (UNESCO, 2012; Foster e Chilton, 2018; e van der Gun, 2018). Minore attenzione è stata rivolta a come il principio di precauzione possa guidare la nostra governance rispetto alla determinazione scientifica della contaminazione delle acque sotterranee da cause antropogeniche (Stewart et al., 2020).

In prospettiva, il Principio di Precauzione chiede alla comunità delle acque sotterranee- dagli scienziati, legislatori, teorici della politica, gestori della risorsa idrica, fino alle corti internazionali di giustizia, l'umiltà e la franchezza riguardo alle sfide che affrontiamo nel governare noi stessi e il nostro pianeta a fronte di tutto quanto ancora non conosciamo, ma anche quando si pensi di conoscere abbastanza, di essere profondamente preoccupati. È nostro dovere nei confronti delle generazioni future tradurre questa preoccupazione in azioni consapevoli.

10 Epilogo

L'acqua "che scompare" per infiltrazione nel terreno e dai letti dei fiumi, non svanisce semplicemente, così come l'acqua che sgorga da sorgenti e fluisce in superficie non appare semplicemente. Le leggi fisiche che regolano la circolazione idrica (basate sul carico idraulico che rappresenta l'energia per unità di peso dell'acqua e sul principio di conservazione della massa) "collegano i punti", in un modo di cui siamo a conoscenza, dando vita al movimento continuo delle acque sotterranee, seppur lento, anche se invisibile, essendo parte integrante del ciclo globale dell'acqua (Figura 72).

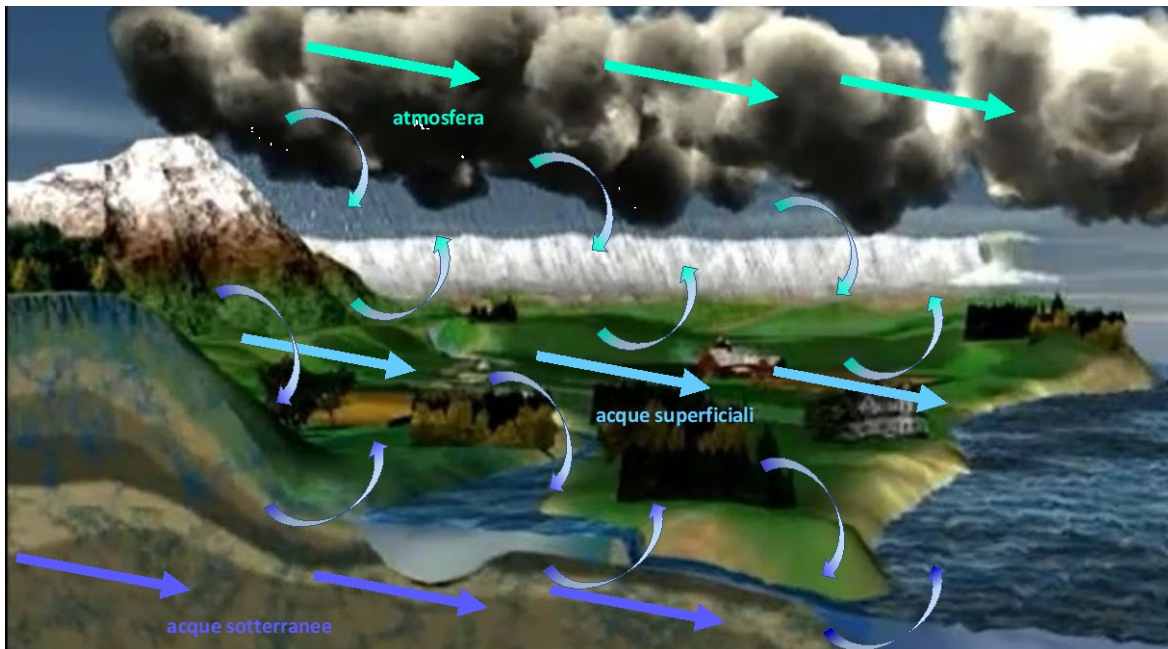


Figura 72 - Come illustrato nella Figura 37, i tre sistemi di trasporto dell'acqua a scala continentale: la circolazione dell'aria nell'atmosfera, il reticolo idrografico in superficie e le acque sotterranee nel sottosuolo sono intimamente connesse e scambiano acqua molte volte lungo il percorso (modificato da NASA, 2020)

Attualmente si prevede che la popolazione della Terra, che oggi risulta essere di quasi 8 miliardi di abitanti, raggiungerà gli 11 miliardi entro il 2100. Gli esseri umani dovranno imparare a produrre cibo a sufficienza senza distruggere il suolo, l'acqua e il clima. Questa è stata definita la più grande sfida che l'umanità abbia mai affrontato (Bourne, 2015) e la gestione sostenibile delle acque sotterranee è al centro della soluzione. La comprensione scientifica e la corretta gestione delle acque sotterranee è essenziale, perché le acque sotterranee possono attenuare il problema se le utilizziamo in modo responsabile e sostenibile, attraverso una migliore governance.

11 Esercizi

11.1 Considera l'area in cui vivi:

1. Qual è il tipo di clima?
2. Qual è la precipitazione annuale?
3. Qual è l'evapotraspirazione annuale?
4. Qual è il principale reticolo idrografico più vicino?
5. Qual è la portata media di tale drenaggio?
6. Il corso d'acqua perde, guadagna o a volte perde e altre volte guadagna?
7. Qual è la tua opinione sull'entità della portata del corso d'acqua (grande, moderata, piccola) e perché?
8. Da dove viene l'acqua potabile?
9. Che tipo di formazioni geologiche sono presenti?
10. Dove osservi manifestazioni di acque sotterranee?
11. Quanto è profonda la falda freatica?
12. Dove sono le aree di ricarica delle acque sotterranee?
13. Dove sono le aree di recapito delle acque sotterranee?
14. Le falde acquifere confinate e non confinate sono entrambe captate da pozzi?
15. Il sistema idrico sotterraneo è stato soggetto a prelievi a un tasso insostenibile?
16. C'è stata una subsidenza notevole?
17. Quali composti naturali si trovano nelle acque sotterranee?
18. C'è contaminazione delle acque sotterranee?

11.2 Considera le condizioni generali in tutte le aree:

1. Qual è lo schema generale dei sistemi di flusso delle acque sotterranee?
2. Tutti gli eventi di precipitazione ricaricano le acque sotterranee?
3. Come si presenta l'acqua sotterranea nel sottosuolo?
4. Cosa succede in un sistema di acque sotterranee quando l'acqua viene pompata dai pozzi?
5. Cosa succede se il prelievo delle acque sotterranee supera la ricarica?
6. Qual è la differenza tra una falda acquifera confinata e non confinata?
7. Perché la temperatura dei corsi d'acqua varia meno della temperatura dell'aria?
8. Perché una temperatura mediata è importante per i flussi?
9. Perché l'acqua nella zona vadosa è più acida delle precipitazioni?
10. Quali meccanismi contribuiscono all'aumento dei solidi disciolti totali (TDS) dell'acqua che ricarica la falda rispetto alla precipitazione?
11. Quali sono i comuni costituenti disciolti nelle acque sotterranee?
12. Perché le acque sotterranee nelle aree di contesti geologici antichi hanno solidi disciolti totali inferiori?

13. In generale, in che modo i costituenti delle acque sotterranee differiscono tipicamente tra i sistemi locali, intermedi e regionali?
14. Quali due meccanismi primari aumentano i costituenti disciolti lungo i percorsi di flusso delle acque sotterranee?
15. Descrivere la differenza principale tra i nastri trasportatori delle acque sotterranee in climi secchi e umidi.
16. In che modo le acque sotterranee sono coinvolte nel ciclo globale del carbonio?
17. Quali sono le fonti comuni di contaminazione delle acque sotterranee?
18. Qual è il contaminante delle acque sotterranee più pervasivo al mondo?
19. Come possono essere utilizzati i sistemi di acque sotterranee in modo positivo rispetto ai contaminanti?
20. Quale attività rappresenta la maggior parte dell'uso umano dell'acqua? In media, quale percentuale dell'acqua utilizzata dall'uomo viene utilizzata a tale scopo?
21. Cosa sostiene i corpi idrici superficiali?
22. Cosa rende la governance delle acque sotterranee una sfida?

12 Riferimenti bibliografici

- 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, Diagram, commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8650678, license <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.en>.
- 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 No. 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://www.bgs.ac.uk/research//groundwater//health//fluoride.html>.
- BGS (British Geologic Survey), 2020b, Fluoride in groundwater, map, <https://www.bgs.ac.uk/research//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, doi.org/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, pp 15-20, doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.007.
- Bunnell, Dave, 2006, Field photo, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Labeled_speleothems.jpg#file, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/deed.en>.

- Charlton, John, 2018, Field photo, Kansas Geological Survey, https://chasm.kgs.ku.edu/ords/pubcat.phd2.View_Photo?f_id=401, accessed July 10, 2020.
- 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.
- 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*, 46, W09525, <https://doi.org/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*, US 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*, pages 549. CRC Press. Kindle Edition.
- Gale, J.E. 1982. *Assessing the permeability characteristics of fractured rock*. Geological Society of America, Special Paper 189: 163-181.
- Galloway, Devin, David R. Jones, and S.E. Ingebritsen (editors), 1999, *Land subsidence in the United States*, U.S. 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*, www.smithsonianmag.com/history/farming-like-the-incas-70263217/.

- Gustafson, C., K. Key, and R.L. Evans, 2019, Scientific Reports, Aquifer systems extending far offshore on the U.S. Atlantic margin. Vol. 9, Article 8709, doi.org/10.1038/s41598-019-44611-7.
- van der Gun, J., 2018, Data, information, knowledge and diagnostics on groundwater, In: Villholth et al. Eds. 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](https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.632).
- Heath, Ralph C., 1983, Basic Ground-Water Hydrology, United States Geological Survey Water Supply Paper 2220, 86 pages, www.nrc.gov/docs/ML1423/ML1423A052.pdf.
- Hinton, M., 2014, Groundwater-Surface Water Interactions in Canada. In: Rivera [editor] Canada's Groundwater Resources, pp. 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, www.iowadnr.gov/environmental-protection/water-quality/private-well-program/private-well-testing/contamination-in-karst.
- 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. doi.org/10.1038/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, blogs.worldbank.org/opendata/chart-globally-70-freshwater-used-agriculture#:~:text=In%20most%20regions%20of%20the,percent%20increase%20in%20water%20withdrawals.
- 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.

- 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*. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema.
- Marshak, Stephen, 2005, *Earth: Portrait of a Planet*, Second Edition, W. W. Norton, New York, New York, USA, 292 pages.
- Mellin, Robert, 2013, U.S. Air Force Photo, afcent.af.mil/News/Photos/igphoto/2000911939/, accessed July 10, 2020.
- NADP, 2019, National (United States) Atmospheric Deposition Program, Total deposition maps, <http://nadp.slh.wisc.edu/committees/tdep/tdepmaps/>.
- Naeinsun, 2012, Field photo, © commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27037762, license, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en/>.
- NASA, 2020, United States National Aeronautics and Space Administration website, <https://pmm.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, permission for use in this book is granted.
- Poland, Joseph, 1977, United States Geological Survey website in Oct 2019: <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. Cazenav, 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., Ed., *Water in Crisis: A Guide to World's Freshwater Resources*, Oxford University Press, New York, 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: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5144, 67 pages, doi.org/10.3133/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: U.S. 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. ASTI Series from Springer. In M. Abrunhosa, A. Chambel, S. Peppoloni, H.I. Chaminé, Eds. 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 8(4):309-315.
- Sunderland, Elsie M., Xindi C. Hu, Clifton Dassuncao, Andrea K. Tokranov, Charlotte C. Wagner, and Joseph G. Allen, 20189, 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: 131–147. doi: 10.1038/s41370-018-0094-1
- The Old Pueblo, 2014, field photo, https://en.wikipedia.org/wiki/Desert_riparian, accessed, July 27, 2020.
- Thrasher, John Sidney, 1856, see Humboldt, Alexander von, 1825 in this reference list.
- Tille, Andreas, 1996, Field photo, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Strokkur_geyser_eruption_close-up_view.jpg, © <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, accessed July 10, 2020.
- ULARA Watermaster, 2018, Upper Los Angeles River Area (ULARA) Watermaster 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.

- UNWWAP, 2016, United Nations World Water Assessment Programme, The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs. Paris, UNESCO.
- 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, 2019, United States National Oceanic and Atmospheric Administration (USNOAA), National Centers for Environmental Information (NCEI), https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/hot_springs/, accessed July 31, 2020, data originally published in Berry et al., 1980.
- USNWS (United States National Weather Service), 2012, Field photo, https://www.weather.gov/ict/event_dryrivers2012, accessed July 10, 2020
- Wada, Y., 2016, Modeling groundwater depletion at regional and global scales: Present state and future prospects. *Surveys in Geophysics*, 37, 419–451. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9347-x>.
- Wikimapia, 2020, field photo, [©creativecommons.org/licenses/by/4.0/](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), <http://wikimapia.org/8582923/Pantanal-Mato-Grossense-National-Park>, accessed, July 27, 2020.
- 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, doi.org/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, 79p, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/cir1139>.
- Wood, W. W. and D.W. Hyndman, 2018, Sea level rise cut in half?; *Groundwater*, volume 56, number 6, pages 845. <https://doi.org/10.1111/gwat.12821>.

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, volume 114, number 3, pages 259-268, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114%3C0259:SOSTTC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114%3C0259:SOSTTC%3E2.0.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, 48: 350-354. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00695.3.x>.

13 Soluzioni degli esercizi

13.1 Considera l'area in cui vivi:

Tutti gli esercizi della Sezione 11.1 sono specifici per l'area in cui vive il lettore. Se queste domande vengono assegnate come parte di un corso, l'insegnante potrebbe sviluppare risposte specifiche per la località, da rivedere dopo che gli studenti hanno tentato di rispondere. Se stai leggendo questo come uno studio indipendente, puoi rispondere a queste domande combinando le informazioni fornite dal libro e la ricerca di informazioni su Internet. Alcune idee su dove cercare sono fornite di seguito.

1. Considerando l'area in cui vivi: qual è il tipo di clima?

Date le tue osservazioni sulla quantità di pioggia nella località in cui vivi e le informazioni tratte da questo libro, classifichi il clima nella tua località come umido, moderato, arido, semi arido o estremamente arido?

[torna agli esercizi](#) ↑

2. Considerando l'area in cui vivi: qual è la precipitazione annuale?

Cerca su Internet le precipitazioni medie annue di una località vicino a te.

[torna agli esercizi](#) ↑

3. Considerando l'area in cui vivi: qual è l'evapotraspirazione annuale?

Considera le stime della percentuale di precipitazioni che evapotraspira in vari tipi di climi e, utilizzando tale percentuale insieme alla quantità di precipitazioni medie annue, calcola una stima della quantità di evapotraspirazione.

[torna agli esercizi](#) ↑

4. Considerando l'area in cui vivi: qual è il principale reticolo idrografico più vicino?

Guarda le mappe della tua zona per fiumi/corsi d'acqua.

[torna agli esercizi](#) ↑

5. Considerando l'area in cui vivi: qual è la portata media di tale drenaggio?

Cerca in Internet i dati ufficiali di portata su quel bacino (o un bacino di dimensioni simili nelle vicinanze o in clima simile e un terreno con un'area di drenaggio simile) che riporta la portata (ad esempio, metri cubi al secondo) in funzione del tempo.

[torna agli esercizi](#) ↑

6. Considerando l'area in cui vivi: il corso d'acqua perde, guadagna o a volte perde e altre volte guadagna?

Per determinarlo, è necessario disporre di almeno due stazioni in cui viene misurata la portata del fiume per vedere se la stazione a valle ha una portata maggiore o minore. Altri flussi in entrata e in uscita possono verificarsi tra le stazioni di misura, quindi è difficile determinarli con solo una piccola quantità di dati. Se il guadagno o la perdita è grande, è possibile stimare la condizione anche solo dalle osservazioni visive.

[torna agli esercizi](#) ↑

7. Considerando l'area in cui vivi: qual è la tua opinione sull'entità della portata del corso d'acqua (grande, moderata, piccola) e perché?

Questa è solo un'opinione, ma potresti confrontare questo flusso con altri famosi fiumi del mondo. Ad esempio, una semplice domanda come qual è la portata media del Rio delle Amazzoni in Internet si otterrà un valore (ad es. 209.000 metri cubi al secondo).

[torna agli esercizi](#) ↗

8. Considerando l'area in cui vivi: da dove viene l'acqua potabile?

Questo potrebbe essere un pozzo associato alla tua casa o a un approvvigionamento idrico cittadino che proviene da pozzi o forse da un fiume o da un bacino idrico.

[torna agli esercizi](#) ↗

9. Considerando l'area in cui vivi: che tipo di formazioni geologiche sono presenti?

Cerca la stratigrafia o una carta geologica della tua zona.

[torna agli esercizi](#) ↑

10. Considerando l'area in cui vivi: dove osservi manifestazioni di acque sotterranee?

Potresti vedere delle sorgenti. Potresti vedere le sponde umide del fiume. O forse c'è un lago o uno stagno in cui la falda freatica è collegata a un corpo idrico superficiale.

[torna agli esercizi](#) ↑

11. Considerando l'area in cui vivi: quanto è profonda la falda freatica?

Cerca dei rapporti sulle acque sotterranee nella tua zona, o carte delle falde acquifere o dati ufficiali sulla profondità dell'acqua nei pozzi (questi sarebbero nei rapporti chiamati log dei pozzi che vengono spesso registrati quando i pozzi vengono perforati).

[torna agli esercizi](#) ↑

12. Considerando l'area in cui vivi: dove sono le aree di ricarica delle acque sotterranee?

Una probabile posizione è nelle zone montane. I rapporti sulle acque sotterranee nella tua zona probabilmente parleranno delle aree di ricarica.

[torna agli esercizi](#) ↑

13. Considerando l'area in cui vivi: dove sono le aree di recapito delle acque sotterranee?

Una probabile posizione è nelle zone vallive. I rapporti sulle acque sotterranee nella tua zona probabilmente parleranno delle aree di discarica.

[torna agli esercizi](#) ↑

14. Considerando l'area in cui vivi: le falde acquifere confinate e non confinate sono entrambe captate da pozzi?

È probabile che i rapporti sulle acque sotterranee nella tua zona forniscano queste informazioni. Oppure potresti dedurla dalle informazioni geologiche e dalla profondità dei pozzi.

[torna agli esercizi](#) ↑

15. Considerando l'area in cui vivi: il sistema idrico sotterraneo è stato pompato a un tasso insostenibile?

È probabile che i rapporti sulle acque sotterranee nella tua zona e forse articoli sui media forniscano queste informazioni. Oppure potresti trovare registrazioni dei livelli dell'acqua nei pozzi e notare un declino a lungo termine.

[torna agli esercizi](#) ↑

16. Considerando l'area in cui vivi: c'è stata una subsidenza notevole?

È probabile che i rapporti sulle acque sotterranee nella tua zona e forse articoli sui media forniscano queste informazioni.

[torna agli esercizi](#) ↑

17. Considerando l'area in cui vivi: quali composti naturali si trovano nelle acque sotterranee?

È probabile che i rapporti sulle acque sotterranee nella tua zona e forse articoli sui giornali forniscano queste informazioni.

[torna agli esercizi](#) ↑

18. Considerando l'area in cui vivi: c'è contaminazione delle acque sotterranee?

Rapporti sulle acque sotterranee nella tua zona e forse articoli sui media potrebbero fornire queste informazioni

[torna agli esercizi](#) ↑

13.2 Considera le condizioni generali in tutte le aree:

1. Qual è lo schema generale dei sistemi di flusso delle acque sotterranee?

Le acque sotterranee fluiscono da un carico idraulico più alto verso un carico più basso, tipicamente questo avviene in generale da aree montane a aree di pianura e da pendii collinari verso corsi d'acqua e corpi idrici superficiali. Alcuni percorsi sono brevi e locali, mentre altri vanno più in profondità, bypassando alcuni bacini prima di emergere, o facendo lunghi percorsi regionali verso l'area di drenaggio più depressa della zona.

[torna agli esercizi](#) ↑

2. Tutti gli eventi di precipitazione ricaricano le acque sotterranee?

No, generalmente solo eventi di precipitazione di grandi dimensioni e/o prolungati forniscono un'infiltrazione sufficiente in modo che l'acqua infiltrata raggiunga la falda freatica anziché essere utilizzata dalla vegetazione per la traspirazione.

[torna agli esercizi](#) ↑

3. Come si presenta l'acqua sotterranea nel sottosuolo?

L'acqua sotterranea scorre attraverso gli spazi tra le particelle solide e all'interno delle fratture e delle cavità nelle rocce e nei sedimenti.

[torna agli esercizi](#) ↑

4. Cosa succede in un sistema di acque sotterranee quando l'acqua viene pompata dai pozzi?

I livelli dell'acqua diminuiscono.

[torna agli esercizi](#) ↑

5. Cosa succede se il pompaggio delle acque sotterranee supera la ricarica?

I livelli dell'acqua non si equilibrano e alla fine la falda acquifera si esaurisce. Ciò si traduce spesso nella scomparsa del flusso del corso d'acqua e nella subsidenza della superficie topografica.

[torna agli esercizi](#) ↑

6. Qual è la differenza tra una falda acquifera confinata e non confinata?

In una falda acquifera confinata il livello dell'acqua è al di sopra del tetto dell'acquifero mentre il livello dell'acqua è all'interno di un acquifero non confinato. Quando i livelli dell'acqua diminuiscono in un acquifero non confinato, l'acqua defluisce dai pori e dalle fratture, mentre in un acquifero confinato i pori rimangono saturi d'acqua ma la pressione dell'acqua diminuisce.

[torna agli esercizi](#) ↗

7. Perché la temperatura dei corsi d'acqua varia meno della temperatura dell'aria?

L'acqua immagazzina il calore meglio dell'aria e quindi le sue temperature sono moderate. Questa caratteristica è esaltata quando le acque sotterranee alimentano i corsi d'acqua perché il terreno isola le acque sotterranee quindi le temperature sono meno variabili dell'aria (più fresca d'estate e più calda d'inverno) quindi il corso d'acqua mostra temperature più stabili dell'aria.

[torna agli esercizi](#) ↗

8. Perché una temperatura mediata è importante per i flussi?

La vita acquatica, in particolare i pesci, spesso richiedono un intervallo di temperatura ristretto per supportare le loro funzioni, soprattutto per quanto riguarda la riproduzione.

[torna agli esercizi](#) ↑

9. Perché l'acqua nella zona vadosa è più acida delle precipitazioni?

L'anidride carbonica, prodotta nella zona vadosa dal decadimento microbico della materia organica e dalla respirazione delle radici delle piante, si combina con l'acqua per produrre acido carbonico ($CO_2 + H_2O = H_2CO_3$).

[torna agli esercizi](#) ↑

10. Quali meccanismi contribuiscono all'aumento dei solidi disciolti totali (TDS) dell'acqua che ricarica la falda rispetto alla precipitazione?

L'acido carbonico dissolve i minerali e l'evapotraspirazione fa sì che l'acqua venga rimossa dalla zona vadosa mentre i sali vengono lasciati indietro.

[torna agli esercizi](#) ↑

11. Quali sono i comuni costituenti disciolti nelle acque sotterranee?

Ioni di sodio, calcio, magnesio, ferro, cloruro, bicarbonato e solfato. Molte altre sostanze sono disciolte nelle acque sotterranee a concentrazioni inferiori.

[torna agli esercizi](#) ↑

12. Perché le acque sotterranee nelle aree di contesti geologici antichi hanno solidi disciolti totali inferiori?

Le acque sotterranee hanno dilavato i minerali solubili dagli strati geologici durante un lungo periodo di tempo geologico.

[torna agli esercizi](#) ↑

13. In generale, in che modo i costituenti delle acque sotterranee differiscono tipicamente tra i sistemi locali, intermedi e regionali?

I sistemi di flusso locale tendono ad avere meno solidi disciolti e generalmente l'ione bicarbonato domina la chimica. I sistemi intermedi hanno più solidi disciolti e in genere hanno più solfati. I sistemi profondi tendono ad essere più salati e hanno più ioni solfato e cloruro.

[torna agli esercizi](#) ↑

14. Quali due meccanismi primari aumentano i costituenti disciolti lungo i percorsi di flusso delle acque sotterranee?

Dissoluzione di minerali e diffusione di sali residui da strati a bassa permeabilità.

[torna agli esercizi](#) ↑

15. Descrivere la differenza principale tra i nastri trasportatori delle acque sotterranee in climi secchi e umidi.

Nei climi umidi le acque sotterranee defluiscono negli oceani tramite drenaggi superficiali, mentre nei climi aridi le acque sotterranee spesso defluiscono in sistemi superficiali chiusi in modo tale che i depositi di sale si accumulano a causa dell'evaporazione.

[torna agli esercizi](#) ↗

16. In che modo le acque sotterranee sono coinvolte nel ciclo globale del carbonio?

Nel corso del tempo geologico il carbonio che è entrato nei sistemi di acque sotterranee nelle aree di ricarica è stato bilanciato dal carbonio rilasciato nelle aree di recapito. Al giorno d'oggi c'è un impoverimento netto delle acque sotterranee e quindi un guadagno netto di carbonio nell'atmosfera perché c'è più deflusso delle acque sotterranee che ricarica.

[torna agli esercizi](#) ↑

17. Quali sono le fonti comuni di contaminazione delle acque sotterranee?

Applicazione di erbicidi e pesticidi in agricoltura, infiltrazioni da discariche, miniere, serbatoi perdenti, smaltimento di rifiuti umani e animali, tra gli altri.

[torna agli esercizi](#) ↗

18. Qual è il contaminante delle acque sotterranee più pervasivo al mondo?

Nitrato.

[torna agli esercizi](#) ↑

19. Come possono essere utilizzati i sistemi di acque sotterranee in modo positivo rispetto ai contaminanti?

I depositi geologici profondi possono isolare i rifiuti dall'ambiente per lunghi periodi di tempo, il che può consentire il decadimento dei composti pericolosi presenti nei rifiuti.

[torna agli esercizi](#) ↑

20. Quale attività impiega la maggior parte dell'uso umano dell'acqua? In media, quale percentuale dell'acqua utilizzata dall'uomo viene utilizzata a tale scopo?

Produzione alimentare/irrigazione agricola. Circa il 70 per cento.

[torna agli esercizi](#) ↗

21. Cosa sostiene i corpi idrici superficiali?

Deflusso di acqua da vasti sistemi di acque sotterranee a bassa velocità.

[torna agli esercizi](#) ↑

22. Cosa rende la governance delle acque sotterranee una sfida?

1. 1) Gli effetti della cattiva gestione delle acque sotterranee non si osservano fino a molto tempo dopo che si sono verificati;
2. 2) una volta riconosciuto il problema il rimedio richiede un lungo periodo di tempo;
3. 3) sebbene i problemi delle acque sotterranee abbiano aspetti comuni in tutto il mondo, ogni problema è di natura locale e richiede soluzioni sito-specifiche

[torna agli esercizi](#) ↑

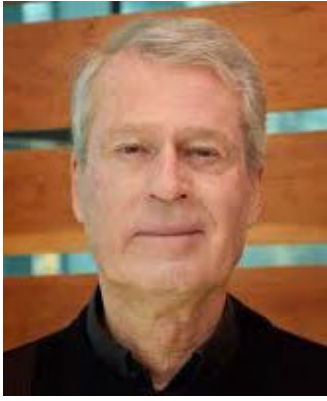
Sugli Autori



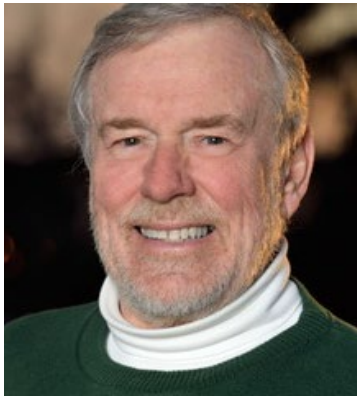
Dr. Eileen Poeter è Professore Emerito in Geological Engineering alla Colorado School of Mines, dove ha insegnato corsi di idrogeologia seguendo più di 40 studenti magistrali, che hanno lavorato con lei in ricerche sui sistemi idrici sotterranei e su progetti di modellistica idrogeologica. È anche stata Direttrice del Integrated Groundwater Modeling Center; da pensionata è Presidente del Poeter Engineering. Con 40 anni di esperienza nella modellazione di sistemi idrogeologici, è stata consulente in campo giuridico, industriale, per compagnie di ingegneria, agenzie governative, laboratori di ricerca e associazioni civili su progetti di modellistica idrogeologica per: immagazzinamento e recupero di acquiferi, performance di barriere impermeabili, drenaggio negli siti proposti per centrali nucleari, gestione regionale delle risorse idriche sotterranee, pompaggi regionali ad ampia scala, filtrazione da dighe, migrazione di contaminanti, impatto delle depressioni piezometriche, e interazione acque superficiali/acque sotterranee. Ha realizzato software di modellazione idrogeologica, incluse valutazioni di sensibilità dei modelli, valutazione dei dati necessari, calibrazione di modelli, selezione e classificazione di modelli e valutazione di incertezze predittive. È stata inoltre vincitrice della Darcy Lecture NGWA nel 2006 ed ha ricevuto il premio M. King Hubbert nel 2017, oltre ad essere Membro a vita della NGWA.



Dr. Ying Fan è Professore al Department of Earth and Planetary Sciences, Rutgers University – New Brunswick. Le sue ricerche sono indirizzate su come i processi idrologici modulino i cicli globali idrico, energetico e biogeochimico, e in particolare su l'influenza dell'acqua sull'ecologia ed evoluzione delle piante. È stata membro del Comitato sui Bisogni Futuri Idrici della Nazione per l'Accademia Nazionale delle Scienze, membro del comitato editoriale delle riviste internazionali Hydrology and Earth System Sciences (HESS), nel Comitato Direttivo del CUAHSI (Consortium of Universities for Advancement of Hydrologic Sciences, Inc.), e attualmente è membro del Comitato dei Garanti di Scienze della Terra per la NASA, membro del comitato editoriale della rivista Hydrological Processes (HYP), e membro del Amazon Science Panel (SPA) nello stato dell'Amazzonia su incarico delle Nazioni Unite.



Dr. John Cherry, dopo gli studi negli Stati Uniti e un post-doc in Francia, ha lavorato all'Università di Waterloo dal 1971 su ricerche di campo sulla migrazione e il destino dei contaminanti nelle acque sotterranee, e sulla relativa bonifica. È coautore del testo "Groundwater" con R.A. Freeze (1979) e coeditore/coautore di molti capitoli del libro "Dense Chlorinated Solvents...in Groundwater" (1996). È il Direttore fondatore dell'University Consortium for Field-Focused Groundwater Contamination Research. Presso il G360 Centre for Groundwater Research, dell'Università di Guelph, partecipa a ricerche sulle tecniche di monitoraggio idrogeologico e ha realizzato pozzi sicuri per popolazioni rurali in aree remote. È stato Presidente del Canadian Expert Panel on Environmental Impacts of Shale Gas development (2012-2014). È membro straniero della U.S. Academy of Engineering. Ha ricevuto il Lee Kwan Yew Water Prize in 2016, and lo Stockholm Water Prize, 2020.



Dr. Warren Wood è attualmente Professore Visitatore in Idrogeologia al Department of Earth and Environmental Sciences, Michigan State University, ed è formalmente Christiansen Fellow presso il St. Catherin's College, dell'Università di Oxford, U.K., oltre che Ricercatore Idrogeologo presso l'U.S. Geological Survey. Warren ha pubblicato oltre 120 articoli scientifici sull'idrogeologia delle aree aride, è stato Lettore in oltre 100 Università in North America, China, Botswana, Japan, Oman, UAE, Saudi Arabia, Israel, Jordan, Qatar, U.K. Germany, France, e Mexico. Warren è stato premiato con il Meritorious Service Award dall'U. S. Department of Interior; ha ricevuto la Medaglia M. King Hubbert dalla NGWA; il premio Distinguished Service della Geological Society of America ed è EMembro Eletto della Geological Society of America. Warren è stato inoltre Editor-in-Chief della rivista scientifica Ground Water ed è stato audito prima dell'U.S. congress, dal Segretario degli Interni, come Chairman della Nuclear Regulatory Commission sul ruolo dell'idrogeologia nei depositi di scorie nucleari.



Dr. Douglas Mackay è Professore Emerito Aggiunto presso il Department of Land, Air & Water Resources, della University of California, Davis. Le sue ricerche includono test di campo e modellazione del trasporto di contaminanti, della loro trasformazione e della bonifica del sottosuolo, studi di laboratorio sui processi che controllano il comportamento sul terreno, lo sviluppo di tecnologie di bonifica delle falde, metodi per la stima della massa totale rilasciata dai contaminanti in falda e nella zona non satura, inclusi i rischi relativi, metodi per il rilascio di soluti in falda (ammendanti per la bonifica, traccianti). Le sue ricerche hanno riguardato un ampio campo di contaminanti organici, incluso petrolio greggio, prodotti petroliferi raffinati, carburanti di vario tipo, pesticidi, solventi alogenati, e prodotti chimici idrofobici combinati con solventi e altre specie ancora. Ha insegnato a studenti magistrali corsi sul trasporto e il destino dei contaminanti organici, oltre a bonifica delle falde naturale e ingegnerizzata. Ha fatto parte di due Comitati dell'US National Research Council, collaborando in ricerche applicate riguardanti test pilota con consulenti professionisti ed infine è co-inventore di due brevetti per la bonifica delle falde.

I traduttori



Il Comitato Italiano dell'Associazione Internazionale Idrogeologi (IAH), a nome della comunità idrogeologica italiana, qui rappresentata dalla foto dai partecipanti al Congresso Internazionale IAH di Dubrovnik del 2016, ha provveduto alla traduzione di questo volume in lingua italiana, nelle persone dei seguenti soci: **Costanza Cambi, Daniela Ducci, Paolo Fabbri, Alessandro Gargini, Maria Filippini, Marco Masetti, Marco Petitta, Vincenzo Piscopo, Maurizio Polemio, Elisabetta Preziosi, Sergio Rusi, Daniela Valigi.**

Siete invitati a sottoscrivere la GW-Project mailing list in modo da essere informati riguardo la pubblicazione di nuovi libri, eventi e altre modalità di partecipazione al GW-Project. Aderire alla nostra mailing list è di aiuto nel costruire una comunità idrogeologica mondiale [Registratevi](#).

