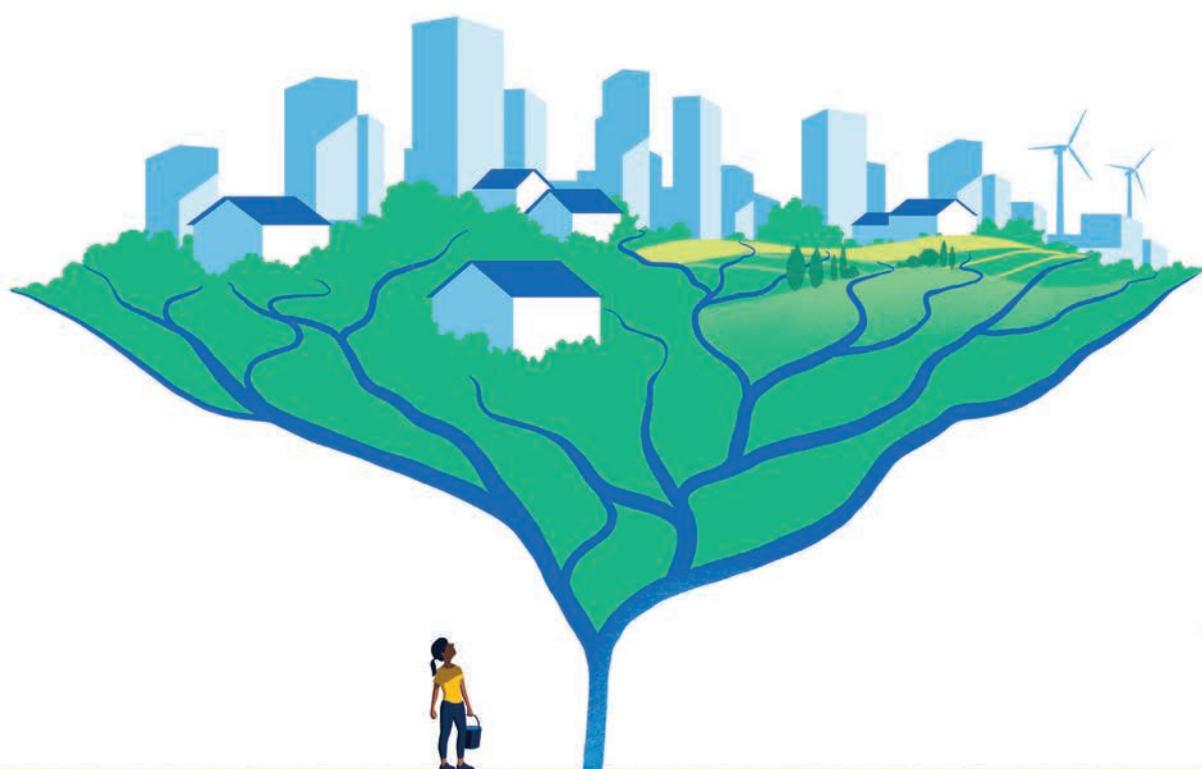


Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2022

ACQUE SOTTERRANEE

Rendere visibile la risorsa invisibile



ACQUE SOTTERRANEE

Rendere visibile la risorsa invisibile

Publicato nel 2022 dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura, 7, place de Fontenoy, 75352 Parigi 07 SP, Francia, e dalla Fondazione UniVerde, Via Antonio Salandra, 6 – 00187 Roma, Italia.

© UNESCO e Fondazione UniVerde, 2022

Questo rapporto è pubblicato dall'UNESCO per conto di UN-Water. L'elenco dei membri e dei partner di UN-Water è disponibile al seguente sito web: www.unwater.org.

ISBN 978-92-3-000158-2



Questa pubblicazione è disponibile in Open Access con licenza Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>). Utilizzando il contenuto di questa pubblicazione, gli utenti accettano di essere vincolati dai termini di utilizzo stabiliti nel Repository Open Access dell'UNESCO (<http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en>).

La presente licenza si applica esclusivamente al contenuto testuale della pubblicazione. Per l'utilizzo di qualsiasi materiale non chiaramente identificato come appartenente all'UNESCO, è richiesta la previa autorizzazione da parte del titolare del copyright.

Le designazioni utilizzate e la presentazione del materiale in questa pubblicazione non implicano in nessun modo l'espressione di alcuna opinione da parte dell'UNESCO in merito allo status giuridico di qualsiasi paese, territorio, città o area o delle sue autorità, o riguardo alla delimitazione dei suoi confini o frontiere. Allo stesso modo, i confini e i nomi mostrati e la designazione usata nelle mappe non implicano l'approvazione o l'accettazione ufficiale da parte delle Nazioni Unite.

Le idee e le opinioni espresse in questa pubblicazione sono quelle degli autori; non sono necessariamente quelle dell'UNESCO e non impegnano l'organizzazione. I contenuti sono stati forniti dai membri e dai partner di UN-Water elencati all'inizio di ogni capitolo. L'UNESCO e il Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO (WWAP) non sono responsabili per eventuali errori nei contenuti forniti o discrepanze nei dati e nei contenuti tra i capitoli. Il WWAP ha offerto l'opportunità ai singoli di essere inclusi come autori e contributori o di essere riconosciuti in questa pubblicazione. Il WWAP non è responsabile per eventuali omissioni al riguardo.

Il capitolo 4 e la sezione 8.1 contengono materiale del British Geological Survey © UKRI 2022

Sezione 8.2: Annukka Lipponen, Sonja Koeppel e Sarah Tiefenauer-Linardon © 2022 Nazioni Unite

Capitolo 12: Annukka Lipponen, Sonja Koeppel e Sarah Tiefenauer-Linardon © 2022 Nazioni Unite

Capitolo 13 "Finanziamenti per la sostenibilità" © Banca internazionale per la ricostruzione e lo sviluppo/Banca mondiale. Questa traduzione non è stata eseguita dalla Banca mondiale e non deve essere considerata una traduzione ufficiale della Banca mondiale. La Banca mondiale non sarà responsabile per alcun contenuto o errore in questa traduzione.

Titolo originale:

The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible.

Citazione suggerita:

Nazioni Unite, *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2022. Acque sotterranee: rendere visibile la risorsa invisibile*. UNESCO, Parigi.

Illustrazione in copertina di Davide Bonazzi

Traduzione di Massimo Micheli

Progettazione grafica di Marco Tonsini

Impaginazione di libreriauniversitaria.it Edizioni - TXT Spa

Stampato da Printbee.it, Viale della Navigazione Interna, 89 35010 Noventa Padovana (PD)

Questa pubblicazione è realizzata con materia prima da foreste gestite in maniera sostenibile e da fonti controllate

Il vasto potenziale delle acque sotterranee e la necessità di gestirle in modo sostenibile sono temi che non possono essere più ignorati.

Rappresentando circa il 99% di tutta l'acqua dolce allo stato liquido sulla Terra, le acque sotterranee possono offrire alle società enormi vantaggi e opportunità sul piano sociale, economico e ambientale. Esse forniscono già la metà del volume di acqua prelevata dalla popolazione mondiale per uso domestico, compresa l'acqua potabile utilizzata dalla maggior parte della popolazione nelle aree rurali che non è collegata ai sistemi pubblici o privati di approvvigionamento idrico, e circa il 25% di quella prelevata per l'irrigazione. Tuttavia, questa risorsa naturale è spesso poco conosciuta e, di conseguenza, sottovalutata, mal gestita e persino sprecata.

Le acque sotterranee sono fondamentali per la lotta alla povertà, per la sicurezza alimentare e idrica, per la creazione di posti di lavoro dignitosi, per lo sviluppo socioeconomico e per la resilienza delle società e delle economie ai cambiamenti climatici. La dipendenza dalle acque sotterranee non farà che aumentare, principalmente a causa della crescente domanda di acqua da parte di tutti i settori unita ad una maggiore variazione dei regimi pluviometrici.

Il rapporto descrive le sfide e le opportunità associate allo sviluppo, alla gestione e alla governance delle acque sotterranee in tutto il mondo. Mira a stabilire una chiara comprensione del ruolo che le acque sotterranee svolgono nella vita quotidiana, delle sue interazioni con le persone e delle opportunità per ottimizzarne l'uso al fine di garantire la sostenibilità a lungo termine di questa risorsa largamente disponibile ma fragile.

Liberare il pieno potenziale delle acque sotterranee richiederà un impegno solido e concertato per gestirle e utilizzarle in modo sostenibile. Per realizzare tale obiettivo, il primo passo da compiere è rendere visibile questa risorsa invisibile.

Le acque
sotterranee
rappresentano circa il
99%
di tutta l'acqua dolce
allo stato liquido sulla
Terra



unesco

UN WATER

«Poiché le guerre hanno origine nello spirito degli uomini e delle donne, è nello spirito degli uomini e delle donne che si debbono innalzare le difese della pace»

Prefazione di Audrey Azoulay, <i>Direttrice Generale dell'UNESCO</i>	viii
Prefazione di Gilbert F. Houngbo, <i>Presidente di UN-Water e del Fondo internazionale per lo sviluppo agricolo</i>	ix
Prefazione di Michela Miletto, <i>Coordinatrice dell'UNESCO WWAP</i> e Richard Connor, <i>Curatore editoriale</i>	x
Prefazione di Alfonso Pecoraro Scanio, <i>Presidente Fondazione UniVerde</i>	xii
Gruppo di lavoro del WWDR 2022	xiv
Ringraziamenti	xv
Sintesi	1
Prologo: Stato delle risorse idriche sotterranee	13
Volumi di acqua dolce	14
Rinnovo dell'acqua dolce.....	15
Prelievo di acqua dolce, stress idrico e scarsità di acqua.....	17
Le risorse idriche sotterranee e la loro distribuzione geografica	18
Prelievo e utilizzo delle acque sotterranee.....	20
Vincoli naturali specifici delle aree di prelievo delle acque sotterranee	21
Capitolo 1: Introduzione	25
1.1 Scopo e portata del presente rapporto.....	26
1.2 Proprietà e caratteristiche uniche delle acque sotterranee e dei loro sistemi.....	27
1.3 Gli acquiferi, le loro principali caratteristiche e le acque sotterranee in essi contenute..	28
1.4 Breve storia dello sfruttamento delle acque sotterranee	31
1.5 I molteplici servizi offerti dalle acque sotterranee agli esseri umani e agli ecosistemi ...	32
1.6 Interconnessioni a livello mondiale	33
1.7 Le acque sotterranee nel contesto delle agende e dei quadri globali	34
1.8 Sfide relative alle acque sotterranee	36
1.9 Opportunità per aumentare i benefici offerti dalle acque sotterranee.....	39
Capitolo 2: Aspetti giuridici e istituzionali della governance delle acque sotterranee	41
2.1 Governance e gestione delle acque sotterranee.....	42
2.2 Strumenti giuridici.....	44
2.3 Aspetti istituzionali	47
Capitolo 3: Acque sotterranee e settore agricolo	49
3.1 Introduzione	50
3.2 Utilizzo delle acque sotterranee nel settore agricolo	50
3.3 Impatti dell'agricoltura sulla portata degli acquiferi.....	54

3.4 Terreni agricoli con falde poco profonde.....	58
3.5 Impatti dell'agricoltura sulla qualità delle acque sotterranee.....	58
3.6 Collegamenti fra acque sotterranee ed energia nell'ambito dell'irrigazione.....	61
Capitolo 4: Acque sotterranee per gli insediamenti umani.....	63
4.1 Introduzione.....	64
4.2 Approvvigionamento idrico urbano.....	66
4.3 Approvvigionamento idrico rurale.....	71
4.4 Preoccupazioni per l'ambiente.....	74
4.5 Ruolo delle parti interessate.....	76
4.6 Osservazioni conclusive.....	77
Capitolo 5: Acque sotterranee e settore industriale.....	79
5.1 Contesto.....	80
5.2 Estrazione e utilizzo delle acque sotterranee nel settore industriale.....	80
5.3 Industria, qualità delle acque sotterranee e inquinamento.....	85
5.4 Miniere e acque sotterranee.....	87
5.5 Energia, produzione di energia elettrica e acque sotterranee.....	89
5.6 Responsabilità dell'industria in relazione alle acque sotterranee.....	93
5.7 La via da seguire.....	95
Capitolo 6: Acque sotterranee ed ecosistemi.....	96
6.1 Introduzione agli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee.....	97
6.2 Ubiquità degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee.....	100
6.3 Minacce per i servizi ecosistemici relativi alle acque sotterranee.....	103
6.4 Gestione congiunta delle risorse idriche e del territorio, soluzioni basate sulla natura e protezione dell'ecosistema.....	106
Capitolo 7: Acque sotterranee, acquiferi e cambiamenti climatici.....	110
7.1 Introduzione.....	111
7.2 Impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee.....	111
7.3 Resilienza e vulnerabilità dei sistemi acquiferi ai cambiamenti climatici.....	118
7.4 Adattamenti ai cambiamenti climatici basati sulle acque sotterranee: l'intervento umano.....	120
7.5 Mitigazione dei cambiamenti climatici basata sulle acque sotterranee tramite energia geotermica a basse emissioni di carbonio.....	120
7.6 Mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso la cattura e il sequestro del carbonio.....	124
Capitolo 8: Prospettive regionali sulle acque sotterranee.....	126
8.1 Africa subsahariana.....	127
8.2 Europa e America settentrionale.....	133
8.3 America Latina e Caraibi.....	141
8.4 Asia e Pacifico.....	146
8.5 La regione araba.....	152

Capitolo 9: Creazione e aggiornamento della base di conoscenze	158
9.1 Introduzione	159
9.2 Lo studio delle acque sotterranee: caratterizzazione e valutazione	159
9.3 Monitoraggio delle acque sotterranee.....	163
9.4 Analisi di scenario e incertezza delle previsioni	167
9.5 Condivisione della base di conoscenze e potenziamento delle competenze	167
Capitolo 10: Politiche e pianificazione delle acque sotterranee	171
10.1 Le politiche relative alle acque sotterranee.....	172
10.2 Esempi di politiche sulle acque sotterranee	174
10.3 Pianificazione della gestione delle acque sotterranee	175
10.4 Esempi di pianificazione della gestione delle acque sotterranee.....	178
Capitolo 11: Gestione delle acque sotterranee	180
11.1 Introduzione	181
11.2 Dati e conoscenze necessari	181
11.3 Controllo dei prelievi	181
11.4 Tutela della qualità delle acque sotterranee	184
11.5 Approcci di gestione integrata	185
11.6 Conclusioni.....	187
Capitolo 12: Acquiferi transfrontalieri	189
12.1 Introduzione	190
12.2 Conoscenza attuale degli acquiferi transfrontalieri.....	190
12.3 Sfide specifiche per gli acquiferi transfrontalieri	191
12.4 Aspetti giuridici e istituzionali internazionali	194
12.5 Cooperazione in materia di acquiferi transfrontalieri	194
12.6 Benefici derivanti dalla cooperazione in materia di acquiferi transfrontalieri.....	196
Capitolo 13: Finanziamenti per la sostenibilità.....	198
13.1 Finanziamenti attualmente disponibili e finanziamenti necessari	199
13.2 Istituzione di fonti di finanziamento permanenti, strutturali e adeguate	200
13.3 Utilizzare al meglio i finanziamenti attualmente disponibili	200
Capitolo 14: Conclusioni	205
14.1 Prospettive e sfide	206
14.2 La via da seguire	208
14.3 Epilogo	212
Riferimenti bibliografici	213
Abbreviazioni e acronimi	245

Riquadri, figure e tabelle

Riquadri

Riquadro 1.1	Sistemi di acque sotterranee.....	27
Riquadro 1.2	Che cos'è un acquifero?.....	28
Riquadro 2.1	Definizione di governance delle acque sotterranee.....	42
Riquadro 2.2	Definizione di gestione delle acque sotterranee.....	43
Riquadro 2.3	Passaggio dai diritti di estrazione dell'acqua "basati sul volume" a quelli "basati sulle quote" nel Nuovo Galles del Sud (Australia).....	46
Riquadro 3.1	Esaurimento delle acque sotterranee in Egitto.....	56
Riquadro 3.2	Terreni agricoli irrigati da acque superficiali con falda poco profonda: il caso del Pakistan.....	57
Riquadro 3.3	Energia e irrigazione nell'Africa subsahariana.....	60
Riquadro 3.4	Acque sotterranee ed energia in India.....	62
Riquadro 4.1	Un esempio di prelievo di acque sotterranee urbane gestito con successo ad Amburgo (Germania).....	66
Riquadro 4.2	Schema di uso combinato pianificato per la conservazione di una falda acquifera essenziale a Lima.....	69
Riquadro 4.3	Le acque sotterranee aiutano a sopravvivere alle gravi crisi di approvvigionamento idrico a Chennai (India).....	70
Riquadro 4.4	Pozzi profondi che forniscono acqua pulita ai rifugiati Rohingya in Bangladesh.....	72
Riquadro 4.5	Grande dipendenza dalle acque sotterranee ma con rischi significativi a Lusaka.....	75
Riquadro 5.1	Vantaggi del monitoraggio della qualità delle acque sotterranee: il caso di AngloGold Ashanti a Cerro Vanguardia S.A. (Argentina).....	89
Riquadro 5.2	Discariche di ceneri di carbone: il lascito dell'inquinamento delle acque sotterranee.....	93
Riquadro 5.3	Collaborazione tra PT Multi Bintang e UNIDO.....	94
Riquadro 6.1	Mappatura degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee in California (Stati Uniti).....	99
Riquadro 6.2	Acque sotterranee, zone umide di importanza internazionale (siti Ramsar) e siti designati dall'UNESCO, come siti del patrimonio mondiale, riserve della biosfera e geoparchi.....	106
Riquadro 6.3	Soluzioni basate sulla natura per proteggere gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee.....	108
Riquadro 7.1	Strategie di ricarica gestita degli acquiferi (MAR).....	121
Riquadro 8.1	Crisi dell'approvvigionamento idrico di Città del Capo.....	132
Riquadro 8.2	Schema di ricarica gestita degli acquiferi (MAR) di Windhoek.....	132
Riquadro 8.3	Stato quantitativo e chimico dei corpi idrici sotterranei nell'Unione europea.....	136
Riquadro 8.4	Transizione difficile dalla valutazione idrogeologica alla contabilizzazione delle pressioni umane.....	137
Riquadro 8.5	L'accordo relativo all'acquifero guarani (GAA).....	145
Riquadro 8.6	Contratti di acquifero in Marocco.....	156
Riquadro 8.7	Applicazione della MAR ad Abu Dhabi.....	157
Riquadro 10.1	Sequenza concreta del processo di pianificazione degli acquiferi definiti come prioritari.....	175
Riquadro 11.1	Prelievo delle acque sotterranee e gestione della quantità: autorizzazione e "potenziamento dei pozzi" per ridurre gli impatti (bacino idrografico del fiume South Platte, Colorado, Stati Uniti d'America).....	184
Riquadro 11.2	Aree di protezione delle risorse idriche sotterranee.....	186
Riquadro 11.3	Raccolta delle acque piovane per lo stoccaggio e il risanamento dell'acquifero: esempio di progetto MAR nell'area di Adelaide (Australia).....	188
Riquadro 12.1	Iniziativa International Shared Aquifer Resource Management (ISARM).....	191
Riquadro 12.2	Protezione e utilizzo del sistema acquifero transfrontaliero del Carso dinarico (DIKTAS).....	195
Riquadro 12.3	Meccanismo di cooperazione multi-paese di Stampriet: il primo meccanismo congiunto in materia di acquiferi transfrontalieri inserito nell'organizzazione di un bacino idrografico.....	196
Riquadro 12.4	Verso la cooperazione nel bacino dell'acquifero senegalese-mauritano per promuovere la pace e la resilienza tra gli Stati.....	197
Riquadro 13.1	Combinare tasse e imposte per migliorare la gestione, il monitoraggio e l'utilizzo delle acque sotterranee in Perù.....	202
Riquadro 13.2	Combinare la finanza mista con le tecnologie emergenti per fornire acqua sicura ai villaggi rurali della Tanzania.....	203
Riquadro 13.3	Pagamento per servizi ecosistemici con finanziamento del settore privato: il caso di Kumamoto (Giappone).....	204

Figure

Figura 1	Volumi stimati di acqua dolce allo stato liquido presenti nei diversi continenti	15
Figura 2	Rinnovo di acqua dolce stimato nei diversi continenti, 2015	16
Figura 3	Prelievi di acqua dolce nel 2017, dati aggregati per continente e per settore di utilizzo (km ³ /anno)	17
Figura 4	Media annuale della scarsità mensile di acqua blu con una risoluzione di 30x30 arcmin, 1996-2005	19
Figura 5	Numero di mesi all'anno in cui la scarsità di acqua blu supera 1,0, 1996-2005	19
Figura 6	Le risorse idriche sotterranee del mondo	20
Figura 7	Mappa mondiale dei fenomeni noti di acque sotterranee offshore dolci e salmastre	21
Figura 8	Hotspot globali di vulnerabilità delle acque sotterranee all'intrusione marina e all'innalzamento del livello del mare	23
Figura 9	Principali zone del mondo interessate da subsidenza indotta dal prelievo di acque sotterranee	24
Figura 1.1	Sezione verticale che mostra gli acquiferi, le unità di confinamento e la zona insatura	29
Figura 1.2	Evoluzione del prelievo totale di acque sotterranee in paesi selezionati, 1950-2020	32
Figura 1.3	I molteplici servizi offerti dalle acque sotterranee	33
Figura 1.4	Gli Obiettivi di sviluppo sostenibile	35
Figura 1.5	Copertura regionale e globale della fornitura di acqua potabile, 2015-2020 (%)	36
Figura 2.1	Elementi principali della governance e della gestione delle acque sotterranee, dai principi politici agli approcci di attuazione	43
Figura 3.1	Stima dei prelievi totali di acque sotterranee e percentuale destinata all'irrigazione nel 2010 per i paesi selezionati	52
Figura 3.2	Abbassamento della falda in una selezione dei principali acquiferi del mondo	55
Figura 4.1	Panoramica schematica delle fonti idriche urbane, del loro utilizzo e dell'interazione fra esse	67
Figura 4.2	Andamento tipico dell'evoluzione degli approvvigionamenti idrici urbani	68
Figura 5.1	Prelievi per l'autoapprovvigionamento idrico industriale negli Stati Uniti	81
Figura 5.2	Consumo di acqua durante il ciclo di vita di un progetto minerario	88
Figura 5.3	Fonte e uso dell'acqua dolce negli Stati Uniti, 2015	90
Figura 5.4	Energia utilizzata per vari processi nel settore idrico	92
Figura 5.5	Fattori di valore per le aziende e le comunità relativi alla gestione dell'acqua	95
Figura 6.1	Esempio di un ecosistema dipendente dalle acque sotterranee: una veduta aerea di pianure alluvionali e isole nel delta dell'Okavango (Botswana)	97
Figura 6.2	Interazioni tra acque sotterranee, ecosistemi, attività umane e soluzioni basate sulla natura	98
Figura 6.3	Modelli globali di dipendenza dalle acque sotterranee, zone soggette a minacce a livello regionale e priorità per la conservazione e la gestione degli ecosistemi acquatici e terrestri	102
Figura 6.4	Collegamento tra i tipi di ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee e i servizi ecosistemici che forniscono	103
Figura 6.5	Impatti ecologici della diminuzione della qualità e della quantità delle acque sotterranee	105
Figura 7.1	Interazioni principali tra acque sotterranee e cambiamenti climatici che mostrano come gli impatti diretti e indiretti dei cambiamenti climatici influiscono sui sistemi acquiferi	112
Figura 7.2	Cambiamenti previsti nelle precipitazioni medie annue a livello globale dovuti ai cambiamenti climatici	113
Figura 7.3	Cambiamenti nello stoccaggio mensile delle acque sotterranee e nelle precipitazioni annue in quattro grandi sistemi acquiferi nelle zone aride degli Stati Uniti e dell'Australia	115
Figura 7.4	Impatto dell'innalzamento del livello del mare (SLR) sull'intrusione di acqua marina in un sistema acquifero costiero non confinato in pendenza	117
Figura 7.5	Diagramma schematico che mostra i diversi tipi di sistemi di energia geotermica, tra cui lo stoccaggio dell'energia termica nell'acquifero (ATES), la pompa di calore geotermica (GSHP) e il sistema geotermico avanzato (EGS)	123
Figura 8.1	Resilienza delle acque sotterranee ai cambiamenti climatici. Elevate riserve di acque sotterranee contro i cambiamenti delle precipitazioni a breve termine e un'elevata ricarica media delle acque sotterranee a lungo termine consentono a un acquifero di essere rapidamente ripristinato dopo la siccità	129
Figura 8.2	Distribuzione delle principali tipologie di acquiferi in Africa	130
Figura 8.3	Percentuale delle acque sotterranee sul totale dell'acqua dolce (lorda) estratta nei paesi selezionati (ultimo anno disponibile)	134
Figura 8.4	Percentuale della superficie dei corpi idrici sotterranei che non si trova in "buono stato chimico" suddivisi per distretto idrografico	140
Figura 8.5	Velocità di ricarica dei principali sistemi acquiferi dell'America Latina e dei Caraibi	142
Figura 8.6	Acque sotterranee dell'Asia, dell'Australia e dell'Oceania	147
Figura 8.7	Prelievi di acqua per fonte in Stati arabi selezionati	152

Figura 8.8	Sistemi acquiferi transfrontalieri nella regione araba	153
Figura 8.9	Modifica della riserva di acque sotterranee (spessore equivalente all'acqua allo stato liquido) nella regione araba tra il 2002 e il 2019 utilizzando i dati della missione GRACE (in cm).....	155
Figura 9.1	Un esempio di carta idrogeologica e di sezione trasversale	162
Figura 9.2	Moderno piezometro con registratore di dati e una scheda esplicativa per il pubblico (Parco nazionale De Alde Feanen, provincia della Frisia, Paesi Bassi).....	164
Figura 9.3	Gruppo di pozzi per il monitoraggio del livello dell'acqua a diverse profondità (copertura, strato roccioso poco profondo e profondo) in un sito nell'Irlanda orientale	165
Figura 9.4	Indicatore di siccità nelle acque sotterranee poco profonde degli Stati Uniti, basato sui risultati della missione GRACE	166
Figura 9.5	Forme selezionate di presentazione dei dati e delle informazioni sulle acque sotterranee, in relazione alle utenze previste	168
Figura 9.6	Sistema informativo globale sulle acque sotterranee (GGIS)	170
Figura 10.1	Che cosa sono le politiche? Un modello dello Stato del Nuovo Galles del Sud (Australia).....	172
Figura 10.2	Struttura istituzionale per lo sviluppo delle politiche relative alle acque sotterranee.....	174
Figura 10.3	Fasi e fattori nell'elaborazione di un piano di gestione delle acque sotterranee.....	177
Figura 11.1	Fonti di inquinamento che minacciano la qualità delle acque sotterranee.....	184
Figura 12.1	Gli acquiferi transfrontalieri del mondo.....	190
Figura 12.2	Il pompaggio di acque sotterranee da un pozzo nel paese A può avere un impatto sulla parte dell'acquifero situato nel paese B.....	192
Figura 13.1	Valore economico totale delle acque sotterranee.....	201

Tabelle

Tabella 1	Prelievi di acque sotterranee nel 2017, aggregati in base alle principali regioni del mondo.....	22
Tabella 2	Dettaglio del prelievo di acque sotterranee relativo al 2017 per settore di utilizzo e per continente.....	22
Tabella 3.1	Aree irrigate per regione e a livello globale, inclusa la quota di acque sotterranee utilizzate	52
Tabella 4.1	Dati nazionali sull'estrazione delle acque sotterranee per l'approvvigionamento urbano	65
Tabella 4.2	Sintesi dei benefici delle fonti di acque sotterranee per le aziende idriche.....	66
Tabella 4.3	Scala relativa al servizio di fornitura di acqua potabile basato sull'utilizzo di acque sotterranee	73
Tabella 5.1	I 15 paesi che secondo le stime prelevano annualmente i maggiori quantitativi di acque sotterranee, 2010.....	81
Tabella 5.2	I nove paesi che annualmente prelevano i maggiori quantitativi di acqua per uso industriale (km ³ /anno).....	82
Tabella 5.3	Consumo di acqua nella lavorazione tessile negli Stati Uniti (in l/kg di produzione)	83
Tabella 5.4	Contaminanti industriali comuni delle acque sotterranee suddivisi per fonte.....	85
Tabella 5.5	Impatti sulle acque sotterranee da miniere attive e dismesse	88
Tabella 5.6	Consumo di acqua nella produzione di energia termoelettrica in Canada (2017), per fonte.....	91
Tabella 8.1	Alcune caratteristiche generali della governance delle acque sotterranee per ciascuna subregione, in una prospettiva di integrazione regionale (dati meramente indicativi)	135
Tabella 8.2	Una selezione delle risposte di governance e/o di gestione alle criticità delle acque sotterranee in ciascuna sottoregione (solo a titolo indicativo)	140
Tabella 9.1	Parametri frequentemente inclusi nel monitoraggio della qualità delle acque sotterranee	160
Tabella 10.1	Esempi di azioni che possono essere identificate nei piani di gestione delle acque sotterranee	178
Tabella 11.1	Modalità di controllo dei prelievi di acque sotterranee.....	182
Tabella 12.1	Dati e informazioni necessari per valutare e gestire un acquifero transfrontaliero.....	193
Tabella 12.2	Sintesi dei risultati del monitoraggio globale dell'indicatore 6.5.2, 2017 e 2020	196

Prefazione

di **Audrey Azoulay**, *Direttrice Generale dell'UNESCO*

Il ciclo idrologico ci insegna che l'acqua è in continuo movimento. L'acqua si scioglie, evapora, condensa e circola, ma non è mai statica. Come parte di questo processo, l'acqua filtra nel suolo, dando origine a riserve sotterranee. Queste acque sotterranee sono una risorsa naturale fondamentale, invisibile ma indispensabile per la vita sul nostro pianeta.

Quasi il 50% della popolazione urbana mondiale dipende proprio dalle acque sotterranee. Eppure sempre più acquiferi vengono inquinati, sfruttati eccessivamente e prosciugati dagli esseri umani, a volte con conseguenze irreversibili. Inoltre, molti decisori nel settore idrico non sempre hanno una visione chiara di cosa siano le acque sotterranee, malgrado il ruolo essenziale di queste ultime nel ciclo idrologico.

Ecco perché l'UNESCO, in collaborazione con UN-Water, sta organizzando un vertice globale sulle acque sotterranee, che si terrà a dicembre 2022. Questo è inoltre il motivo per cui al tema delle acque sotterranee sarà dedicata la Giornata mondiale dell'acqua, che si celebra il 22 marzo. Infine, è per questo che le acque sotterranee sono al centro dell'edizione 2022 del Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche.

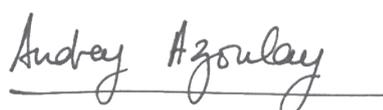
Il presente rapporto, dal titolo "Acque sotterranee: rendere visibile la risorsa invisibile", si pone l'obiettivo di sensibilizzare il pubblico riguardo a questa risorsa abbondante ma fragile. Fornisce informazioni approfondite sulla disponibilità delle acque sotterranee e ne evidenzia l'importanza per l'approvvigionamento idrico sia dell'essere umano che dell'ambiente.

È importante sottolineare che il rapporto spazia dalle opportunità attuali alle sfide imminenti ed analizza come possiamo utilizzare, gestire e governare questa risorsa in modo sostenibile. Ciò significa, tra l'altro, sfruttare in modo più intelligente il potenziale delle acque sotterranee ancora scarsamente utilizzate, proteggerle dall'inquinamento e dallo sfruttamento eccessivo, rispondere in modo dinamico alle esigenze di una popolazione in costante aumento e affrontare efficacemente le crisi climatiche ed energetiche globali.

Infine, il rapporto mette in evidenza le interconnessioni tra le acque sotterranee e la salute umana, la riduzione della povertà e l'uguaglianza di genere. A tal fine, il solo miglioramento delle conoscenze e lo sviluppo delle competenze non sono sufficienti; per proteggere gli acquiferi, necessitiamo anche di innovazione, in termini di interventi tecnici, di riforme istituzionali e dei quadri giuridici, di miglioramento dei finanziamenti e di cambiamenti comportamentali.

Questa straordinaria pubblicazione, coordinata dall'UNESCO, è stata resa possibile grazie al continuo supporto fornito dal Governo italiano e dalla Regione Umbria al Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO. Desidero inoltre ringraziare la famiglia di UN-Water per aver contribuito con le sue conoscenze e abilità.

Quando si tratta di acque sotterranee, sono molte le sfide e le opportunità che si prospettano. L'UNESCO si impegna ad affrontarle, in particolare attraverso il suo programma idrologico intergovernativo. Confido quindi che questa edizione del Rapporto mondiale sullo sviluppo delle risorse idriche ispirerà chi è responsabile delle decisioni ad adottare approcci più mirati allo sviluppo, alla gestione e alla buona governance delle acque sotterranee e, così facendo, a rendere visibile questa risorsa invisibile.


Audrey Azoulay

Prefazione

di **Gilbert F. Houngbo**, *Presidente di UN-Water
e del Fondo internazionale per lo sviluppo agricolo*

Conservate sotto i nostri piedi, fuori dalla nostra vista, le acque sotterranee sono una risorsa a cui la maggior parte di noi raramente pensa. Quasi tutta l'acqua dolce allo stato liquido nel mondo è sotterranea, e costituisce un supporto fondamentale all'approvvigionamento di acqua potabile, alle colture, alle industrie e agli ecosistemi.

Come mostra questo rapporto, con le nostre attività inquiniamo e utilizziamo oltre misura le acque sotterranee in molte aree; in altre zone, invece, non sappiamo neanche quanta acqua sia presente nel sottosuolo. La cattiva gestione delle acque sotterranee, e il loro frequente abuso sia per contaminazione che per sfruttamento eccessivo, è una minaccia per l'intero ciclo dell'acqua – e quindi una minaccia per il benessere degli esseri umani e per la sopravvivenza di tutte le specie viventi.

La presente edizione del Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche pone l'accento sulla necessità di comprendere e proteggere le acque sotterranee e mostra che una gestione equa e sostenibile di questa risorsa sarà fondamentale per la sopravvivenza e l'adattamento ai cambiamenti climatici così come per soddisfare i bisogni di una popolazione in crescita.

Come in passato, questa pubblicazione è estremamente importante non solo per un pubblico esperto ma anche per un pubblico più ampio che desidera comprendere maggiormente il ruolo svolto dall'acqua nel contesto delle società umane e dello sviluppo. Le esperienze, le informazioni e le analisi fornite dai membri e dai partner di UN-Water ci aiutano a capire i molti modi in cui le acque sotterranee sono fondamentali per l'assistenza sanitaria, l'agricoltura, il lavoro, l'ambiente e per molti altri settori.

La conclusione è chiara: migliorare il modo in cui utilizziamo e gestiamo le acque sotterranee è una priorità se vogliamo raggiungere gli Obiettivi di sviluppo sostenibile entro il 2030.

Chi è responsabile delle decisioni ora deve tenere pienamente conto del contributo vitale delle acque sotterranee alla resilienza degli esseri umani e delle loro attività in un futuro in cui il clima sarà sempre più imprevedibile.

L'edizione 2022 del Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche è il risultato della cooperazione tra varie agenzie delle Nazioni Unite e organizzazioni partner della "famiglia" di UN-Water. Un gruppo ricco e diversificato di professionisti e professioniste ha prodotto un'analisi completa, chiara e accessibile di questo argomento che individua le sfide e suggerisce soluzioni.

Sono grato all'UNESCO e al suo Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche per aver coordinato questa edizione, e vorrei ringraziare tutti i colleghi e tutte le colleghe che hanno partecipato.

È nostro dovere proteggere e utilizzare le acque sotterranee in modo sostenibile, trovando un equilibrio tra i bisogni delle persone e quelli del pianeta. Sono fiducioso che questo rapporto fornirà al pubblico una migliore comprensione di come potenziare le politiche sulle acque sotterranee e spero che stimolerà un'azione urgente e quanto mai necessaria.



Gilbert F. Houngbo

Prefazione

di **Michela Miletto**, *Coordinatrice dell'UNESCO WWAP*
e **Richard Connor**, *Curatore editoriale*

In passato, ogni edizione del Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche ha offerto una prospettiva unica sull'acqua. Alcune edizioni hanno affrontato temi relativamente tecnici come l'energia, le acque reflue, le soluzioni basate sulla natura o i cambiamenti climatici; altre hanno trattato argomenti relativi all'acqua, come lo sviluppo sostenibile, l'acqua e il lavoro, il "non lasciare nessuno indietro" o il valore dell'acqua, principalmente da una prospettiva socioeconomica. In alcuni casi, abbiamo avuto a disposizione per il nostro lavoro una notevole quantità di dati, informazioni, analisi e materiale preesistente, mentre in altri la base di conoscenze notevolmente limitata ci ha costretto ad adottare un approccio più creativo nella progettazione e nella stesura del rapporto.

Quest'edizione è molto particolare: è la prima volta che il rapporto pone l'accento su un elemento specifico del ciclo globale dell'acqua – in questo caso, le acque sotterranee. In altre parole, l'argomento (o tema) del rapporto di quest'anno è più di un semplice punto di vista o prospettiva dal quale analizzare il ruolo dell'acqua attraverso vari obiettivi e finalità sociali, economici e ambientali. Il tema è la risorsa stessa. E, cosa ancora più importante, si tratta di una risorsa di acqua dolce fondamentale che per troppo tempo è stata trascurata.

Nona di una serie di rapporti tematici annuali, l'edizione 2022 si propone di esplorare l'importanza delle acque sotterranee per lo sviluppo sostenibile e analizzare le azioni politiche e di gestione che devono essere intraprese, non solo per garantire la durata perenne della risorsa, ma anche per massimizzare le numerose opportunità da essa offerte in un mondo in rapido mutamento, caratterizzato da una crescente domanda di acqua e da risorse di acqua dolce limitate, e spesso vulnerabili.

Come evidenziato in tutto il rapporto, le acque sotterranee svolgono già un ruolo fondamentale nel sostenere la sicurezza alimentare ed energetica, gli insediamenti urbani e (soprattutto) rurali, e l'industria. Tale risorsa è una componente essenziale per il corretto funzionamento di molti ecosistemi e offre prospettive eccezionali in termini di adattamento e mitigazione dei cambiamenti climatici. Il rapporto descrive anche le potenziali risposte al fine di superare le sfide che attualmente impediscono il progresso nella governance e nella gestione delle acque sotterranee, in particolare in termini di raccolta e diffusione dei dati, di quadri giuridici e politici, di rafforzamento delle competenze e di finanziamento.

Un altro aspetto unico di questa edizione è il gran numero di persone coinvolte nello sviluppo dei contenuti e la ricchezza dei loro contributi. Mai prima d'ora abbiamo avuto un livello così straordinario di sostegno da un numero così ampio di esperti ed esperte, di professionisti e professioniste riconosciuti e provenienti da tutto il mondo, e con umiltà crediamo che ciò si rifletta nella qualità e nella rilevanza del rapporto. La realizzazione di questo rapporto ci ha permesso sicuramente di creare molte nuove amicizie – e di ritrovarne tante altre – lungo la strada! E la nostra più sincera speranza è continuare a promuovere tali sforzi di collaborazione negli anni a venire.

Lavorando a stretto contatto con questa comunità di esperti ed esperte che hanno apportato contributi di rilievo e valore, ci siamo sforzati di produrre un resoconto equilibrato, basato sui fatti e neutrale dello stato attuale delle conoscenze, affrontando gli sviluppi più recenti ed evidenziando le sfide e le opportunità che una maggiore attenzione alle acque sotterranee può offrire. Sebbene sia rivolto principalmente a chi si occupa di formulare le politiche e di gestire le risorse idriche, nonché al mondo accademico e alla più ampia comunità che opera nel settore dello sviluppo,

speriamo che questo rapporto sia ben accolto anche da un pubblico più ampio e da coloro che sono impegnati nella lotta alla povertà e nella gestione delle crisi umanitarie, nel perseguimento dei diritti umani all'approvvigionamento idrico e ai servizi igienico-sanitari e nell'avanzamento dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

Quest'edizione del rapporto è il risultato di uno sforzo concertato tra le agenzie responsabili della stesura dei vari capitoli, di cui si fa menzione nei ringraziamenti. Il rapporto ha anche beneficiato in larga misura dei contributi e degli apporti di molti membri e partner di UN-Water, nonché di numerose università, istituti di ricerca, associazioni scientifiche e ONG che hanno fornito un'ampia quantità di materiale.

A nome del Segretariato del Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche (WWAP), vorremmo estendere il nostro più profondo apprezzamento alle agenzie, ai membri e ai partner di UN-Water, agli autori e alle autrici, così come a tutti coloro che hanno offerto il loro contributo per aver prodotto collettivamente questo rapporto unico e autorevole durante il secondo anno di pandemia di COVID-19, con tutte le difficoltà che la situazione ha imposto a ciascuno di noi. Ringraziamo in modo particolare Jac van der Gun per aver generosamente offerto la sua conoscenza, saggezza e guida durante tutto il processo di realizzazione del rapporto.

Siamo profondamente grati al Governo italiano per aver finanziato il Programma e alla Regione Umbria per aver generosamente ospitato il Segretariato del WWAP a Villa La Colombella a Perugia. I loro contributi sono stati determinanti per la produzione del rapporto.

I nostri ringraziamenti speciali vanno ad Audrey Azoulay, Direttrice Generale dell'UNESCO, per il suo continuo supporto al WWAP e alla produzione del rapporto, e a Gilbert F. Hounou, Presidente del Fondo internazionale per lo sviluppo agricolo (IFAD) e Presidente di UN-Water.

Estendiamo la nostra più sincera gratitudine a tutte le nostre colleghe e a tutti i nostri colleghi del Segretariato del WWAP, i cui nomi sono indicati nei ringraziamenti. Non avremmo mai potuto portare a termine un progetto così ambizioso senza la loro professionalità e dedizione.

Infine, dedichiamo questo rapporto al personale sanitario in prima linea e alle lavoratrici e ai lavoratori dei servizi essenziali i cui instancabili sforzi ci hanno permesso di rimanere il più al sicuro possibile durante l'attuale pandemia di COVID-19.



Michela Miletto



Richard Connor

Prefazione

di **Alfonso Pecoraro Scanio**, *Presidente Fondazione UniVerde*

Il Rapporto WWAP è di straordinaria importanza perché prosegue l'opera di sensibilizzazione sulla conoscenza della risorsa idrica, essenziale alla vita e all'equilibrio ambientale dell'intero Pianeta, eppure ancora incredibilmente sottovalutata.

Quest'ultima analisi ha soprattutto il merito di rendere visibile l'invisibile, ovvero i bacini sotterranei che rappresentano circa il 99% delle acque dolci esistenti oggi allo stato liquido.

Come viene spiegato, ad attingere ai giacimenti blu sotterranei, oltre le necessità di acqua potabile per gli usi civili, sono principalmente i settori manifatturiero, minerario, petrolifero e del gas, dell'energia elettrica, ingegneristico ed edilizio, oltre al tessile, alimentare e delle bevande: tutte necessitano di acqua dolce.

Eppure, l'attenzione è pressoché ovunque concentrata sulla distribuzione della risorsa e mai su come garantire la gestione sostenibile delle falde, limitarne l'inquinamento e incrementare, ove necessario, i processi di desalinizzazione sostenibile.

La grande sfida che il nuovo Rapporto ci pone è quella di considerare che, di fronte al cambiamento climatico, è fondamentale monitorare non solo il sistema dei bacini idrici, di fiumi e laghi ma anche le falde sotterranee. Quindi le strategie di adattamento devono in particolare favorire e vigilare i sistemi di ricarica delle falde poiché, rispetto agli invasi superficiali, sono in grado di immagazzinare le eccedenze idriche riducendo al contempo i fenomeni di evaporazione.

Importanti, a ben vedere, sono le connessioni del Rapporto proprio con il cambiamento climatico, responsabile di alterare il sistema delle piogge: da questa osservazione deriva la necessità di assicurare una maggiore attenzione alle riserve idriche.

C'è poi l'ampio respiro sociale e inclusivo che viene riservato a settori e regioni come quella araba o ancora più specificatamente dell'Africa subsahariana dove, ad esempio, si ricordano le opportunità offerte da vasti acquiferi a bassa profondità sfruttate solo in minima parte: secondo i dati messi in luce, infatti, appena il 5% delle aree dotate di sistemi di irrigazione utilizza acque sotterranee. Potrebbe senz'altro rivelarsi questo uno dei temi centrali della cooperazione internazionale per lo sviluppo sostenibile dei Paesi più svantaggiati.

L'Italia è un Paese affetto da desertificazione. Abbiamo la necessità di destinare maggiore attenzione a tali processi e soprattutto ai territori dove il cuneo salino contamina le falde, e nelle situazioni più gravi, rendendo l'acqua inservibile a fini potabili e per l'irrigazione di terreni.

Altra grande sfida è il monitoraggio: come Paese vantiamo capacità davvero competitive nella meccanica di precisione eppure manchiamo di sviluppare risposte concrete alle emergenze in atto nella penisola. Non solo per evitare lo spreco idrico degli acquedotti, che notoriamente registrano ancora un notevole indice di dispersione, ma anche per avviare una pianificazione virtuosa capace di limitare gli impatti del cambiamento climatico sul sistema delle falde: un percorso che dovrebbe essere condiviso con i territori a tutela del corretto utilizzo di un bene comune primario, nel medio e lungo periodo, come l'acqua.

Infine, l'altro grande aspetto: l'inquinamento. L'allarme che lancia il Rapporto è il rischio per la salute umana dei livelli di contaminazione provocati dagli insediamenti urbani, dalle attività agricole intensive e dall'industria: si tratta del principale fattore di degrado delle acque sotterranee, interne e costiere.

L'Italia dispone di tecnologie e professionalità in grado di realizzare sia il monitoraggio che la prevenzione e il disinquinamento. Questo Rapporto ci consente di valutare la gravità del fenomeno, diffonderne la conoscenza e stimolare i dovuti interventi di istituzioni e imprese.

Promossa dalla Fondazione UniVerde, che mi onoro di presiedere, la traduzione in italiano dell'autorevole Rapporto WWAP è un appuntamento ricorrente ormai da ben cinque anni e ha l'obiettivo di suscitare l'interesse dell'opinione pubblica su argomenti di notevole priorità e favorire, di conseguenza, politiche sostenibili per garantire la disponibilità, l'accessibilità e il corretto trattamento dell'acqua per tutti. Ringrazio l'Istituto Italiano per gli Studi delle Politiche Ambientali, per l'attenta cura nella predisposizione di questo volume, e il World Water Assessment Programme per l'impegno profuso nelle sedi istituzionali a favorire un dialogo sempre costruttivo, in linea con gli obiettivi descritti nell'Agenda 2030.

Condividendo le sfide del Rapporto, i processi di governance delle acque sotterranee devono puntare sull'attuazione di adeguate misure di pianificazione, nonché di politiche idriche, e orientare all'azione la gestione degli stoccaggi della risorsa blu, senza prescindere da attività ed interventi pratici su molteplici scale e livelli geografici, regionali e transfrontalieri.



Alfonso Pecoraro Scanio

Gruppo di lavoro del WWDR 2022

Direttrice della pubblicazione

Michela Miletto

Curatore editoriale

Richard Connor

Coordinatore del processo

Engin Koncagül

Assistente di pubblicazione

Valentina Abete

Disegnatore grafico

Marco Tonsini

Revisore e correttore bozze (versione originale in inglese)

Simon Lobach

Per l'edizione in lingua italiana**Curatore**

Maurizio Montalto

Traduttore

Massimo Micheli

Editing

Consiglia Gianniello

Coordinatore del processo

Giuseppe Di Duca

Comunicazione

Massimo Boddi

Segretariato del Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO (WWAP) (2021-2022)

Coordinatrice: Michela Miletto

Programmi: Richard Connor, Laura Veronica Imburgia, Engin Koncagül e Laurens Thuy

Pubblicazioni: Valentina Abete, Martina Favilli e Marco Tonsini

Comunicazione: Simona Gallese

Amministrazione e supporto: Barbara Bracaglia, Lucia Chiodini e Arturo Frascani

IT e sicurezza: Michele Brensacchi, Tommaso Brugnami e Francesco Gioffredi

Tirocinanti: Hanouf Alyami, Ahmed Quotah, Caterina Brazda, Giulia Cadoni, Hugo Chauvin, Arianna Fusi e Candelaria Landín Moreno

Ringraziamenti

Questo rapporto è pubblicato dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO), per conto di UN-Water, e la sua produzione è coordinata dal Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO (WWAP). Esprimiamo la nostra gratitudine ai membri e partner di UN-Water e ad altri che hanno contribuito e che hanno reso possibile la preparazione dei contenuti di questo rapporto.

Agenzie responsabili dell'elaborazione dei capitoli

Ask for Water GmbH per conto del Rural Water Supply Network (RWSN), Associazione internazionale degli idrogeologi (IAH), Banca mondiale, Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas (CeReGAS), Commissioni regionali delle Nazioni Unite (Commissione economica per l'Europa – UNECE, Commissione economica per l'America Latina e i Caraibi – UNECLAC, Commissione economica e sociale per l'Asia e il Pacifico – UNESCAP, Commissione economica e sociale per l'Asia occidentale – UNESCWA), International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC), International Water Association (IWA), International Water Management Institute (IWMI), Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO), Organizzazione delle Nazioni Unite per lo sviluppo industriale (UNIDO), Programma delle Nazioni Unite per gli insediamenti umani (UN-Habitat), Programma delle Nazioni Unite per lo sviluppo (UNDP), UNESCO (Programma idrologico intergovernativo – IHP, Ufficio di Nairobi, Ufficio di Montevideo e WWAP), e il Relatore speciale sui diritti umani all'acqua potabile sicura e ai servizi igienico-sanitari.

Organizzazioni che hanno offerto il loro contributo

Agenzia europea dell'ambiente (AEA), Agenzia internazionale dell'energia atomica (AIEA), Ask for Water GmbH per conto del Rural Water Supply Network, Banca mondiale, British Geological Survey (BGS), Associazione internazionale di scienze idrologiche (IAHS), CDP (ex Carbon Disclosure Project), Centro di ricerca sulle risorse idriche dell'Università dell'Arizona, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) Land and Water, Dipartimento di pianificazione, industria e ambiente del Nuovo Galles del Sud, Divisione di statistica delle Nazioni Unite (UNSD), Empresa de Transformación Agraria (TRAGSA), Environmental Law Institute, Global Water Partnership (GWP), IAH, IGRAC, IHE Delft, Institute of Environmental Assessment and Water Research Spanish National Research Council (IDAEA-CSIC), International Association for Water Law (AIDA), International Union for Conservation of Nature (IUCN), International Water Resources Association (IWRA), IWMI, Kiwa Water Research Institute (KWR), Miami-Dade County Water and Sewer Department (WASD), Organizzazione dei Paesi Bassi per la ricerca scientifica applicata (TNO), Organizzazione internazionale per le migrazioni (IOM/OIM), Organizzazione meteorologica mondiale (WMO), Texas A&M University School of Law, The Nature Conservancy (TNC), Trinity College di Dublino, UCL-Institute for Risk and Disaster Reduction (UCL-IRDR), Ufficio dell'Alto Commissario delle Nazioni Unite per i diritti umani (OHCHR), UNDP, UNECLAC, UNESCO-IHP, UNESCO World Heritage Centre (WHC), UNESCO WWAP, UNESCWA, Università della Sorbona e Scuola nazionale delle miniere di Parigi, Università di Flinders e National Center for Groundwater Research and Training, Università di Ginevra, Università di Kiel, Università del Massachusetts, Università di Strathclyde, Università del Texas – Austin (UTexas-Austin), Università di Tsukuba, Università Tecnica della Catalogna, Università Tecnica di Dresda (TU-Dresden), United Nations University Institute (UNU), UNU Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH), US Department of Agriculture (USDA), Water Resources Research Center, WaterAid e Women for Water Partnership (WfWP).

Donatori

La realizzazione del rapporto è stata sostenuta finanziariamente dal Governo italiano e dalla Regione Umbria. Un ringraziamento particolare a tutti coloro che hanno fornito un contributo di qualsiasi tipo e ai relativi donatori.

Si ringrazia l'Istituto Italiano per gli Studi delle Politiche Ambientali per l'apporto alla versione italiana.



Questa edizione del *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* si propone di mettere in evidenza le acque sotterranee, ponendo l'attenzione sul ruolo, sulle sfide e sulle opportunità specifiche che esse presentano nel contesto della valorizzazione, della gestione e della governance delle risorse idriche a livello mondiale.

Le acque sotterranee, che rappresentano all'incirca il 99% delle acque dolci allo stato liquido della Terra e sono distribuite sull'intero pianeta, seppure irregolarmente, possono garantire alle società enormi vantaggi sociali, economici e ambientali, anche in relazione all'adattamento ai cambiamenti climatici. Dalle acque sotterranee proviene già la metà del volume dei prelievi idrici per uso domestico effettuati dalla popolazione globale e circa il 25% di tutti quelli destinati all'irrigazione, che alimentano il 38% delle terre irrigate a livello mondiale. Tuttavia, nonostante la sua enorme importanza, questa risorsa naturale viene spesso trascurata e di conseguenza sottovalutata, mal gestita e addirittura sovrasfruttata. In un contesto di crescente scarsità idrica in numerose aree del mondo, non è più possibile ignorare l'enorme potenziale delle acque sotterranee e la necessità di una gestione attenta di questa risorsa.

I molteplici servizi offerti dalle acque sotterranee

La capacità delle acque sotterranee di offrire servizi vari dipende dalle caratteristiche specifiche della loro collocazione geografica, ed è influenzata in modo dinamico dai processi naturali e umani in corso.

Tali servizi includono:

- servizi di approvvigionamento, che consentono il prelievo di acque sotterranee per l'uso (umano) dell'acqua;
- servizi di regolazione, che riflettono la capacità degli acquiferi di regolare i regimi di quantità e qualità delle acque sotterranee;
- servizi di supporto, a sostegno degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (GDE nell'acronimo inglese) e di altri elementi ambientali a queste collegati;
- servizi culturali, relativi alle attività di intrattenimento, alle tradizioni e ai valori religiosi o spirituali, associati a particolari aree piuttosto che ad acquiferi specifici.

Le acque sotterranee offrono inoltre diverse opportunità aggiuntive, quali ad esempio la crescita della produzione di energia geotermica, l'incremento delle capacità di stoccaggio al fine di migliorare la sicurezza idrica e l'adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici.

Le sfide

La riduzione delle riserve di acque sotterranee si verifica quando il deflusso supera la ricarica. Per quanto la variabilità del clima e i cambiamenti climatici svolgano certamente un ruolo rilevante in questo senso, nella maggior parte dei casi l'impoverimento delle riserve di acque sotterranee nel lungo periodo è conseguenza di prelievi intensivi. A livello globale, si registra un tasso aggregato di riduzione delle riserve di acque sotterranee particolarmente elevato: secondo le stime, all'inizio di questo secolo le cifre oscillavano tra 100 e 200 chilometri cubi all'anno (una percentuale compresa tra il 15% e il 25% circa del totale dei prelievi di acque sotterranee).

L'inquinamento delle acque sotterranee riduce la possibilità di utilizzo delle stesse come acqua potabile, e al contempo influenza negativamente gli ecosistemi che da esse dipendono.

Sono numerose le fonti antropogeniche di inquinamento delle acque sotterranee: esse si collocano per la maggior parte sulle superfici dei terreni o nelle immediate vicinanze; tuttavia numerose altre fonti immettono sostanze inquinanti al di sotto della superficie, a profondità talvolta considerevoli. L'inquinamento derivante dall'agricoltura è molto comune; si tratta di una fonte diffusa di

inquinamento che spesso causa la presenza di notevoli quantitativi di nitrati, pesticidi e altri fitofarmaci. L'inquinamento delle acque sotterranee è un processo praticamente irreversibile: una volta inquinati, gli acquiferi tendono a rimanere in tale condizione.

La governance delle acque sotterranee

I processi di governance delle acque sotterranee prevedono l'attuazione di misure di gestione e pianificazione, nonché di politiche idriche. La governance si svolge su molteplici scale e livelli geografici, ad esempio a livello regionale e transfrontaliero. La gestione delle acque sotterranee, d'altro canto, è orientata all'azione: si concentra su attività pratiche e su interventi quotidiani e si svolge prevalentemente a livello micro e meso.

Poiché le acque sotterranee vengono spesso considerate come una risorsa privata (ovvero strettamente legata alla proprietà del relativo terreno e in alcune giurisdizioni come vera e propria proprietà privata), la regolamentazione e la governance o gestione dall'alto presentano delle difficoltà. È essenziale che i governi assumano appieno il proprio ruolo di custodi delle risorse, essendo le acque sotterranee un bene comune.

Le leggi e le norme nazionali regolamentano l'accesso alle acque sotterranee e le attività umane che possono avere un impatto sulla loro qualità. Ulteriori strumenti giuridici rilevanti sono quelli che: garantiscono l'accesso alle risorse idriche per necessità essenziali, nel rispetto del diritto umano all'acqua; consentono l'accesso alle acque sotterranee per fini di sostentamento e di produzione su piccola scala; regolano quegli usi dei terreni che possono essere dannosi per i naturali processi di ricarica e di deflusso delle acque sotterranee; regolano la costituzione e il funzionamento di associazioni di utenti di acque sotterranee in merito alle responsabilità relative all'assegnazione, al monitoraggio e alla formulazione di politiche. I quadri giuridici devono inoltre prevedere la protezione delle aree di deflusso e di ricarica, così come delle aree circostanti i pozzi per l'approvvigionamento idrico, oltre alle norme relative al rendimento sostenibile, ai controlli dei prelievi e ai regolamenti sull'uso congiunto.

In alcune giurisdizioni le acque sotterranee sono soggette a regolamenti che riguardano anche le acque superficiali, inclusi i fiumi. In caso di conflitto tra i diritti relativi alle acque sotterranee e quelli riguardanti le acque superficiali (ad esempio nel caso di un corso d'acqua che si stia prosciugando a causa di intense attività di pompaggio delle acque sotterranee nelle vicinanze, e viceversa), è prevista una modalità di gestione congiunta.

Le fonti puntuali di inquinamento possono essere regolamentate attraverso il rilascio di permessi, come pure tramite norme generali relative alla qualità degli effluenti e/o delle acque circostanti. L'inquinamento da fonti non puntuali, diffuse o di difficile identificazione richiede misure di prevenzione, ad esempio la regolamentazione degli usi dei terreni e/o l'imposizione di migliori pratiche agricole e ambientali.

Il settore agricolo

Le acque sotterranee costituiscono una risorsa essenziale per l'agricoltura irrigua, l'allevamento del bestiame e altre attività collegate, tra cui la trasformazione agroalimentare. Per poter soddisfare la domanda globale di acqua e di prodotti agricoli da qui al 2050, tenendo conto di un incremento della domanda di alimenti, mangimi e biocombustibili stimato al 50% rispetto ai livelli del 2012, è di fondamentale importanza aumentare la produttività agricola attraverso un'intensificazione sostenibile dei prelievi di acque sotterranee, riducendo al contempo l'impronta idrica e gli impatti ambientali della produzione.

Nei luoghi in cui sono presenti fonti perenni e affidabili di acque sotterranee a basse profondità, queste possono costituire una risorsa importante per i piccoli agricoltori. Le



Nell'Africa subsahariana, dove le opportunità offerte da vasti acquiferi a bassa profondità sono sfruttate solo in minima parte, appena il 5% delle aree dotate di sistemi di irrigazione utilizza acque sotterranee

aree del mondo che dipendono in larga misura dalle acque sotterranee per scopi irrigui sono l'America settentrionale e l'Asia meridionale, in cui rispettivamente il 59% e il 57% delle zone dotate di sistemi di irrigazione attingono alle suddette fonti. Nell'Africa subsahariana, dove le opportunità offerte da vasti acquiferi a bassa profondità sono sfruttate solo in minima parte, appena il 5% delle aree dotate di sistemi di irrigazione utilizza acque sotterranee.

Secondo le stime, l'inquinamento causato dall'agricoltura ha superato i livelli di contaminazione provocati dagli insediamenti umani e dall'industria ed è il principale fattore di degrado delle acque interne e costiere. A livello globale, il nitrato contenuto nei fertilizzanti chimici e organici costituisce il principale contaminante di origine antropogenica delle acque sotterranee. Il non corretto utilizzo o smaltimento di insetticidi, erbicidi e fungicidi può essere causa di inquinamento delle acque sotterranee con sostanze cancerogene e tossiche.

L'evidenza scientifica mostra come leggi e regolamenti atti a prevenire o a limitare l'ormai diffuso inquinamento delle acque sotterranee causato dall'agricoltura si rivelino generalmente insufficienti e di difficile attuazione. Le politiche che intervengono sull'inquinamento delle risorse idriche in ambito agricolo dovrebbero costituire parte integrante di un quadro generale di direttive in materia di agricoltura e risorse idriche a livello nazionale, di bacino idrografico e di acquifero.

L'elettrificazione delle aree rurali è uno dei principali fattori alla base del crescente ricorso alle acque sotterranee, in particolare in quelle zone in cui le reti elettriche hanno coperto aree che altrimenti avrebbero dovuto fare affidamento su combustibili diesel o energia eolica. I progressi nella tecnologia solare hanno visto lo sviluppo di sistemi di irrigazione a energia solare (SPIS nell'acronimo inglese), adottati su larga scala per supportare le attività delle aziende agricole. Permane tuttavia il rischio di un impiego insostenibile della risorsa idrica in assenza di adeguate misure di gestione e di regolamentazione di questi sistemi.

Gli insediamenti umani

La dipendenza di numerose città dalle acque sotterranee è in costante crescita: si stima che oggi quasi il 50% della popolazione urbana mondiale soddisfi il proprio fabbisogno idrico grazie alle acque sotterranee. Tuttavia, sono numerosi i poveri che vivono in insediamenti periurbani, spesso informali e privi di uno status legale, nonché sprovvisti di infrastrutture e servizi idrici pubblici.

Nelle economie in via di sviluppo il ricorso a pozzi privati per l'autoapprovvigionamento idrico nelle zone urbane è cresciuto notevolmente negli ultimi anni. Questa pratica viene inizialmente adottata come strategia per far fronte a una fornitura idrica irregolare e inadeguata proveniente dalle condutture, e poi continua a essere mantenuta come strategia di riduzione dei costi per evitare di pagare tariffe più elevate.

L'impatto di servizi igienico-sanitari inadeguati sulle acque sotterranee è osservabile nelle aree urbane con una bassa copertura di reti fognarie, in cui buona parte dei reflui fecali domestici viene scaricata in latrine a fossa. I gestori delle reti idriche dovrebbero aumentare il loro impegno per proteggere fonti essenziali quali pozzi e sorgenti, limitando le attività agricole ed edilizie nelle zone di cattura delle acque sotterranee, al fine di salvaguardare la salute pubblica e ridurre il costo dell'approvvigionamento idrico.

In buona parte del mondo, il ricorso alle acque sotterranee costituisce l'unica modalità possibile ed economicamente sostenibile per consentire l'accesso alle risorse idriche essenziali alle popolazioni rurali che ancora ne sono sprovviste. Ciò vale in particolare per l'Africa subsahariana e per l'Asia meridionale, dove la popolazione rurale è numerosa ma dispersa su vasti territori.



In buona parte del mondo, il ricorso alle acque sotterranee costituisce l'unica modalità possibile ed economicamente sostenibile per consentire l'accesso alle risorse idriche essenziali alle popolazioni rurali che ancora ne sono sprovviste



il settore petrolifero e del gas e quello minerario, attraverso le loro attività, generano una notevole quantità di dati interni sulla localizzazione, sulla portata e sulle caratteristiche degli acquiferi

La coesistenza negli stessi luoghi di acque sotterranee e di impianti igienico-sanitari è causa di grave preoccupazione per le fonti a bassa profondità. Secondo le stime, la contaminazione costante delle acque sotterranee rurali causata da agenti patogeni interessa circa il 30% del totale degli impianti. Di norma ciò va a scapito dei soggetti più emarginati (donne e bambine risultano di gran lunga più a rischio di contrarre malattie causate da agenti patogeni e tossine come conseguenza dell'esposizione alle acque reflue).

Gli insediamenti, permanenti o temporanei, degli sfollati meritano un'attenzione particolare. Tali insediamenti presentano spesso un'elevata densità di popolazione, ma vengono classificati in una categoria intermedia tra insediamenti urbani e rurali. In questi casi, risulta essenziale costruire pozzi adeguatamente progettati, oltre a impianti igienico-sanitari realizzati in luoghi appropriati e sottoposti a costante manutenzione.

Il settore industriale

Ad attingere alle acque sotterranee sono i settori manifatturiero, minerario, petrolifero e del gas, dell'energia elettrica, ingegneristico ed edilizio. I settori che presentano una maggiore dipendenza dalle acque sotterranee attraverso le catene di fornitura includono il settore tessile, alimentare e delle bevande. Sono diversi i processi industriali che attingono alle acque sotterranee in aree in cui la disponibilità di acque superficiali risulta limitata in termini di quantità, ma anche in situazioni in cui la qualità riveste un ruolo importante.

Lo scarico e l'infiltrazione nel terreno di effluenti industriali non trattati o trattati solo parzialmente può costituire causa di inquinamento delle acque sotterranee. La salute dell'essere umano e dell'ambiente può essere esposta a un rischio significativo anche in conseguenza della contaminazione del suolo e della lisciviazione derivante da vecchie discariche industriali a bassa tecnologia e da miniere abbandonate.

Numerosi processi produttivi necessitano di considerevoli quantitativi di acqua per il lavaggio e per la pulizia dei prodotti al termine della fase di produzione, nonché per la separazione dei residui delle sostanze chimiche impiegate. L'utilizzo delle acque sotterranee per fini di raffreddamento dipende in larga misura dalla localizzazione e dalla tipologia di industria, con conseguenti e notevoli differenze tra paesi. Le costruzioni nel sottosuolo, come ad esempio i tunnel, spesso richiedono drenaggi temporanei o permanenti.

In numerosi casi le miniere necessitano di drenaggi frequenti se non addirittura costanti per poter funzionare, con rischio di contaminazione per gli acquiferi locali, che potrebbero costituire una fonte di acqua potabile. Lo smaltimento delle acque costituisce un'ulteriore sfida in fase di trattamento, in caso di contaminazione causata dalle attività minerarie. Tuttavia, il settore petrolifero e del gas e quello minerario, attraverso le loro attività, generano una notevole quantità di dati interni sulla localizzazione, sulla portata e sulle caratteristiche degli acquiferi. Questi dati potrebbero risultare estremamente utili per idrogeologi, governi e aziende che gestiscono le forniture idriche.

Anche il settore energetico può avere notevoli effetti sulla qualità delle acque sotterranee. Il carbone utilizzato per la generazione di energia termica può avere conseguenze significative sulla qualità delle acque sotterranee, a seguito dell'infiltrazione di ceneri di carbone provenienti dalle discariche. Il *fracking* per l'estrazione del gas naturale può presentare elevati rischi di contaminazione per le acque sotterranee, in particolare per gli acquiferi meno profondi. Le fonti di inquinamento includono acque reflue derivanti da acque di formazione, acque di riflusso, liquidi di perforazione e fratturazione.

Il settore finanziario si sta indirizzando in modo evidente verso investimenti sostenibili: questo avrà un effetto a catena, favorendo gli attori operanti nel settore industriale ed energetico che usano le acque sotterranee in modo sostenibile e incoraggiando altri a fare altrettanto.



In numerose aree del mondo, affinché le forniture idriche siano in grado di resistere ai cambiamenti climatici sarà necessario attingere non solo alle acque sotterranee, ma anche a fiumi, laghi e altri bacini idrici superficiali

Gli ecosistemi

Gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (GDE) sono presenti in diverse aree, dalle valli di alta montagna ai fondali oceanici, compresi anche i deserti.

Le acque sotterranee alimentano il flusso di base di fiumi e torrenti; si tratta di una fonte essenziale di acqua da cui dipende il rischio di prosciugamento di questi corsi durante i periodi di siccità. Gli ecosistemi terrestri dipendono dalle acque sotterranee in tutti i biomi del mondo in cui le piante possono accedere a esse. Negli ambienti aridi le pozze d'acqua spesso sono alimentate pressoché esclusivamente dalle acque sotterranee, che rivestono quindi un ruolo cruciale per sostenere le complesse reti alimentari degli ambienti più aridi, come ad esempio le savane. Le zone rivierasche, quelle umide e altri corpi idrici superficiali spesso dipendono dalle acque sotterranee.

Inoltre, i GDE svolgono un importante ruolo di sostegno a vantaggio dei servizi ecosistemici essenziali. I GDE acquatici e terrestri costituiscono un habitat per varie specie, sostengono la biodiversità, proteggono da inondazioni e siccità, forniscono alimenti e offrono servizi culturali. I GDE svolgono un ruolo fondamentale nella protezione delle acque di falda dalla contaminazione, assicurando la loro separazione fisica dagli inquinanti, consentendo processi biofisici quali la filtrazione, la biodegradazione e l'assorbimento di sostanze contaminanti, oltreché agevolando e proteggendo la ricarica naturale.

Il benessere comune di acque sotterranee, ecosistemi ed esseri umani può essere rafforzato attraverso la gestione delle acque sotterranee, la gestione congiunta di acque e terreni, le soluzioni basate sulla natura e il miglioramento della protezione degli ecosistemi. Mentre la gestione delle acque sotterranee spesso si concentra sulle acque stesse o sugli acquiferi, è necessario che acque sotterranee ed ecosistemi vengano gestiti congiuntamente al fine di garantire la fornitura dei servizi ecosistemici essenziali.

I cambiamenti climatici

I cambiamenti climatici hanno un'influenza diretta sulla ricarica naturale delle acque sotterranee in ragione della loro influenza sulle precipitazioni e sulla dispersione delle acque superficiali, ivi compresi corsi d'acqua effimeri, zone umide e laghi. Le proiezioni globali mostrano tuttavia una situazione di notevole incertezza in merito alla portata degli impatti dei cambiamenti climatici sulla ricarica delle acque sotterranee.

Un impatto conosciuto e diffuso dei cambiamenti climatici che influenza la ricarica delle acque sotterranee è l'intensificazione delle precipitazioni. Nelle aree caratterizzate da servizi igienico-sanitari inadeguati, le piogge estreme possono causare il passaggio di sostanze chimiche e di agenti patogeni microbici fecali attraverso suoli poco profondi fino ai livelli delle falde freatiche.

L'innalzamento globale del livello dei mari (SLR nell'acronimo inglese) ha comportato pressoché ovunque l'intrusione di acque marine negli acquiferi costieri. Tuttavia, l'impatto dell'SLR sull'intrusione marina appare limitato se confrontato a quello dei prelievi. Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee potrebbero essere addirittura superiori considerando gli effetti indiretti sulla domanda di acqua per l'irrigazione in ragione dell'aumento dell'evapotraspirazione.

In numerose aree del mondo, affinché le forniture idriche siano in grado di resistere ai cambiamenti climatici sarà necessario attingere non solo alle acque sotterranee, ma anche a fiumi, laghi e altri bacini idrici superficiali. Le strategie di adattamento ai cambiamenti climatici incentrate sulle acque sotterranee si basano su uno stoccaggio distribuito di queste ultime e sulla capacità degli acquiferi di immagazzinare le eccedenze idriche stagionali o

episodiche. Ciò determina una netta riduzione delle perdite per evaporazione rispetto alle infrastrutture convenzionali, quali ad esempio le dighe di superficie.

Lo sviluppo dell'energia geotermica – una fonte di energia sostenibile – svolge un ruolo notevole nella riduzione delle emissioni di CO₂. Gli acquiferi più profondi possono essere utilizzati anche per il sequestro e la cattura del carbonio: si tratta del processo di stoccaggio del carbonio al fine di contenere l'accumulo di CO₂ nell'atmosfera.

Prospettive regionali

Africa subsahariana

L'Africa possiede ingenti quantitativi di acque sotterranee. Per quanto non tutti questi quantitativi siano disponibili per il prelievo, secondo le stime il volume sarebbe pari a oltre 100 volte quello del rinnovo annuale delle risorse di acqua dolce della regione. Lo sfruttamento delle acque sotterranee ha il potenziale per soddisfare una domanda di acqua in rapida crescita in tutta l'Africa subsahariana, necessaria sia per la sopravvivenza umana sia per promuovere lo sviluppo economico. Tuttavia, ad oggi, circa 400 milioni di persone nell'Africa subsahariana non hanno ancora accesso ai servizi idrici essenziali.

In Africa occidentale e centrale la maggior parte dei paesi presenta riserve di acque sotterranee limitate, ma un tasso di precipitazioni annue elevato e dunque una ricarica regolare. Al contrario, numerosi paesi dell'Africa orientale e meridionale vantano riserve notevoli di acque sotterranee, nonostante i livelli molto limitati di ricarica. L'entità di queste riserve permette di ammortizzare gli effetti dei prelievi sulle acque sotterranee della regione. Resta il fatto che prima o poi l'attuale tasso di prelievo delle acque sotterranee andrà a scapito delle generazioni future.

Solamente il 3% del totale dei terreni coltivati dell'Africa subsahariana viene irrigato, e solo il 5% di questi terreni ricorre alle acque sotterranee. La valorizzazione delle acque sotterranee potrebbe essere il catalizzatore della crescita economica grazie all'incremento delle aree irrigue, il che promuoverebbe maggiori rendimenti agricoli e diversità delle colture. Ciò che attualmente limita un ulteriore utilizzo delle acque sotterranee nell'Africa subsahariana non è la loro scarsità, quanto piuttosto la carenza di investimenti in infrastrutture, di istituzioni, di professionisti esperti e di conoscenze in relazione alla risorsa.

Europa e America settentrionale

Le caratteristiche delle acque sotterranee e la loro disponibilità variano tra Europa e America settentrionale, così come all'interno degli stessi continenti in ragione delle differenze geologiche e idrologiche. Anche la quota rappresentata dalle acque sotterranee sul totale dei prelievi di acqua dolce varia considerevolmente da un paese all'altro.

In numerosi paesi europei le acque sotterranee vengono utilizzate principalmente come acqua potabile, il che evidenzia la necessità di monitorare la qualità dell'acqua in ragione dei potenziali rischi per la salute. Nell'Unione europea le sostanze inquinanti che con maggiore frequenza determinano un cattivo stato delle acque dal punto di vista chimico sono i nitrati e i pesticidi. Nonostante gli inquinanti derivanti dall'agricoltura siano i più diffusi, le sostanze chimiche industriali e quelle provenienti dal settore minerario sono spesso causa dell'inquinamento chimico delle acque sotterranee in diversi distretti idrografici. Ulteriori dati sono necessari su queste sostanze inquinanti "nuove" (o "emergenti").

Oltre all'esigenza di collaborazione tra diversi utenti all'interno di un dato paese, c'è una consapevolezza sempre maggiore della natura transfrontaliera di numerose acque sotterranee, e dunque la necessità di una cooperazione intergiurisdizionale.

Le operazioni di monitoraggio e sviluppo di competenze in materia di acque sotterranee sono di norma affidate a istituti specializzati, mentre l'attuazione delle politiche idriche

richiede una collaborazione tra istituzioni differenti. In effetti, le problematiche e le relative soluzioni sembrano essere le stesse per le acque sotterranee e per quelle superficiali. Sono attualmente in corso iniziative volte alla promozione di politiche e misure integrate al fine di garantire lo sviluppo di approcci coerenti.

America Latina e Caraibi

A causa della relativa abbondanza di acque superficiali e dell'impiego limitato delle acque sotterranee, meno del 30% dei prelievi di acqua dolce in America Latina e nei Caraibi proviene da fonti sotterranee. Nei paesi che dipendono dalle acque sotterranee circa la metà dei prelievi viene impiegata per l'irrigazione, un terzo per uso domestico e la parte restante per usi industriali.

In tutta la regione si registrano carenze in merito alla protezione e al monitoraggio delle acque sotterranee, il che dà adito a uno sfruttamento intensivo e/o alla contaminazione delle stesse, minacciando la sostenibilità di queste risorse come pure la loro accessibilità per i gruppi maggiormente vulnerabili, che dipendono da tali fonti per l'approvvigionamento di acqua potabile.

Le acque sotterranee svolgono un ruolo importante nel sistema di approvvigionamento idrico della maggior parte delle città dell'America Latina, anche se non sempre costituiscono la fonte principale per questo scopo. Inoltre, le acque sotterranee rappresentano il 50% delle acque utilizzate dal settore industriale. Nei Caraibi, dove si registra una relativa scarsità di acque superficiali, circa il 50% dei prelievi idrici proviene dalle acque sotterranee.

L'importanza delle acque di falda per ecosistemi, sviluppo sociale e attività economiche della regione continuerà a crescere nel prossimo futuro; dunque, è essenziale che questa area geografica promuova politiche atte ad armonizzare i processi decisionali, il monitoraggio e la gestione delle acque sotterranee sia a livello nazionale che internazionale.

Asia e Pacifico

La regione dell'Asia e del Pacifico preleva i maggiori quantitativi di acque sotterranee al mondo, e include sette dei dieci paesi con i più elevati livelli di prelievo: Bangladesh, Cina, India, Indonesia, Iran, Pakistan e Turchia. Questi paesi da soli contano circa il 60% del totale mondiale dei prelievi di acque sotterranee.

I vantaggi socioeconomici derivanti dall'utilizzo delle acque sotterranee sono particolarmente rilevanti per il settore agricolo. Un uso notevole di questa risorsa si registra anche nel settore industriale e in ambito municipale. Per quanto le acque sotterranee siano presenti in quantitativi abbondanti in buona parte della regione, il rischio di esaurimento solleva preoccupazioni sulla sostenibilità del loro uso in Cina e in diverse parti dell'Asia centrale e meridionale, nonché in alcuni centri urbani dell'Asia sudorientale.

La contaminazione delle acque sotterranee in ragione di processi antropogenici e geogenici costituisce un'ulteriore fonte di preoccupazione. L'impatto dei cambiamenti climatici sulla variabilità delle precipitazioni aggrava la pressione su questa risorsa, in particolare nelle aree caratterizzate da climi semiaridi e aridi, nonché nei piccoli Stati insulari in via di sviluppo.

Per quanto l'intera regione vanti procedure di gestione, nonché quadri istituzionali, legali e normativi per intervenire sui problemi concernenti le acque sotterranee, la relativa governance risulta comunque difficoltosa in ragione dell'assenza in numerosi paesi di limitazioni all'accesso a tale risorsa. Risulta quindi essenziale migliorare la governance delle acque sotterranee, in modo che possa godere del sostegno delle popolazioni e di maggiori possibilità di attuazione.

La regione araba

La regione araba è una tra le zone a maggiore scarsità idrica al mondo, e le acque sotterranee costituiscono la principale fonte di approvvigionamento idrico in almeno 11 dei 22 Stati



Le acque sotterranee nella regione araba sono per la maggior parte fonti non rinnovabili e devono quindi essere gestite considerando la natura limitata della risorsa

arabi. Il prelievo eccessivo di acque sotterranee in gran parte della regione ha causato un abbassamento del livello delle falde freatiche, soprattutto nelle zone densamente popolate e nelle aree agricole. Si tratta di una situazione particolarmente allarmante, dato che le acque sotterranee costituiscono la principale fonte di approvvigionamento idrico per i gruppi vulnerabili non ufficialmente collegati alle reti idriche o privi di accesso alle fonti pubbliche. Pratiche agricole insostenibili, industrializzazione e urbanizzazione causano un impatto significativo sulla qualità delle acque sotterranee.

Le acque sotterranee nella regione araba sono per la maggior parte fonti non rinnovabili e devono quindi essere gestite considerando la natura limitata della risorsa. Permangono tuttavia difficoltà nel monitoraggio dei prelievi, nonostante si stiano affermando nuove tecnologie in merito. Ciò rende più complessa la gestione delle acque sotterranee, soprattutto nei contesti transfrontalieri. Purtroppo nella regione i casi di cooperazione in tale materia sono assai limitati.

L'importanza delle acque sotterranee per la sicurezza idrica della regione in un contesto caratterizzato dai cambiamenti climatici richiede un miglioramento della governance attraverso politiche e norme di legge, approcci innovativi alla gestione, un uso più ampio delle tecnologie, finanziamenti specifici volti a migliorare la conoscenza della risorsa e un rafforzamento della cooperazione a livello regionale.

Promuovere e aggiornare il patrimonio di conoscenze

Il *Summary Progress Update 2021: SDG 6* (Rapporto delle Nazioni Unite di sintesi sui progressi relativi all'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6) affronta il tema della carenza di dati e di iniziative di monitoraggio in relazione alle acque sotterranee, sottolineando come quello del monitoraggio di tali risorse sia "un campo trascurato".

È necessario monitorare le acque sotterranee nel tempo in termini di quantità e qualità, al fine di comprenderne le dinamiche e lo stato e di identificare eventuali cambiamenti negativi, quali ad esempio i prelievi eccessivi, la riduzione della ricarica (inclusi gli effetti dovuti ai cambiamenti climatici) e l'inquinamento. La ricarica delle acque sotterranee è di norma oggetto di una semplice stima piuttosto che di una misurazione diretta. Gli acquiferi più vulnerabili che riforniscono persone e ambiente devono quindi essere monitorati con maggiore frequenza.

La conoscenza scientifica in ambito idrogeologico, i metodi e gli strumenti disponibili sono sufficienti per intervenire sulla maggior parte dei problemi di gestione delle acque sotterranee; la sfida sta piuttosto nella scarsità di dati affidabili per condurre analisi di scenari e valutazioni incentrate su aree specifiche. Dato che tutti gli acquiferi e le condizioni dei loro confini presentano caratteristiche uniche, risulta essenziale promuovere una valutazione delle acque sotterranee sul campo, al fine di sviluppare politiche basate su dati concreti e un'adeguata gestione di tali risorse idriche.

Sebbene spesso si riveli assai costoso, il monitoraggio costituisce comunque un investimento intelligente: l'identificazione precoce di eventuali problematiche può rivelarsi estremamente efficace dal punto di vista dei costi, consentendo l'introduzione di misure di mitigazione prima che si verifichino danni gravi alla risorsa. I programmi di monitoraggio convenzionali possono essere ulteriormente ampliati grazie a iniziative di citizen science, che hanno anche il potenziale per promuovere l'integrazione della conoscenza locale nella descrizione idrogeologica del territorio e nella valutazione delle acque sotterranee. Le tecniche di telerilevamento vengono utilizzate dalla comunità scientifica anche al fine di migliorare il monitoraggio e la valutazione delle suddette risorse.

● ● ●
I dati sulle acque sotterranee raccolti grazie a fondi pubblici dovrebbero essere accessibili liberamente

La condivisione di dati e informazioni si rivela spesso carente, soprattutto nei paesi a basso reddito. I dati sulle acque sotterranee raccolti grazie a fondi pubblici dovrebbero essere accessibili liberamente. Le imprese private dovrebbero divulgare informazioni e dati rilevanti su quegli elementi concernenti le acque non superficiali che permetterebbero di migliorare la valutazione e la gestione delle acque sotterranee. A titolo di esempio, i dati geofisici e quelli riguardanti i pozzi di trivellazione acquisiti nel corso delle esplorazioni per l'estrazione di petrolio e gas potrebbero migliorare la conoscenza dell'estensione e delle caratteristiche degli acquiferi.

In numerosi paesi a medio e basso reddito mancano competenze in materia di idrogeologia, anche in quei contesti in cui le acque sotterranee costituiscono la parte più consistente delle risorse idriche utilizzate. Queste lacune riguardano sia il livello tecnico, sia quello istituzionale.

Politiche e pianificazione

Fin troppo spesso le politiche adottate in relazione alle acque sotterranee si concentrano principalmente sull'utilizzo della risorsa dopo il prelievo. Questo approccio non contribuisce in alcun modo a una gestione adeguata dell'acquifero, che richiede invece un'attenzione particolare nei confronti di questioni quali l'uso dei terreni, il reintegro delle risorse, la protezione e l'attuazione di misure volte a preservare le funzioni e i servizi offerti dalle acque sotterranee.

Qualunque "prospettiva di gestione delle acque sotterranee" a livello nazionale deve costituire parte integrante di una prospettiva nazionale per le risorse idriche in generale, concertata con un'ampia gamma di parti interessate, dagli utenti locali fino a coloro che si occupano di tecnologie, di scienza, della formulazione di politiche e di investimenti. Le politiche relative alle acque sotterranee dovrebbero essere strettamente collegate allo status e alla natura giuridica della proprietà (pubblica o privata) di queste risorse, oltre che a fattori quali la tipologia di utenti, le caratteristiche delle acque superficiali a esse correlate e l'uso dei terreni nelle aree di ricarica degli acquiferi. Queste prospettive dovrebbero inoltre consentire un processo decisionale integrato per gli acquiferi, garantendo un collegamento con altri ambiti e settori della società al di là di quello idrico, come ad esempio sviluppo socioeconomico, uguaglianza di genere e riduzione della povertà, alimentazione ed energia, ecosistemi, cambiamenti climatici e salute umana.

Politiche, strategie e progetti dovrebbero essere adattati ai contesti locali, in base alle priorità e alle aspirazioni delle popolazioni locali, oltre a essere incentrati su prove scientifiche solide. I progetti possono essere predisposti sotto forma di iniziativa congiunta di ministeri nazionali, enti provinciali e locali e altre parti interessate, sulla base di un dialogo e di un supporto tecnico inclusivo (ad esempio mappatura partecipata), al fine di garantire la co-titolarità dei processi e dei risultati. Questa procedura permetterebbe di realizzare documenti formali da convalidare, con misure che prevedono scadenze precise e con indicatori oggetto di monitoraggio, oltre a dati, risultati e conclusioni che potranno essere oggetto di valutazione.

La gestione delle acque sotterranee

La gestione delle acque sotterranee si propone di monitorare i prelievi e la qualità di questa risorsa, oltre a intervenire sugli effetti che tali prelievi hanno sugli ecosistemi, sulle acque superficiali, sulla subsidenza del suolo e altro ancora. Uno degli elementi principali della gestione delle acque sotterranee è probabilmente il monitoraggio dell'area geografica e della quantità di prelievi idrici dagli acquiferi.

La messa a punto dei diversi strumenti di gestione delle acque sotterranee può avvenire solo a seguito della creazione di strutture giuridiche e istituzionali dotate dell'autorità necessaria



La messa a punto dei diversi strumenti di gestione delle acque sotterranee può avvenire solo a seguito della creazione di strutture giuridiche e istituzionali dotate dell'autorità necessaria per l'utilizzo e l'applicazione di tali strumenti

per l'utilizzo e l'applicazione di tali strumenti. Tuttavia, non tutte le procedure di gestione sono a carico dei governi. Le comunità e/o gli stessi utenti potrebbero scegliere di gestire in modo indipendente la collocazione dei pozzi e i prelievi.

L'approccio più sostenibile e conveniente in termini di costi per la gestione della qualità delle acque sotterranee consiste nel garantire una protezione adeguata, evitando la contaminazione. Questo risultato può essere conseguito attraverso una mappatura delle vulnerabilità, la creazione di aree di protezione delle acque sotterranee e la pianificazione dell'uso dei terreni.

Un'attenzione particolare deve essere dedicata alla gestione congiunta di acque superficiali e sotterranee, come pure alla possibilità di sviluppare soluzioni "basate sulla natura". Un approccio integrato tra gestione ambientale, gestione dell'uso dei terreni e gestione di spazi e risorse del sottosuolo costituisce un elemento essenziale nel quadro di una gestione integrata. La ricarica gestita degli acquiferi (MAR nell'acronimo inglese) costituisce un approccio che permette di integrare le dighe di stoccaggio con la ricarica delle falde acquifere, rappresentando così un'alternativa conveniente in termini di costi che riduce al minimo l'evaporazione e gli impatti ambientali. La MAR può essere utilizzata anche per la conservazione di acque meteoriche urbane e di acque riciclate non utilizzate, che possono essere messe a disposizione per un utilizzo produttivo a seconda delle necessità. A livello di bacino idrografico, la MAR può essere utilizzata per preservare i flussi ecologici e salvaguardarne la disponibilità, regolando il deflusso idrico in un corso d'acqua. Negli ultimi 60 anni il ricorso alla MAR è aumentato di 10 volte, ma c'è ancora un notevole spazio per un'ulteriore espansione, dagli attuali 10 chilometri cubi all'anno a una cifra prossima ai 100 chilometri cubi all'anno.



Sebbene il diritto internazionale in materia di risorse idriche fosse stato inizialmente concepito per le acque superficiali, sempre più spesso gli acquiferi transfrontalieri sono stati presi in considerazione in accordi di cooperazione sulle risorse idriche di portata più ampia, formulati per i bacini idrografici transfrontalieri

Gli acquiferi transfrontalieri

Gli acquiferi transfrontalieri comprendono un flusso naturale di acque sotterranee che attraversa i confini internazionali. Le misure prese in merito a detti acquiferi in un paese, ad esempio in relazione a elevati quantitativi di prelievi o alla contaminazione, possono avere un impatto significativo al di là della frontiera.

La gestione degli acquiferi transfrontalieri risente spesso della mancanza di un impegno istituzionale o dell'insufficienza di risorse per raccogliere le informazioni necessarie, soprattutto a livello locale. Il coordinamento, l'armonizzazione e la condivisione di dati costituiscono il primo passo verso la cooperazione tra paesi confinanti. Si tratta di interventi necessari per giungere a un accordo su un modello concettuale affidabile in relazione agli acquiferi, prerequisito essenziale per la formulazione di piani di gestione. L'inclusione di considerazioni di genere nel quadro della cooperazione transfrontaliera può generare opportunità per il consolidamento di una gestione delle acque sotterranee più equa dal punto di vista sociale.

Sebbene il diritto internazionale in materia di risorse idriche fosse stato inizialmente concepito per le acque superficiali, sempre più spesso gli acquiferi transfrontalieri sono stati presi in considerazione in accordi di cooperazione sulle risorse idriche di portata più ampia, formulati per i bacini idrografici transfrontalieri. Tutto ciò evidenzia una crescente consapevolezza dell'importanza degli acquiferi transfrontalieri.

Iniziative di cooperazione scientifica nel quadro di progetti tecnici sugli acquiferi transfrontalieri sono presenti ovunque nel mondo. Si tratta di iniziative che possono avere obiettivi differenti: alcune sono incentrate sulla valutazione scientifica congiunta, mentre altre si propongono di affrontare la gestione di problematiche specifiche. In questi casi, organizzazioni regionali, internazionali e donatori possono svolgere un ruolo particolarmente

rilevante, soprattutto quando i paesi interessati presentano dislivelli in termini di competenze, conoscenza e informazione, oppure in caso di mancanza di fiducia.

Finanziamenti

A differenza di quanto avviene nel contesto delle acque superficiali, dove i costi del capitale vengono di norma coperti dal settore pubblico, le infrastrutture per lo sfruttamento delle acque sotterranee vengono quasi sempre finanziate dagli utenti finali, ad esempio da imprese, famiglie, agricoltori o comunità. L'accesso alla risorsa da parte degli utenti avviene in modo diretto o decentralizzato. L'utente finale investe il proprio capitale privato per far fronte ai costi di accesso alle acque sotterranee; di norma si tratta di costi fissi per la costruzione di pozzi e di costi variabili per gli impianti di pompaggio. Alcuni paesi hanno introdotto un'imposta sui prelievi idrici o un onere specifico per le acque sotterranee, ma queste imposte e oneri solo raramente riflettono i costi effettivi e il valore della risorsa.

È necessario che i governi valutino e si facciano carico del proprio ruolo di potenziali promotori dell'uso sostenibile delle acque sotterranee in base alle condizioni locali, attingendo a risorse finanziarie limitate in modo più efficiente attraverso iniziative su misura. I bilanci pubblici dovrebbero quantomeno finanziare il monitoraggio delle acque sotterranee – qualità e quantità, relativi costi operativi e di manutenzione – impiegando gli investimenti privati per finanziare l'avvio di iniziative di esplorazione e di gestione.

È inoltre possibile integrare meglio lo sfruttamento e la gestione sostenibile delle acque sotterranee nel quadro di altri progetti e iniziative del settore idrico. A titolo di esempio, lo stoccaggio e il prelievo delle acque sotterranee potrebbero figurare fra le fonti di approvvigionamento idrico urbano al fine di garantire maggiore sicurezza e flessibilità in caso di variazioni stagionali delle risorse. Tutto ciò consentirebbe di ottimizzare i finanziamenti esistenti provenienti dall'aiuto pubblico allo sviluppo, dalle tariffe relative a fornitura idrica e a impianti igienico-sanitari, come pure dal partenariato pubblico-privato. Oneri e imposte applicati ad altri settori, come ad esempio quello agricolo, potrebbero essere utilizzati per il finanziamento di iniziative relative alle acque sotterranee, riducendo così eventuali esternalità negative.

In numerosi paesi, le attività oggetto di finanziamento pubblico promosse da altri settori comportano l'abbassamento delle falde acquifere o l'inquinamento delle acque sotterranee. A titolo di esempio, i sussidi assegnati al settore energetico che incentivano un prelievo eccessivo delle acque sotterranee riducendo il costo dell'elettricità, oppure quelli destinati alle imprese agricole che incoraggiano le colture richiedenti maggiori quantitativi di acqua, possono condurre a risultati sfavorevoli. La riforma di questi sussidi potenzialmente dannosi e il loro adattamento alle politiche relative alle acque sotterranee dovrebbero costituire parte integrante del programma di finanziamento del settore idrico.

La strada verso il futuro

L'Assemblea generale delle Nazioni Unite e il Consiglio per i diritti umani riconoscono l'accesso equo ad acqua potabile sicura e a servizi igienico-sanitari adeguati come diritti umani distinti. Gli Stati membri delle Nazioni Unite sono tenuti a garantire i diritti umani ad acqua potabile e a impianti igienico-sanitari sicuri attraverso piani di azione e strategie e tramite la protezione delle acque sotterranee e la ricarica degli acquiferi, dato che queste costituiscono una componente essenziale della fornitura di acqua e di servizi igienico-sanitari.

È essenziale che i paesi si impegnino nella definizione di un quadro adeguato ed efficace per la governance delle acque sotterranee. Questo richiede che i governi prendano l'iniziativa e



È essenziale che i paesi si impegnino nella definizione di un quadro adeguato ed efficace per la governance delle acque sotterranee

si facciano carico della responsabilità di istituire e di mantenere una struttura di governance pienamente operativa che preveda sviluppo di competenze, capacità istituzionale, leggi, regolamenti e loro relativa applicazione, formulazione di politiche e pianificazione, partecipazione delle parti interessate e finanziamenti adeguati. Spetta inoltre agli Stati garantire che le rispettive politiche e piani in materia di gestione delle acque sotterranee vengano pienamente attuati. I governi devono assumere il proprio ruolo di custodi delle risorse, essendo le acque sotterranee un bene comune, garantire che l'accesso alle acque sotterranee e i vantaggi derivanti da esse vengano equamente distribuiti, e che la risorsa rimanga disponibile anche per le generazioni future.

Conclusioni

L'insieme delle acque sotterranee disponibili sulla Terra costituisce un enorme patrimonio di acqua dolce. In un mondo in cui la domanda di acqua aumenta costantemente, dove le risorse idriche superficiali sono spesso scarse e sottoposte a uno stress sempre maggiore, il valore delle acque sotterranee come risorsa che consente lo sviluppo delle società umane ormai da millenni verrà riconosciuto universalmente.

Nonostante l'abbondanza generale, le acque sotterranee sono comunque vulnerabili al sovrasfruttamento e all'inquinamento, con potenziali effetti devastanti su tale risorsa e sulla sua disponibilità. Per liberare tutto il potenziale delle acque sotterranee saranno necessari sforzi notevoli e concertati nella loro gestione e nel loro utilizzo sostenibile. Il primo passo in questo senso è rendere visibile questa risorsa invisibile.

Prologo

Stato delle risorse idriche sotterranee

WWAP

Michela Miletto, Jac van der Gun e Richard Connor



Come premessa al *Rapporto mondiale sullo sviluppo delle risorse idriche 2022*, questo prologo presenta statistiche aggregate, cifre e altre informazioni su caratteristiche generali selezionate e sullo stato delle risorse idriche mondiali, nonché sulle tendenze osservate. Le cifre aggregate su scala globale, continentale o regionale si basano su numerose osservazioni non coordinate relative a variabili di difficile valutazione, la cui elaborazione è solitamente poco documentata. Pertanto, tali informazioni sono inevitabilmente incerte, al punto che circolano versioni diverse della stessa variabile. Nonostante queste incertezze, si ritiene che le informazioni presentate faciliteranno la comprensione del macrofenomeno e del sistema delle acque sotterranee discussi nei diversi capitoli del rapporto, a condizione che le criticità menzionate siano adeguatamente prese in considerazione.

Volumi di acqua dolce



Come i volumi di acqua dolce, anche i tassi di rinnovo sono soggetti a notevoli variazioni spaziali

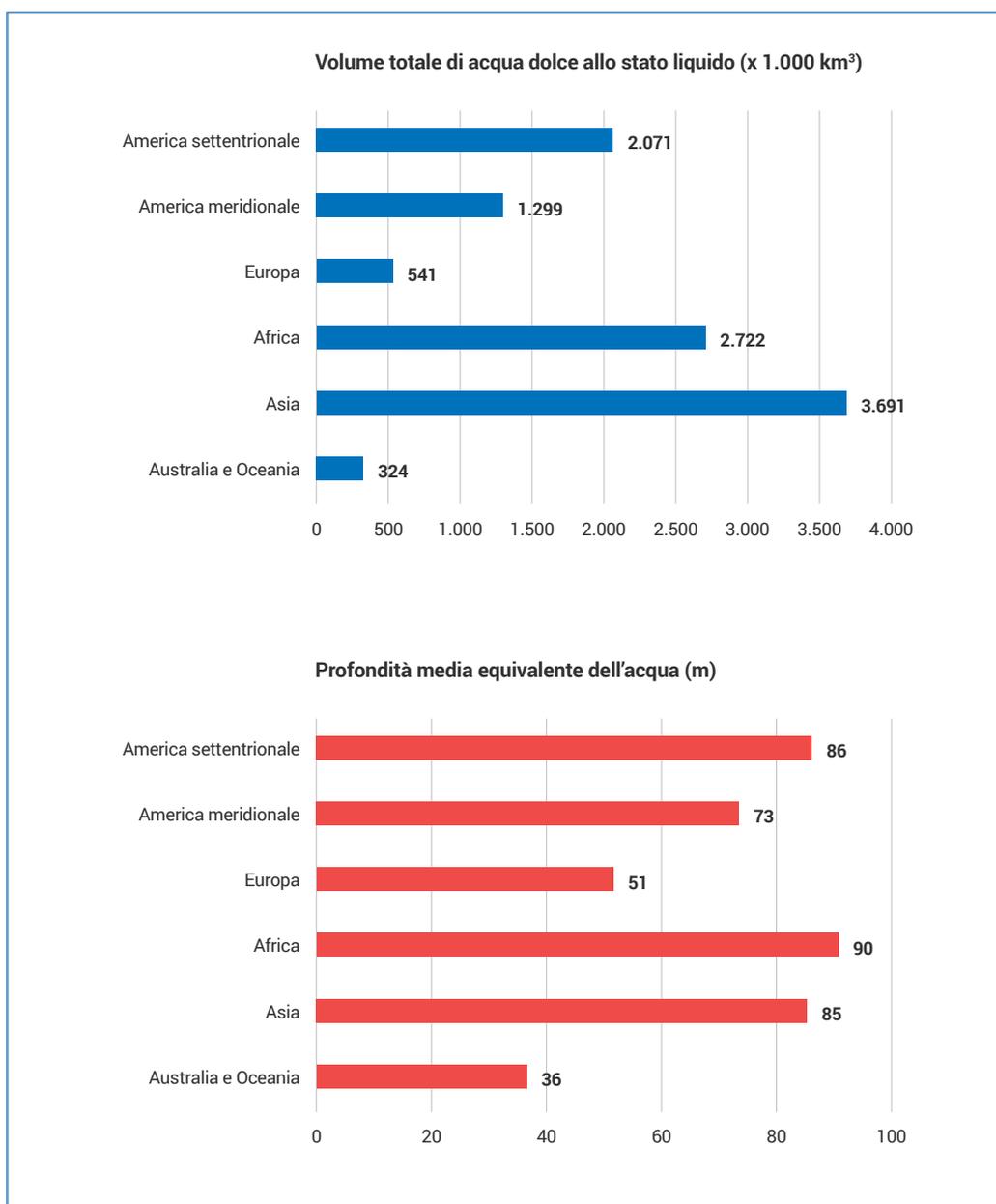
L'acqua è il liquido più abbondante sulla Terra, ma la maggior parte di essa è salina. Nel corso degli anni, diversi scienziati hanno pubblicato stime del volume globale di acqua dolce. Shiklomanov e Rodda (2003) evidenziano la stima di Garmonov pubblicata in Korzun (1974), secondo cui il volume globale di acqua dolce liquida (meno dell'1% di tutta l'acqua presente sulla Terra in forma liquida, solida o gassosa) è stimato in 10,6 milioni di chilometri cubi, che equivale a uno strato di acqua di 79 metri (profondità equivalente) su tutta l'area terrestre del globo, esclusa l'Antartide. Circa il 99% di questo volume è costituito da acque sotterranee e solo 1,4 milioni di chilometri cubi di acque sotterranee accumulate sono recenti, ovvero sono entrate nel sottosuolo meno di 50 anni fa (Gleeson et al., 2016). Stime più attuali del volume globale di acqua dolce includono quelle di Kotwicki (2009), 11,1 milioni di chilometri cubi, e di Ferguson et al. (2021), 15,9 milioni di chilometri cubi (considerando solo la componente di acqua dolce sotterranea). Tutte le stime sono in parte basate su ipotesi piuttosto arbitrarie, pertanto non è possibile definire quale stima sia la più realistica. Comprensibilmente, queste stime sono soggette a un ampio margine di incertezza.

Il volume di acqua dolce è distribuito irregolarmente sui continenti, il che è in parte spiegato dalle differenze nelle dimensioni di essi, in parte dalle differenze nel volume medio di acqua dolce per unità di superficie. Un'analisi di Korzun (1974), basata sulla stima di Garmonov, è mostrata nella figura 1. Nel contesto dei paesi e dei territori più piccoli, la variazione spaziale della profondità equivalente dell'acqua è maggiore, con valori che vanno da zero a quasi duemila metri.

Le variazioni dei volumi di acqua dolce nel tempo, come quelle causate dalle variazioni stagionali del clima, dai cambiamenti climatici e dallo sfruttamento intensivo, durante l'arco di tempo di una vita umana non hanno alcun effetto apprezzabile sui volumi mostrati nella figura 1. Tuttavia, le stesse variazioni possono avere, entro lo stesso lasso di tempo, impatti drastici su scala locale o regionale. Esempi sono: a) laghi in contrazione come il lago Ciad, il lago d'Aral, il lago di Urmia, il Gran Lago Salato e il lago Poopó (Wurtsbaugh et al., 2017); b) la scomparsa di numerose sorgenti nel mondo e la riduzione dei flussi in fiumi come il Fiume Giallo, il Gange, il Río Grande, il fiume Congo e i fiumi Murray-Darling (Shi et al., 2019); e c) il costante calo dei livelli di acque sotterranee nei sistemi acquiferi sfruttati in modo intensivo, tra cui il bacino del Gange-Brahmaputra, la pianura della Cina settentrionale e la valle centrale della California (Shamsudduha e Taylor, 2020).

Figura 1

Volumi stimati di acqua dolce allo stato liquido presenti nei diversi continenti



Fonte: Shiklomanov e Rodda (2003), sulla base dei dati di Korzun (1974).

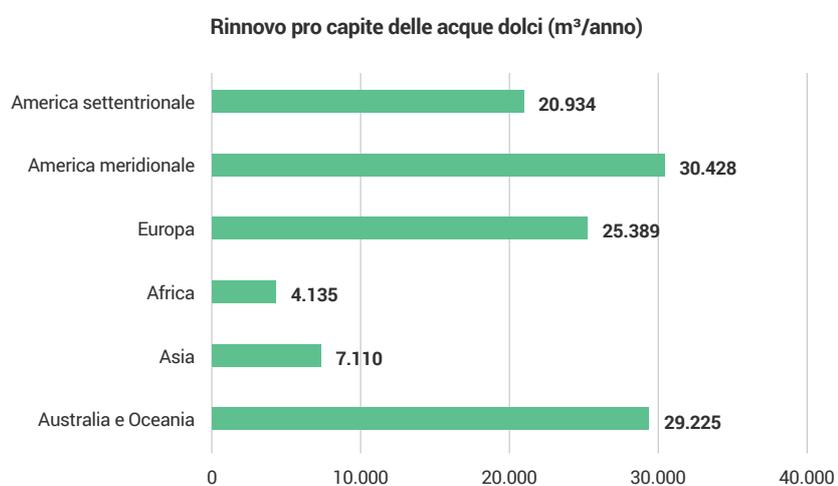
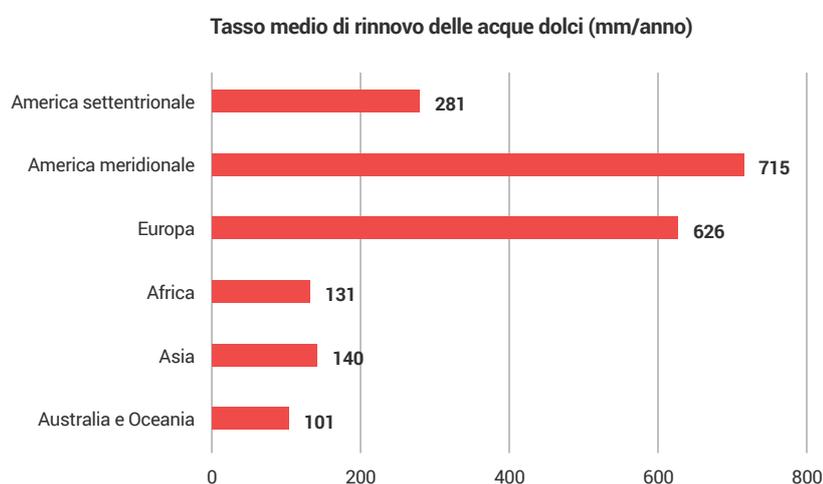
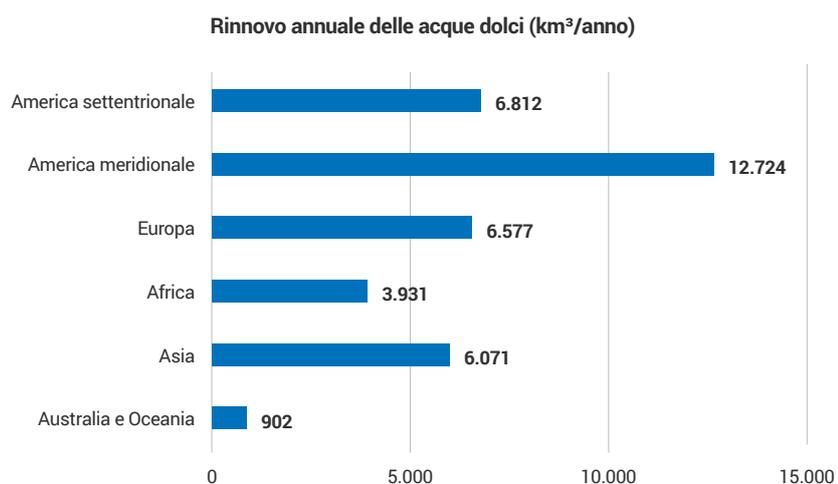
Rinnovo dell'acqua dolce

Il tasso di rinnovo definisce il limite massimo teorico del prelievo idrico sostenibile. Il rinnovo dell'acqua dolce (essenzialmente l'acqua concentrata nella parte terrestre del ciclo idrologico che viene mantenuta in movimento) integra i volumi trasportati da corsi d'acqua, suoli e acquiferi e consente agli esseri umani di prelevare acqua in modo sostenibile. Come i volumi di acqua dolce, anche i tassi di rinnovo sono soggetti a notevoli variazioni spaziali. I dati, anche se aggregati a livello continentale, mostrano marcate differenze (figura 2).

È evidente che le differenze tra i continenti nel volume globale di rinnovo delle acque dolci (valore medio: 37.000 chilometri cubi all'anno) sono in parte causate dalle dimensioni differenti degli stessi, ma anche da differenze significative nel tasso di rinnovo per unità di superficie (profondità dell'acqua in millimetri all'anno). Le profondità medie di rinnovo delle acque dolci per i continenti relativamente umidi come l'America meridionale e l'Europa sono da quattro a sette volte superiori a quelle di Asia, Africa, Australia e Oceania, continenti che comprendono ciascuno vasti territori aridi e semiaridi. Secondo i dati presentati da Ritchie e Roser (2017), il rinnovo medio annuo di acqua dolce calcolato sulla superficie terrestre globale (esclusa l'Antartide) equivale a una profondità dell'acqua di 274 millimetri (solo lo 0,35% della profondità media dell'acqua dolce immagazzinata), il che implica un tempo di permanenza medio di quasi trecento anni. Africa e Asia hanno i tassi di rinnovo dell'acqua dolce pro capite più bassi.

Figura 2

Rinnovo di acqua dolce stimato nei diversi continenti, 2015



Fonte: Ritchie e Roser (2017), sulla base dei dati di Aquastat.

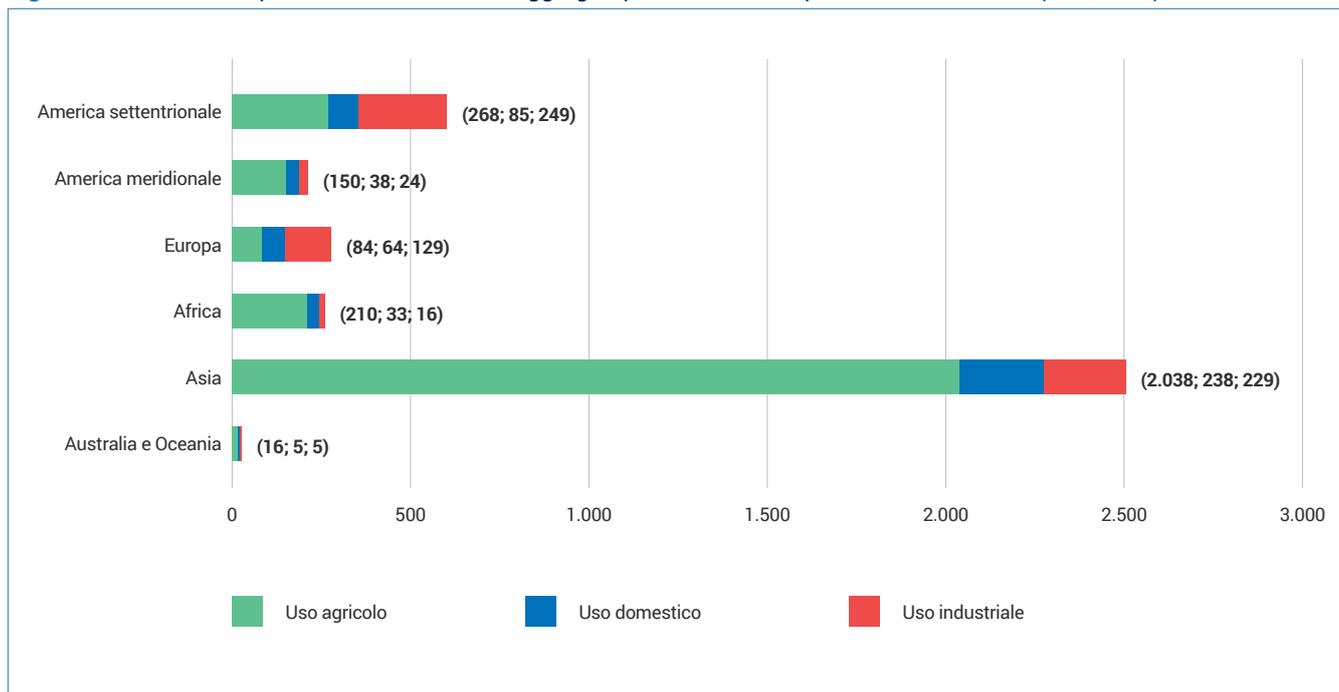
Prelievo di acqua dolce, stress idrico e scarsità di acqua

Il prelievo di acqua dolce da ruscelli, laghi, acquiferi e bacini artificiali (le cosiddette sorgenti di “acqua blu”) è aumentato notevolmente durante l’ultimo secolo e sta aumentando ancora nella maggior parte del mondo. Il prelievo globale di acqua dolce era probabilmente di circa 600 chilometri cubi all’anno nel 1900 ed è aumentato a 3.880 chilometri cubi all’anno nel 2017, secondo recenti stime (Nazioni Unite, 2021; Aquastat, s.d.). Il tasso di aumento è stato particolarmente elevato (circa il 3% all’anno) durante il periodo dal 1950 al 1980, in parte a causa di un maggiore tasso di crescita della popolazione e in parte per il rapido aumento dello sfruttamento delle acque sotterranee, in particolare per l’irrigazione. Il tasso di incremento è oggi di circa l’1% annuo, in sintonia con l’attuale tasso di crescita della popolazione.

Come mostrato nella figura 3, l’Asia presenta la quota maggiore di prelievi di acqua dolce a livello globale (64,5%). Seguono America settentrionale (15,5%), Europa (7,1%), Africa (6,7%), America meridionale (5,4%), Australia e Oceania (0,7%).

Il confronto con le stime relative al rinnovo (figura 2) mostra che su scala globale il tasso di prelievo di acqua dolce ha raggiunto il 10,5% del tasso medio annuo di rinnovo di tale risorsa. Queste percentuali variano notevolmente tra i continenti: alte per l’Asia (41,3%), basse per l’America meridionale (1,7%) e per l’Australia e l’Oceania (2,9%), con valori intermedi in Africa (6,6%), America settentrionale (8,8%) ed Europa (4,2%).

Figura 3 Prelievi di acqua dolce nel 2017, dati aggregati per continente e per settore di utilizzo (km³/anno)



Fonte: sulla base dei dati di Aquastat (s.d.).

Sebbene il tasso di aumento dell’uso di acqua dolce si sia stabilizzato nella maggior parte dei paesi sviluppati, continua a crescere in gran parte delle economie emergenti, nonché nei paesi a reddito medio e basso. A livello globale, si prevede che l’uso dell’acqua crescerà di circa l’1% all’anno nei prossimi 30 anni, indotto dall’aumento della domanda nei settori dell’industria e dell’energia, nonché dagli usi municipali e domestici, principalmente in funzione dello sviluppo industriale e del miglioramento della copertura dei servizi idrici e igienico-sanitari, in concomitanza con la crescita della popolazione, lo sviluppo economico e il cambiamento dei modelli di consumo (Nazioni Unite, 2021).



Si stima che quattro miliardi di persone vivano in aree che soffrono di grave scarsità fisica di acqua per almeno un mese all'anno

Il prelievo sulla percentuale del rinnovo è un indicatore di stress idrico spesso utilizzato; tuttavia, se applicato a grandi aree aggregate e ai dati medi annuali, risulta piuttosto inefficace per rilevare le zone che soffrono di stress idrico. L'indicatore diventa più significativo se utilizzato con una risoluzione spaziale più elevata e tenendo conto della variazione stagionale, ma presenta ancora alcuni difetti, in particolare perché vengono ignorati i flussi ambientali e i flussi di ritorno della frazione non consumata dell'acqua prelevata, mentre spesso rimane incerto come devono essere interpretati i valori degli indicatori.

Queste lacune sono state affrontate nel contesto dell'indicatore della scarsità di acqua blu, introdotto da Mekonnen e Hoekstra (2016). Questo indicatore è definito come l'impronta idrica blu divisa per la disponibilità di acqua blu. L'impronta idrica blu si riferisce al "consumo di acqua blu" o al "prelievo netto di acqua" ed è uguale al volume di "acqua blu" (= acqua dolce superficiale e acque sotterranee combinate) che viene prelevato e non restituito alle acque sotterranee o superficiali perché l'acqua è evaporata o è stata incorporata in un prodotto. La disponibilità di acqua blu su una determinata area è calcolata come la somma del deflusso generato in quell'area e ricevuto a valle, meno il flusso ambientale ottimale di tutte le aree che contribuiscono e meno l'impronta idrica in tutte le aree contribuenti a monte. La figura 4 mostra il modello globale simulato calcolato annualmente della scarsità di acqua blu, mentre la figura 5 (basata su simulazioni per mese solare) indica il numero di mesi all'anno in cui la scarsità di acqua blu supera 1,0, valore che indica un tasso di prelievo insostenibile. Si stima che quattro miliardi di persone vivano in aree che soffrono di grave scarsità fisica di acqua per almeno un mese all'anno (Mekonnen e Hoekstra, 2016). Le risposte tipiche per le aree in cui i valori di scarsità annuale superano 1,0 includono i trasferimenti di acqua dalle aree limitrofe con un surplus di acqua (se disponibili) o l'esaurimento dei volumi di acqua immagazzinata nei laghi, nei bacini idrici superficiali e, soprattutto, negli acquiferi.

Le risorse idriche sotterranee e la loro distribuzione geografica

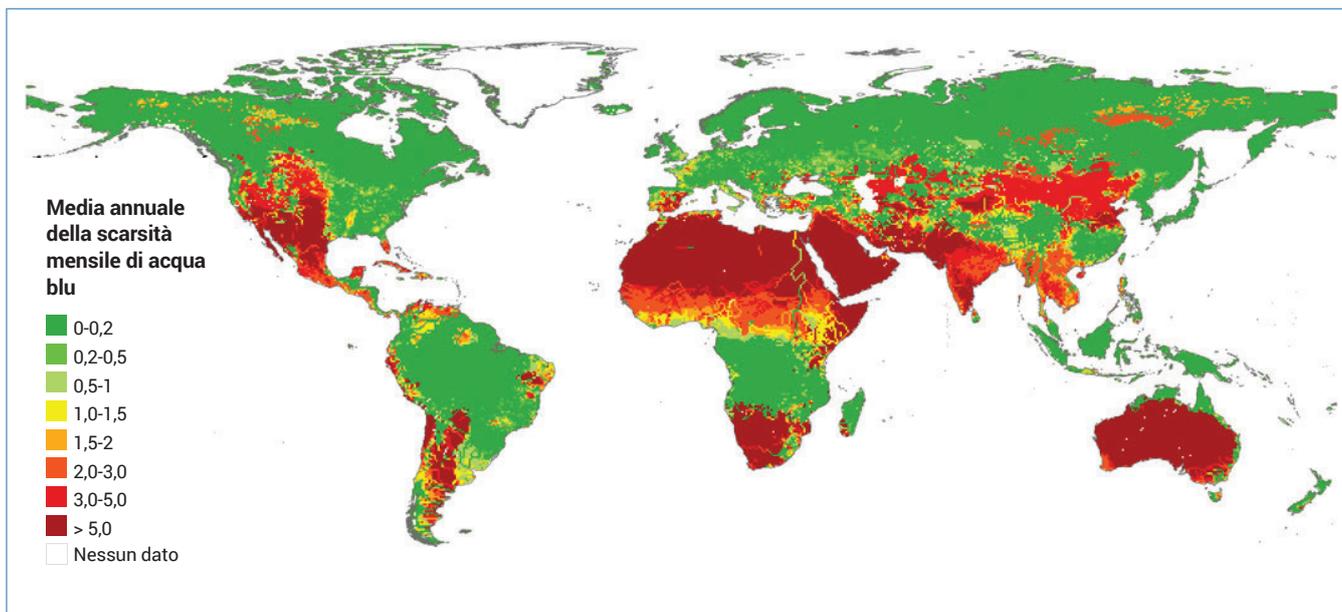


Grandi volumi di acqua dolce sotterranea sono presenti sotto la superficie del suolo e distribuiti su tutto il globo, ma la loro abbondanza e le condizioni per il loro prelievo sono soggette a notevoli variazioni spaziali

Grandi volumi di acqua dolce sotterranea sono presenti sotto la superficie del suolo e distribuiti su tutto il globo, ma la loro abbondanza e le condizioni per il loro prelievo sono soggette a notevoli variazioni spaziali. Per essere produttivi, i pozzi devono estendersi in formazioni geologiche caratterizzate da porosità e permeabilità relativamente elevate (i cosiddetti "acquiferi", vedere capitolo 1) ed essere riempiti di acque sotterranee dolci. Le carte idrogeologiche mostrano gli schemi e i confini delle zone in cui si incontrano formazioni favorevoli (acquiferi) di questo tipo, alternate a zone dominate da formazioni che non sono in grado di fornire quantità significative di acqua ai pozzi. L'idoneità di un determinato luogo o zona al prelievo di acque sotterranee dipende inoltre dal tasso di ricostituzione dell'acquifero captato (ricarica delle acque sotterranee) e dalla qualità dell'acqua. La ricarica consente di prelevare le acque sotterranee in modo sostenibile; se è assente o minima, l'estrazione esaurisce il volume delle acque sotterranee immagazzinate.

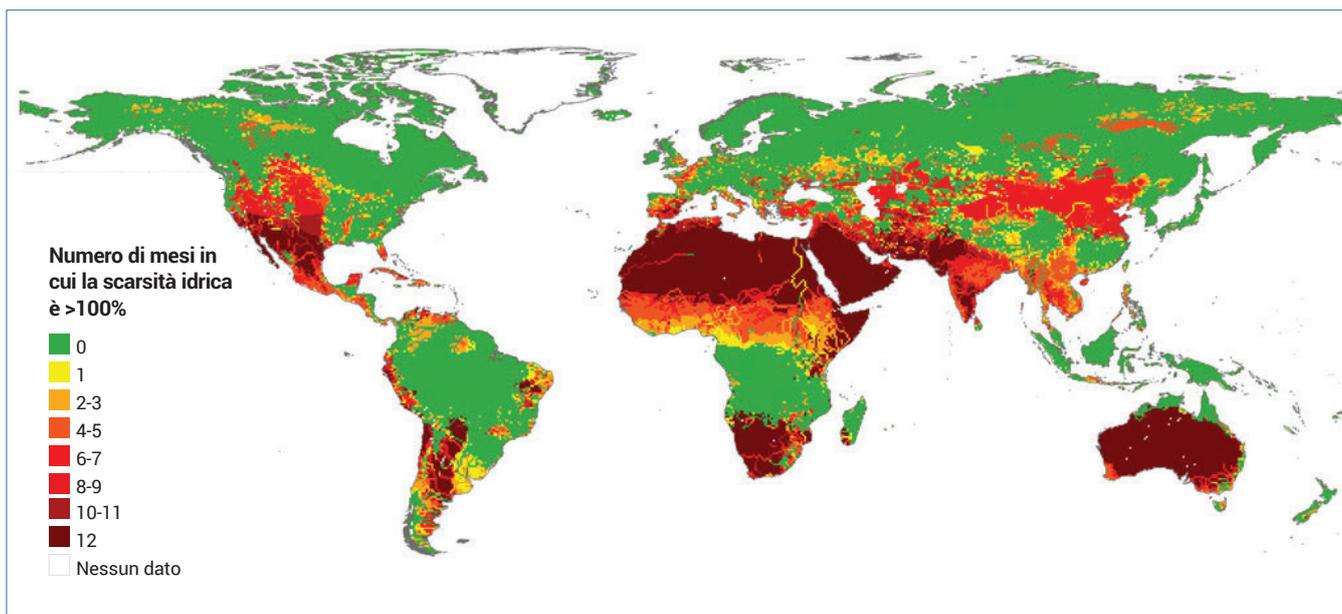
La figura 6 mostra una carta idrogeologica semplificata su scala globale. Presenta i principali bacini idrogeologici (colore blu) di tutti i continenti, parte dei quali dotati di tassi di ricarica medio-alti, mentre altri (in zone aride e nel permafrost) con ricarica ridotta o assente. Questi grandi bacini idrogeologici contengono gran parte di tutte le acque sotterranee dolci immagazzinate sulla Terra e presentano in generale le condizioni più favorevoli per la loro estrazione. Le aree a struttura idrogeologica complessa (colore verde) contengono strati fitti di formazioni che consentono di trasferire anche notevoli quantità di acque sotterranee (spesso immagazzinate e defluite in fessure piuttosto che nei pori), ma la loro produttività, in media, tende ad essere inferiore a quella dei principali bacini idrogeologici. La terza unità cartografica principale (colore marrone) rappresenta le aree meno favorevoli per lo sfruttamento delle acque sotterranee, ma va notato che questa è solo una caratterizzazione macroscopica, non appropriata per valutazioni su scala locale. Oltre alle zone non produttive, questa unità comprende numerosi acquiferi relativamente piccoli e/o poco profondi che possono essere di enorme importanza locale o regionale. Per i progetti locali è opportuno consultare carte idrogeologiche su scala locale.

Figura 4 Media annuale della scarsità mensile di acqua blu con una risoluzione di 30x30 arcmin, 1996-2005



Fonte: Mekonnen e Hoekstra (2016, fig. 2, pag. 3).

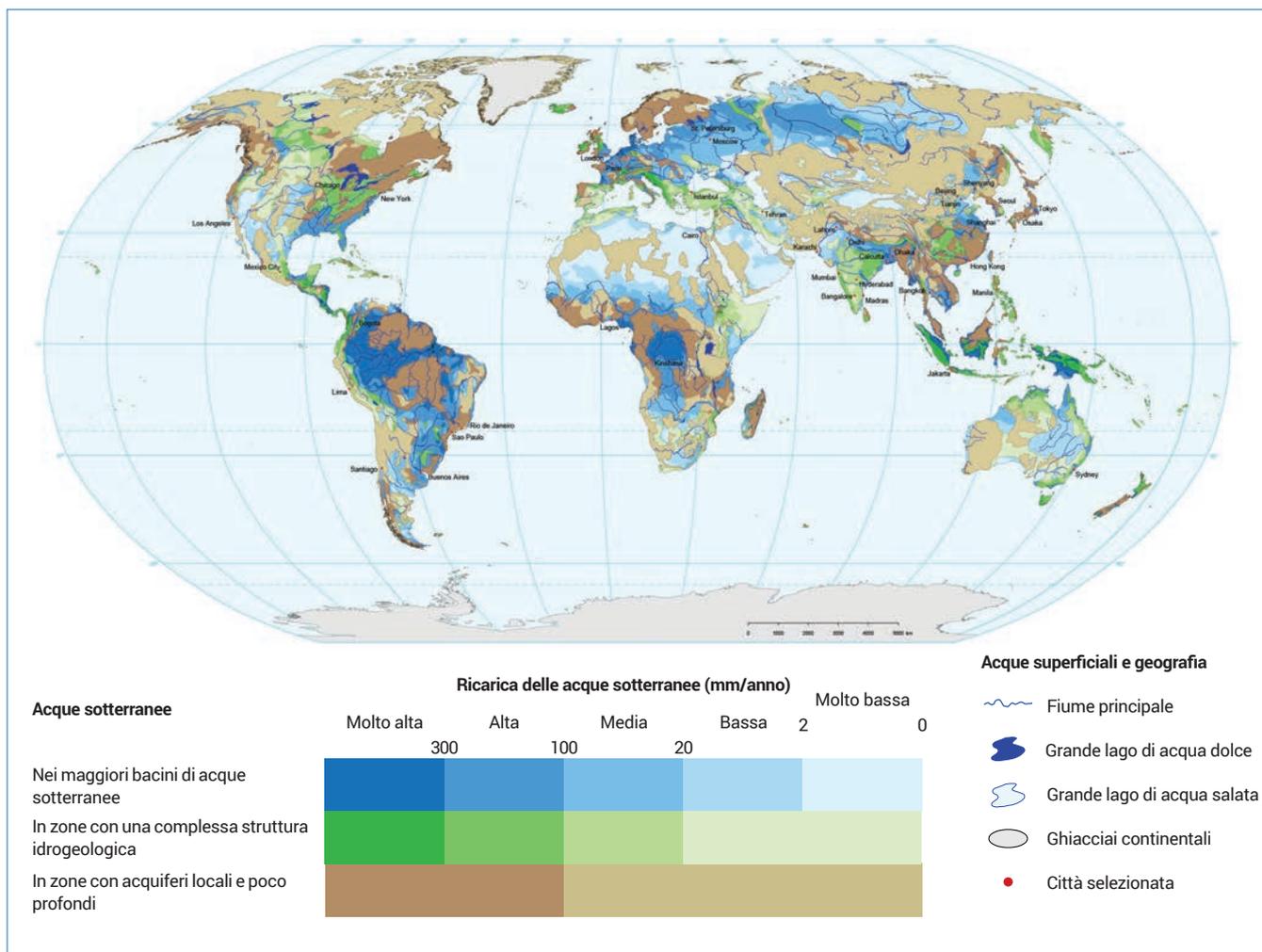
Figura 5 Numero di mesi all'anno in cui la scarsità di acqua blu supera 1,0, 1996-2005



Fonte: Mekonnen e Hoekstra (2016, fig. 3, pag. 3).

Le acque sotterranee dolci e salmastre non si trovano solo nel sottosuolo di continenti e isole: sono presenti anche al largo della costa. La figura 7 mostra i risultati di un recente censimento di tali acque sotterranee. Una piccola parte di questi corpi idrici sotterranei dolci o salmastri può ricevere una ricarica contemporanea (mediante afflusso laterale da un sistema freatico terrestre connesso), ma la maggior parte di essi sono risorse non rinnovabili. La fattibilità e la convenienza dello sfruttamento di questi corpi d'acqua dolce e salmastra offshore per l'approvvigionamento idrico in futuro devono ancora essere esplorate.

Figura 6 Le risorse idriche sotterranee del mondo



Fonte: BGR/UNESCO (2008).

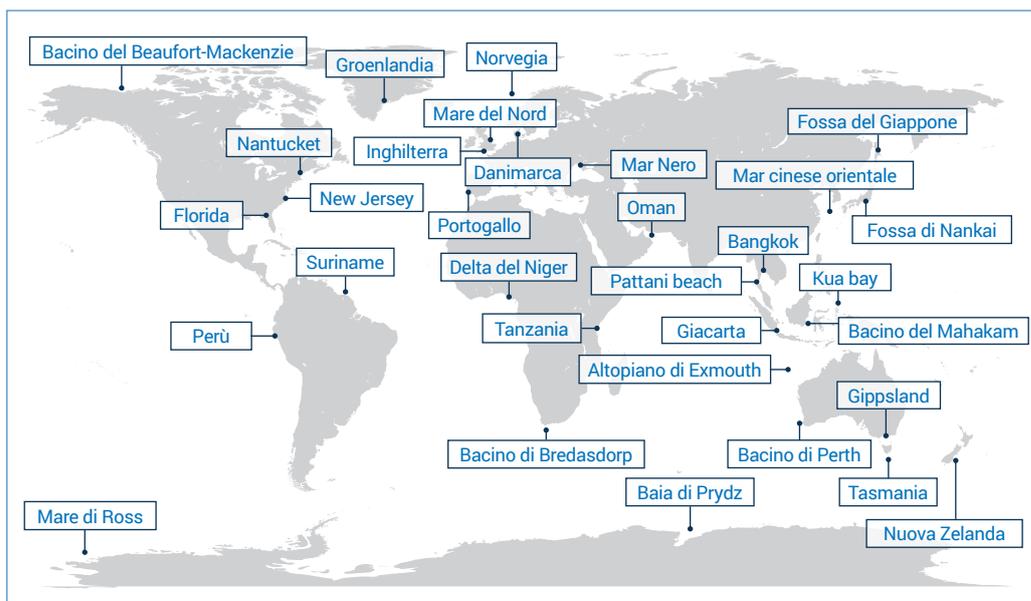
Prelievo e utilizzo delle acque sotterranee

In risposta alla domanda di acqua in rapida crescita e stimolata dal progresso tecnico, scientifico ed economico, il prelievo di acque sotterranee è cresciuto nel corso del XX secolo nella maggior parte dei paesi del mondo, raggiungendo livelli senza precedenti all'inizio di questo secolo. La tabella 1 presenta le stime dei prelievi di acque sotterranee nel corso del 2017, aggregate per regione e per continente. Secondo questa tabella, nel 2017, 959 chilometri cubi di acque sotterranee sono stati prelevati a livello mondiale, in modo non uniforme¹. Va notato che i due terzi di questa quantità sono stati prelevati in Asia, principalmente nell'area meridionale e orientale. L'America settentrionale è stata il secondo continente per prelievi, con una quota del 16% sul totale dei prelievi globali. Infatti, otto dei dieci paesi con i maggiori prelievi di acque sotterranee (pari al 75% del totale) si trovano in Asia (in ordine decrescente: India, Cina, Pakistan, Iran, Indonesia, Bangladesh, Arabia Saudita e Turchia), e due in America settentrionale (Stati Uniti d'America e Messico; vedere tabella 5.1). Nonostante in Africa sia concentrato circa il 17% della popolazione mondiale (1,4 miliardi), il tasso di prelievo di acque sotterranee di questo continente è relativamente basso, pari a poco meno del 5% del totale a livello mondiale. Anche l'Australia e l'Oceania, considerato il ridotto numero di abitanti, contano una quota molto bassa sui prelievi globali di acque sotterranee.

¹ I dati disponibili poco prima della redazione finale di questo rapporto indicano un prelievo globale di acque sotterranee di 978 chilometri cubi nel 2018. La differenza con la stima del 2017 risiede nel margine delle variazioni interannuali e delle imprecisioni di segnalazione.

Figura 7

Mappa mondiale dei fenomeni noti di acque sotterranee offshore dolci e salmastre



Fonte: sulla base di Post et al. (2013, fig. 1, pag. 72).

● ● ●
Nonostante in Africa sia concentrato circa il 17% della popolazione mondiale (1,4 miliardi), il tasso di prelievo di acque sotterranee di questo continente è relativamente basso, pari a poco meno del 5% del totale a livello mondiale

Il confronto con le stime precedentemente elaborate per il 2010 (Margat e Van der Gun, 2013) mostra che il tasso di prelievo a livello mondiale non è cambiato in modo significativo tra il 2010 e il 2017. Tuttavia, a livello regionale, le percentuali di variazione cambiano notevolmente. Sebbene queste percentuali sembrino piuttosto elevate per alcune regioni, non consentono ancora di trarre conclusioni definitive sulle tendenze, poiché le differenze calcolate possono essere causate da variazioni climatiche interannuali o persino da incongruenze nelle relazioni delle agenzie nazionali. Dopo l'analisi delle serie temporali nei record annuali, sembra che i tassi di prelievo delle acque sotterranee nella maggior parte dei paesi europei si siano stabilizzati o siano addirittura leggermente in calo. Lo stesso sembra essere il caso del Nord dell'America settentrionale (cioè Canada, Stati Uniti e Groenlandia) e dell'Asia meridionale e orientale. Apparentemente, il prelievo di acque sotterranee nei relativi paesi ha raggiunto livelli tali oltre i quali non è più auspicabile o possibile spingersi.

La tabella 1 mostra inoltre che, a livello globale, il prelievo di acque sotterranee corrisponde attualmente al 25% del prelievo totale di acqua dolce. Le percentuali variano da un continente all'altro: basse per l'America meridionale, gran parte della quale è dotata di abbondanti risorse idriche superficiali permanenti, e alte per l'Australia e l'Oceania, dove tali risorse idriche superficiali sono scarse.

Un'analisi dettagliata del prelievo di acque sotterranee per settore di utilizzo dell'acqua è presentata nella tabella 2. Essa mostra che il 69% del volume totale viene prelevato per il settore agricolo, il 22% per usi domestici e il 9% per scopi industriali. Queste percentuali variano tra i continenti. I capitoli 3, 4 e 5 di questo rapporto forniscono maggiori informazioni sui diversi usi umani delle acque sotterranee, mentre il capitolo 6 affronta il tema dei servizi offerti dalle acque sotterranee *in situ* a sostegno degli ecosistemi.

Vincoli naturali specifici delle aree di prelievo delle acque sotterranee

Ovviamente, l'assenza di acquiferi produttivi in una determinata area costituisce un vincolo primario al prelievo delle acque sotterranee. Le carte idrogeologiche forniscono indicazioni sulla presenza o assenza di tali acquiferi. Tuttavia, altri vincoli naturali influenzano il prelievo delle acque sotterranee: alcuni tra i più importanti sono menzionati e brevemente descritti di seguito.

La scarsa qualità delle acque sotterranee costituisce un grave vincolo al prelievo delle stesse. Sebbene la maggior parte delle acque sotterranee entro poche centinaia di metri sotto la

Tabella 1 Prelievi di acque sotterranee nel 2017, aggregati in base alle principali regioni del mondo

Continente e regione	Prelievo di acque sotterranee (km ³ /anno)	% di variazione dal 2010	% di prelievo totale di acque dolci
America settentrionale	156	0	26
America settentrionale del Nord	113	-1	24
America centrale	37,1	+12	38
Caraibi	6,5	-37	27
America meridionale	27	+6	13
America meridionale del Nord e dell'Est	7,9	-32	9
Stati andini	4,7	-22	11
America meridionale del Sud	14,7	+83	19
Europa	65	-6	23
Europa settentrionale	4,7	-3	20
Europa occidentale	15,2	+1	22
Europa orientale	15,2	-24	18
Europa meridionale	29,7	+1	31
Africa	45	+10	20
Africa settentrionale	26,2	+24	21
Africa occidentale	8,0	+9	28
Africa centrale	2,1	-21	72
Africa orientale	6,3	-6	13
Africa meridionale	2,8	-16	14
Asia	657	-4	26
Asia settentrionale	3,1	-10	15
Asia centrale	2,7	-85	2
Asia occidentale	63,7	-3	39
Asia meridionale	401	-5	39
Asia orientale	132	-6	18
Asia sudorientale	54,2	+54	11
Australia e Oceania	8	+21	31
Australasia	7,5	+30	29
Micronesia, Melanesia e Polinesia	0,6?	-36?	79?
Mondo	959	-2	25

Fonte: stime basate su Aquastat (s.d.), Eurostat (s.d.) e Margat e Van der Gun (2013).

Tabella 2 Dettaglio del prelievo di acque sotterranee relativo al 2017 per settore di utilizzo e per continente

	Prelievo di acque sotterranee		Volume di acqua usata per settore			Percentuale di acqua usata per settore		
	(km ³ /anno)	% del mondo	Uso agricolo	Uso domestico	Uso industriale	Uso agricolo	Uso domestico	Uso industriale
America settentrionale	156	16	97	48	12	62	30	7
America meridionale	27	3	13	9	5	49	32	20
Europa	65	7	24	29	12	36	45	19
Africa	45	5	29	14	2	65	32	4
Asia	657	68	496	107	53	76	16	8
Australia e Oceania	8	1	4	4	0	48	48	3
Mondo	959	100	664	211	84	69	22	9

Fonte: stime basate su Aquastat (s.d.), Eurostat (s.d.) e Margat e Van der Gun (2013).

superficie terrestre sia dolce, più della metà di esse a livello globale è salina e quindi inadatta alla maggior parte degli utilizzi. Un'elevata salinità prevale negli strati più profondi dei bacini sedimentari (paleosalinità), sebbene in molte zone del mondo questo fenomeno si osservi anche a profondità inferiori, ad esempio nelle zone costiere e nelle zone con falde poco profonde interessate da climi aridi (Van Weert et al., 2009). Inoltre, in alcune aree le acque sotterranee dolci contengono contaminanti naturali in concentrazioni eccessive, ad esempio arsenico e fluoruro.

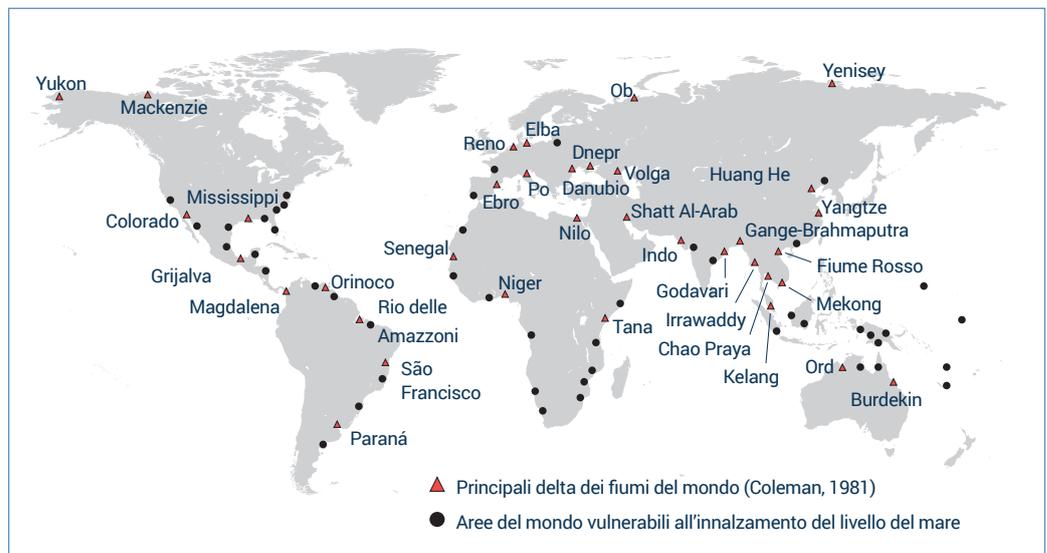
Un altro vincolo al prelievo delle acque sotterranee è la profondità a cui si trovano al di sotto della superficie terrestre. Se devono essere perforati pozzi molto profondi per attingere ad acquiferi produttivi, o se i livelli delle acque sotterranee sono molto al di sotto della superficie, allora per la maggior parte delle persone e degli scopi previsti il costo della costruzione del pozzo o del pompaggio per l'estrazione potrebbe diventare proibitivo. Questo vincolo tende ad aumentare le differenze di accesso tra le fasce povere e quelle più ricche delle comunità locali.

Inoltre, il prelievo di acque sotterranee in prossimità della costa può innescare l'intrusione di acqua di mare negli acquiferi costieri, il che porrà fine al prelievo locale di acque sotterranee dolci. L'innalzamento del livello del mare ridurrà similmente il prelievo di acque sotterranee dagli acquiferi ubicati nelle zone costiere a bassa altitudine. La figura 8 mostra gli hotspot globali delle zone vulnerabili all'intrusione marina e all'innalzamento del livello del mare. Una condizione fisica in qualche modo simile che limita il prelievo di acque sotterranee dolci è la presenza di acque sotterranee saline o salmastre sottostanti ad acque sotterranee dolci poco profonde e collegate idraulicamente ad esse. In effetti, la risalita di acque saline o salmastre tende a compromettere il prelievo di acque dolci sotterranee nelle aree interessate da tale fenomeno (spesso anche nelle zone costiere).

Infine, gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee e gli strati di sedimenti comprimibili, poco profondi e collegati idraulicamente agli acquiferi sono componenti aggiuntivi dell'ambiente naturale che possono imporre vincoli al prelievo delle acque sotterranee, soprattutto se è necessario prevenire il degrado dell'ecosistema e la subsidenza. La figura 9 mostra le principali zone del mondo interessate da subsidenza indotta dal prelievo di acque sotterranee.

Figura 8

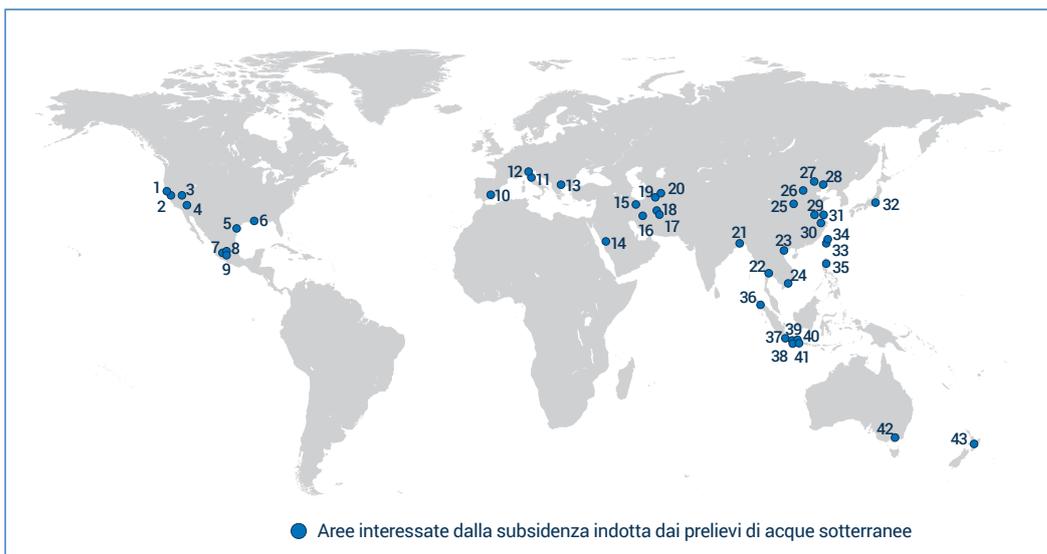
Hotspot globali di vulnerabilità delle acque sotterranee all'intrusione marina e all'innalzamento del livello del mare



Fonte: sulla base di Oude Essink et al. (2010, fig. 1, pag. 2).

Figura 9

Principali zone del mondo interessate da subsidenza indotta dal prelievo di acque sotterranee



Fonte: sulla base di Guzy e Malinowska (2020, fig. 1, pag. 4).

Nota: Stati Uniti d'America: 1. Valle di Santa Clara; 2. Valle di San Joaquin; 3. Las Vegas; 4. Bacino Eloy; 5. Houston; 6. New Orleans. Messico: 7. Celaya; 8. Zamora de Hidalgo; 9. Città del Messico. Spagna: 10. Lorca. Italia: 11. Ravenna; 12. Venezia. Grecia: 13. Regione di Salonicco. Arabia Saudita: 14. Wadi Al-Yutama. Iran: 15. Teheran; 16. Yazd; 17. Rafsanjan; 18. Zarando; 19. Kashmar; 20. Mashad. India: 21. Calcutta. Thailandia: 22. Bangkok. Vietnam: 23. Hanoi; 24. Ho Chi Minh. Cina: 25. Xian; 26. Taiyuan; 27. Pechino; 28. Tientsin; 29. Su-Xi-Chang; 30. Hangzhou-Jiaxing-Huzhou; 31. Shanghai. Giappone: 32. Tokio. Taiwan, provincia della Cina: 33. Yunlin; 34. Taiwan. Filippine: 35. Manila. Indonesia: 36. Medan; 37. Giacarta; 38. Bandung; 39. Blanakan; 40. Pekalongan; 41. Semarang. Australia: 42. Valle di Latrobe. Nuova Zelanda: 43. Wairakei.

Capitolo 1

Introduzione

WWAP

Michela Miletto, Jac van der Gun e Richard Connor

UNESCO-IHP

Dan Lapworth*, Abhijit Mukherjee e Alice Aureli

* Affiliato al British Geological Survey (Servizio geologico britannico)



1.1 Scopo e portata del presente rapporto

● ● ●
**Le acque
sotterranee
rappresentano
circa il 99% di
tutta l'acqua dolce
allo stato liquido
presente sulla
Terra**

Questa edizione del *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* (WWDR 2022) si propone di mettere in evidenza le acque sotterranee, richiamando l'attenzione sul ruolo, le sfide e le opportunità specifiche che esse presentano nel contesto della valorizzazione, della gestione e della governance delle risorse idriche a livello mondiale.

Le acque sotterranee, che rappresentano circa il 99% di tutta l'acqua dolce allo stato liquido presente sulla Terra (Shiklomanov e Rodda, 2003), offrono alle società enormi opportunità di benefici sociali, economici e ambientali, anche in relazione all'adattamento ai cambiamenti climatici e al raggiungimento degli Obiettivi di sviluppo sostenibile. Il contributo delle acque sotterranee al soddisfacimento del fabbisogno idrico è notevole. Ad esempio, esse forniscono il 49% del volume di acqua prelevata per uso domestico dalla popolazione mondiale (Aquastat, s.d.; Margat e Van der Gun, 2013) e circa il 25% di tutta l'acqua prelevata per l'irrigazione, servendo il 38% dei terreni irrigati (Aquastat, s.d.; Margat e Van der Gun, 2013; Siebert et al., 2013). Tuttavia, nonostante la sua enorme importanza, questa risorsa naturale è spesso poco conosciuta, e di conseguenza sottovalutata, mal gestita e persino sovrasfruttata. Nel contesto della crescente scarsità di acqua in molte parti del mondo, il vasto potenziale delle acque sotterranee e la necessità di gestirle con attenzione non possono più essere trascurati.

Le acque sotterranee sono profondamente interconnesse e interagiscono con molte altre componenti dell'ambiente fisico terrestre. Ciò si può osservare nel ciclo idrologico, quando l'acqua atmosferica e l'acqua superficiale percolando nel sottosuolo diventano acque sotterranee, che a loro volta prima o poi defluiscono in corpi idrici superficiali o in mare, o ritornano nell'atmosfera per evaporazione. Analoghe trasformazioni avvengono nella filiera dell'uso dell'acqua, ramo antropico secondario del ciclo idrologico: quando si prelevano acque sotterranee o superficiali, tale acqua grezza viene in alcuni casi trattata e diviene acqua potabile, fornita agli utenti, mentre la parte rimanente non consumata si modifica successivamente in acque reflue che vengono scaricate, trattate o non trattate, nelle acque sotterranee o superficiali. Le acque sotterranee partecipano anche a numerosi altri cicli e processi naturali e svolgono un ruolo importante nel sostenere la salute umana, i mezzi di sussistenza, lo sviluppo economico e gli ecosistemi. La consapevolezza di queste interconnessioni ha portato all'opinione ampiamente condivisa che la valorizzazione e la gestione delle acque sotterranee dovrebbero avvenire con approcci integrati. Tuttavia, ciò non risponde alla necessità di comprendere adeguatamente gli aspetti specifici delle acque sotterranee e dei processi in cui sono coinvolte. Il presente rapporto intende fare chiarezza proprio su questo aspetto.

Il primo capitolo del rapporto presenta i concetti di base e la terminologia relativi alle acque sotterranee e agli acquiferi¹ nel contesto di prospettive e iniziative globali e riassume le principali sfide e opportunità riguardanti questa risorsa. Il prossimo capitolo affronta gli aspetti giuridici e istituzionali della governance delle acque sotterranee. I capitoli a seguire descrivono le acque sotterranee dal punto di vista dei tre principali settori di utilizzo nella società umana: agricoltura (capitolo 3), insediamenti umani (capitolo 4) e industria (capitolo 5), le interazioni con gli ecosistemi (capitolo 6) e la relazione con i cambiamenti climatici (capitolo 7). Il capitolo 8 presenta differenti prospettive sulle acque sotterranee da cinque regioni del mondo. Infine, vengono descritte e discusse le possibilità di risposta in termini di miglioramento della conoscenza (capitolo 9), di politiche e di pianificazione in materia di acque sotterranee (capitolo 10), di gestione (capitolo 11), di risorse acquifere transfrontaliere (capitolo 12) e di finanziamento (capitolo 13). Nelle sue conclusioni, il rapporto esamina le modalità per compiere progressi verso una valorizzazione, un uso, una gestione e una protezione più prudenti delle risorse idriche sotterranee e per creare le condizioni favorevoli ad attuare tali progressi (capitolo 14).

¹ Vedere la sezione 1.3 per una definizione e caratterizzazione degli acquiferi.

1.2 Proprietà e caratteristiche uniche delle acque sotterranee e dei loro sistemi

1.2.1 Cosa sono le acque sotterranee?

È comune pensare che con il termine “acque sotterranee” si faccia riferimento a tutta l'acqua che si trova al di sotto della superficie terrestre. Chi si occupa di idrogeologia e idrologia, invece, distingue l'acqua nella zona satura (dove tutti gli interstizi sono completamente riempiti d'acqua) da quella nella zona insatura (dove gli interstizi contengono sia acqua che aria), riservando il termine “acque sotterranee” solo alla prima categoria, quindi all'acqua presente al di sotto del livello piezometrico². Questa definizione più ristretta di acque sotterranee è stata adottata in tutto il rapporto.

1.2.2 Proprietà uniche e relative caratteristiche

Le acque sotterranee e superficiali sono strettamente interconnesse e interagiscono tra loro. Per molti usi umani, una delle due fonti di acqua può essere sostituita dall'altra. Tuttavia, alcune proprietà e caratteristiche distinguono nettamente i sistemi di acque sotterranee (vedere riquadro 1.1) dai sistemi di acque superficiali:

- Le acque sotterranee sono presenti in pori, fessure e altri vuoti all'interno di formazioni geologiche e non esistono senza questa matrice litologica.
- Le acque sotterranee sono invisibili, nascoste all'occhio nudo.
- Le acque sotterranee sono una risorsa distribuita nello spazio. Sono presenti praticamente ovunque e si estendono lateralmente sotto la maggior parte della superficie terrestre, al contrario delle acque superficiali nei torrenti e nei laghi che coprono solo una parte minore della superficie terrestre.
- Le acque sotterranee non sono solo di grande estensione laterale, ma hanno anche una dimensione verticale significativa (geometria 3D). Esse possono estendersi verticalmente da zone molto vicine alla superficie terrestre fino a grandi profondità, che raggiungono migliaia di metri.
- Le acque sotterranee si muovono in generale molto lentamente, principalmente perché la matrice litologica del sottosuolo offre una resistenza idraulica al flusso di molti ordini di grandezza superiore a quella sperimentata nel flusso a canale aperto. Il flusso delle acque sotterranee nelle formazioni carsiche, tuttavia, può essere abbastanza veloce.
- Grandi volumi di acque sotterranee sono immagazzinati nel sottosuolo, e superano in media di due ordini di grandezza la ricarica annua delle stesse.

Riquadro 1.1 Sistemi di acque sotterranee

Sistema di acque sotterranee è un termine generico che può riferirsi a diverse rappresentazioni concettuali di porzioni tridimensionali specifiche della zona satura del sottosuolo. Tra queste, ben noti sono i concetti di acquiferi e sistemi acquiferi, individuati e delineati sulla base delle differenze percepite nelle proprietà idrauliche con parti contigue del sottosuolo. Questi concetti sono definiti e affrontati in modo più dettagliato nella sezione 1.3. Altri esempi sono i segmenti sotterranei dei bacini idrografici (con gli acquiferi come confini), i sistemi di flusso delle acque sotterranee come definiti da Tóth (1963) e i corpi idrici sotterranei introdotti dall'Unione europea nella sua Direttiva quadro sulle acque (Parlamento europeo/Consiglio europeo, 2006; Commissione europea, 2008). La delimitazione dei corpi idrici sotterranei non segue una metodologia standardizzata, piuttosto uno dei criteri per la definizione dei confini è la giurisdizione rispetto alle acque sotterranee. Queste rappresentazioni concettuali sono una semplificazione della realtà, ma sono utili per analizzare e comprendere lo stato delle acque sotterranee, i processi rilevanti e le interazioni con le persone, gli ecosistemi e altri sistemi esterni (vedere anche figura 1.1).

² Ciò implica una pressione idrostatica uguale o maggiore della pressione atmosferica locale.

Come risultato delle proprietà uniche menzionate, le acque sotterranee in pratica mostrano spesso le seguenti caratteristiche e particolarità:

- Accesso facile e aperto a numerose persone, caratteristiche tipiche di un bene comune.
- Sono una risorsa spesso poco conosciuta e compresa, anche dalla popolazione locale.
- Accesso difficile e/o costoso alle attività di esplorazione, valutazione e monitoraggio. Ciò limita lo sviluppo di conoscenze sufficienti e accurate sulle acque sotterranee locali, necessarie per un'adeguata identificazione e analisi delle opportunità, delle sfide e delle potenziali risposte.
- I grandi volumi di acque sotterranee immagazzinate (riserve di acque sotterranee) formano enormi zone tampone, garantendo la disponibilità permanente di acqua in molte regioni con stagioni secche prolungate e corsi d'acqua intermittenti o stagionali.
- All'interno di contesti specifici più ampi, l'età delle acque sotterranee generalmente varia molto (da pochi anni a decine di millenni); anche la salinità e altri parametri di qualità possono essere soggetti a variazioni significative.
- Nel tempo, la qualità delle acque sotterranee può cambiare a causa dei lunghi tempi di permanenza e del contatto con la matrice litologica e la biosfera del sottosuolo.
- Rispetto alle acque superficiali, le acque sotterranee sono generalmente meglio protette dall'inquinamento (a causa della resistenza al flusso della copertura), ma una volta inquinate sono molto più difficili da bonificare. Le acque sotterranee poco profonde, a loro volta, sono più vulnerabili all'inquinamento rispetto a quelle più profonde.

1.3 Gli acquiferi, le loro principali caratteristiche e le acque sotterranee in essi contenute

1.3.1 Acquiferi: unità spaziali definite dalla suddivisione idraulica del sottosuolo

Le formazioni geologiche che compongono il sottosuolo (rocce sedimentarie, ignee e metamorfiche) mostrano una variazione di proprietà pressoché infinita. La categoria delle proprietà idrauliche è la più rilevante per comprendere il flusso e lo stoccaggio delle acque sotterranee. Pertanto, comunemente chi si occupa di idrogeologia guarda il sottosuolo attraverso una lente idraulica e lo suddivide schematicamente in unità spaziali che differiscono tra loro per la capacità di immagazzinare acque sotterranee (legata alla porosità totale o drenabile o al rapporto di vuoto) e di trasmetterle (legata a permeabilità o conducibilità idraulica). Le unità spaziali che ottengono un punteggio relativamente alto in entrambi gli aspetti prendono il nome di acquiferi; combinano le funzioni di serbatoio delle acque sotterranee e di "autostrada" per il loro flusso.

Varie definizioni di acquifero possono essere trovate nei libri di testo e in altre pubblicazioni. Queste definizioni mostrano differenze di prospettiva (fonte di approvvigionamento idrico rispetto al flusso idrico sotterraneo "neutro"): alcune di esse sembrano associare un acquifero esclusivamente o principalmente alla matrice litologica (contenitore) e in minor o nessuna misura alle acque sotterranee nei suoi interstizi (contenuto). Il riquadro 1.2 presenta una definizione semplice ma chiara, puntuale e compatibile con le opinioni della maggior parte delle esperte e degli esperti di acque sotterranee.

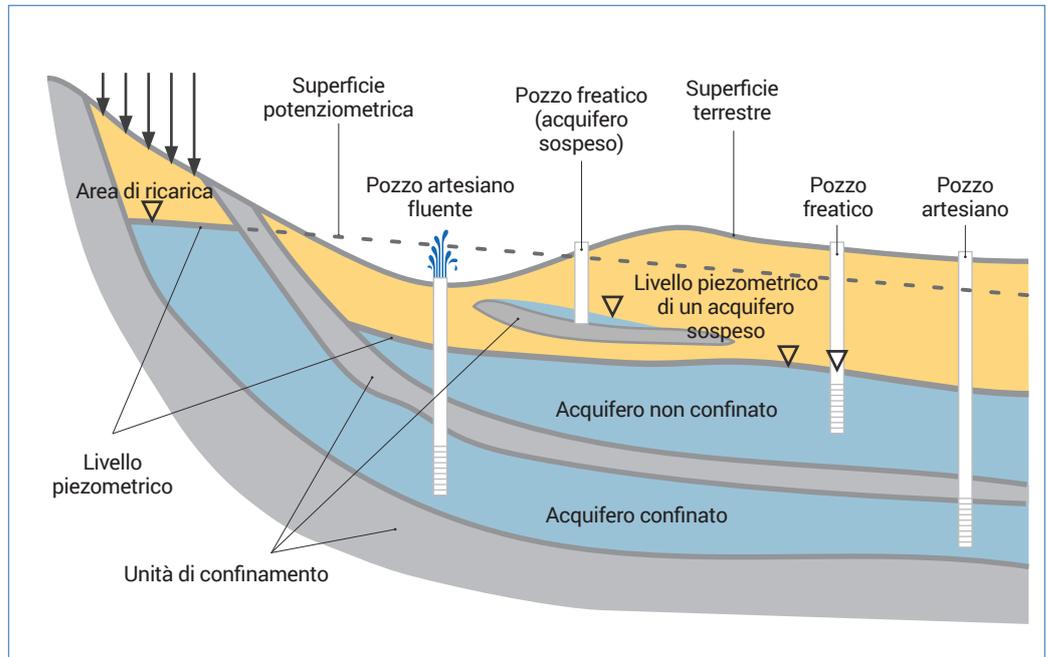
Riquadro 1.2 Che cos'è un acquifero?

Un acquifero è un'unità geologica satura permeabile in grado di trasmettere quantità significative di acqua sotto normali gradienti idraulici (Freeze e Cherry, 1979).

La delimitazione dei confini dell'acquifero è spesso difficile, in particolare se l'acquifero è litologicamente eterogeneo, di grande estensione o profondo. Richiede il coinvolgimento di persone competenti in materia di idrogeologia in grado di interpretare correttamente la struttura, la continuità e le proprietà delle formazioni geologiche del sottosuolo, che di solito sono state osservate solo in un numero limitato di località.

Figura 1.1

Sezione verticale che mostra gli acquiferi, le unità di confinamento e la zona insatura



Fonte: sulla base di Harlan et al. (1989, pag. 9).

1.3.2 Altre unità idrauliche nel sottosuolo

Gli acquiferi interagiscono con diverse unità idrauliche nel sottosuolo, in particolare con la zona insatura e con gli acquitardi (vedere definizione seguente). La figura 1.1 presenta un'ipotetica sezione verticale in cui sono mostrati gli acquiferi e altre unità idrauliche sotterranee.

La zona insatura si estende dalla superficie terrestre fino al livello piezometrico. Gli interstizi (pori o fessure) nella matrice di questa zona non sono interamente riempiti d'acqua, ma contengono anche aria. L'acqua nella zona insatura ha una pressione inferiore a quella atmosferica, a causa delle forze di aspirazione della matrice, che ne influenzano il comportamento idraulico. La zona insatura svolge un ruolo nella ricarica delle acque sotterranee trasmettendo la pioggia in eccesso o l'acqua superficiale verso il basso dalla superficie del terreno alla zona saturata. In aree con acquiferi poco profondi, facilita il flusso ascendente necessario affinché le acque sotterranee vengano scaricate direttamente nell'atmosfera per evaporazione o evapotraspirazione.

Gli acquitardi sono formazioni sotterranee contenenti quantità notevoli di acque sotterranee ma incapaci di trasmetterne quantità significative ai pozzi. La loro permeabilità è bassa rispetto a quella degli acquiferi, ma su scala regionale possono cedere notevoli quantità di acqua ad acquiferi contigui o trasmettere acqua tra gli acquiferi che separano. Dal punto di vista idraulico, gli acquitardi funzionano come strati confinanti o semiconfinanti.

Le restanti unità litologiche del sottosuolo sono idraulicamente inattive e costituiscono barriere al deflusso delle acque sotterranee, sia per la bassissima permeabilità, sia per la mancanza di interstizi interconnessi. Termini un po' datati per queste unità di confinamento sono rispettivamente aquiclude e aquifugo.

● ● ●
La delimitazione dei confini dell'acquifero è spesso difficile, in particolare se l'acquifero è litologicamente eterogeneo, di grande estensione o profondo

● ● ●
**Attività umane
come il prelievo
di acque
sotterranee e la
ricarica artificiale
producono
spostamenti nel
bilancio idrico**

1.3.3 Tipi di acquiferi

Gli acquiferi possono differire ed essere classificati in base a una serie di criteri, quali:

- Dimensioni: gli acquiferi variano in estensione laterale da meno di cento a più di un milione di chilometri quadrati, mentre il loro spessore può variare da meno di dieci a più di mille metri.
- Litologia: gli acquiferi più produttivi sono composti da sabbie e ghiaie (non consolidate), arenarie (consolidate), calcari carsici o alcune rocce vulcaniche (ad esempio basalti); il substrato roccioso esposto alle intemperie può formare acquiferi locali, solitamente meno produttivi.
- Volumi immagazzinati (riserve): questi sono maggiori negli acquiferi sedimentari spessi e porosi, minimi negli acquiferi con substrato roccioso fessurato.
- Posizione rispetto alla superficie terrestre: è probabile che gli acquiferi poco profondi (con la loro sommità a meno di poche decine di metri sotto la superficie) siano coinvolti più attivamente nel ciclo idrologico rispetto agli acquiferi profondi o moderatamente profondi; inoltre, il prelievo delle acque sotterranee diventa più costoso e tecnicamente impegnativo con l'aumentare della profondità.
- Non confinato o confinato: gli acquiferi non confinati hanno una falda libera che si muove verticalmente al variare dello stoccaggio, mentre negli acquiferi confinati non c'è falda libera poiché la pressione dell'acqua al di sotto dello strato di confinamento superiore è ovunque superiore alla pressione atmosferica. La variazione dello stoccaggio negli acquiferi confinati non è correlata a una falda acquifera in movimento, ma è accompagnata da risposte elastiche dell'acqua immagazzinata e della matrice solida alle variazioni di pressione.
- Condizioni di ricarica: molti acquiferi sono abbondantemente ricaricati (centinaia di millimetri l'anno) e quindi contengono risorse idriche sotterranee rinnovabili; altri (principalmente in aree aride o nel permafrost) non vengono ricaricati in modo significativo, quindi l'acqua che contengono è classificata come non rinnovabile.
- Acquiferi domestici e acquiferi transfrontalieri: gli acquiferi domestici sono situati interamente all'interno di un'unica giurisdizione (nazionale o subnazionale), mentre gli acquiferi attraversati da confini nazionali o di altra giurisdizione sono chiamati transfrontalieri.

Gli acquiferi importanti di solito hanno un nome, per una facile identificazione e comunicazione.

1.3.4 Il regime idrologico di un acquifero

Il principio della conservazione di massa implica che la ricarica delle acque sotterranee sia sempre bilanciata dal deflusso e dalla modifica dello stoccaggio. Di conseguenza, attività umane come il prelievo di acque sotterranee e la ricarica artificiale producono spostamenti nel bilancio idrico: le prime portano alla riduzione del deflusso naturale e/o allo stoccaggio delle acque sotterranee, le seconde all'opposto.

1.3.5 Sistemi acquiferi

A seconda delle condizioni specifiche dell'area e della scala di indagine o mappatura, due o più acquiferi sovrapposti e separati da acquitardi possono essere definiti un sistema acquifero, a condizione che siano componenti interconnessi di un sistema idraulicamente continuo. Se, per esempio nella figura 1.1, l'unità di confinamento tra i due acquiferi fosse a perdita (e quindi si trattasse di un acquitardo), ciò comporterebbe una connettività idraulica tra i due acquiferi, e quindi significherebbe che insieme all'aquitardo formano un sistema acquifero. In pratica, la distinzione tra acquiferi e sistemi acquiferi è alquanto arbitraria, perché la distinzione tra acquitardi e lenti a bassa permeabilità, nonché tra rocce permeabili e poco permeabili, è soggettiva. Con l'aumentare della complessità e delle dimensioni, si tende

a preferire il termine “sistema acquifero”. I più grandi sistemi acquiferi del mondo, situati in profondi bacini sedimentari, si estendono lateralmente fino ad alcuni milioni di chilometri quadrati e sono profondi migliaia di metri. Le sezioni più profonde della maggior parte di tali sistemi acquiferi sono riempite con acqua salina.

1.4 Breve storia dello sfruttamento delle acque sotterranee

Le acque sotterranee sono state estratte e utilizzate per scopi umani da tempo immemorabile. Per molto tempo questi scopi devono essere stati perseguiti prelevando acqua da sorgenti e da pozzi scavati a profondità limitata. L'energia muscolare di animali o umani veniva utilizzata per sollevare l'acqua dai pozzi alla superficie. Nel tempo, sono state sviluppate tecniche per utilizzare questa energia nel modo più efficiente possibile, come lo *shaduf* (primo predecessore della pompa manuale), la *saqiya* (ruota persiana modificata) e l'*arhor* (Margat e Van der Gun, 2013; Yannopoulos et al., 2015). Queste tecniche hanno contribuito allo sviluppo dell'irrigazione su piccola scala basata sulle acque sotterranee, ma i tassi di estrazione sono rimasti bassi in questa prima fase di utilizzo.

Un importante passo avanti fu l'invenzione e l'introduzione del sistema *qanat*, intorno al 1000-800 a.C., un sistema di tunnel che attinge acque sotterranee poco profonde e le convoglia per gravità, quindi senza bisogno di energia esterna per portare le acque sotterranee in superficie. Si ritiene che i *qanat* abbiano avuto origine nell'Iran nordoccidentale e da lì si siano diffusi in Medio Oriente, Nordafrica ed Europa meridionale; essi si trovano anche in Asia centrale, Cina occidentale e America meridionale (English, 1968; Mostafaeipour, 2010). Sono stati – e sono tuttora in alcuni paesi – di grande importanza per l'irrigazione e gli insediamenti umani nelle regioni aride.



**Le acque
sotterranee sono
state estratte e
utilizzate per scopi
umani da tempo
immemorabile**

I mulini a vento sono un'altra antica tecnica di risparmio energetico per portare l'acqua in superficie. Non è noto da quando siano stati utilizzati per il pompaggio delle acque sotterranee: molto probabilmente dal Medioevo o da un'epoca precedente. Attualmente sono ancora in uso, in particolare per l'abbeveraggio del bestiame e l'irrigazione su piccola scala (Yannopoulos et al., 2015; Glazema, 2003).

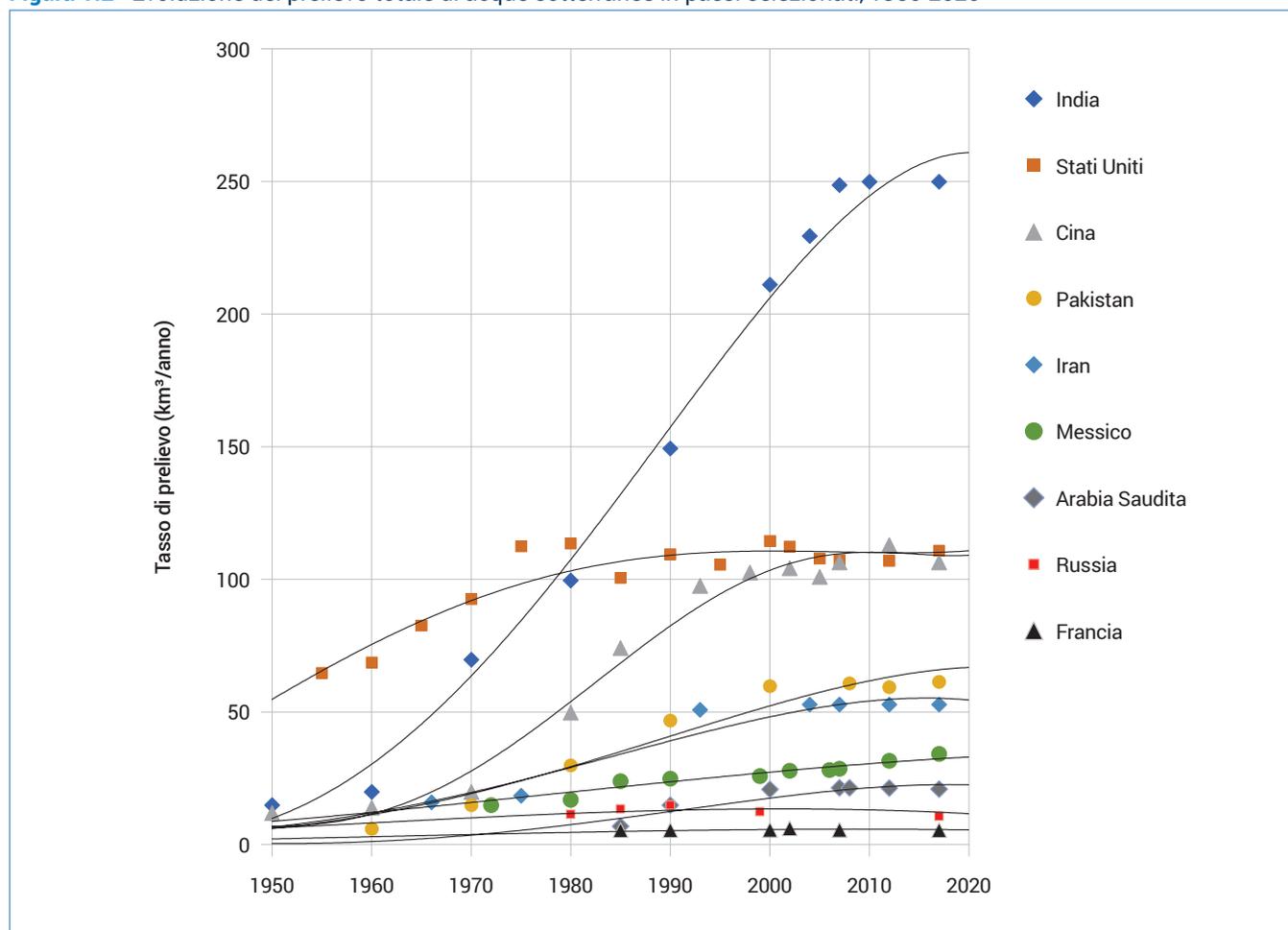
Sebbene le tecniche di perforazione a percussione siano state sviluppate in Cina già mille anni fa per lo sfruttamento delle acque salmastre profonde (Kuhn, 2004; Han e Cheng, 2013), lo scavo è rimasto fino a tempi recenti la tecnica comune per la costruzione di pozzi d'acqua in tutto il mondo, limitando il prelievo di acque sotterranee a profondità relativamente ridotte. Lo sviluppo delle tecniche di perforazione dei pozzi, iniziato all'inizio del XIX secolo, ha segnato una grande rivoluzione, sebbene ci sia voluto molto tempo prima che queste tecniche diventassero sufficientemente avanzate e fossero ampiamente applicate in tutto il mondo. Hanno aperto la strada all'esplorazione e allo sfruttamento di acquiferi più profondi e sono state anche determinanti nella scoperta di zone di falda artesiane in cui poter costruire pozzi zampillanti. All'inizio del XX secolo, la comparsa di pompe a motore ad alta capacità in grado di pompare acque sotterranee profonde ha portato a un aumento senza precedenti della loro estrazione in risposta ad una domanda di acqua sempre crescente. Di conseguenza, il prelievo di acque sotterranee è cresciuto nel corso del XX secolo, a partire dai primi decenni, negli Stati Uniti, in Messico e in diversi paesi europei, e nella maggior parte degli altri paesi durante la seconda metà del secolo o verso la fine.

La figura 1.2 illustra l'evoluzione del prelievo di acque sotterranee nel periodo dal 1950 al 2020 per paesi selezionati (paesi per i quali sono disponibili dati sufficienti). Mostra chiaramente la differenza nei tempi di massima crescita tra Stati Uniti e paesi asiatici come India, Cina, Pakistan e Iran. Il prelievo globale di acque sotterranee nel corso del 2017 è stimato in 959 chilometri cubi (vedere prologo), di cui il 68% corrisponde ai nove paesi mostrati nella figura 1.2. Supponendo che i restanti paesi del mondo seguissero in media lo stesso modello di aumento, si stima che il prelievo di acque sotterranee aggregato a livello globale sia stato di soli 158 chilometri cubi all'anno nel 1950 e che sia aumentato nei decenni successivi come indicato

dalle seguenti percentuali medie annue: +3,7% (1950-1960), +4,8% (1960-1970), +3,9% (1970-1980), +3,4% (1980-1990), +1,8% (1990-2000), +0,8% (2000-2010) e -0,2% (2010-2017). La quota rappresentata dalle acque sotterranee sul totale dei prelievi di acqua dolce è aumentata dal 12% nel 1950 al 25% nel 2017. Si può osservare che i tassi di prelievo dalle acque sotterranee si sono più o meno stabilizzati negli Stati Uniti, nella maggior parte dei paesi europei e in Cina.

Gli usi, i benefici e le sfide relativi alle acque sotterranee nel settore agricolo, domestico e industriale sono descritti rispettivamente nei capitoli 3, 4 e 5.

Figura 1.2 Evoluzione del prelievo totale di acque sotterranee in paesi selezionati, 1950-2020



Fonte: sulla base di Margat e Van der Gun (2013, fig. 5.4, pag. 128). Aggiornato dall'ultimo autore, utilizzando i dati nazionali riportati.

1.5 I molteplici servizi offerti dalle acque sotterranee agli esseri umani e agli ecosistemi

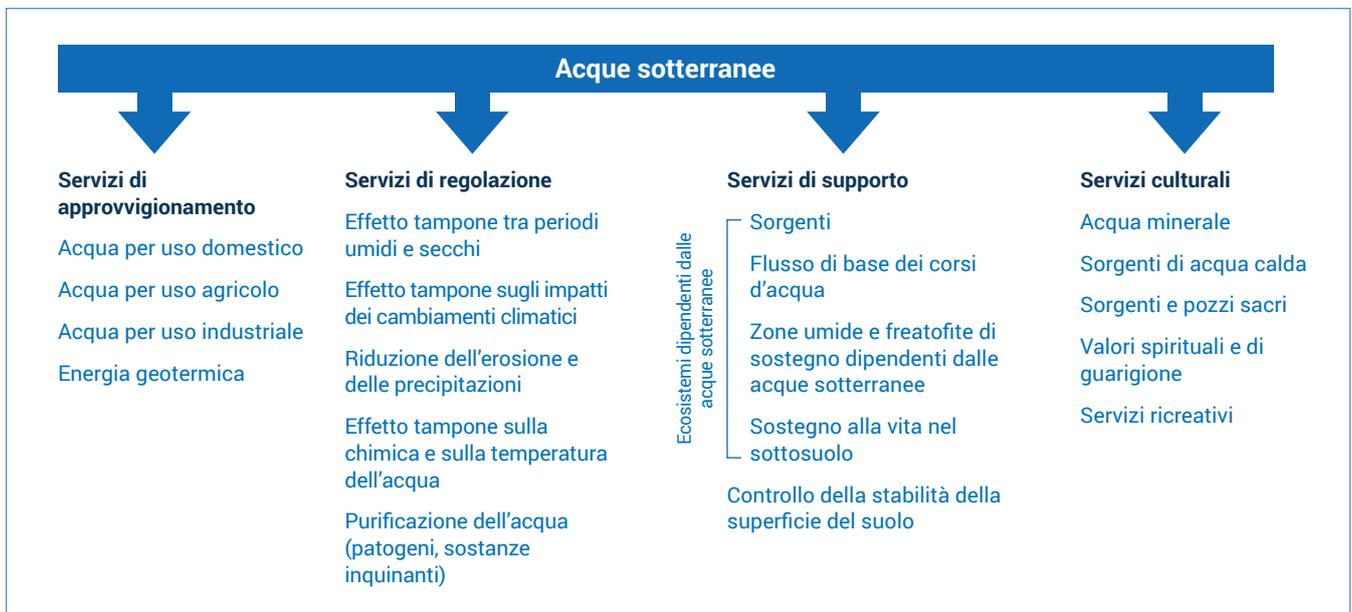
Per quanto sia importante, il prelievo delle acque sotterranee per gli usi umani corrisponde a una sola categoria dei servizi offerti dalle suddette risorse (servizi di approvvigionamento). Non va dimenticato che le acque sotterranee forniscono molti più servizi, come indicato nella figura 1.3. La maggior parte dei servizi menzionati in questa figura sono ovvi; tuttavia, verranno presentati alcuni commenti esplicativi.

- I servizi di approvvigionamento consentono di prelevare le acque sotterranee per scopi idrici, ma in alcuni casi il prelievo viene utilizzato solo per estrarre l'energia geotermica trasportata dalle suddette risorse, dopodiché l'acqua prelevata viene restituita al sottosuolo.
- I servizi di regolazione sono servizi *in situ* che riflettono la capacità tampone degli acquiferi (vedere sezione 1.2); regolano principalmente i regimi di quantità e qualità delle acque sotterranee.

- Anche i servizi di supporto sono *in situ*; a sostegno degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (nell'acronimo inglese GDE) e di altre caratteristiche ambientali ad esse connesse. Non solo gli acquiferi, ma anche gli acquitardi possono svolgere un ruolo importante in questa categoria, a volte un ruolo fondamentale (controllo della subsidenza del suolo).
- Infine, le acque sotterranee forniscono anche servizi culturali; quelli legati ad attività di svago, tradizione, religione o valori spirituali sono associati a particolari siti piuttosto che a un acquifero specifico. In effetti, le acque sotterranee hanno svolto un ruolo importante nelle culture e nelle religioni di tutto il mondo, dalle grotte e dalle sorgenti venerate dai popoli Maya del Messico ai pozzi dei draghi e alle sorgenti sacre della Cina (Ray, 2020).

I servizi di approvvigionamento sono potenzialmente in conflitto con i servizi di supporto: questi ultimi tendono a essere sovraccaricati in caso di prelievo intensivo di acque sotterranee. La governance e la gestione di questa risorsa devono perseguire un equilibrio ottimale tra servizi in conflitto o concorrenti.

Figura 1.3 I molteplici servizi offerti dalle acque sotterranee



Fonte: sulla base di Van der Gun (2019, fig. 5).

1.6 Interconnessioni a livello mondiale

Le acque sotterranee sono fondamentalmente una risorsa locale, gestita principalmente da operatori e operatrici del settore in un contesto locale. Tuttavia, tali risorse sono interconnesse con l'ambiente circostante a diverse scale, il che implica la necessità di prospettive diverse per supervisionare e affrontare l'intera gamma di questioni rilevanti: non conta solo la prospettiva locale, ma anche quella dell'intero acquifero, così come quella nazionale, transfrontaliera, regionale e globale. Di seguito vengono brevemente esaminate alcune importanti interconnessioni a livello mondiale riguardanti le acque sotterranee.

1.6.1 Acque sotterranee nel ciclo idrologico globale, interazione con il clima e altri sistemi a livello mondiale

Con le loro caratteristiche specifiche, in particolare con la loro capacità tampone, le acque sotterranee imprimono un segno distintivo al ciclo globale dell'acqua. Tuttavia, il ciclo idrologico globale e il suo bilancio idrico non sono in equilibrio dinamico: essi sono modificati dai cambiamenti climatici e da interferenze umane sempre più significative, come il prelievo

di acque sotterranee e le pratiche di uso del suolo. In linea di principio, l'interazione è bidirezionale, il che implica che un ciclo idrologico modificato produrrà anche un feedback sul clima globale. Negli ultimi decenni si sono registrati notevoli progressi nella valutazione e nella comprensione di queste modifiche su scala globale, nonché delle loro ripercussioni. È emersa una nuova disciplina: l'idrologia globale. Questa disciplina utilizza modelli idrologici su scala globale, abbinati a modelli climatici, di uso del suolo o delle risorse idriche, al fine di esplorare modelli e processi idrologici su larga scala e di ottenere una migliore comprensione del sistema Terra. Lo studio combinato con altri ambiti d'interesse – sicurezza alimentare, economia, energia e biodiversità – è avanzato (Bierkens, 2015).

1.6.2 Resilienza delle acque sotterranee e del sistema Terra

Come sottolineato da Gleeson et al. (2020a), diversi processi all'interno del ciclo idrologico globale regolano il clima e supportano gli ecosistemi. Le attività umane, compreso il prelievo di acque sotterranee, sono attualmente una delle principali forze che disturbano questi processi, causando, potenzialmente, cambiamenti di regime su scala planetaria che minacciano la stabilità del nostro pianeta come habitat adatto agli esseri umani e agli ecosistemi. È importante esplorare quanto sia resiliente la Terra a tali cambiamenti di regime e come questi possono essere controllati.

1.6.3 Acque sotterranee e innalzamento del livello del mare

Il prelievo intensivo delle acque sotterranee provoca una riduzione dell'acqua terrestre immagazzinata, che produce un aumento quasi uguale del volume dell'acqua negli oceani. Nonostante a livello mondiale le stime del contributo annuale di tale prelievo all'innalzamento del livello del mare divergano (Wada et al., 2010, 2016; Konikow, 2011; Bierkens e Wada, 2019), non c'è dubbio che l'estrazione intensiva di questa risorsa comporti un significativo aumento del livello del mare, presente e futuro, oltre a contribuire ai cambiamenti climatici. I principali impatti dell'innalzamento del livello del mare sono le inondazioni costiere, le alluvioni e l'aumento dell'intrusione marina.

1.6.4 Degrado degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee a livello mondiale

Gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee sono molto vulnerabili al prelievo intensivo delle acque sotterranee. Tale prelievo in continua espansione in tutto il mondo provoca un declino su scala globale di flussi di base, sorgenti, flussi artesiani e zone umide, portando alla perdita della biodiversità e alla desertificazione nel lungo periodo (vedere capitolo 6).

1.6.5 Acque sotterranee e commercio internazionale

Il commercio internazionale ha consentito di consumare e utilizzare cibo e altri beni a grande distanza da dove vengono prodotti. Secondo Hoekstra (2018), il 22% dell'uso di acqua nel mondo è destinato alla produzione di beni per l'esportazione. Di conseguenza, grandi volumi di "acqua virtuale" viaggiano attraverso il mondo; questo implica che una percentuale variabile dell'impronta idrica dei consumi dei paesi si trova al di fuori dei loro territori ("impronta esterna"). Il commercio internazionale porta ovviamente benefici economici ai paesi che esportano i prodotti, ma il risparmio idrico nei paesi importatori rischia di aumentare lo stress idrico in quelli esportatori. Nel 2010, l'impoverimento delle acque sotterranee a livello mondiale legato alla produzione alimentare è stato stimato a 141 chilometri cubi all'anno, di cui 26 erano connessi ai prodotti esportati (Dalin et al., 2017).

1.7

Le acque sotterranee nel contesto delle agende e dei quadri globali

1.7.1 Programma idrologico intergovernativo dell'UNESCO

I principali risultati del Programma idrologico intergovernativo (nell'acronimo inglese IHP) che presentano una particolare attenzione alle acque sotterranee includono la promozione mondiale della mappatura idrogeologica (Gilbrich e Struckmeier, 2014), l'istituzione di un'iniziativa globale sugli acquiferi transfrontalieri (l'iniziativa "Internationally Shared Aquifer Resources Management", o ISARM), il Programma mondiale di mappatura e valutazione idrogeologica (nell'acronimo inglese WHYMAP) e l'istituzione del Centro internazionale

● ● ●

Sebbene solo uno degli Obiettivi faccia esplicito riferimento alle acque sotterranee nella sua formulazione (traguardo 6 dell'Obiettivo 6), non meno di 53 traguardi sembrano essere interconnessi con le acque sotterranee

di valutazione delle risorse idriche sotterranee (nell'acronimo inglese IGRAC). L'obiettivo principale dell'ottava fase dell'IHP (IHP-VIII 2014-2021) è stata quella di tradurre le conoscenze scientifiche nelle azioni necessarie per la sicurezza idrica.

1.7.2 L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile

Gli Obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite (figura 1.4) sono un appello all'azione di tutti i paesi – poveri, ricchi e a reddito medio – per promuovere la prosperità proteggendo il pianeta. I 17 Obiettivi sono stati adottati da tutti gli Stati membri delle Nazioni Unite nel 2015, nell'ambito dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile che definisce un piano di 15 anni con 169 traguardi per raggiungere gli Obiettivi (UNDESA, s.d.). Sebbene solo uno degli Obiettivi faccia esplicito riferimento alle acque sotterranee nella sua formulazione (traguardo 6 dell'Obiettivo 6), non meno di 53 traguardi sembrano essere interconnessi con le acque sotterranee, inclusi, ma non solo, tutti quelli relativi agli Obiettivi 6, 12 e 13. Nella maggior parte dei casi, c'è convergenza tra gli scopi perseguiti e le tendenze o gli obiettivi che riguardano le acque sotterranee (*"reinforcing linkages/ collegamenti di rinforzo"*), ma in alcuni casi le relazioni sono conflittuali o di carattere misto (Guppy et al., 2018). Le acque sotterranee sono una risorsa chiave per raggiungere gli Obiettivi dell'Agenda 2030, il che implica la necessità di competenze adeguate in materia di acque sotterranee e conoscenze idrogeologiche locali per consentirne l'attuazione (Velis et al., 2017; IAH, 2017). Ci sono argomenti validi per definire ulteriori "indicatori dello stato delle acque sotterranee" legati a diversi traguardi dell'Obiettivo 6, in quanto le acque sotterranee sono parte integrante di questi; tuttavia, tali risorse finora non sono state adeguatamente trattate (IAH, 2017).

Figura 1.4
Gli Obiettivi di sviluppo sostenibile



Fonte: UNDESA (s.d).

1.7.3 Acqua, servizi igienico-sanitari e igiene (WASH)

Analizzare il miglioramento dell'accesso all'acqua potabile, ai servizi igienico-sanitari e all'igiene a livello mondiale fa parte delle missioni dell'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) e del Fondo delle Nazioni Unite per l'infanzia (UNICEF), in collaborazione con numerose altre organizzazioni. Il loro Programma di monitoraggio congiunto (nell'acronimo inglese JMP) rivela la situazione attuale dei progressi nazionali, regionali e globali in materia di acqua potabile, servizi igienico-sanitari e igiene compiuti dal 1990.

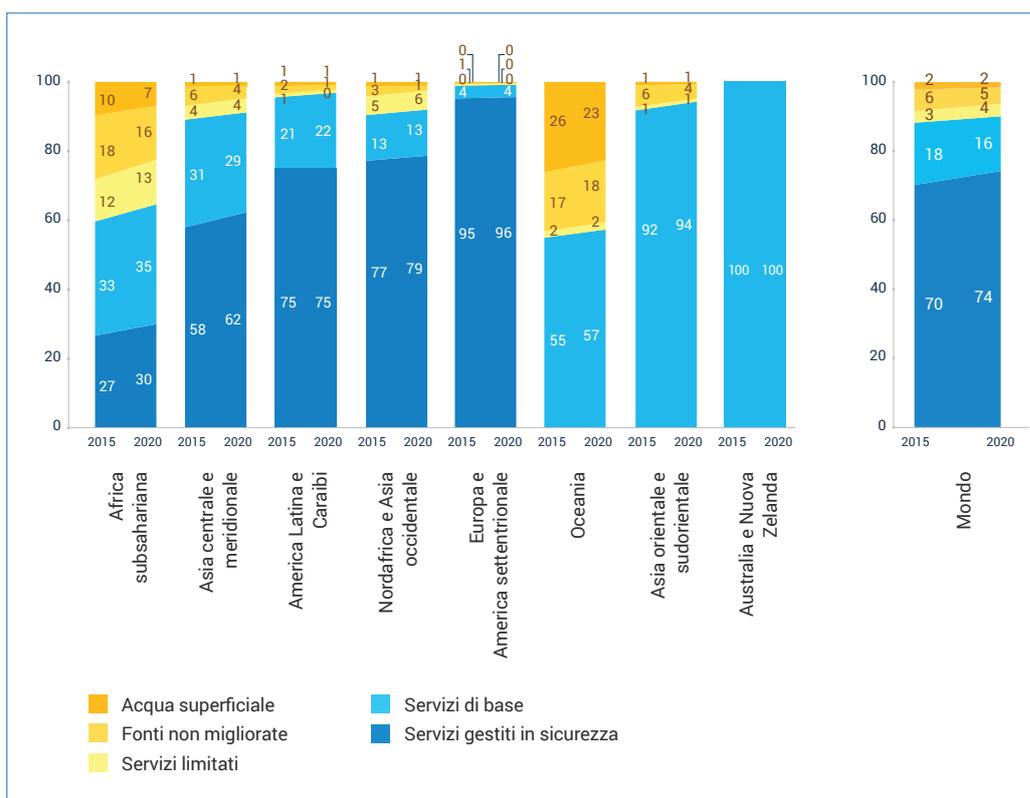
La figura 1.5 mostra lo stato e i progressi nella copertura della fornitura di acqua potabile a livello regionale e globale nel periodo dal 2015 al 2020. La percentuale della popolazione mondiale che utilizza servizi di acqua potabile gestiti in sicurezza è aumentata dal 70% al

74%, ma le differenze tra le regioni e all'interno di esse restano considerevoli. Statistiche simili sono disponibili per i servizi igienico-sanitari: l'uso di servizi igienico-sanitari gestiti in sicurezza è aumentato dal 47% al 53% della popolazione mondiale nel periodo dal 2015 al 2020. Il JMP riferisce inoltre che, nel 2020, il 71% della popolazione mondiale disponeva di strutture di base per il lavaggio delle mani con acqua e sapone disponibili in casa (OMS/UNICEF, 2021). L'importanza di queste strutture è cresciuta in seguito alla pandemia di Covid-19, dato che lavarsi le mani di frequente viene considerata una pratica in grado di ridurre in modo notevole la trasmissione del virus (Brauer et al., 2020).

Il JMP non specifica la percentuale di acque sotterranee utilizzate per la fornitura di acqua e servizi igienico-sanitari né i relativi tassi di incremento, ma sappiamo che questa è senza dubbio considerevole.

Figura 1.5

Copertura regionale e globale della fornitura di acqua potabile, 2015-2020 (%)



Nota: nel 2020, cinque regioni SDG disponevano di stime relative ai servizi di erogazione di acqua potabile gestiti in sicurezza.

Fonte: adattato da OMS/UNICEF (2021, fig. 2 e 3, pag. 8).

1.8 Sfide relative alle acque sotterranee

La capacità delle acque sotterranee di offrire servizi vari (come mostrato nella figura 1.2) dipende dalle caratteristiche specifiche della loro collocazione geografica (vedere il prologo) ed è influenzata in modo dinamico dai processi naturali e umani in corso. Questi ultimi portano a numerose sfide legate alle acque sotterranee in molte parti del mondo, in particolare nelle aree densamente popolate. Le sfide principali sono brevemente descritte di seguito. Maggiori dettagli e potenziali risposte sono presentati in molti altri capitoli di questo rapporto, in un contesto tematico (capitoli dal 3 al 7), regionale (capitolo 8) o di governance e di gestione (capitoli 10 e 11). Affrontare le sfide richiede una buona comprensione della catena causale sottostante, che va dalle cause profonde (come la crescita demografica, lo sviluppo economico e i cambiamenti climatici) agli stress (ad esempio il prelievo di acque sotterranee e l'afflusso di sostanze inquinanti) e ai cambiamenti nello stato delle acque sotterranee (quantità, livello, pressione, e qualità) fino al loro impatto sugli esseri umani, sugli ecosistemi e sull'ambiente.

1.8.1 Esaurimento delle riserve di acque sotterranee a lungo termine

L'esaurimento delle riserve di acque sotterranee, accompagnato da un abbassamento dei loro livelli, si verifica quando il deflusso delle acque sotterranee (ovvero la somma del

prelievo di acque sotterranee e del deflusso “non forzato” o naturale) supera la ricarica. Sebbene anche la variabilità del clima e i cambiamenti climatici possano svolgere un ruolo in questo senso (influenzando la ricarica delle acque sotterranee e la domanda di acqua), la maggior parte dei casi di esaurimento delle riserve di queste acque a lungo termine derivano da un'estrazione intensiva. L'esaurimento a lungo termine delle acque sotterranee è osservato in numerosi acquiferi, prevalentemente situati in zone semiaride e aride, dove spesso costituisce una grave minaccia per l'uso sostenibile delle suddette risorse per l'irrigazione. A livello mondiale, il tasso di esaurimento delle acque sotterranee è considerevole: all'inizio del secolo, le stime erano per lo più comprese tra 100 e 200 chilometri cubi all'anno (Bierkens e Wada, 2019).

I potenziali impatti della diminuzione del livello delle acque sotterranee includono:

- aumento di costi, complessità tecnica e fabbisogno energetico per l'estrazione delle acque sotterranee;
- aumento della scarsità di acqua causata dal prosciugamento di pozzi, zone dell'acquifero o interi acquiferi;
- degrado degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee e dei servizi offerti da queste oltre a quelli di approvvigionamento;
- subsidenza del suolo in aree con sedimenti altamente comprimibili o altre formazioni geologiche soggette a deformazione in risposta a variazioni di pressione dell'acqua;
- concorrenza tra settori che utilizzano le acque sotterranee o tra singoli utenti del pozzo;
- accesso sempre più iniquo alle acque sotterranee (compresa la perdita di equità intergenerazionale).

I grandi sistemi acquiferi, ben noti, interessati da un significativo esaurimento delle riserve a lungo termine sono quelli delle pianure indo-gangetiche, della pianura della Cina settentrionale, della valle centrale della California, delle alte pianure statunitensi e del sistema acquifero arabo. La maggior parte delle acque sotterranee prelevate da questi sistemi acquiferi viene utilizzata per l'agricoltura irrigua.

L'uso e le pratiche di utilizzo del suolo, il drenaggio artificiale e la gestione delle acque superficiali sono altre attività umane che influenzano lo stoccaggio delle acque sotterranee.

1.8.2 Inquinamento delle acque sotterranee

L'inquinamento delle acque sotterranee riduce l'idoneità di queste risorse agli scopi potabili e agli altri usi umani, e al contempo può anche influenzare gli ecosistemi che da esse dipendono.

Esistono molte fonti di inquinamento antropico delle acque sotterranee: la maggior parte di esse si trova in corrispondenza o in prossimità della superficie terrestre (agricoltura, abitazioni, fognature, discariche, industrie e altre fonti urbane, serbatoi di stoccaggio, strade, canali, condutture, ecc.), ma diverse altre fonti immettono inquinanti nel sottosuolo a una profondità maggiore sotto la superficie (pozzi, estrazione di petrolio e gas, estrazione mineraria, depositi sotterranei di rifiuti e altre attività umane nel sottosuolo). L'inquinamento derivante dalla produzione agricola è molto comune; si tratta di una fonte diffusa (non puntuale) che spesso causa la presenza di notevoli quantitativi di nitrati, pesticidi e altri prodotti agrochimici. Al contrario, le industrie e le famiglie di solito producono inquinamento da fonti puntuali. La gamma di inquinanti industriali è molto ampia (numerose sostanze organiche e inorganiche, microrganismi, radionuclidi) e varia a seconda delle tipologie di prodotti industriali. Risulta peculiare la presenza di composti microbiologici e dei cosiddetti “microinquinanti emergenti” (ad esempio gli inquinanti derivanti da prodotti farmaceutici e per la cura personale, nell'acronimo inglese PPCP, e gli interferenti endocrini, nell'acronimo inglese EDC) tra gli inquinanti prodotti dalle famiglie e trovati nelle fognature (Lapworth et al., 2012).

● ● ●
L'inquinamento delle acque sotterranee è un processo praticamente irreversibile: una volta inquinati, gli acquiferi tendono a rimanere in tale condizione

● ● ●
**Le acque
sotterranee dolci
possono diventare
salmastre o saline
in diversi modi**

Come già accennato nel prologo, oltre agli inquinanti di origine antropica, possono essere presenti nel sottosuolo anche inquinanti geogenici (ad esempio arsenico e fluoruro). L'azione umana, come il pompaggio delle acque sotterranee, può contribuire al loro rilascio dalla matrice rocciosa e al loro trasporto sotto la superficie.

L'inquinamento delle acque sotterranee è un processo praticamente irreversibile: una volta inquinati, gli acquiferi tendono a rimanere in tale condizione. Poiché la maggior parte delle fonti di inquinamento antropogeniche si trova in corrispondenza o in prossimità della superficie del suolo, l'inquinamento è più spesso osservato nei pressi di acquiferi poco profondi, in particolare se è assente uno strato protettivo a bassa permeabilità. Tuttavia, a causa del costante aumento delle attività umane negli strati sotterranei più profondi (sfruttamento di idrocarburi, *fracking*, stoccaggio nel sottosuolo, ecc.), l'inquinamento sta raggiungendo anche le zone più profonde, sebbene questo sia un fenomeno un po' meno diffuso. L'inquinamento delle acque sotterranee è un problema importante in quasi tutte le aree caratterizzate da un'elevata densità di popolazione e/o da una produzione agricola o industriale significativa.

1.8.3 Salinizzazione delle acque sotterranee

Le acque sotterranee dolci possono diventare salmastre o saline in diversi modi.

Uno dei meccanismi è legato alle inondazioni marine. L'acqua di mare che inonda le terre costiere basse tende a infiltrarsi negli acquiferi sottostanti, sostituendo le acque sotterranee dolci con acqua salata. Ciò avviene sia all'improvviso, durante eventi eccezionali (tempeste o tsunami), sia gradualmente, di pari passo con la lenta trasgressione marina causata dall'innalzamento del livello del mare. In termini di estensione territoriale, solo una percentuale molto ridotta della superficie terrestre è esposta al rischio di inondazioni marine, ma queste aree sono spesso ampiamente popolate. Inoltre, in considerazione del previsto innalzamento del livello del mare, questo fenomeno minaccia di privare le isole con topografia estremamente piatta (come gli atolli nell'Oceano Pacifico) di risorse di acqua dolce sufficienti ad assicurare l'insediamento umano in modo continuato.

L'estrazione delle acque sotterranee è un altro fattore che può determinare la loro salinizzazione. Può indurre l'intrusione di acqua di mare nelle aree costiere e può far sì che le acque sotterranee salmastre o saline relativamente stagnanti inizino a muoversi in direzione verticale o orizzontale, verso la zona di falda dolce che viene sfruttata. Entrambi questi meccanismi costituiscono minacce significative alle risorse idriche sotterranee dolci, specialmente nelle aree costiere.

Un'altra causa significativa della salinizzazione delle acque sotterranee è l'irrigazione. Dopo l'irrigazione, l'acqua utilizzata viene temporaneamente trattenuta nella zona superiore del suolo, da dove le colture la prelevano. Questo assorbimento di acqua da parte delle colture è selettivo, nel senso che parte dei solidi disciolti rimane nel terreno. Successivamente, questi sali si infiltrano in profondità, sia per effetto delle precipitazioni durante i periodi più piovosi dell'anno, sia a causa di un'eccedenza di acqua di irrigazione applicata dagli agricoltori per prevenire la salinizzazione del suolo. Di conseguenza, il contenuto di solidi disciolti degli acquiferi poco profondi non confinati, in prossimità delle aree irrigate, tende ad aumentare gradualmente, a meno che i sistemi di drenaggio non deviano l'acqua mineralizzata verso corpi idrici superficiali. Questo meccanismo di salinizzazione delle acque sotterranee si aggiunge all'aumento dei solidi disciolti causato da prodotti agrochimici che percolano verso il basso.

1.8.4 Problemi di priorità, assegnazione e accesso

In assenza di qualsiasi forma di controllo comunitario o governativo, è improbabile che in una determinata area si sviluppi una combinazione ottimale dei servizi offerti dalle acque sotterranee e che coloro che vivono in tale area possano usufruire equamente dei relativi benefici. Ciò è dovuto a fattori quali l'incompatibilità tra i servizi, la competizione tra i

potenziali utenti, le caratteristiche di libero accesso e di bene comune della risorsa e la mancanza di condizioni di parità.

In molte aree si può osservare che gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee soffrono e degenerano a causa del prelievo intensivo e incontrollato di queste da parte di individui o aziende alla ricerca di profitti economici a breve termine. La maggior parte dei volumi di acque sotterranee viene estratta dai segmenti più ricchi della popolazione, mentre le persone relativamente povere e senza terra (compresi i rifugiati e altri gruppi di migranti) spesso non hanno accesso a questa risorsa o tale accesso è molto limitato. L'utilizzo delle acque sotterranee per l'approvvigionamento pubblico di acqua per uso domestico spesso non riceve una priorità sufficiente e rimane pertanto inadeguato. Infine, coloro che godono dei profitti del prelievo delle acque in questione spesso ignorano le esternalità negative associate, a scapito della sostenibilità delle risorse e delle generazioni future. Tali questioni tendono a diventare sfide scottanti, in particolare nelle aree caratterizzate da scarsità d'acqua, e pertanto devono essere affrontate attraverso politiche appropriate.

1.9 Opportunità per aumentare i benefici offerti dalle acque sotterranee

Gli ingenti volumi di acque sotterranee prelevati e utilizzati e la diffusa evidenza dei servizi offerti *in situ* ne dimostrano l'enorme importanza per l'umanità e per gli ecosistemi dipendenti da questa risorsa. Sebbene gli attuali tassi di prelievo delle acque sotterranee siano insostenibili in diverse aree e quindi prima o poi dovranno diminuire, rimangono tuttavia varie opportunità per aumentarne i benefici. Tali opportunità, che contribuiranno al raggiungimento degli obiettivi definiti a livello locale, nazionale o sovranazionale (ad esempio la Direttiva dell'Unione europea sulle acque sotterranee o gli Obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite), sono descritte di seguito. La maggior parte di queste opportunità si concentra sulla messa a disposizione della società umana di una maggiore quantità di acque sotterranee, necessaria per soddisfare una domanda di acqua sempre crescente, guidata principalmente dalla crescita della popolazione e dai cambiamenti climatici.

1.9.1 Attingere al potenziale non sfruttato delle acque sotterranee

A differenza degli acquiferi sfruttati in modo intensivo, in diverse regioni del mondo esistono anche acquiferi che vengono ancora sfruttati a ritmi molto bassi, ovvero molto al di sotto dei tassi massimi sostenibili. Questi acquiferi ospitano un potenziale idrico sotterraneo non sfruttato e pronto per essere utilizzato. Non è ancora disponibile un inventario di tali acquiferi a livello mondiale, ma le informazioni che abbiamo suggeriscono che molti di essi si trovano in regioni scarsamente popolate dell'Africa subsahariana (MacDonald et al., 2012; Cobbing e Hiller, 2019), nell'area settentrionale dell'America meridionale, nella Federazione russa e nel Canada (Margat e Van der Gun, 2013). I tassi di prelievo in alcune zone di queste regioni sono vincolati da mezzi finanziari insufficienti per infrastrutture tecniche adeguate piuttosto che da una domanda limitata di acqua o da una scarsa disponibilità di acque sotterranee.

1.9.2 Valorizzare le risorse idriche sotterranee non convenzionali

In condizioni di crescente scarsità d'acqua, si può prendere in considerazione lo sfruttamento di risorse idriche sotterranee non convenzionali. Queste risorse possono integrare le scarse fonti di acqua dolce, ma il loro utilizzo è solitamente meno vantaggioso rispetto al prelievo convenzionale di acque sotterranee a causa di vincoli tecnici e ambientali o di fattibilità finanziaria.

Una di queste risorse non convenzionali è costituita dalle acque sotterranee salmastre, spesso presenti a profondità relativamente basse. Le acque sotterranee salmastre possono essere utilizzate direttamente, senza alcun trattamento, per scopi quali acquacoltura salmastra, sistemi di raffreddamento, operazioni nell'industria petrolifera e del gas e, se il contenuto di minerali non è troppo elevato, per l'irrigazione di colture tolleranti al sale. Per scopi che richiedono acqua a bassa mineralizzazione, come l'uso di acqua potabile, l'acqua di falda salmastra può essere miscelata con acqua dolce o desalinizzata. Soprattutto nella

● ● ●
**A differenza
degli acquiferi
sfruttati in modo
intensivo, in
diverse regioni del
mondo esistono
anche acquiferi
che vengono
ancora sfruttati
a ritmi molto
bassi, ovvero
molto al di sotto
dei tassi massimi
sostenibili**

● ● ●
La presenza eccezionalmente ampia di grandi volumi di acque sotterranee, combinata con la funzione tampone unica di questa risorsa, offre un grande potenziale per la sicurezza dell'approvvigionamento idrico in una condizione di adattamento ai cambiamenti climatici

regione araba e nelle aree più aride degli Stati Uniti, esiste un notevole interesse per lo sfruttamento di acque sotterranee salmastre (Stanton e Dennehy, 2017; Dawoud, 2019).

Le acque sotterranee dolci profonde (qui definite come le acque sotterranee presenti in acquiferi la cui sommità si trova a una profondità maggiore di 500 metri sotto la superficie) sono solo raramente prelevate per l'approvvigionamento idrico, quindi possono essere classificate come una risorsa idrica sotterranea non convenzionale. È un'opzione interessante se l'acquifero profondo da cui vengono estratte viene sostanzialmente ricaricato. Tuttavia, è probabile che la maggior parte degli acquiferi profondi contenga solo risorse idriche sotterranee non rinnovabili, il che ne ostacola l'utilizzo sostenibile. Piuttosto, queste risorse potrebbero essere sfruttate temporaneamente come risorsa tampone di emergenza durante periodi eccezionalmente secchi, quando altre fonti di acqua si esauriscono (Van der Gun et al., 2012).

Già nell'antichità, le acque dolci sotterranee offshore erano un fenomeno noto e le sorgenti sottomarine di acqua dolce erano utilizzate per uso potabile in alcune località (Taniguchi et al., 2002). Studi recenti hanno dimostrato che le acque sotterranee dolci o salmastre offshore si trovano in molte parti del mondo, sia nelle zone di deflusso sottomarino di sistemi acquiferi che vengono ricaricati sulla terra vicina (Taniguchi et al., 2002; Zhou et al., 2019), sia come corpi idrici sotterranei non rinnovabili originati in epoche geologiche precedenti (Post et al., 2013; vedere anche la figura 7 del prologo). Secondo i riferimenti citati, il tasso aggregato di deflusso a livello mondiale e i volumi stoccati sono considerevoli. Lo sfruttamento di queste risorse idriche sotterranee non convenzionali, tuttavia, non è facile ed è probabile che sia anche costoso.

1.9.3 Sviluppare l'energia geotermica

Come descritto nel capitolo 7, le acque sotterranee offrono in diversi modi opportunità per lo sviluppo dell'energia geotermica. Nonostante i progressi compiuti negli ultimi anni, questo ramo dello sviluppo energetico è ancora agli inizi. C'è ampio spazio per espandere lo sviluppo dell'energia geotermica a livello mondiale, che non solo aumenterà i benefici globali ottenuti dalle acque sotterranee, ma darà anche un contributo significativo alla transizione verso un'energia più pulita e *carbon neutral*.

1.9.4 Espandere il rifornimento di origine antropica del tampone idrico sotterraneo

La ricarica gestita degli acquiferi (nell'acronimo inglese MAR) è un efficace intervento tecnico che si avvale della capacità di stoccaggio naturalmente disponibile del sottosuolo (vedere riquadro 7.1 e sezione 11.5). L'acqua in eccesso che altrimenti andrebbe persa viene temporaneamente immagazzinata e resa disponibile per un uso proficuo in un secondo momento. L'applicazione della MAR è aumentata di ben 10 volte negli ultimi 60 anni, ma vi sono ancora ampi margini per un'ulteriore espansione, dagli attuali 10 chilometri cubi all'anno a una cifra prossima ai 100 chilometri cubi all'anno (Dillon et al., 2019). La MAR si colloca tra gli interventi di gestione delle acque sotterranee più efficaci.

1.9.5 Adattarsi ai cambiamenti climatici e mitigare i disastri

La presenza eccezionalmente diffusa di grandi volumi di acque sotterranee, combinata con la funzione tampone unica di questa risorsa, offre un grande potenziale per la sicurezza dell'approvvigionamento idrico in una condizione di adattamento ai cambiamenti climatici (vedere capitolo 7). Ciò fornisce un accesso facile e ampio e la possibilità di un uso affidabile quando le fonti di acqua superficiale vengono a mancare (ad esempio durante periodi prolungati di siccità).

La capacità delle risorse idriche sotterranee di fare da tampone durante i cambiamenti e gli shock a breve termine può inoltre aiutare a mitigare gli impatti di disastri ed emergenze antropogeniche e naturali, come incidenti industriali, siccità, inondazioni, terremoti e frane, qualora i sistemi di approvvigionamento idrico superficiale vengano direttamente colpiti (Vrba e Verhagen, 2011).

Capitolo 2

Aspetti giuridici e istituzionali della governance delle acque sotterranee

UNDP

Jenny Grönwall* e Marianne Kjellén

UNESCO-IHP

Alice Aureli, Stefano Burchi**, Mohamed Bazza** e Raya Marina Stephan

Con il contributo di Gabriel Eckstein (Texas A&M University School of Law), Lesha Witmer (WfWP), Margreet Zwarteveen (IHE Delft), Aurélien Dumont (UNESCO-IHP), Danielle Gaillard-Picher (GWP), Rio Hada (OHCHR), Rebecca Welling (IUCN) e Maki Tsujimura (Università di Tsukuba).

* Commissionato tramite il Water Governance Facility, ospitato da SIWI

** Affiliato ad AIDA, per conto dell'UNESCO



Questo capitolo definisce i concetti collegati di governance e gestione delle acque sotterranee, spiegando come differiscono l'uno dall'altro. Descrive anche gli strumenti giuridici prevalenti e gli aspetti istituzionali della gestione e della governance di questa risorsa.

2.1 Governance e gestione delle acque sotterranee

La governance e la gestione delle acque sotterranee riguardano sia l'estrazione che la distribuzione, l'efficienza d'uso e la protezione della qualità. Sebbene questi due termini siano spesso utilizzati in modo intercambiabile, questo rapporto fa una distinzione tra i due concetti (vedere rispettivamente i riquadri 2.1 e 2.2). I processi di governance delle acque sotterranee stabiliscono le condizioni e consentono la gestione, la pianificazione e l'attuazione delle politiche relative a questa risorsa. I principi per una "buona" governance dell'acqua includono accesso equo, responsabilità, trasparenza, partecipazione delle parti interessate, inclusività, ecc. La gestione delle acque sotterranee è orientata all'azione: concentrandosi sulle attività di attuazione pratica e sulle operazioni quotidiane in senso stretto, sottolinea i risultati delle decisioni (Linton e Brooks, 2011).

La governance e la gestione delle acque sotterranee possono essere difficili a causa della natura di bene comune della maggior parte delle risorse sotterranee, insieme alle lacune informative e alla diversità delle parti coinvolte e dei loro interessi (Ross, 2016). I sistemi acquiferi (l'ambiente roccioso o sedimentario saturo e l'acqua contenuta nella zona satura della formazione) agiscono come "ospiti" della risorsa, fornendo servizi ecosistemici come lo stoccaggio naturale (infrastrutture verdi; Nazioni Unite, 2021; Puri e Villholth, 2018;

Riquadro 2.1 Definizione di governance delle acque sotterranee

Sono stati fatti molti sforzi per identificare le caratteristiche fondamentali della governance delle acque sotterranee. Quello più completo è stato svolto nel contesto del progetto "Groundwater Governance: A Global Framework for Action" (Groundwater Governance Project, 2016a, 2016b, 2016c), che ha definito la governance delle acque sotterranee come segue:

«La governance delle acque sotterranee comprende la promozione di un'azione collettiva responsabile per garantire il controllo, la protezione e l'utilizzo socialmente sostenibile delle risorse idriche sotterranee e dei sistemi acquiferi a beneficio dell'umanità e degli ecosistemi dipendenti. Questa azione è facilitata da un quadro abilitante e da principi guida» (Groundwater Governance Project, 2016c, pag. 17).

Secondo questa definizione, la governance prevede un insieme di quattro componenti o disposizioni essenziali:

1. un quadro istituzionale caratterizzato da rappresentanza e leadership, organizzazioni e capacità, coinvolgimento e partecipazione dei soggetti interessati;
2. un quadro giuridico completo;
3. sistemi di conoscenza e sensibilizzazione più generalizzata sui temi;
4. politiche, strutture e piani di incentivazione allineati a una governance efficace.

I principi guida della governance delle acque sotterranee sono:

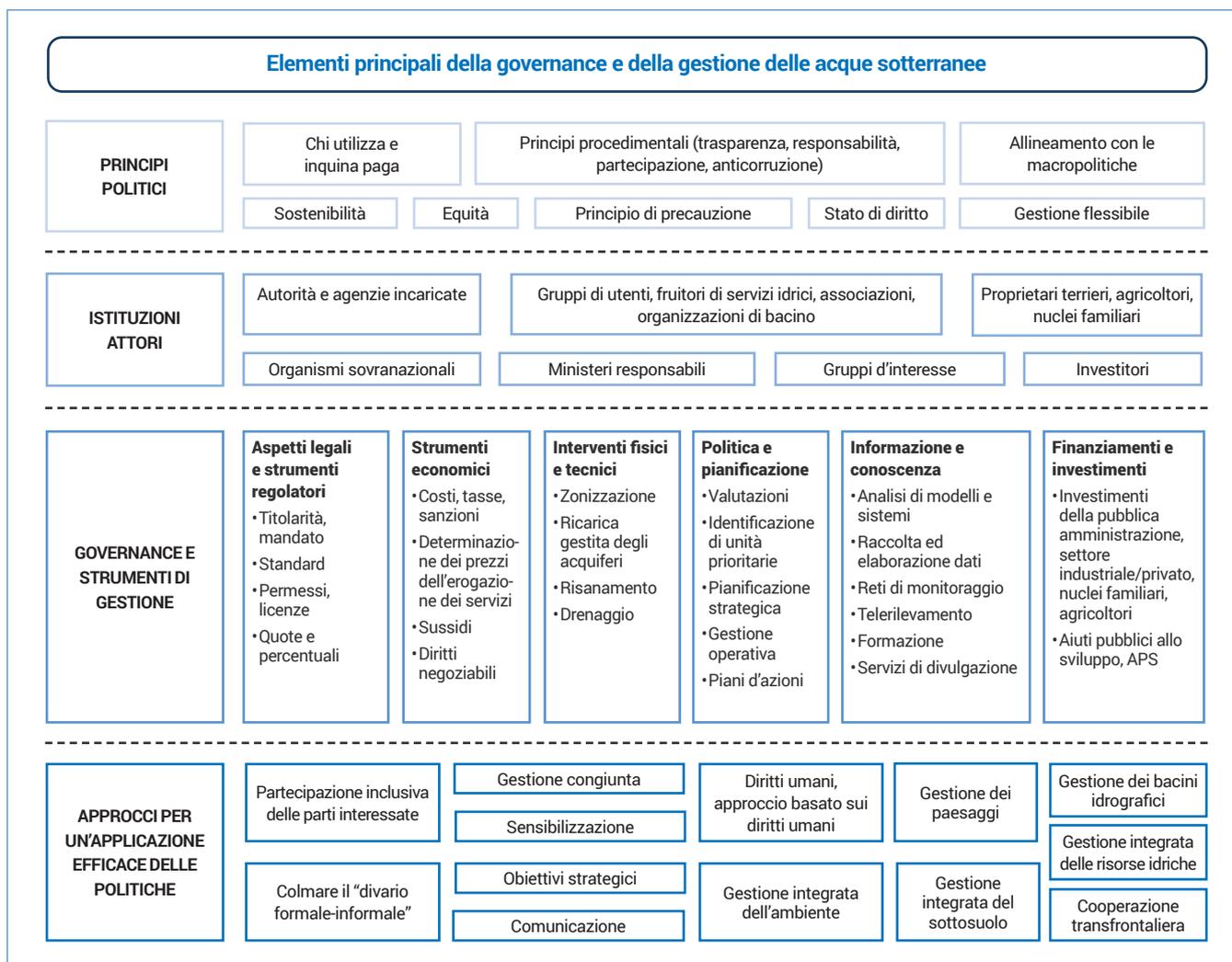
- la gestione integrata delle acque superficiali e sotterranee;
- la gestione congiunta della quantità e della qualità delle risorse idriche sotterranee;
- la governance congiunta dello spazio sotterraneo e delle risorse del sottosuolo, che comprende la regolamentazione di tutte le attività e funzioni ubicate nello spazio sotterraneo al fine di garantire un uso armonizzato ed evitare danni indesiderabili e irreversibili;
- l'integrazione "verticale" nella pianificazione e gestione tra le autorità locali, distrettuali/provinciali e federali, nonché internazionali, a seconda dei casi; e
- il coordinamento politico (orizzontale) di altri settori che interessano o sono interessati dalle acque sotterranee.

Riquadro 2.2 Definizione di gestione di acque sotterranee

Il Groundwater Governance Project (2016c, pag. 17) ha definito la gestione delle acque sotterranee come «... le attività intraprese dagli attori incaricati di valorizzare, utilizzare e proteggere in modo sostenibile le risorse idriche sotterranee».

La gestione comprende misure, interventi, azioni e attività che possono essere pratiche, tecniche e tangibili in varia misura, e che mirano a «controllare l'estrazione delle acque sotterranee e prevenire il degrado della loro qualità, solitamente con l'obiettivo di garantire una fornitura sostenibile di acqua dolce, preservando le condizioni ambientali ed ecosistemiche desiderate che dipendono dalle acque sotterranee». Le attività di gestione tecnica comprendono la perforazione e la manutenzione di pozzi, l'installazione di tecnologie per il risparmio idrico, ecc. (vedere capitolo 11).

Figura 2.1 Elementi principali della governance e della gestione delle acque sotterranee, dai principi politici agli approcci di attuazione



Fonte: autori.

Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2009). Le realtà idrogeologiche, socioeconomiche e politico-istituzionali dei sistemi acquiferi devono essere considerate insieme al modo in cui questi vengono utilizzati e gestiti. Il divario temporale e l'invisibilità delle risorse idriche sotterranee rendono il tutto più complesso: gli impatti negativi sulle acque sotterranee possono rimanere nascosti per anni e i limiti fisici degli acquiferi sono invisibili sia agli utenti che a chi prende le decisioni. Di conseguenza, i rischi e i problemi associati alle acque sotterranee e agli acquiferi spesso non vengono affrontati in modo proattivo.

La governance e la gestione delle acque sotterranee si verificano all'interno del più ampio contesto politico di un paese o bacino e sono correlate ai principi politici, alla pianificazione, agli aspetti legali e all'attuazione. La figura 2.1 suggerisce come le idee e i principi politici generali si traducano, in parte attraverso leggi e regolamenti, in strumenti di gestione. Tuttavia, le metodologie e gli approcci per l'attuazione sono una tappa o uno strumento necessario ai risultati delle intenzioni politiche.

Poiché le acque sotterranee sono spesso considerate come una risorsa privata (ossia, strettamente connessa alla proprietà della terra e in alcune giurisdizioni considerata come vera e propria proprietà privata), la regolamentazione, la governance e la gestione dall'alto presentano delle difficoltà. In pratica, le decisioni relative ai singoli pozzi sono esercitate principalmente dai proprietari (terrieri) ed è spesso difficile per i governi quantificare, distribuire e regolare il prelievo e l'utilizzo delle acque sotterranee, in particolare se le loro risorse sono limitate. Ne consegue che, quasi ovunque, la governance e la gestione delle acque sotterranee devono includere soggetti pubblici e privati, nonché le comunità locali. Allo stesso tempo, i governi devono assumere pienamente il loro ruolo di custodi delle risorse in considerazione della qualità di bene comune e pubblico delle acque sotterranee. Una maggiore integrità e politiche che migliorino l'accesso per i piccoli proprietari e le donne hanno maggiori possibilità di contribuire al bene comune e raggiungere uno sviluppo sostenibile.

2.2 Strumenti giuridici



Le leggi e i regolamenti interni disciplinano l'accesso alle acque sotterranee e le attività umane che incidono sulla loro qualità

La legislazione in materia di risorse idriche sotterranee definisce diritti vincolanti ed esecutivi e identifica diritti e obblighi che vengono successivamente resi operativi attraverso decisioni di gestione, compreso il monitoraggio e l'applicazione delle norme. Ad esempio, la Direttiva quadro sulle acque dell'Unione europea (Parlamento europeo/Consiglio europeo, 2000) e la Direttiva sulle acque sotterranee (Parlamento europeo/Consiglio europeo, 2006) hanno dato il via a un gran numero di attività di gestione.

Le leggi e i regolamenti che incorporano gli obiettivi della società e gli obiettivi politici (vedere capitolo 10), e che stabiliscono un quadro normativo e abilitante per il raggiungimento di tali obiettivi, sono componenti fondamentali della governance delle acque sotterranee. Sono anche utili alla gestione di questa risorsa. Quadri giuridici stabili consentono inoltre ai governi e a chi utilizza le acque sotterranee di pianificare la gestione delle risorse (vedere capitolo 10) a lungo termine e di affrontare interessi contrastanti, compresi quelli dell'ambiente e delle generazioni future (Smith et al., 2016).

I quadri giuridici devono includere la protezione delle zone di deflusso e ricarica e dell'area circostante i pozzi di approvvigionamento idrico, nonché norme sulla resa sostenibile e controlli sull'estrazione e regolamenti condivisi. Tali quadri richiederebbero la condivisione dei dati per facilitare processi importanti, tra i quali troviamo il bilanciamento della competizione o del conflitto di interessi tra le parti interessate, la riduzione e l'eliminazione delle disuguaglianze nell'accesso alla risorsa e nel trarre vantaggio da essa, nonché il coordinamento con l'uso del suolo urbano e rurale per la gestione dell'intero spazio sotterraneo (Groundwater Governance Project, 2016c).

Le leggi e i regolamenti interni disciplinano l'accesso alle acque sotterranee e le attività umane che incidono sulla loro qualità (vedere sezione 2.2.2). Ulteriori atti giuridici in materia includono quelli che:

- a. Garantiscono l'accesso all'acqua per i bisogni primari, nel rispetto dei diritti umani. I diritti umani all'acqua e ai servizi igienico-sanitari, così come il diritto a un ambiente sicuro, pulito, salubre e sostenibile, differiscono dai diritti sull'acqua in quanto non sono né temporanei né soggetti ad approvazione statale e in quanto non possono essere revocati. L'Assemblea generale delle Nazioni Unite e il Consiglio per i diritti umani

riconoscono che l'accesso equo ad acqua potabile e servizi igienici sicuri e puliti sono diritti umani (Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2010; UNHRC, 2010). Pertanto, le risorse idriche sotterranee devono essere protette come parte del diritto umano a un ambiente sicuro, pulito, salubre e sostenibile, che è stato recentemente riconosciuto dal Consiglio per i diritti umani (UNHRC, 2021). Nei luoghi in cui i servizi idrici sono carenti o inadeguati, la dipendenza delle famiglie e delle comunità dalle acque sotterranee è di gran lunga maggiore, con l'obbligo per gli Stati di rispettare, proteggere e garantire il diritto all'acqua potabile attraverso la preservazione delle risorse. Il ruolo dello Stato varia dal consigliare agli utenti finali di proteggere le "loro" risorse idriche sotterranee, al sostenere le famiglie i cui pozzi si sono prosciugati a causa della siccità ricorrente (Grönwall e Danert, 2020).

- b. Consentono l'accesso alle acque sotterranee per la sussistenza e gli usi produttivi su piccola scala delle comunità tradizionali, nel rispetto del diritto consuetudinario. Le regole formali, tuttavia, possono ignorare il diritto consuetudinario con il risultato che gli utenti sono lasciati senza protezione legale davanti ai titolari dei diritti idrici formali (Hodgson, 2016). Le regole consuetudinarie continuano a svolgere un ruolo significativo, ad esempio per quanto riguarda le risorse idriche sotterranee percepite come appartenenti alla comunità, mentre viene negato il concetto di diritti individuali. In gran parte dell'Africa e dell'Asia, i diritti consuetudinari sull'acqua sono intrinsecamente legati alla terra e incorporati nei sistemi di proprietà fondiaria (Mechlem, 2016; Meinzen-Dick e Nkonya, 2007). Tuttavia, le norme consuetudinarie relative alle risorse idriche possono essere ingiuste o addirittura discriminatorie e contrarie agli interessi delle donne, delle bambine, dei bambini e delle minoranze (Hodgson, 2016); laddove alle donne e ai gruppi minoritari viene negata la proprietà formale della terra, possono anche essere privati dei diritti sulle acque sotterranee. La governance responsabile della proprietà fondiaria, della pesca e delle foreste è indissolubilmente legata all'accesso e alla gestione di altre risorse naturali, come le acque sotterranee (FAO, 2012).
- c. Regolamentano gli usi del suolo nocivi per i processi naturali di ricarica e deflusso delle acque sotterranee e alla funzione di sostegno ambientale delle acque sotterranee in relazione, in particolare, alle zone umide e alle oasi.
- d. Disciplinano la formazione e il funzionamento di associazioni di utenti delle acque sotterranee per l'assegnazione, il monitoraggio e le responsabilità politiche a livello delle acque sotterranee come bene comune.

Il diritto internazionale in materia di risorse idriche identifica i diritti e gli obblighi degli Stati sovrani in relazione a fiumi, laghi, bacini e acquiferi che sono condivisi, formano o sono alla base di (nel caso delle acque sotterranee) una linea di confine internazionale. Solamente di recente ha iniziato ad occuparsi in modo specifico degli acquiferi e delle acque sotterranee; infatti solo un numero ridotto di trattati e accordi è stato concluso da alcuni paesi con specifico riguardo agli acquiferi transfrontalieri e alle acque sotterranee (vedere capitolo 12).

2.2.1 Diritti sull'acqua: dai diritti di proprietà privata ai diritti amministrativi

Attualmente, nella maggior parte delle giurisdizioni la proprietà pubblica delle acque sotterranee è la norma e la loro estrazione, così come il loro uso, si basa su diritti amministrativi come permessi individuali, licenze o concessioni che, in molte giurisdizioni, sono vincolati nel tempo e qualificati in termini di volumi e tassi di estrazione (Salman e Bradlow, 2006; Nelson e Quevauviller, 2016; Groundwater Governance Project, 2016c; Burchi, 2018a). Tuttavia, in alcune giurisdizioni con una popolazione numerosa, come l'India, il Pakistan, le Filippine e più della metà degli Stati federati degli Stati Uniti d'America, i diritti sulle acque sotterranee sono legati alla proprietà della terra e le acque sotterranee sono considerate proprietà privata (Closas e Molle, 2016; Tarlock e Robinson, 2019).



Attualmente, nella maggior parte delle giurisdizioni la proprietà pubblica delle acque sotterranee è la norma

Il Groundwater Governance Project ha sottolineato l'importanza di fare entrare questa risorsa nel dominio pubblico, nonostante le sfide legali e pratiche che ciò può comportare, consentendo così allo Stato di assegnare diritti d'uso e regolare i prelievi in linea con gli obiettivi sociali di sostenibilità, equità ed efficienza (Groundwater Governance Project, 2016c). Il passaggio delle acque sotterranee dal dominio privato a quello pubblico, per quanto difficile viste le sfumature politiche, può essere realizzato con successo (come è avvenuto in giurisdizioni come Argentina, Stati australiani del Nuovo Galles del Sud e di Victoria, Germania, Italia, Marocco, Sudafrica, Tanzania, Uganda e Zimbabwe) per legge o per pronuncia delle più alte Corti (Burchi, 1999, 2012 e 2018a; Burchi e Nanni, 2003; Salman e Bradlow, 2006). In Spagna, invece, il tentativo di passaggio dalla proprietà privata a quella pubblica delle acque sotterranee decretato dalla legge sull'acqua del 1985 è fallito, nonostante una sentenza favorevole della Corte suprema, e privati che risultano in possesso di un titolo di proprietà da prima del 1985 possono ancora godere dei diritti di usufrutto. Nuovi diritti sono, tuttavia, assegnati sotto la proprietà pubblica. Ciò spiega le criticità da affrontare per l'accettazione di tali cambiamenti relativi alla proprietà (Closas e Molle, 2016).

In alcune giurisdizioni, le acque sotterranee sono regolamentate insieme alle acque superficiali, compresi i fiumi; in altre, fanno parte di leggi quadro. Sempre più paesi stanno rafforzando il proprio quadro giuridico in materia di acque sotterranee, classificandole alla pari con i regimi delle acque superficiali, proteggendo la quantità e la qualità e coinvolgendo le parti interessate per bilanciare interessi sia privati che pubblici (Mechlem, 2016). Il riquadro 2.3 mostra un esempio dall'Australia, dove sono stati introdotti misure e diritti di estrazione "basati sulle quote" per gestire i prelievi di acque sotterranee. L'applicazione di tale regolamento sull'estrazione delle risorse può bilanciare meglio la funzione di supporto all'habitat e all'ambiente offerta dalle acque sotterranee e dagli acquiferi con i prelievi per usi produttivi e altri scopi (Burchi, 2018a; Smith et al., 2016).

Vale la pena notare che in alcuni casi vi sono conflitti tra i diritti sulle acque sotterranee e quelli sulle acque superficiali, ad esempio nel caso di un corso d'acqua che si sta prosciugando a causa di un intenso pompaggio delle acque sotterranee nelle vicinanze e viceversa. Un approccio di gestione condivisa prevede di integrare i diritti sulle acque sotterranee con quelli sulle acque superficiali, come è stato fatto nel Nuovo Galles del Sud in Australia (riquadro 2.3).

Riquadro 2.3 Passaggio dai diritti di estrazione dell'acqua "basati sul volume" a quelli "basati sulle quote" nel Nuovo Galles del Sud (Australia)

Lo Stato australiano del Nuovo Galles del Sud ha introdotto un principio di accesso generale di gruppo sulla base del *Water Management Act* (2000). La quantità di acque sotterranee estratte dagli acquiferi si è spostata da un'assegnazione volumetrica a una quota variabile delle acque sotterranee disponibili in un determinato acquifero. Le relative licenze di estrazione sono costituite da due parti: una "componente di quota", che dà diritto al titolare della licenza a una quota delle acque sotterranee disponibili nell'acquifero; e una "componente di estrazione", che autorizza il titolare della licenza a prelevare acque sotterranee a orari, tariffe e luoghi specifici dall'acquifero individuato. La componente di quota è il fulcro di questo sofisticato regime di gestione e governance ed è determinata sulla base di regole di condivisione dell'acqua (anche di superficie) e piani di condivisione della risorsa negoziati in modo partecipativo in cicli decennali di gestione degli acquiferi (vedere capitolo 10; Burchi, 2018a).

2.2.2 La regolamentazione dell'inquinamento

Le fonti puntuali di inquinamento, come gli scarichi industriali di acque reflue (in particolare pozzi di iniezione) e il trattamento dei rifiuti solidi che possono incidere sulle risorse idriche sotterranee e sulle fognature municipali, possono essere regolate tramite autorizzazioni



L'emissione e lo scarico illegali di sostanze nei corpi idrici o nel suolo, o il trattamento illecito delle acque reflue, secondo modalità che arrecano gravi danni o rischi alle reti idriche sotterranee e/o alla salute umana, possono essere considerati illeciti o reati

2.3 Aspetti istituzionali

nonché tramite standard generali di qualità degli effluenti e/o delle acque circostanti. Lo scarico diretto di rifiuti pericolosi o tossici nelle acque sotterranee è stato vietato in alcune giurisdizioni (Burchi, 2018a). L'inquinamento da fonti non puntuali, diffuse o indistinte, richiede misure di prevenzione, come la regolamentazione degli usi del suolo e/o l'imposizione delle migliori pratiche agricole e ambientali. Proprio come per l'inquinamento da fonte puntuale, queste misure includono il divieto o la limitazione di determinate attività inquinanti e di utilizzo dell'acqua, il contenimento dell'uso di pesticidi, erbicidi e fertilizzanti (soprattutto per ridurre l'accumulo di azoto e fosforo), la limitazione di alcuni modelli colturali, la riduzione dell'intensità del pascolo degli animali, la bonifica dei terreni e la gestione del drenaggio (Mechlem, 2016).

L'emissione e lo scarico illegali di sostanze nei corpi idrici o nel suolo, o il trattamento illecito delle acque reflue, secondo modalità che arrecano gravi danni o rischi alle reti idriche sotterranee e/o alla salute umana, possono essere considerati illeciti o reati. Provvedimenti e sanzioni possono essere previsti per gli scarichi senza permesso o in caso di violazione del permesso stesso, in base al diritto penale, civile o amministrativo. Gli sforzi di contrasto e il perseguimento di chi inquina, tuttavia, sono spesso difficili a causa della natura invisibile delle acque sotterranee.

La governance delle acque sotterranee avviene a più scale e livelli geografici, anche a livello regionale (come nel caso dell'Unione europea) e transfrontaliero. Al contrario, la gestione delle acque sotterranee avviene più spesso a livello micro e meso. Una varietà di disposizioni sociali, istituzionali, organizzative, finanziarie e tecniche, nonché regole, pratiche e norme comunemente accettate, modellano l'accesso alle acque sotterranee. E per affrontare i bisogni delle persone più povere è proprio a livello micro e meso che dovrebbe essere focalizzata l'attenzione (Cleaver et al., 2005).

Esiste una grande varietà di parti interessate e attori nelle istituzioni legate alle acque sotterranee, che rappresentano il settore pubblico e quello privato, le autorità o i comitati idrici (regionali), i servizi pubblici, le organizzazioni dei bacini idrografici, le comunità, i gruppi informali e la società in generale. Parte del ruolo di queste istituzioni consiste nell'attuare politiche e leggi, tradurre le decisioni in azioni e garantire che i regolamenti, le procedure di governance e l'applicazione del mandato siano attuati (Smith et al., 2016) sulla base delle informazioni e delle conoscenze acquisite sui sistemi delle acque sotterranee. Le agenzie governative hanno comunemente il mandato per attività di governance e gestione multilivello delle acque sotterranee, ma in pratica il loro ruolo può variare considerevolmente da un approccio normativo dall'alto a una posizione permissiva e di *laissez-faire* (Kemper, 2007). Anche i ruoli (o focus) assegnati o consentiti ai soggetti interessati possono essere molto diversi. Ad esempio, le norme e le istituzioni locali possono influenzare le divisioni del lavoro e delle funzioni, che a loro volta determinano l'approvvigionamento e l'allocazione dell'acqua. Inoltre, le organizzazioni comunitarie possono essere guidate da fazioni, separate sulla base del genere ed escludenti (Cleaver et al., 2005). Laddove gli utenti delle acque sotterranee operano come individui o comunità (compreso l'autoapprovvigionamento nelle aree urbane, così come i programmi di irrigazione gestiti dagli agricoltori), potrebbero esserci poche istituzioni formali, se non nessuna, attraverso le quali la governance può operare su larga scala.

In pratica, le prestazioni degli enti pubblici variano da quasi inattive a proattive ed efficaci, a seconda del regime autorizzativo (compresi i regolamenti), del livello di consapevolezza dell'importanza delle acque sotterranee e dell'impegno politico; del bilancio disponibile e, di conseguenza, della capacità di gestione, della leadership; e/o dei mandati. Un ulteriore fattore sono le pressioni commerciali e politiche per lo sfruttamento eccessivo delle acque sotterranee, insieme alla situazione politica complessiva e alla posizione del governo agli occhi della popolazione locale (compresa la fiducia reciproca o la sua mancanza).

Un'amministrazione pubblica nazionale può garantire sia l'integrazione verticale tra il livello nazionale e quello locale, sia la cooperazione orizzontale a diversi livelli e l'interfaccia con altri settori. A livello di bacino idrografico o di sistema acquifero, le organizzazioni delle parti interessate possono svolgere ruoli importanti nel coordinamento della pianificazione e della gestione delle acque sotterranee. Poiché questa risorsa è percepita (spesso in modo errato) come locale, le organizzazioni decentralizzate (compresi i municipi) svolgono un ruolo fondamentale. Tuttavia, un acquifero può estendersi al di sotto di più di un bacino idrografico, il che complica la governance di tale bacino e dell'acquifero stesso, nonché la gestione integrata delle risorse idriche. I governi dovrebbero adoperarsi per cercare il coinvolgimento sistematico delle parti interessate con l'obiettivo di creare meccanismi permanenti a tal fine. Questo può avvenire sotto forma di associazioni di utenti e altri forum (Groundwater Governance Project, 2016c).

Secondo il Groundwater Governance Project (2016c), la visione di un "quadro d'azione globale" coinvolge istituzioni efficienti con la capacità di guardare avanti e pianificare, di essere inclusive e legittime agli occhi delle parti interessate e di impegnarsi in modo credibile e tangibile; tali istituzioni sono caratterizzate dalle seguenti componenti:

- una solida progettazione organizzativa con un'adeguata capacità di elaborazione delle politiche e di pubblica amministrazione dell'uso delle risorse e della protezione dall'inquinamento;
- meccanismi per il coinvolgimento e la partecipazione permanenti delle parti interessate per promuovere approcci e azioni socialmente responsabili sulle acque sotterranee come risorsa comune;
- procedure per il coordinamento intersettoriale e la gestione congiunta al fine di affrontare adeguatamente i problemi delle acque sotterranee nelle politiche e nelle pratiche dei settori collegati;
- istituzioni per la gestione delle risorse idriche sotterranee che attraversano i confini intranazionali e internazionali (ove pertinente).

Le istituzioni, da sole, non sono sufficienti per governare adeguatamente le acque sotterranee e gli acquiferi internazionali. Devono essere accompagnate da politiche e leggi nazionali (e talvolta subnazionali; vedere capitolo 10) per guidare al meglio questi enti nel loro lavoro.

Le organizzazioni di bacino idrografico raramente contemplan le acque sotterranee, in parte a causa della mancanza di conoscenze e capacità nella valutazione degli acquiferi e in parte a causa di una storica separazione istituzionale delle acque superficiali da quelle sotterranee. Di conseguenza, l'attività di pianificazione relativa al bacino idrografico diventa incompleta. In diverse parti del mondo, tuttavia, la cooperazione è iniziata e questo suggerisce alcune migliori pratiche emergenti, modellate sugli approcci utilizzati nella gestione dei bacini idrografici transfrontalieri (Groundwater Governance Project, 2016c).

Capitolo 3

Acque sotterranee e settore agricolo

FAO
Matthew England

IWMI
Karen Villholth



3.1 Introduzione

Questo capitolo fornisce una panoramica del ruolo delle acque sotterranee in agricoltura, il settore che fa maggiore uso della risorsa a livello globale. Poiché la crescita della popolazione e del reddito determina un aumento della domanda per una produzione alimentare più intensiva e di maggior valore, per la quale le acque sotterranee sono adatte, l'agricoltura irrigua, il bestiame e i relativi usi industriali, compresa la trasformazione agroalimentare, stanno diventando sempre più dipendenti da questa risorsa (FAO, 2020).

3.2 Utilizzo delle acque sotterranee nel settore agricolo



Le acque sotterranee sono una risorsa fondamentale per l'agricoltura irrigua, l'allevamento e altre attività agricole, compresa la trasformazione alimentare

3.2.1 Importanza delle acque sotterranee per l'agricoltura

Le acque sotterranee sono una risorsa fondamentale per l'agricoltura irrigua, l'allevamento e altre attività agricole, compresa la trasformazione alimentare. Secondo le stime, nel 2018 i prelievi globali di acque sotterranee si sono attestati intorno ai 978 chilometri cubi all'anno per tutti i settori, compresa l'agricoltura (Aquastat, s.d.; Eurostat, s.d.; Margat e Van der Gun, 2013). Circa il 70% dei prelievi globali di acque sotterranee, e ancor di più nelle regioni aride e semiaride (Margat e Van der Gun, 2013), è utilizzato per la produzione agricola di cibo, fibre e colture industriali, nonché per l'allevamento del bestiame (FAO, 2020). Si stima che circa il 38% dei terreni attrezzati per l'irrigazione sia rifornito da acque sotterranee (Siebert et al., 2013). In un contesto più ampio, l'agricoltura irrigua è ancora responsabile del 70% dei prelievi di acqua dolce (FAO, 2020) e di circa il 90% dell'evaporazione complessiva dell'acqua (Hoogeveen et al., 2015). Significativo è anche l'uso dell'acqua per la trasformazione agroalimentare, che rappresenta fino al 5% dell'uso mondiale di acqua (Boretti e Rosa, 2019). Questi numeri evidenziano come nel complesso la produzione alimentare implichi un elevato consumo di acqua.

L'estrazione delle acque sotterranee ha svolto un ruolo importante nell'accelerare la produzione alimentare dagli anni '70 in poi (FAO, 2020; Shah et al., 2007), soprattutto nelle aree semiaride e aride con precipitazioni e acque superficiali limitate. Allo stesso tempo, essa ha sostenuto le economie locali e regionali che dipendono dalle acque sotterranee per i mezzi di sussistenza, la crescita economica e la sicurezza alimentare.

Per poter soddisfare la domanda globale di prodotti agricoli da qui al 2050, tenendo conto di un incremento della domanda di alimenti, mangimi e biocombustibili stimato al 50% rispetto ai livelli del 2012 (FAO, 2017), è di fondamentale importanza aumentare la produttività agricola attraverso l'intensificazione sostenibile dei prelievi di acque sotterranee, riducendo al contempo l'impronta idrica e gli impatti ambientali della produzione; tale obiettivo può essere raggiunto, ad esempio, attraverso l'agroecologia (Snapp et al., 2021), migliori politiche alimentari e strumenti economici (FAO, 2021).

Per comprendere la varietà e la dinamicità degli impatti determinati dall'uso delle acque sotterranee in ambito agricolo a livello globale, Shah et al. (2007) distinguono tra quattro tipi di socio-ecologie:

- sistemi agricoli aridi, come quelli in Medio Oriente e Nordafrica, dove la domanda di acque sotterranee è in aumento anche per usi di maggior valore che esulano dal settore agricolo;
- sistemi agricoli industriali, come quelli in Australia, Europa e Stati Uniti occidentali, dove le acque sotterranee supportano l'agricoltura commerciale di precisione¹ e attraggono risorse finanziarie relativamente elevate per la loro gestione;

¹ L'agricoltura di precisione comprende l'uso di strumenti della tecnologia dell'informazione e della comunicazione, inclusi sistemi di posizionamento globale, satelliti, droni, sensori e immagini aeree che forniscono agli agricoltori informazioni specifiche sul sito per prendere decisioni di gestione (Lowenberg-DeBoer ed Erickson, 2019). La determinazione delle condizioni del suolo e delle colture, riducendo al minimo l'impatto sulla fauna selvatica e sull'ambiente, è alla base dell'agricoltura di precisione. Sebbene concentrati nei paesi ad alto reddito, alcuni strumenti di precisione hanno un grande potenziale nei paesi a basso reddito. Molte di queste applicazioni sono state limitate all'agricoltura su larga scala, ma offrono opportunità anche per i piccoli agricoltori (FAO, 2020).

- sistemi agricoli di piccole dimensioni, come quelli in Asia meridionale e in alcune zone dell'Asia sudorientale, nonché nella pianura della Cina settentrionale, dove i sistemi di irrigazione alimentati da acque sotterranee sono vitali per ben 1-1,2 miliardi di agricoltori, per lo più poveri;
- pastorizia estensiva basata sull'uso di acque sotterranee, come in gran parte dell'Africa subsahariana e dell'America Latina.

Nelle regioni in cui esiste una fonte perenne e affidabile di acque sotterranee poco profonde, comprese le aree precedentemente alimentate da acque piovane, tali risorse sono state e continuano ad essere una fonte importante per i piccoli agricoltori (Villholth, 2013a; Shah, 2009; Giordano, 2006). Esse rappresentano infatti una fonte d'acqua relativamente accessibile, reperibile a livello locale, disponibile su richiesta e costante per le pratiche agricole, che si traduce in riduzione della povertà, maggiore sicurezza alimentare e migliori mezzi di sussistenza. Alcuni studi condotti in Asia due decenni fa indicano che l'estensione dell'accesso alle acque sotterranee ha promosso una maggiore equità fra individui, classi sociali, generi e regioni nella fruizione dei sistemi irrigui rispetto a quanto avviene nel contesto di progetti di irrigazione dei canali su scala più ampia (Shah et al., 2007; Deb Roy e Shah, 2003; Van Koppen et al., 2002). Altri studi svolti in Africa, Asia e America Latina evidenziano che gli agricoltori più poveri, quando tentano di migliorare le proprie condizioni di vita attraverso la vendita su piccola scala di prodotti agricoli o tramite l'allevamento, di norma attingono ad acque sotterranee utilizzando pompe di piccole dimensioni, il che va principalmente a vantaggio delle donne (Villholth, 2013a; Shah et al., 2007; Van Koppen, 1998).

3.2.2 Confronto fra regioni in merito ai sistemi di irrigazione alimentati da acque sotterranee

A livello globale, la superficie dei terreni dotati di impianti per l'irrigazione (compreso il controllo completo, le zone umide attrezzate e l'irrigazione per sommersione) è più che raddoppiata rispetto agli anni '60, passando da 139,0 milioni di ettari nel 1961 a 325,1 milioni nel 2013 (tabella 3.1). La variazione regionale nell'estensione della superficie irrigua è notevole. Il 72% delle aree adibite all'irrigazione su scala mondiale è concentrato in Asia, prevalentemente nella zona meridionale e orientale, e il 41% della superficie coltivata del continente è irrigata. L'Africa subsahariana presenta sistemi di irrigazione meno sviluppati: l'area irrigata infatti equivale al 3,4% della superficie coltivata della regione, mentre nell'Asia occidentale al 41%. Le aree del mondo che dipendono in larga misura da questa risorsa per scopi irrigui sono l'America settentrionale e l'Asia meridionale, in cui rispettivamente il 59% e il 57% delle zone dotate di sistemi di irrigazione attingono ad acque sotterranee; in Nordafrica la percentuale è del 35%, mentre nell'Africa subsahariana si raggiunge appena il 5% (vedere sezione 8.1.3).

3.2.3 Confronto fra paesi in merito ai sistemi di irrigazione alimentati da acque sotterranee

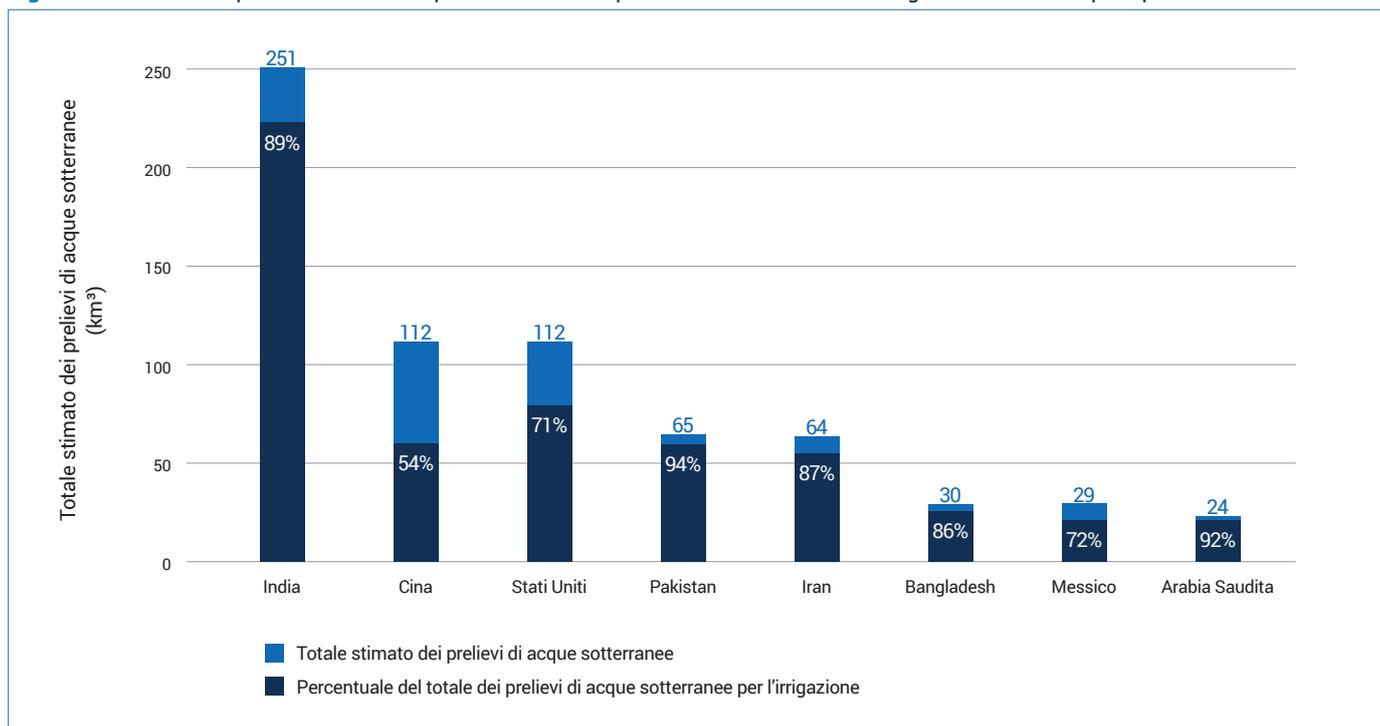
I paesi con la maggior parte della superficie irrigata sono Cina (73 milioni di ettari), India (70 milioni), Stati Uniti (27 milioni) e Pakistan (20 milioni) (Aquastat, s.d.). Nel complesso, l'entità delle attività di estrazione delle acque sotterranee per scopi irrigui varia in modo significativo in questi paesi. L'India, in quanto maggior fruitore di tale risorsa a livello globale, che preleva circa 251 chilometri cubi all'anno, utilizza l'89% delle acque sotterranee estratte per l'irrigazione. La Cina è relativamente meno dipendente da questa risorsa; secondo le stime, il 54% circa del totale dei prelievi sarebbe destinato all'irrigazione, ma con significative disparità geografiche: la pianura della Cina settentrionale (vedere sezione 8.4.4), infatti, dipende maggiormente dalle acque sotterranee rispetto alle regioni meridionali (Liu et al., 2010). Anche altri paesi, come Arabia Saudita, Bangladesh, Iran, Messico, Pakistan e Stati Uniti, dipendono fortemente dalle acque sotterranee per l'irrigazione, con percentuali di prelievi che variano dal 71% al 94% (Margat e Van der Gun, 2013) (figura 3.1).

Tabella 3.1 Aree irrigate per regione e a livello globale, inclusa la quota di acque sotterranee utilizzate

Continente e regione	Area totale attrezzata per l'irrigazione alimentata da acque superficiali o sotterranee (Mha) (Faostat 1961-1996; Aquastat 1997-2013)		Area irrigata come % del totale dell'area coltivata (Faostat)		Irrigazione alimentata dalle acque sotterranee (2013) (Aquastat)	
	1961	2013	1961	2013	Area attrezzata (Mha)	% sul totale delle aree irrigate
Anno	1961	2013	1961	2013	Area attrezzata (Mha)	% sul totale delle aree irrigate
Africa	7,4	15,6	4,4	5,8	3	19,2
Africa settentrionale	3,9	7,4	17,1	25,6	2,5	34,6
Africa subsahariana	3,5	8,2	2,4	3,4	0,4	5,4
America	22,7	52	6,7	13,1	23,7	45,5
America centrale e Caraibi	17,4	1,7	6,7	13	0,6	33,8
America settentrionale	0,6	34,3	5,5	14,9	20,1	58,7
America meridionale	4,7	16	6,8	10,5	3	18,5
Asia	95,6	232,6	19,6	40,9	89,7	38,7
Asia centrale	9,6	13,2	16,2	28,5	1,1	8
Asia orientale	7,2	73,9	13,4	56	21,3	28,9
Asia meridionale	36,3	98,0	19,1	45,7	55,5	56,6
Asia sudorientale	34,5	22,8	29,7	20,7	0,6	4,6
Asia occidentale	8	24,7	11,7	40,6	11,2	45,2
Europa	12,3	21,4	3,6	7,3	7,1	14
Europa orientale e Federazione russa	8,7	4,8	5,8	3,6	0,25	10,1
Europa occidentale e centrale	3,6	16,6	1,9	13,5	6,8	40,7
Oceania	1,1	3,2	3,2	6,8	0,8	24,9
Australia e Nuova Zelanda	1,1	3,2	3,2	6,9	0,8	24,9
Isole del Pacifico	0,001	0,004	0,2	0,6	0,0004	10
MONDO	139,1	324,8	10,2	20,6	124,1	38,4

Fonte: sulla base di dati Aquastat (s.d.) e Faostat (s.d.).

Figura 3.1 Stima dei prelievi totali di acque sotterranee e percentuale destinata all'irrigazione nel 2010 per i paesi selezionati



Fonte: sulla base dei dati di Margat e Van der Gun (2013).

3.2.4 Portata dell'uso combinato dell'acqua

L'uso combinato² di acque sotterranee e di superficie in agricoltura è significativo. Solitamente questa pratica sostiene l'intensificazione della produzione all'interno delle aree irrigate dalle acque superficiali esistenti, come in Asia meridionale, dove consente di impiegare colture perenni e di tenere sotto controllo la salinità (Shah, 2009). In genere, l'andamento dell'uso combinato non viene regolato o pianificato; si tratta piuttosto di un meccanismo di risposta a cui gli agricoltori ricorrono quando le risorse idriche superficiali non riescono a garantire un approvvigionamento costante di acqua dolce. Sono poche le informazioni disponibili e attendibili sull'uso combinato (Siebert et al., 2010), ma i dati dei censimenti effettuati negli Stati Uniti (Dieter et al., 2018), in Cina e in India (Evans e Dillon, 2018; Ministero delle risorse idriche dell'India, 2017) indicano una continua diffusione della suddetta pratica.

3.2.5 Contributo economico delle acque sotterranee all'agricoltura

Nel settore agricolo, il contributo economico mondiale delle acque sotterranee rappresenta secondo le stime una cifra compresa tra 210 e 230 miliardi di dollari americani all'anno, con una produttività lorda che oscilla tra 0,23 e 0,26 dollari per metro cubo estratto (Shah et al., 2007). La produttività delle risorse idriche in termini di rendimento delle colture per unità di acqua utilizzata risulta in generale fino a due volte superiore per le acque sotterranee rispetto alle acque superficiali. Ciò è dovuto principalmente alla presenza di acque sotterranee disponibili all'occorrenza, alla loro vicinanza ai campi e al fatto che di solito tali risorse vengono gestite in modo autonomo. Ciò consente agli agricoltori di investire maggiormente in altri fattori produttivi, come fertilizzanti, pesticidi e sementi, rendendo le loro attività agricole più vantaggiose, più redditizie e meno rischiose (Bierkens et al., 2019; Smilovic et al., 2015; Shah, 2007). Tuttavia, il contributo economico complessivo e la produttività dell'acqua in questo ambito possono apparire bassi se confrontati con quelli di altri settori che utilizzano tale risorsa a causa della combinazione fra consumo di acqua relativamente elevato per unità di produzione e prezzi bassi delle materie prime agricole. In un contesto di crescita economica e di maggiore urbanizzazione, ciò spesso porta l'agricoltura a essere privata di notevoli quantitativi di acqua, che vengono destinati agli usi urbani e industriali a causa del valore aggiunto generalmente più elevato che questi ultimi presentano per unità di acqua utilizzata (Molle e Berkoff, 2009).

3.2.6 Acque sotterranee per l'allevamento

I volumi di acque sotterranee destinati all'abbeveraggio del bestiame³ sono ridotti rispetto a quelli usati per irrigare le colture foraggere (Shah et al., 2007). Il 98% dell'acqua (superficiale e sotterranea) utilizzata per l'allevamento viene impiegato per la produzione di foraggi irrigui, mentre il restante 2% viene prelevato per uso potabile e per fini di raffreddamento (Mekonnen e Hoekstra, 2012). A livello globale, si stima che circa 264 chilometri cubi di acqua superficiale e sotterranea all'anno siano utilizzati per la produzione di foraggi; tale cifra è pari a circa un quinto dell'acqua complessivamente consumata dal settore agricolo, e a meno di un terzo di quella utilizzata per le colture alimentari (Heinke et al., 2020).

I terreni gestiti come pascoli e prati permanenti, per lo più alimentati da acque piovane, coprono quasi 33 milioni di chilometri quadrati della superficie terrestre, circa il 70% di tutti i terreni agricoli (Faostat, s.d.). Il numero totale di capi di bestiame è più che triplicato, passando da 7,3 miliardi di unità nel 1970 a 24,2 miliardi di unità nel 2011 (FAO, 2018a). L'intensificazione della produzione di bestiame è associata a un aumento della domanda di

² L'uso combinato dell'acqua prevede l'utilizzo di acque superficiali insieme a quelle sotterranee per soddisfare la domanda di acqua per le colture (Shah et al., 2006).

³ La parola bestiame è utilizzata in senso lato, e comprende tutti gli animali domestici indipendentemente dall'età, dall'ubicazione e dallo scopo dell'allevamento. Gli animali non addomesticati sono esclusi da questa definizione, a meno che non siano tenuti o allevati in cattività. Gli animali inclusi sono quadrupedi grandi e piccoli, pollame, insetti (api) e larve di insetti (bachi da seta) (FAO, 2018a).

3.3 Impatti dell'agricoltura sulla portata degli acquiferi

● ● ●
*Il continuo
impoverimento
delle acque
sotterranee nelle
aree agricole
sta diventando
motivo di
crescente
preoccupazione a
livello regionale e
globale*

mangime e acqua, soprattutto nell'ambito dell'agricoltura industriale, spesso associato a una pressione crescente sulla terra e sulle risorse idriche *in loco*, ad esempio per la coltivazione di foraggi irrigui in sistemi a pascolo zero (IPES-Food, 2018).

Molti pascoli aridi e semiaridi dipendono interamente dall'accesso alle acque sotterranee per l'abbeveraggio del bestiame. I pozzi favoriscono quantità superiori alla capacità di carico dei pascoli in termini di vegetazione naturale per il pascolo e concentrano anche il bestiame intorno ai pozzi stessi. La sostenibilità ambientale dei pascoli può essere gravemente compromessa dall'introduzione di pozzi con pompe motorizzate (Shah et al., 2007). In Somalia e nel Kenya settentrionale, i pozzi hanno migliorato la sicurezza idrica, ma al contempo hanno determinato un'eccedenza di risorse, provocando controversie relative ai diritti sull'acqua e sui pascoli, nonché l'esclusione delle comunità vulnerabili (Gomes, 2006).

La pastorizia svolge un ruolo cruciale nel garantire i mezzi di sussistenza in gran parte dell'Africa subsahariana (Giordano, 2006). Mentre l'estrazione delle acque sotterranee può essere meno intensiva nei pascoli destinati all'allevamento, il degrado del suolo dovuto al bestiame può avere impatti significativi sulla ricarica delle acque sotterranee e sulla qualità delle stesse (Meglioli et al., 2013).

3.3.1 Abbassamento delle falde acquifere causato dall'irrigazione

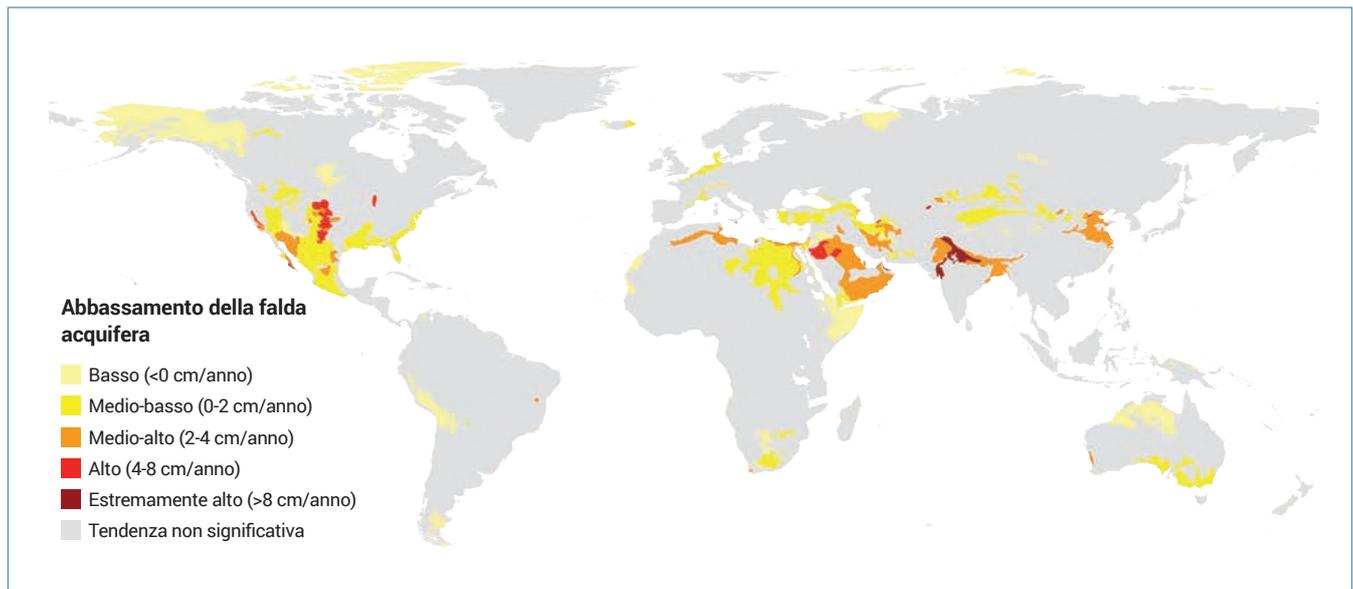
L'abbassamento delle falde acquifere è spesso attribuito a prelievi destinati all'agricoltura. Questo processo porta a una moltitudine di esternalità, tra cui il prosciugamento delle zone umide e dei corsi d'acqua dipendenti dalle acque sotterranee attraverso la riduzione dei flussi di base (vedere capitolo 6) e la compattazione di strati di terra comprimibili, con conseguente subsidenza, migrazione verso il basso di acque sotterranee di bassa qualità e intrusione salina in falde acquifere e corpi idrici superficiali lungo le pianure costiere.

Osservazioni terrestri e dati satellitari hanno dimostrato, o reso plausibile, che numerose falde acquifere vengono sfruttate a velocità tali da indurre un rapido abbassamento delle stesse e da causare esternalità sociali e ambientali. Ciò riguarda molti dei 37 principali sistemi acquiferi del mondo (Konikow, 2011; Gleeson et al., 2012; Scanlon et al., 2012a; Richey et al., 2015; Gong et al., 2018; Shamsudduha e Taylor, 2020) (figura 3.2). Gli elevati tassi di prelievo per l'agricoltura irrigua si concentrano nelle regioni aride e semiaride, dove l'aumento della popolazione e l'espansione delle aree irrigate hanno portato a una rapida crescita della domanda di acqua. Lo sfruttamento delle acque sotterranee è stato guidato da fattori condizionati dall'offerta, come la capacità di questa risorsa di garantire il funzionamento di un sistema irriguo flessibile e utilizzabile all'occorrenza, volto a sostenere un'agricoltura che genera ricchezza (Shah et al., 2007; Gleeson et al., 2012), insieme alla disponibilità di pompe, tecnologie di perforazione ed energia a basso costo, elementi spesso contemplati nel contesto di programmi di sostegno e sussidi governativi. Anche fattori legati alla domanda hanno contribuito notevolmente alla creazione delle dinamiche sopra illustrate, derivanti dalla necessità di fornire più cibo alle crescenti popolazioni urbane e rurali.

I casi più rilevanti di esaurimento delle acque sotterranee dovuto a prelievi destinati all'agricoltura riguardano le falde acquifere continentali a ridosso di pianure e coste. L'esaurimento riguardante le falde acquifere alluvionali, costiere, deltizie e insulari minori (non incluso nella figura 3.2) può essere in parte attribuito anche a prelievi effettuati dal settore agricolo, i quali portano alla scarsità e all'inquinamento delle acque sotterranee nonché all'intrusione salina, fenomeni che minacciano le riserve di acqua potabile e limitano la produzione agricola (Margat e Van der Gun, 2013).

Gli acquiferi che non ricevono una ricarica adeguata, in particolare quelli situati in aree aride dipendenti dalle acque sotterranee, presentano casi speciali e particolarmente allarmanti di

Figura 3.2 Abbassamento della falda in una selezione dei principali acquiferi del mondo



Nota: l'abbassamento della falda indica il declino medio annuo della stessa nel periodo di studio (1990-2014).

Fonte: WRI (2019). Attribuzione 4.0 Internazionale (CC BY 4.0).

esaurimento delle acque sotterranee, poiché quest'ultime immagazzinate vengono rimosse in modo definitivo, mentre l'acquifero riceve una ricarica naturale nulla o irrilevante, date le condizioni climatiche attuali (Bierkens e Wada, 2019) (riquadro 3.1). Tali falde acquifere non rinnovabili, che ricevono un tasso di ricarica trascurabile su scala temporale umana, richiedono strategie a lungo termine per un utilizzo pianificato, in cui sono essenziali misure alternative per garantire l'approvvigionamento idrico di base, orientando l'economia verso modelli di consumo basati su una gestione più sostenibile delle risorse idriche. L'orizzonte temporale entro cui raggiungere tali obiettivi è un parametro di pianificazione fondamentale, ma è associato a una grande incertezza, poiché la capacità di stoccaggio assoluta e la fattibilità economica dell'estrazione di acque sotterranee esauribili rimangono incerte (Foster e Loucks, 2006). È probabile che anche molte parti delle falde acquifere rinnovabili siano soggette a un esaurimento irreversibile, poiché una ricarica naturale, o addirittura una ricarica potenziata, sarebbe comunque insufficiente per rigenerarle. Ciò può essere dovuto alla compattazione e alla subsidenza degli acquiferi, o al fatto che una ricarica naturale di quest'ultimi sarebbe impossibile a causa del lungo tempo che tale processo richiederebbe, per non parlare della necessità di risorse idriche esterne per rigenerare artificialmente i suddetti acquiferi.

Il continuo impoverimento delle acque sotterranee nelle aree agricole sta diventando motivo di crescente preoccupazione a livello regionale e globale, poiché minaccia di minare la sicurezza alimentare, l'approvvigionamento idrico di base, l'integrità ambientale e la resilienza climatica. I progressi per risolvere questo spinoso problema sono tuttavia limitati, poiché richiedono una maggiore capacità di gestione e governance a livelli molteplici e integrati, nonché la definizione di approcci intersettoriali (OCSE, 2016) (vedere capitoli 2, 11 e 12).

I modelli di acque sotterranee che riportano i cambiamenti nell'uso del suolo e le stime dei prelievi e delle ricariche vengono utilizzati per tenere traccia del processo di esaurimento di questa risorsa (Konikow, 2013). Tuttavia, verificare la scala e l'entità delle tendenze all'esaurimento utilizzando il telerilevamento per monitorare i cambiamenti relativi allo stoccaggio dell'acqua nella crosta terrestre, attraverso la missione satellitare della NASA Gravity Recovery and Climate Experiment (nell'acronimo inglese GRACE), rimane

Riquadro 3.1 Esaurimento delle acque sotterranee in Egitto

Nell'ultimo decennio vi è stata una notevole proliferazione di pozzi ad alta capacità ed efficienti, in grado di attingere ad acque sotterranee profonde centinaia di metri. L'Egitto ha iniziato a sfruttare in modo intensivo le acque sotterranee per scopi irrigui negli anni '60 attraverso il progetto New Valley, estraendo le risorse non rinnovabili del sistema Nubian Sandstone Aquifer nel deserto occidentale del paese (Powell e Fensham, 2016). Progetti e piani successivi hanno accelerato il tasso di diffusione delle attività di irrigazione, alimentate dall'estrazione intensiva delle acque sotterranee. Ad esempio, il progetto Developing Southern Egypt (1997-2017) prevedeva la creazione di 216.000 ettari di terreni irrigati nell'area di Toshka, nel sud-est del deserto occidentale. Il progetto ha utilizzato le acque superficiali del fiume Nilo e le acque sotterranee del Nubian Sandstone Aquifer, estratte attraverso pozzi che raggiungono profondità comprese tra i 200 e i 1.200 metri. Dal 1997 al 2006, il livello delle acque sotterranee è sceso fino a 13,8 metri in alcune zone dell'acquifero. Ulteriori piani per irrigare altri 10.500 ettari attingendo esclusivamente alle acque sotterranee attraverso 50 pozzi dovrebbero portare a un abbassamento dei livelli delle acque sotterranee di altri 15 metri (Sharaky et al., 2018). Aree di superficie ma direttamente connesse con la falda acquifera, come le sorgenti e le oasi desertiche artesiane, che hanno sostenuto antiche civiltà e mezzi di sussistenza, sono ora compromesse a causa di questa intensificazione dell'uso dell'acqua e del suolo (Powell e Fensham, 2016).

un obiettivo difficile da raggiungere (Famiglietti, 2014). Ciò è in gran parte dovuto alla risoluzione grossolana delle anomalie gravitazionali utilizzate per dedurre i cambiamenti riguardanti lo stoccaggio dell'acqua (Vishwakarma et al., 2021). Alcune stime suggeriscono che tra il 2000 e il 2009, l'impoverimento globale delle acque sotterranee per tutti gli usi è stato dell'ordine di 113 chilometri cubi all'anno (Döll et al., 2014), mentre altri modelli suggeriscono volumi dell'ordine di 304 chilometri cubi all'anno per il 2010, di cui circa il 75% è stato attribuito all'agricoltura (Dalin et al., 2017; Wada, 2016). In pratica, la possibilità di quantificare l'impoverimento dello stoccaggio degli acquiferi su scala globale è ancora teorica, poiché le condizioni di confine, ricarica e perdita rimangono dinamiche e incerte. Tuttavia, i modelli includono sempre di più le teste piezometriche, utilizzate come un prezioso indicatore dei cambiamenti relativi allo stoccaggio, fornendo maggiore certezza nelle stime dell'impoverimento degli acquiferi locali e regionali (Haacker et al., 2016).

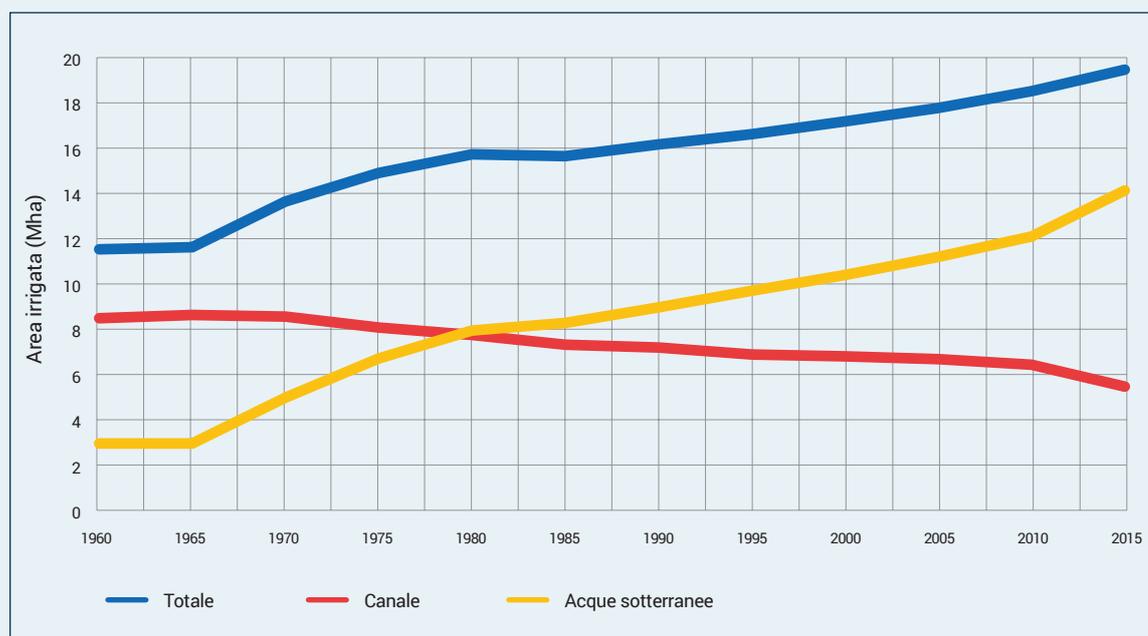
Sempre più spesso si riconosce che l'acqua virtuale incorporata nei prodotti agricoli insieme alla loro redistribuzione su scala globale attraverso il commercio internazionale è fondamentale per determinare e regolare livelli sostenibili di estrazione di acqua a livello mondiale (vedere capitolo 1). Secondo le stime, circa l'11% (pari a 25 chilometri cubi all'anno) dell'abbassamento delle falde acquifere su scala globale è dovuto al commercio internazionale dei prodotti agricoli (Dalin et al., 2017), che contribuisce alla sicurezza alimentare e alla crescita economica, ma in misura significativa anche all'impoverimento su vasta scala degli acquiferi sottostanti i terreni produttivi. Grano, mais, riso, canna da zucchero, cotone e foraggi sono le principali colture che contribuiscono all'abbassamento delle falde acquifere. L'ampia commercializzazione di queste colture comporta un'impronta idrica decisamente insostenibile⁴ (di cui le acque sotterranee sono una quota importante) dovuta all'esportazione intensiva di colture per la produzione di cibo, foraggio e fibre destinati al consumo umano e all'alimentazione del bestiame (Mekonnen e Gerbens-Leenes, 2020). Cinque paesi esprimono circa il 70% di questa impronta idrica insostenibile: Cina, India, Iran, Pakistan e Stati Uniti. Di tale impronta idrica, il 90% derivava da colture alimentari e foraggiere, mentre il 10% da colture di fibra, gomma e tabacco (Mekonnen e Gerbens-Leenes, 2020).

⁴ L'impronta idrica è considerata "insostenibile" se è superiore all'acqua blu rinnovabile disponibile e viola i requisiti di flusso ambientale (Mekonnen e Gerbens-Leenes, 2020).

Riquadro 3.2 Terreni agricoli irrigati da acque superficiali con falda poco profonda: il caso del Pakistan

In Pakistan l'acquifero del bacino dell'Indo ospita una riserva idrica pari ad almeno ottanta volte il volume di acqua dolce contenuto nelle tre dighe più grandi del paese. Eppure il paese è sull'orlo di una grave crisi in relazione alle acque sotterranee (Lytton et al., 2021). Il Pakistan si colloca al quarto posto fra i maggiori fruitori di acque sotterranee, e, rispettivamente nel 2010 e nel 2017, è stato responsabile del 6,6% e del 6,4% dei prelievi di acque sotterranee a livello globale (Margat e Van der Gun, 2013; Aquastat, s.d.), sebbene solo il 4,6% dei terreni agricoli irrigati da acque sotterranee su scala mondiale si trovi nel suo territorio (Bhutta e Smedema, 2007). L'uso estensivo delle acque sotterranee nel paese è iniziato negli anni '60, quando sono stati installati grandi pozzi di drenaggio nell'ambito dei progetti di controllo della salinità e di bonifica (nell'acronimo inglese SCARP) finanziati dal governo per monitorare i problemi di ristagno idrico e salinità in 2,6 milioni di ettari di terre irrigate, in particolare nella provincia del Punjab (Qureshi, 2020). Nel corso del tempo, l'uso delle acque sotterranee poco profonde è stato adottato sempre più spesso dagli agricoltori come metodo per accrescere la superficie delle aree irrigate, la produzione agricola e i redditi, affrontando al contempo la siccità. Un accesso più sicuro all'acqua ha contribuito ad aumentare i raccolti del 50-100%. Nel 1980, l'area irrigata da acque sotterranee aveva superato quella alimentata da acque superficiali (vedere grafico seguente), mentre parti consistenti delle terre coltivate sono state effettivamente irrigate combinando le due fonti, in parte per tenere sotto controllo la salinità generalmente più elevata nelle acque sotterranee. Praticamente il Pakistan, in un periodo di 60 anni, da paese dipendente dalle acque superficiali è diventato un paese dipendente dalle acque sotterranee, così come da paese con acque sotterranee in eccedenza si è trasformato in un paese con seri problemi di carenza di tale risorsa, aggravati dai crescenti problemi di salinità dovuti all'uso di acque sotterranee di scarsa qualità per l'irrigazione. Circa il 21% dell'area irrigata è interessata dalla salinità, il che minaccia la sicurezza alimentare del Pakistan, poiché la terra irrigata è responsabile di oltre il 90% della produzione totale di grano del paese (Qureshi, 2020).

Sviluppo storico delle aree irrigate con acque sotterranee e superficiali in Pakistan



Fonte: Qureshi (2020, fig. 4, pag. 6).

3.4 Terreni agricoli con falde poco profonde

Le falde acquifere poco profonde possono presentare sia opportunità che limiti per la coltivazione. Da una parte, tali falde possono essere problematiche per l'agricoltura a causa del rischio di ristagni idrici derivanti da precipitazioni o attività di irrigazione in aree con drenaggio naturale o artificiale inadeguato. Ciò può portare a una progressiva salinizzazione del suolo, in particolare nelle regioni aride. Dall'altra parte, le falde acquifere poco profonde se controllate possono essere vantaggiose per l'agricoltura in quanto garantiscono una disponibilità idrica continua per ottimizzare la resa dei raccolti, anche durante periodi di siccità prolungati. I piccoli agricoltori in tutta l'Africa e l'Asia dipendono da acque sotterranee poco profonde stagionali e perenni per la coltivazione dei loro terreni (Pavelic et al., 2013; Pavelic et al., 2012; Shah, 2009).

Mentre nella maggior parte delle aree aride e semiaride abitate del mondo, comprese quelle che in passato disponevano di buone riserve idriche (riquadro 3.2), le acque sotterranee si stanno man mano esaurendo, diversi studi mostrano che altre regioni, ad esempio l'Europa settentrionale, nelle condizioni climatiche attuali stanno vedendo un aumento considerevole delle loro riserve di acque sotterranee, che si verifica su base stagionale o nell'arco di diversi anni, durante periodi prolungati di precipitazioni più intense del normale, che possono causare ristagni idrici e inondazioni. Ciò può generare sfide significative per l'agricoltura e richiede una gestione proattiva delle acque sotterranee poco profonde, come nel Regno Unito (Macdonald et al., 2008). I Paesi Bassi sono naturalmente soggetti alle inondazioni e gestiscono costantemente i livelli delle acque sotterranee attraverso il drenaggio artificiale e il pompaggio (Zeeberg, 2009). In gran parte dei Paesi Bassi, le falde acquifere poco profonde sono state per secoli controllate artificialmente mantenendo il livello piezometrico vicino a livelli ottimali per colture e vegetazione. Allo stesso modo, altri paesi con altitudine prossima al livello del mare come la Danimarca dipendono da un diffuso drenaggio artificiale del sottosuolo nelle regioni con terreno argilloso, che controlla i livelli delle acque sotterranee e mantiene le condizioni del suolo e delle colture ottimali, proteggendo al contempo le infrastrutture, comprese le strade (Kidmose et al., 2013).

3.5 Impatti dell'agricoltura sulla qualità delle acque sotterranee

3.5.1 Inquinamento delle acque sotterranee causato dall'agricoltura

Secondo le stime, l'inquinamento causato dall'agricoltura ha superato i livelli di contaminazione provocata dagli insediamenti umani e dall'industria ed è il principale fattore di degrado delle acque interne e costiere (FAO, 2018a). I principali inquinanti derivanti dall'agricoltura sono nutrienti, pesticidi, sali, sedimenti, carbonio organico, agenti patogeni, metalli e residui di farmaci. A livello globale, il nitrato contenuto nei fertilizzanti chimici e organici costituisce il principale contaminante di origine antropica delle acque sotterranee (FAO, 2018a), e determina in particolare l'eutrofizzazione delle acque superficiali (Smolders et al., 2010). Nell'Unione europea il 38% dei corpi idrici è soggetto a una pressione significativa causata dall'inquinamento agricolo (WWAP, 2015), negli Stati Uniti l'agricoltura costituisce la principale fonte di inquinamento dei fiumi, mentre in Cina essa è responsabile di una notevole percentuale dell'inquinamento di acque superficiali e sotterranee provocato dall'azoto (FAO, 2013).

I pesticidi comunemente usati in agricoltura includono insetticidi, erbicidi e fungicidi (Schreinemachers e Tipraqsa, 2012). Se utilizzati o smaltiti in modo improprio, essi possono inquinare il suolo e le risorse idriche con agenti cancerogeni e altre sostanze tossiche, mentre i prodotti derivanti dalla loro degradazione possono essere pericolosi per la biosfera terrestre e acquatica, nonché per la salute umana (Tang et al., 2021; Sharma et al., 2019). Il mercato globale dei pesticidi vale più di 35 miliardi di dollari all'anno (FAO, 2018a). La contaminazione con microinquinanti organici, come i pesticidi, che interessa le aree agricole è meno documentata nelle economie emergenti. Tuttavia, laddove i problemi sono stati studiati, nel contesto di ambienti socioeconomici vulnerabili caratterizzati da agricoltura intensiva, i risultati hanno rilevato la presenza di contaminanti in concentrazioni eccessive (Wentworth et al., 2021), il che costituisce un pericolo emergente di importanza critica per l'ambiente e la salute.

L'eccessivo accumulo di sale nelle acque sotterranee dovuto al drenaggio salmastro e all'intrusione di acqua di mare (Mateo-Sagasta e Burke, 2010) è aumentato con la diffusione delle attività di irrigazione; inoltre, la situazione è stata ulteriormente aggravata dai cambiamenti climatici. L'irrigazione può smuovere i sali accumulati nei terreni delle zone aride, che vengono poi trasportati dalle acque di drenaggio nelle falde acquifere e in altri corpi idrici riceventi (FAO, 2018a). Importanti problemi legati alla salinità dell'acqua nei terreni agricoli sono stati segnalati in Argentina, Australia, Cina, India, Pakistan, Stati Uniti, Sudan e in molti paesi dell'Asia centrale (FAO, 2018a; Shahid et al., 2018; Thorslund e Van Vliet, 2020). Le stime indicano che, a livello globale, il 20-23% dei terreni irrigati e il 25-33% di quelli coltivati è salino, e dunque compromesso in termini di produttività agricola (Shahid et al., 2018; Jamil et al., 2011), principalmente nelle regioni aride e semiaride.

L'uso di antibiotici per l'allevamento intensivo di bestiame è aumentato con la crescente domanda globale di carne (Manyi-Loh et al., 2018) e spesso non è soggetto a regolamentazione nei paesi in via di sviluppo; la Cina si attesta come principale produttore e consumatore di antibiotici nell'ambito dell'allevamento (Maron et al., 2013). Se da un lato gli antibiotici proteggono gli animali dalle infezioni, dall'altro generano batteri resistenti che possono essere patogeni per l'uomo e sono molto difficili da trattare (Prestinaci et al., 2015); essi si trovano di solito nell'ambiente, e dunque anche nelle acque sotterranee, attraverso i rifiuti animali. Una diffusa prevalenza di batteri resistenti agli antibiotici è stata documentata a livello globale (Manyi-Loh et al., 2018); inoltre, in Cina (Xiao et al., 2016), Kenya (Wahome, 2013), Sudafrica (Carstens, 2013) e Stati Uniti (Li et al., 2015) è stata rilevata la presenza di tali batteri nelle acque sotterranee.

3.5.2 Impatti economici, sanitari e ambientali

A livello globale, si stima che i costi ambientali e sociali dell'inquinamento delle acque superficiali e sotterranee causato dall'agricoltura siano dell'ordine di diversi miliardi di dollari all'anno (OCSE, 2012a). Secondo le stime, negli Stati Uniti la contaminazione delle acque sotterranee dovuta ai pesticidi e l'eutrofizzazione dell'acqua dolce costerebbero rispettivamente 1,6-2 e 1,5-2,2 miliardi di dollari all'anno (Pimentel, 2005; Dodds et al., 2009). Il costo annuale globale del degrado del suolo provocato dal sale nelle aree irrigate è stimato a 27,3 miliardi di dollari a causa della perdita di produttività delle colture (Qadir et al., 2014).

L'inquinamento delle acque sotterranee causato dall'agricoltura ha un impatto negativo diretto sulla salute umana. Ad esempio, livelli elevati di nitrati nell'acqua possono causare metaemoglobinemia (sindrome del bambino blu) nei neonati (Majumdar, 2003; Knobloch et al., 2000). Mentre gli standard di qualità dell'acqua per gli inquinanti sono generalmente più rigorosi in termini di protezione della salute umana che dell'ambiente, nel caso dei nitrati i livelli richiesti per proteggere i corpi idrici dall'eutrofizzazione sono inferiori rispetto a quelli relativi alla metaemoglobinemia (Hinsby et al., 2008). L'accumulo di pesticidi nell'acqua e nella catena alimentare, con effetti negativi dimostrati sugli ecosistemi e sulla salute umana, nel 2001 ha portato la Convenzione multilaterale di Stoccolma sugli inquinanti organici persistenti a vietare alcuni pesticidi ascrivibili a tale categoria (come il DDT e molti organofosfati) (Tang, 2013). Tuttavia, un certo numero di pesticidi vietati è ancora utilizzato nei paesi meno sviluppati, il che causa effetti gravi e cronici sulla salute (Ngowi et al., 2012).

3.5.3 Controllo dell'inquinamento nel settore agricolo

Alcuni studi suggeriscono che le leggi e i regolamenti volti a prevenire o limitare l'inquinamento diffuso delle acque sotterranee causato dall'agricoltura, e in particolare la loro applicazione, sono generalmente poco efficaci (Groundwater Governance Project, 2016a). Nell'ambito delle acque sotterranee, infatti, si sono registrati più progressi in relazione a leggi e regolamentazione che alla loro attuazione e applicazione pratica, il che rappresenta un ostacolo significativo alla gestione sostenibile delle suddette risorse. In molti paesi, le normative sono scarse o la non conformità alle norme esistenti è pervasiva, per cui spesso l'inquinamento delle acque sotterranee continua a non essere sottoposto



Alcuni studi suggeriscono che le leggi e i regolamenti volti a prevenire o limitare l'inquinamento diffuso delle acque sotterranee causato dall'agricoltura, e in particolare la loro applicazione, sono generalmente poco efficaci

ad alcun controllo. I tentativi di regolare l'inquinamento diffuso attraverso l'imposizione di sanzioni non hanno funzionato, poiché è difficile identificare chi effettivamente inquina (OCSE, 2017a). Gli strumenti economici per il controllo dell'inquinamento delle acque superficiali e sotterranee sono sempre più utilizzati. Questi includono tasse, *set-aside* (la conversione di terreni agricoli ad usi naturali) e imposte per limitare la produzione o l'intensità dell'uso del suolo. Le tasse includono imposte per chi inquina, apposite tasse ambientali e tasse su tecnologie, prodotti e fattori che hanno conseguenze ecologiche negative (ad esempio pesticidi), a seconda del loro livello di pericolosità, o, al contrario, sussidi per tecnologie rispettose dell'ambiente. Per ridurre l'inquinamento è possibile ricorrere ad approcci ben noti, come il principio "chi inquina paga"; ad esempio, si possono istituire tasse verdi su pesticidi e fertilizzanti: queste, però, spesso non vengono applicate, poiché sono troppo basse per poter agire come deterrenti o hanno impatti indesiderati dal punto di vista della distribuzione, per cui i piccoli agricoltori vengono colpiti più duramente da tali tasse rispetto ad altre categorie (OCSE, 2011, 2017a).

Si ritiene che una combinazione di misure di controllo dell'inquinamento, tra cui regolamentazione, incentivi economici, nonché informazione, campagne di sensibilizzazione e diffusione di dati, funzioni in modo più efficace rispetto alle sole normative (OCSE, 2008). Le politiche che affrontano la questione dell'inquinamento idrico in ambito agricolo dovrebbero far parte di un quadro generale di politiche relative ad agricoltura e risorse idriche a livello nazionale, di bacino idrografico e di acquifero. Le politiche volte a promuovere l'informazione e la consapevolezza per cambiare il comportamento degli agricoltori e incentivare l'adozione di migliori pratiche di gestione (FAO, 2018a) nel settore agricolo sono importanti per prevenire l'inquinamento alla fonte (Liu et al., 2018). Ad esempio, l'analisi comparativa può promuovere un cambiamento nel comportamento degli agricoltori, mostrando loro come operano rispetto ad altri agricoltori in relazione all'applicazione di fertilizzanti e pesticidi. Altro aspetto rilevante è la promozione della responsabilità sociale d'impresa all'interno del settore privato (FAO, 2018a).

Riquadro 3.3 Energia e irrigazione nell'Africa subsahariana

L'Africa subsahariana è caratterizzata da scarse infrastrutture per la fornitura di energia e da bassi livelli di accesso all'elettricità, che sono correlati a bassi livelli di sviluppo agricolo e di utilizzo delle acque sotterranee. Al contrario, i livelli di disponibilità di energia solare del continente sono fra i più alti al mondo (IEA, 2019a). Il tipo di agricoltura più diffuso è quello pluviale, ma a causa della crescita demografica e dei cambiamenti climatici vi è una chiara necessità di aumentare la produzione per garantire la sicurezza alimentare e costruire la resilienza al clima. Le acque sotterranee in tutta la regione sono generalmente sottoutilizzate, quindi esiste un grande potenziale per l'espansione dell'agricoltura irrigua su piccola scala in modo sostenibile, se venissero superati i problemi derivanti dall'accessibilità economica e da altri vincoli (Altchenko e Villholth, 2015). Il costo dei sistemi di irrigazione a energia solare su piccola scala si è ridotto in modo significativo negli ultimi anni e tali sistemi stanno iniziando a comparire sul mercato, in particolare nell'Africa orientale, dove i distributori e le catene di approvvigionamento sono più sviluppati (Efficiency for Access, 2019). Le pompe diesel sono più economiche da acquistare ma più costose da utilizzare rispetto ai dispositivi a energia solare, e generano elevate emissioni di gas serra. Si prevede che il mix di fornitura di energia per le piccole pompe in tutta la regione dipenderà da fattori quali la scelta delle colture da parte degli agricoltori e il prezzo futuro del diesel e delle tecnologie solari appropriate (Xie et al., 2021). Vista la domanda in crescita, sarà necessaria una migliore governance e una gestione congiunta di acque sotterranee ed energia per garantire un uso sostenibile di tali risorse.

3.6 Collegamenti fra acque sotterranee ed energia nell'ambito dell'irrigazione

L'estrazione delle acque sotterranee e l'uso di energia sono strettamente correlati. L'elettrificazione delle aree rurali è uno dei principali fattori alla base del crescente ricorso alle acque sotterranee in India (Shah, 2009; Smith e Urpelainen, 2016). Si osserva un'intensa attività di sfruttamento delle acque sotterranee nelle zone rurali in cui le reti elettriche hanno coperto aree che altrimenti avrebbero dovuto fare affidamento su combustibili diesel o energia eolica, come è emerso in Etiopia, Kenya e Sudafrica (Villholth, 2013a). Al contrario, le società fornitrici di energia elettrica possono subire perdite significative nelle entrate quando il calo dei livelli delle acque sotterranee e l'aumento dei costi di irrigazione portano a una diminuzione del pompaggio, come evidenziato negli Stati Uniti centrali (Rhodes e Wheeler, 1996).

I progressi nella tecnologia solare hanno visto lo sviluppo di sistemi di irrigazione a energia solare (nell'acronimo inglese SPIS), adottati su larga scala per supportare le attività delle aziende agricole. Questi vengono impiegati sia nel contesto di operazioni commerciali su larga scala, come avviene ad esempio in Australia, sia da piccoli agricoltori che operano in aree caratterizzate da acque sotterranee relativamente poco profonde, in particolare in località remote dove si producono raccolti di alto valore, come in Afghanistan (FAO, 2018b). La proliferazione degli SPIS, sia come soluzioni connesse alla rete che non, può essere attribuita al calo dei costi dei pannelli solari nell'ultimo decennio, oltre che ai programmi di sovvenzioni governative che hanno reso fruibile tale tecnologia, in particolare per i piccoli agricoltori (FAO, 2018b). Gli SPIS forniscono un'energia per l'irrigazione affidabile, conveniente e sostenibile in relazione al clima (riquadro 3.3). Permane tuttavia il rischio di un impiego insostenibile della risorsa idrica in assenza di adeguate misure di gestione e di regolamentazione di questi sistemi (FAO, 2018b). Una volta installati i sistemi, non vi è alcun costo per unità di potenza e quindi nessun incentivo finanziario per gli agricoltori a risparmiare elettricità per il pompaggio delle acque sotterranee. Gli SPIS possono quindi portare a un'eccessiva estrazione delle acque sotterranee e a una bassa efficienza delle applicazioni sul campo. In alcuni casi, gli agricoltori vendono acqua ai loro vicini con profitto, aumentando i prelievi complessivi di acque sotterranee (FAO, 2018b; Closas e Rap, 2017). La relazione tra sussidi energetici e pompaggio delle acque sotterranee per l'irrigazione è un dato acquisito, come confermano gli studi su paesi come India (Scott e Sharma, 2010) (riquadro 3.4), Iran (Jamali Jaghdani e Kvartiuk, 2021) e Messico (Scott, 2013).

Riquadro 3.4 Acque sotterranee ed energia in India

L'India è il maggior fruitore di acque sotterranee a livello globale. Il volume annuale dei prelievi di tale risorsa ammonta a circa 251 chilometri cubi, di cui l'89% è utilizzato per l'irrigazione (Margat e Van der Gun, 2013; figura 3.1), e viene estratto attraverso circa 20 milioni di pozzi e pompe. Si stima che circa il 60% dei terreni irrigati in India sia rifornito da acque sotterranee (Shah, 2009). L'irrigazione alimentata da acque sotterranee è stata determinante per il successo della Rivoluzione Verde in India a partire dagli anni '60. Tuttavia, è ormai evidente che i guadagni derivanti dalla produzione agricola irrigua hanno progressivamente portato a un calo significativo dei livelli delle acque sotterranee in alcune parti del paese, in particolare nel nord-ovest e nella parte peninsulare dell'India meridionale (Shah, 2009). Attualmente, la crisi idrica del paese può essere in gran parte ricondotta alla diffusione dell'irrigazione alimentata da acque sotterranee, che si inserisce nel quadro delle politiche alimentari ed energetiche delineate nel paese dalla fine degli anni '70. La politica alimentare che garantisce cibo a buon mercato ai consumatori impone la necessità di mantenere bassi i costi dei fattori di produzione, compreso il livello delle tariffe elettriche per il pompaggio delle acque sotterranee. Le tariffe energetiche ridotte o l'energia gratuita per l'agricoltura diffuse in molti stati indiani, insieme alla disponibilità di prodotti agricoli assicurata dallo stato o dal governo, incoraggia gli agricoltori a impiegare colture richiedenti maggiori quantitativi di acqua, come la canna da zucchero, anche nelle regioni semiaride con un basso livello di ricarica idrica naturale. Questo fatto è alla base di un esaurimento delle acque sotterranee senza precedenti che interessa gran parte dell'India (Mukherji, 2020).

Il prelievo eccessivo di acque sotterranee in India può essere ricondotto a una mancanza di coerenza tra le politiche idriche, energetiche e alimentari. Pertanto, le soluzioni ai problemi delle acque sotterranee del paese dovrebbero essere collocate all'interno di un più ampio contesto di nesso acqua-energia-cibo (Shah et al., 2012). La gestione indiretta delle acque sotterranee attraverso politiche energetiche è stata tentata in molti Stati dell'India. Si è provato a misurare le forniture energetiche destinate all'agricoltura e ad addebitare agli agricoltori tariffe commerciali per l'irrigazione (come nello Stato del Bengala occidentale; Mukherji et al., 2009); inoltre, si è optato per il razionamento dell'elettricità agli agricoltori per un numero limitato di ore al giorno, reso possibile dalla distinzione fra alimentatori elettrici agricoli e domestici (come negli Stati di Gujarat, Karnataka e Punjab; Shah et al., 2008; Mukherji, 2017). Entrambe queste misure, la tariffazione e il razionamento dell'elettricità, hanno lo scopo di ridurre la domanda di acque sotterranee fornendo rispettivamente indicazioni sul prezzo e sul livello di scarsità della risorsa (Sidhu et al., 2020). Più di recente, le preoccupazioni per le elevate emissioni di carbonio dovute al pompaggio delle acque sotterranee e per il crescente costo delle sovvenzioni per le utenze elettriche hanno portato all'elaborazione di progetti pilota di sistemi di irrigazione a energia solare (nell'acronimo inglese SPIS). Gli SPIS collegati alla rete vengono promossi per incentivare gli agricoltori a pompare meno acque sotterranee rivendendo l'elettricità alla rete anziché utilizzandola per prelevare queste risorse (Shah et al., 2018); tuttavia, non è ancora chiaro se gli SPIS collegati alla rete riducano effettivamente il pompaggio delle acque sotterranee. Le stime delle emissioni di gas serra dovute al pompaggio di tali risorse rispetto alle emissioni nazionali totali derivanti dal consumo di energia vanno dallo 0,5% in Cina (Wang et al., 2012) e 3,6% in Messico (Scott, 2013) all'8-11% in India (Rajan et al., 2020). Ad aggravare la situazione c'è anche il metano presente nelle acque sotterranee profonde in condizioni anossiche, che viene rilasciato quando queste vengono pompate in superficie (Kulongoski e McMahon, 2019).

Capitolo 4

Acque sotterranee per gli insediamenti umani

IWA
Stephen Foster

UN-Habitat
Pireh Otieno

RWSN*
Kerstin Danert

IAH
Alan MacDonald**

* Ask for Water GmbH per conto del Rural Water Supply Network (Rete per la fornitura idrica rurale, RWSN)

** Affiliato al British Geological Survey (Servizio geologico britannico)



4.1.1 Ambito del tema trattato

Il capitolo offre una panoramica delle dinamiche riguardanti l'approvvigionamento idrico alimentato da acque sotterranee per usi domestici (compresa l'acqua potabile) in contesti urbani e rurali, ed è strettamente collegato agli Obiettivi di sviluppo sostenibile 3 e 6 delle Nazioni Unite per il 2030. L'approvvigionamento idrico può essere gestito da servizi pubblici, da operatori commerciali, da singole famiglie e da organizzazioni comunitarie. Mentre la maggior parte dell'acqua disponibile in contesti urbani è generalmente fornita dai servizi di pubblica utilità, l'autoapprovvigionamento urbano privato alimentato da acque sotterranee è cresciuto notevolmente in molte città nei paesi in via di sviluppo. Il ruolo delle acque sotterranee nel contesto dell'approvvigionamento idrico rurale è l'altro tema centrale su cui si concentra il capitolo; in questo senso, si sottolinea come nei villaggi i pozzi¹ siano spesso l'unica fonte affidabile di acqua potabile ad essere garantita per tutto l'anno. Il capitolo esamina anche i rischi derivanti dall'uso delle acque sotterranee e la questione dell'inquinamento di tali risorse dovuto a servizi igienico-sanitari urbani e rurali inadeguati.

4.1.2 Breve *excursus* storico

Sin dai tempi più remoti, l'umanità ha soddisfatto il suo bisogno di acqua di buona qualità servendosi di fonti sotterranee (Margat e Van der Gun, 2013). Le sorgenti, manifestazione superficiale delle acque sotterranee, hanno svolto un ruolo chiave nello sviluppo delle società; i primi pozzi vennero scavati in alcune zone dell'Asia, del Medio Oriente e dell'Etiopia, e arrivavano fino a 50 metri di profondità.

Durante il XX secolo, si è osservato un vero e proprio proliferare di pozzi per l'approvvigionamento idrico urbano. I notevoli progressi nella perforazione dei pozzi, nella tecnologia di pompaggio, nell'accesso all'energia e nell'ambito delle conoscenze geologiche hanno consentito di costruire più rapidamente pozzi profondi e di estrarre maggiori quantitativi di acqua. Pozzi poco profondi, realizzati con una tecnologia economicamente accessibile e dotati di pompe a mano, sono stati ideati per l'approvvigionamento delle comunità nelle aree rurali. Le acque sotterranee sono diventate così una risorsa naturale fondamentale a sostegno del benessere umano e dello sviluppo economico, ma ancora poco compresa, sottovalutata, mal gestita e non adeguatamente protetta (IAH, 2015).

4.1.3 Dati sull'estrazione delle acque sotterranee

Si stima che i prelievi globali di acque sotterranee abbiano superato i 900 chilometri cubi all'anno nel 2010, con pozzi e sorgenti che fornivano circa il 36% dell'approvvigionamento di acqua potabile (Döll et al., 2012; Margat e Van der Gun, 2013). La dipendenza di numerose città dalle acque sotterranee sembra intensificarsi, tanto che si ritiene che quasi il 50% della popolazione urbana globale oggi sia rifornito da fonti di acque sotterranee (Foster et al., 2020a). Nel caso dell'Unione europea (UE) e degli Stati Uniti, le acque sotterranee forniscono l'approvvigionamento idrico pubblico rispettivamente a 310 e a 105 milioni di persone. Tuttavia, le statistiche nazionali complessive sul pompaggio delle acque sotterranee per gli insediamenti umani sono discordanti (tabella 4.1).

Il valore sociale delle acque sotterranee non deve essere misurato solo in base ai prelievi volumetrici. Questo perché l'uso delle acque sotterranee genera importanti vantaggi a livello economico e sanitario, nonché la possibilità di scalabilità in base alla domanda; inoltre, in caso di siccità garantisce un'elevata disponibilità della risorsa, generalmente di buona qualità e dunque da sottoporre a trattamenti minimi (IAH, 2015); infine, determina un notevole risparmio di tempo per donne e ragazze nei luoghi in cui queste sono responsabili della raccolta dell'acqua. Tuttavia, tassi molto elevati di crescita della popolazione urbana stanno generando una domanda senza precedenti di approvvigionamento idrico e servizi igienico-sanitari, il che costituisce una grande sfida nel contesto della pianificazione urbana.

¹ Il termine pozzo è qui usato genericamente per coprire tutte le forme di pozzo utilizzate per l'estrazione dell'acqua: scavato, perforato, tubolare, galleria e canale.

Tabella 4.1 Dati nazionali sull'estrazione delle acque sotterranee per l'approvvigionamento urbano

Paese	Popolazione (milioni)	Popolazione urbana (milioni)	Servizi di approvvigionamento idrico (Mm ³ /anno)	Servizi di approvvigionamento alimentati da acque sotterranee (Mm ³ /anno) e proporzione	Città selezionate con il maggior utilizzo di acque sotterranee
Brasile	209,3	178,2	16.740 **	3.164 (19%)	Natal, Ribeirão Preto, São Luís do Maranhão
Cile	16,4	14,7	1.267	498 (39%)	Santiago, Coquimbo, Concepción
Costa Rica	4,9	4,0	652	522 (80%)	San José, Puntarenas, Liberia
Messico	129,2	102,1	14.230 *	7.000 (49%)	Città del Messico, Mérida, San Luis Potosí, León
Paraguay	6,4	3,9	362 *	272 (75%)	Asunción, Villarica
Stati Uniti	324,5	270,7	58.390 *	21.001 (36%)	Miami, Tampa, Phoenix, Oklahoma
Costa d'Avorio	24,3	12,2	321 **	?	Abidjan, Bouake
Etiopia	105,0	21,3	810 *	?	Addis Abeba, Dire Dawa
Kenya	49,7	13,2	495 **	?	Mombasa, Nakuru
Senegal	15,9	7,4	98 *	?	Dakar, St. Louis
Tanzania	42,9	9,9	328 **	?	Dodoma, Arusha, Tanga
Zambia	17,1	7,3	290 **	60 (21%)	Lusaka, Kabwe
India	1.339,2	455,3	56.000 **	13.328 (24%)	Lucknow, Chennai, Chandigarh, Indore
Pakistan	197,0	70,9	9.650 **	2.934 (30%)	Islamabad, Lahore, Rawalpindi, Multan
Cina	1.409,5	817,5	79.400 *	7.861 (10%)	Tianjin, Pechino, Handan, Shenyang
Indonesia	964,0	145,2	23.800 **	21.420 (90%)	Giacarta, Semarang, Yogyakarta
Vietnam	95,5	33,4	1.206 *	555 (46%)	Ho Chi Minh, Da Nang, Hanoi
Bangladesh	164,7	59,3	3.600 **	2.603 (72%)	Dhaka, Khulna, Chattogram
Danimarca	5,8	5,1	230	230 (100%)	Copenaghen, Odense, Aarhus, Aalborg
Francia	67,0	53,9	1.774	1.064 (60%)	Parigi, Caen, Limoges, Le Mans, Poitiers
Germania	83,1	64,1	1.606	1.188 (74%)	Amburgo, Berlino, Monaco, Hannover
Ungheria	9,7	7,0	257	244 (95%)	Budapest, Miskolc
Italia	60,3	42,6	1.391	1.210 (87%)	Roma, Milano, Torino, Perugia
Paesi Bassi	17,4	15,8	489	298 (61%)	Utrecht, Eindhoven, L'Aja
Polonia	37,2	22,8	576	357 (62%)	Varsavia, Breslavia, Poznań, Cracovia
Regno Unito	66,8	55,5	3.558	1.245 (35%)	Portsmouth, Hull, Cambridge, Brighton

Nota: ** / * l'autoapprovvigionamento privato dalle acque sotterranee è un problema fondamentale o importante.

Fonte: basata in gran parte su dati UNICEF/OMS (2019) per il 2017, l'entità dell'estrazione delle acque sotterranee è spesso sottostimata e i dati sull'uso privato di pozzi *in-situ* non sono forniti.

4.2 Approvvigionamento idrico urbano

4.2

4.2.1 Sistemi pubblici

Le acque sotterranee presentano numerosi vantaggi come base per il potenziamento della fornitura idrica da parte dei servizi di pubblica utilità (tabella 4.2); grazie all'alta qualità che di solito presenta per sua natura, tale risorsa richiede solo una disinfezione precauzionale prima di essere immessa nei sistemi di distribuzione (riquadro 4.1).

I centri urbani in prossimità di acquiferi ad alto rendimento e/o circondati da essi di solito presentano livelli di servizio idrico pubblico migliori e prezzi dell'acqua inferiori, vista la possibilità di accrescere l'entità dell'approvvigionamento idrico in modo incrementale e a costi modesti in risposta all'aumento della domanda (IAH, 2015). Pertanto, la maggior parte degli insediamenti situati in contesti idrogeologici favorevoli sarà innanzitutto caratterizzata da una notevole dipendenza dalle acque sotterranee per il proprio approvvigionamento idrico (Figura 4.1), nonché da una sicurezza nella fornitura d'acqua considerevolmente superiore durante i periodi di siccità prolungata o in caso di inquinamento delle acque superficiali (Foster et al., 2018).

Tabella 4.2 Sintesi dei benefici delle fonti di acque sotterranee per le aziende idriche

Vantaggi delle acque sotterranee	Benefici derivanti dall'approvvigionamento idrico
<ul style="list-style-type: none"> Distribuzione diffusa, con accesso diretto in molti quartieri periferici. In genere, la qualità naturale è eccellente e richiede trattamenti minimi (eccetto in zone colpite da inquinamento antropogenico o contaminazione naturale – Foster et al., 2020b). 	<ul style="list-style-type: none"> L'utilizzo della risorsa, di solito, prevede un capitale ridotto e basse spese ricorrenti (eccetto in qualche contesto idrogeologico), che possono subentrare in caso di aumento della domanda.
<ul style="list-style-type: none"> Ampi bacini idrografici naturali che possono essere usati per lo stoccaggio di acqua a lungo termine. Protezione dalla variabilità delle precipitazioni a differenza di fonti idriche superficiali. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto livello di sicurezza idrica in caso di siccità e inquinamento dei fiumi.

Fonte: Foster et al. (2020a).

Riquadro 4.1 Un esempio di prelievo di acque sotterranee urbane gestito con successo ad Amburgo (Germania)

Amburgo ha una popolazione di circa 2,2 milioni di abitanti, rifornita da un servizio idrico di proprietà comunale. Nel 1964, dopo una lunga transizione, la città è passata dall'acqua di fiume filtrata a quella di falda per soddisfare le necessità di approvvigionamento idrico. Oggi, essa gestisce circa 470 pozzi che pompano mediamente 120 milioni di metri cubi all'anno da un acquifero alluvionale poco profondo e da una formazione più profonda. Nove delle relative aree di cattura hanno lo status legale di zone di protezione delle acque sotterranee, ma tre si trovano al di fuori della giurisdizione della città, e la loro protezione deve essere negoziata con le autorità vicine. In alcuni casi, sono sorti conflitti poiché l'acquifero poco profondo è esposto all'inquinamento agricolo e industriale, mentre quello più profondo è minacciato dalla salinizzazione dei diapiri salini adiacenti.

Il servizio idrico mantiene quindi una propria rete di circa 1.400 pozzi di monitoraggio, che forniscono un quadro completo e dinamico della qualità delle acque sotterranee. I dati sono archiviati in un sistema informativo digitale, che contiene anche informazioni sul livello delle acque sotterranee. In collaborazione con l'agenzia geologica governativa, è stato elaborato un modello numerico relativo alle acque sotterranee che copre 4.500 chilometri quadrati, comprende oltre 3.000 pozzi di produzione e prevede più di 7.000 prelievi per il monitoraggio. Tale modello viene utilizzato nel contesto dei processi decisionali riguardanti la gestione dei pozzi, le questioni legate ai diritti sull'acqua, la gestione dei prelievi di acque sotterranee per scopi industriali, la definizione delle aree di protezione di tali risorse e il monitoraggio di qualsiasi grave evento inquinante.

Fonte: Foster et al. (2020a).

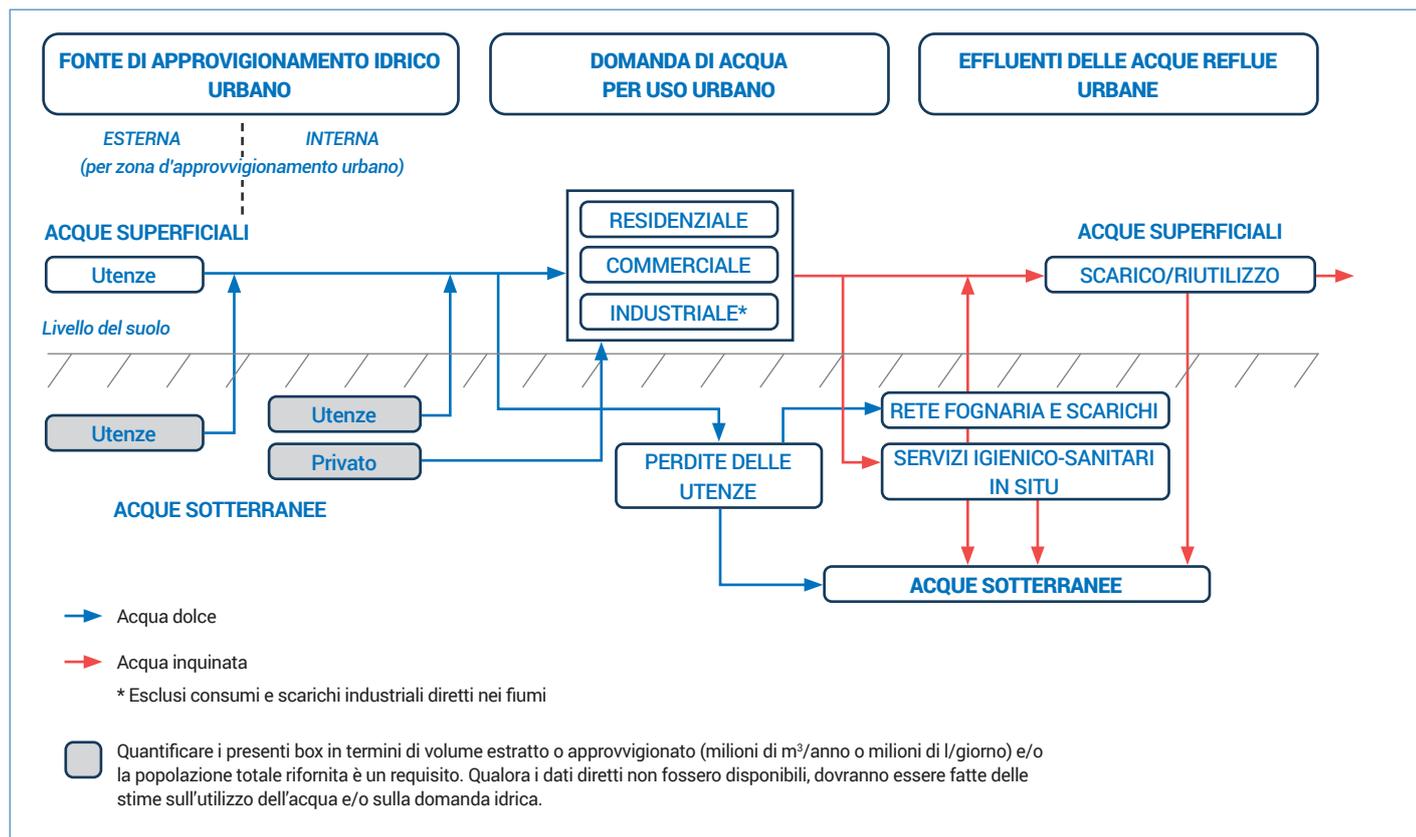


Le acque sotterranee presentano numerosi vantaggi come base per il potenziamento della fornitura idrica da parte dei servizi di pubblica utilità

Indirettamente, le acque sotterranee contribuiscono alla riduzione della povertà urbana consentendo ai servizi idrici di disporre di fonti a costi molto inferiori e stabilire costi di allacciamento più contenuti. Tuttavia, sono numerosi i poveri che vivono in insediamenti periurbani, spesso informali e privi di uno status legale; inoltre, le politiche di pianificazione urbanistica spesso non contemplano la realizzazione di infrastrutture pubbliche (servizi elettrici e idrici) in tali aree (IAH, 2015).

Guardando al futuro, la presenza diffusa di risorse idriche sotterranee consentirà un rapido sviluppo di pozzi di approvvigionamento come base di nuovi sistemi decentralizzati di fornitura di servizi idrici per i distretti urbani in rapida crescita con una popolazione compresa fra i 20.000 e i 50.000 abitanti (IAH, 2015). Tali sistemi potrebbero ridurre al minimo i costi delle infrastrutture, il consumo di energia e le perdite d'acqua, grazie a pozzi profondi e generalmente adatti a fornire acqua alla suddetta popolazione. Al fine di ridurre i carichi di contaminanti sotterranei derivanti dai servizi igienico-sanitari *in situ*, la costruzione dei pozzi dovrebbe essere combinata con la separazione dell'urina dai reflui e il suo recupero perché quest'ultima possa essere impiegata come fertilizzante, nonché con il recupero delle feci per produrre energia (vale a dire, le acque reflue dovrebbero essere valorizzate come risorsa). Inoltre, sarà necessario un ulteriore sforzo sul campo per controllare altre fonti di contaminazione delle falde acquifere urbane (come distributori di benzina, negozi di automobili su piccola scala, garage e lavanderie a secco).

Figura 4.1 Panoramica schematica delle fonti idriche urbane, del loro utilizzo e dell'interazione fra esse



Fonte: adattato da Foster e Hirata (2012, fig. 1, pag. 22).

Entro i confini delle città più grandi, spesso non c'è abbastanza acqua sotterranea disponibile per soddisfare la domanda di acqua in modo sostenibile (figura 4.2). Laddove nelle immediate vicinanze sono presenti acquiferi ad alto rendimento, la creazione di "aree di raccolta" è un'opzione interessante, se confrontata con l'alternativa di importare da lunghe distanze risorse idriche superficiali. L'area di cattura di questi pozzi dovrebbe essere protetta

Riquadro 4.2 Schema di uso combinato pianificato per la conservazione di una falda acquifera essenziale a Lima

Lima si estende attraverso gli *outwash fan* (conoide detritica di dilavamento glaciale) estremamente aridi dei fiumi Rímac e Chillón. La ricarica delle acque sotterranee deriva dall'infiltrazione dell'acqua proveniente dal letto del fiume (recentemente migliorata) e dai canali di irrigazione, dalle eccedenze di acqua dei terreni agricoli e destinati ad attività ricreative (in riduzione) e dalle perdite delle reti idriche e fognarie. Durante gli anni '60 e '80, la città è cresciuta rapidamente fino a superare gli otto milioni di abitanti, e la sua domanda di acqua è aumentata fino a superare i 2.000 milioni di litri al giorno nel 1997. L'acquedotto sul fiume Rímac è stato ampliato fino a una capacità di 860 milioni di litri al giorno, sebbene i livelli massimi di produzione non siano raggiungibili quando si verificano concentrazioni estreme di solidi sospesi o durante periodi di siccità. Dell'approvvigionamento idrico totale nel 1997, 1.050 milioni di litri al giorno provenivano dalle acque sotterranee (di cui 720 milioni da 380 pozzi di servizio) con un conseguente abbassamento della falda di 1-5 metri all'anno e conseguenti effetti collaterali costosi.

Sono stati condotti importanti studi per ottimizzare l'uso combinato attraverso la micromisurazione concertata dell'uso dell'acqua domestica per ridurre gli sprechi, la riduzione dell'estrazione di acque sotterranee in aree critiche definite, l'aumento dei trasferimenti di acque superficiali andine al fiume Rímac fino a 260 milioni di litri al giorno, il miglioramento della flessibilità nella distribuzione dell'acqua per consentire alla maggior parte degli utenti di essere riforniti da una delle due sorgenti e il miglioramento della ricarica del letto del fiume su 6 chilometri del Rímac. Gli accordi istituzionali hanno autorizzato l'ente per il servizio idrico ad agire per conto del governo. Il successo del sistema di uso combinato è testimoniato dal recupero di 5-30 metri di falda tra il 1997 e il 2003 (a seguito di un calo di 10-40 metri nei dieci anni precedenti), con una riduzione dei prelievi di acqua da 265 milioni di metri cubi all'anno nel 1997 a 135 milioni nel 2009, pur mantenendo la capacità per una maggiore produzione nel breve termine.

Fonte: adattato da Foster et al. (2010a, riquadro B, pag. 10).

Gli investimenti in pozzi privati sbloccano finanziamenti significativi per l'accesso all'approvvigionamento idrico, e le prove documentate e il riconoscimento di questo fenomeno stanno crescendo (Foster et al., 2010b; Grönwall, 2011; Butterworth et al., 2013; Sutton, 2017, Grönwall e Danert, 2020). Tuttavia, l'uso privato delle acque sotterranee tende a non essere registrato nelle statistiche ufficiali relative all'approvvigionamento idrico nazionale (Danert e Healy, 2021), oppure il fenomeno non è affatto riconosciuto dal governo (IAH, 2015).

L'uso di pozzi privati per l'autoapprovvigionamento idrico urbano ha conosciuto un incremento senza precedenti negli ultimi anni, soprattutto in Asia meridionale, America Latina e Africa subsahariana (Foster et al., 2010b; Grönwall et al., 2010; Alam e Foster, 2019). Questa pratica viene inizialmente adottata come strategia per far fronte a una fornitura idrica irregolare e inadeguata proveniente dalle condutture, e poi continua a essere mantenuta come strategia di riduzione dei costi per evitare di pagare tariffe più elevate. Si tratta di un modo collaudato per sbloccare gli investimenti destinati a garantire l'accesso all'acqua alle famiglie.

I costi di costruzione di pozzi privati nella maggior parte dei contesti idrogeologici dovrebbero essere compresi tra 2.000 e 20.000 dollari, ma sono notevolmente più elevati (30.000-45.000 dollari) laddove si presenti la necessità di scavare pozzi più profondi (di 200-300 metri). In quest'ultimo caso, la proprietà privata dei pozzi rimarrà appannaggio dei ceti più ricchi, e non è una soluzione che andrà a favore anche di chi è meno abbiente. Sebbene questa pratica riduca la pressione sulle aziende idriche, può avere anche gravi impatti sui flussi di cassa dei

Riquadro 4.3 Le acque sotterranee aiutano a sopravvivere alle gravi crisi di approvvigionamento idrico a Chennai (India)

Chennai ha una popolazione di 8,6 milioni di abitanti e ha dovuto affrontare una grave crisi di approvvigionamento idrico nel periodo 2017-2019, quando i suoi principali bacini idrici si sono quasi prosciugati a causa di una persistente siccità. Nel giugno del 2019, le riserve combinate della città si erano ridotte allo 0,1% della capacità di stoccaggio totale, e l'azienda idrica poteva fornire solo 520 milioni di litri al giorno, attingendo principalmente alle acque sotterranee locali, a fronte di una domanda totale di 830 milioni di litri al giorno. La città dispone di più di 420.000 pozzi privati, ma la falda si è abbassata in modo significativo su vaste aree, causando l'intrusione di acqua salata dovuta al sovrasfruttamento prolungato della falda acquifera e alla ricarica limitata fornita dai recenti monsoni, di portata inferiore alla norma.

Queste pressioni hanno costretto Chennai a dispiegare circa 5.000 autocisterne con una capacità di 9.000 litri ciascuna, effettuando 5-6 viaggi al giorno per trasportare acqua sotterranea dalle aree rurali circostanti all'azienda idrica, per un totale di 200-300 milioni di litri al giorno. Tuttavia, un'inadeguata gestione delle risorse idriche locali ha alimentato i conflitti tra la popolazioni urbana e quella rurale.

Fonte: Alam e Foster (2019).

● ● ●
L'uso di pozzi privati per l'autoapprovvigionamento idrico urbano ha conosciuto un incremento senza precedenti negli ultimi anni, soprattutto in Asia meridionale, America Latina e Africa subsahariana

servizi pubblici e sui cicli di investimento (Foster et al., 2018). Esiste un'evidente necessità di elaborare una qualche forma di regolamentazione dell'autoapprovvigionamento idrico urbano, e senza un monitoraggio regolare della qualità ci saranno sempre dei rischi; ciononostante, gli utenti sembrano essere soddisfatti delle loro forniture.

Studi condotti sull'autoapprovvigionamento urbano alimentato dalle acque sotterranee hanno rivelato che:

- in India, circa 340 milioni di persone dipendono principalmente dall'autoapprovvigionamento alimentato da acque sotterranee (Sutton e Butterworth, 2021); inoltre, molte città di medie dimensioni sono fortemente dipendenti dall'autoapprovvigionamento da queste fonti per uso domestico, che può ammontare al 40-60% della fornitura idrica complessiva (Alam e Foster, 2019);
- l'autoapprovvigionamento per uso domestico alimentato da acque sotterranee in Brasile ammonta a circa il 35% delle forniture idriche totali a San Paolo in condizioni di siccità (nonostante questa pratica non sia riconosciuta dalle autorità e la città non disponga di un grande acquifero); a livello nazionale, ci sono almeno 2,5 milioni di pozzi privati che rappresentano sei o sette volte l'investimento annuale nell'approvvigionamento idrico da parte delle agenzie governative (Foster et al., 2020a).

Il caso della Nigeria è particolarmente significativo, vista la sua popolazione urbana molto numerosa e in rapida crescita e gli alti livelli di autoapprovvigionamento del paese. Secondo le stime, nel 2009 su una popolazione urbana totale di 75-80 milioni di persone, circa 38-43 milioni sarebbero stati dipendenti da pozzi privati, nonostante fosse stata ampliata anche la copertura dell'approvvigionamento idrico pubblico. Nella sola città di Lagos, circa il 20% dei 18-20 milioni di persone residenti in aree urbane è rifornito da reti idriche, di cui circa il 50% possiede pozzi privati e un altro 30% ottiene acqua da queste fonti (Healy et al., 2017).

Gli insediamenti informali e le comunità periurbane più povere possono accedere alle acque sotterranee solo nei casi in cui:

- le organizzazioni basate sulla comunità utilizzino il capitale sociale e le relazioni politiche per assicurarsi finanziamenti per pozzi non allacciati alla rete idrica, realizzati grazie a programmi governativi;
- le organizzazioni non governative installino pozzi al di fuori della rete di distribuzione presso i punti di raccolta;
- dei pozzi possano essere scavati a basso costo per attingere da falde acquifere eccezionalmente poco profonde, con lo svantaggio che tali pozzi sono molto più vulnerabili all'inquinamento fecale e chimico (Grönwall, 2016; Lapworth et al., 2017).

Inoltre, meritano un'attenzione particolare gli insediamenti sia temporanei che permanenti di persone marginalizzate e sfollate. Tali insediamenti presentano spesso un'elevata densità di popolazione, ma vengono classificati in una categoria intermedia tra insediamenti urbani e rurali. In questi casi, risulta essenziale costruire pozzi adeguatamente progettati. Buoni esempi in questo senso sono forniti dalle città turche che accolgono un gran numero di rifugiati siriani e dai campi profughi Rohingya in Bangladesh. Queste aree di insediamento attingono acqua da pozzi profondi costruiti da organizzazioni umanitarie e di soccorso (riquadro 4.4).

4.2.3 Fattori e tendenze dell'uso delle acque sotterranee in ambito urbano

I fattori odierni che influiscono sull'uso delle acque sotterranee urbane sono i tassi di urbanizzazione in crescita, l'aumento del consumo pro capite di acqua, le temperature più elevate, la scarsa ricarica dei fiumi causata dall'inquinamento delle acque e dai cambiamenti climatici, e infine il costo relativamente basso della costruzione dei pozzi e della loro messa in funzione (IAH, 2015). Un altro fenomeno da citare è il ricorso ad autocisterne private per rifornire le aree urbane di acqua proveniente da pozzi ubicati principalmente nelle aree rurali limitrofe.

Nell'Africa tropicale, il tasso di miglioramento dell'approvvigionamento idrico urbano appare in calo, ed è effettivamente diminuito tra il 1990 e il 2015 (Banerjee et al., 2008). La popolazione urbana che rimane "sprovvista" di un approvvigionamento idrico migliorato può essere suddivisa in questo modo (Oluwasanya et al., 2011):

- un 70-80% che vive fisicamente vicino all'infrastruttura esistente, ma non vuole o non può essere allacciato ad essa, a causa dei costi proibitivi e/o della precarietà dell'occupazione della propria abitazione;
- un 20-30% che risiede al di fuori dell'area in cui è ubicata l'infrastruttura esistente, dove i costi di capitale per l'ampliamento della rete idrica sono troppo elevati, data la scarsa prospettiva di recupero di tali costi, a meno che non sia garantita una fornitura sovvenzionata;
- il resto della popolazione, per la quale la continuità e affidabilità delle forniture da parte delle aziende idriche è così scarsa che deve ricorrere regolarmente a soluzioni alternative (come acqua in bottiglia particolarmente costosa o autocisterne poco affidabili).

4.3 **Approvvigionamento** **idrico rurale**

4.3.1 Miglioramento delle fonti d'acqua nei villaggi

La natura delle acque sotterranee le rende particolarmente adatte all'approvvigionamento idrico diffuso per le popolazioni che vivono nelle aree rurali, e spesso è il modo più conveniente per garantire una fornitura idrica sicura ai villaggi. Ciò vale in particolare per l'Africa subsahariana e per l'Asia meridionale, dove la popolazione rurale è numerosa ma dispersa su vasti territori. Le acque sotterranee continueranno ad essere la principale fonte di acqua per uso domestico per la popolazione rurale nei paesi in via di sviluppo (Foster et al., 2008). I pozzi comunitari dotati di pompa manuale hanno cominciato ad essere usati negli anni '80, durante il Decennio internazionale dell'acqua potabile e dei servizi igienico-sanitari delle Nazioni Unite, e hanno determinato un costante ampliamento dell'accesso all'acqua sicura per le popolazioni rurali nei paesi a basso reddito (Arlosoroff et al., 1987).

Riquadro 4.4 Pozzi profondi che forniscono acqua pulita ai rifugiati Rohingya in Bangladesh

Negli ultimi anni, circa un milione di rifugiati Rohingya sono emigrati in un insediamento vicino a Cox's Bazaar, appena a nord del confine tra Myanmar e Bangladesh. Nonostante le abbondanti precipitazioni locali, è difficile fornire acqua pulita alle persone sfollate, poiché le falde acquifere poco profonde dell'area sono contaminate da escrementi umani. La sfida è stata superata perforando un pozzo d'acqua profondo che attinge all'acquifero di arenaria di Tipam a una profondità di 100-300 metri. L'energia per pompare l'acqua è generata da 187 pannelli solari. Dopo una clorazione preventiva, l'acqua viene stoccata in sei cisterne da 95.000 litri ciascuna, e distribuita agli abitanti attraverso un sistema di distribuzione a gravità.

Fonte: IOM (2019).

I volumi d'acqua necessari per soddisfare il fabbisogno idrico dei villaggi rurali non sono consistenti, e dunque possono essere prontamente forniti attraverso pozzi di piccolo diametro, pozzi scavati o talvolta sorgenti, estraendo l'acqua tramite pompe a mano o piccole apparecchiature di pompaggio motorizzate di bassa capacità (0,2-1,0 litri al secondo). Di norma, tali forniture idriche non vengono distribuite attraverso reti allacciate alle abitazioni; nonostante questo, fra le persone si registra una tendenza diffusa a voler perforare e far funzionare pozzi privati in prossimità delle proprie case. Con la giusta esperienza, quantitativi non indifferenti di acqua pompata manualmente possono essere estratti dalla maggior parte dei tipi di roccia, ma la distribuzione di forniture idriche attraverso apposite reti può essere più difficile da progettare nel contesto dei grandi villaggi (>1,0 litri al secondo).

La sfera d'uso delle acque sotterranee comprende sia le cosiddette "fonti migliorate" sicure che rispettano gli standard igienico-sanitari, sia un gran numero di fonti non migliorate (tabella 4.3), la cui qualità microbiologica è altamente compromessa dall'infiltrazione diretta di acque superficiali inquinate. La percentuale di fonti migliorate è in costante aumento, grazie in gran parte all'applicazione delle linee guida offerte attraverso il Rural Water Supply Network².

Secondo un recente studio effettuato in Etiopia, Malawi e Uganda, oltre il 90% delle riserve di acque sotterranee ubicate nelle zone rurali presenterebbe delle caratteristiche chimico-fisiche tali da rendere questa risorsa idonea all'uso potabile, sebbene vi siano particolari aree geologiche in cui gli elevati livelli di arsenico e fluoruro rappresentano un pericolo. Uno dei principali vantaggi delle acque sotterranee sta nella loro resilienza alle variazioni del clima. Le acque sotterranee non dipendono solamente dalle precipitazioni degli ultimi 1-2 anni, ma anche da quelle che si registrano nel corso di anni e decenni. Una ricerca sulla qualità delle forniture idriche alimentate da acque sotterranee nelle aree rurali dell'Etiopia durante la recente siccità del 2015-2016 ha rilevato che i pozzi dotati di pompe manuali sono stati la principale fonte di approvvigionamento idrico in tali contesti (MacDonald et al., 2019).

4.3.2 Statistiche sull'uso delle acque sotterranee in ambito rurale

Le statistiche sull'uso delle acque sotterranee in ambito rurale sono in gran parte derivate da stime sulla popolazione che risiede nelle campagne e sull'uso domestico pro capite dell'acqua in relazione alle forniture idriche non provenienti dalla rete. Mentre nell'Europa settentrionale i servizi idrici garantiscono forniture in rete a molti villaggi, tali servizi non esistono nelle aree rurali della maggior parte dei paesi del mondo, per cui in questi contesti le acque sotterranee svolgono un ruolo chiave nel soddisfare la domanda di acqua in modo efficace.

² <https://www.rural-water-supply.net/en>

Tabella 4.3

Scala relativa al servizio di fornitura di acqua potabile basato sull'utilizzo di acque sotterranee

Categoria	Definizione	Esempi di fonti
Fonti private migliorate	<ul style="list-style-type: none"> Acqua potabile immediatamente disponibile da fonti idriche migliorate Fonti libere da fanghi fecali e contaminazione di sostanze chimiche 	<ul style="list-style-type: none"> Pozzo perforato privato in buone condizioni igienico-sanitarie nelle abitazioni Pozzo perforato protetto, che fornisce acqua attraverso reti idriche/tubature
Fonte comunitaria di base	<ul style="list-style-type: none"> Acqua potabile comunitaria da fonti idriche migliorate Tempo di raccolta inferiore a 30 minuti (andata e ritorno), compreso il tempo impiegato per fare la fila 	<ul style="list-style-type: none"> Pozzo perforato o sorgente in buone condizioni igienico-sanitarie nell'area circostante le abitazioni
Fonti limitate	<ul style="list-style-type: none"> Acqua potabile da fonti idriche migliorate Tempo di raccolta superiore a 30 minuti (andata e ritorno), compreso il tempo impiegato per fare la fila 	<ul style="list-style-type: none"> Pozzo perforato o sorgente distanti e intasati in buone condizioni igienico-sanitarie
Fonti non migliorate	<ul style="list-style-type: none"> Acqua potabile da fonti non protette 	<ul style="list-style-type: none"> Pozzo scavato o sorgente non protetti

Fonte: sulla base di OMS/UNICEF (2017).



In buona parte del mondo, il ricorso alle acque sotterranee costituisce l'unica modalità possibile ed economicamente sostenibile per consentire l'accesso alle risorse idriche essenziali alle popolazioni rurali che ancora ne sono sprovviste

Anche i pozzi privati svolgono un ruolo importante nel garantire la disponibilità di questa risorsa per uso domestico in tutto il mondo (Healy et al., 2020). Ad esempio, in Mali ci sono oltre 170.000 pozzi familiari tradizionali privati, e si stima che in Etiopia, Malawi e Zambia più dell'85% delle famiglie faccia affidamento su pozzi privati per l'approvvigionamento di acqua potabile (Sutton e Butterworth, 2021).

4.3.3 Sfide future

L'approvvigionamento idrico delle comunità rurali alimentato da acque sotterranee presenta comunque delle sfide. Ricerche recenti condotte in Etiopia, Malawi e Uganda hanno dimostrato che meno del 50% dei pozzi funziona in modo regolare, e che circa il 25% di essi è contaminato da agenti patogeni (MacDonald et al., 2019). Le ragioni sono complesse e hanno a che fare con questioni di ingegneria e progettazione, nonché con l'inefficienza dei sistemi di manutenzione e gestione a lungo termine.

Le soluzioni proposte prevedono l'assegnazione di priorità alla manutenzione dei servizi esistenti, il miglioramento della qualità dei materiali e l'ottimizzazione delle fasi di progettazione e costruzione attraverso un'opera di sensibilizzazione e sviluppo delle competenze. Si stima che la contaminazione persistente delle acque sotterranee in ambito rurale causata da agenti patogeni interessi circa il 30% degli impianti totali. Sebbene il trattamento di disinfezione sia possibile, raramente è fattibile nel contesto dei villaggi. La coesistenza di servizi igienico-sanitari *in loco* e acque sotterranee per l'approvvigionamento idrico suscita una seria preoccupazione per le risorse poco profonde, in particolare nei villaggi più densamente popolati. L'inadeguatezza dei pozzi a livello strutturale è un problema diffuso, che determina l'infiltrazione diretta di acque superficiali contaminate (Danert et al., 2020).

In buona parte del mondo, il ricorso alle acque sotterranee costituisce l'unica modalità possibile ed economicamente sostenibile per consentire l'accesso alle risorse idriche essenziali alle popolazioni rurali che ancora ne sono sprovviste. Tuttavia, l'11% della popolazione mondiale non ha accesso ai servizi idrici di base (UNICEF/OMS, 2019); dunque, fornire a queste persone servizi idrici sostenibili, alimentati dalle acque sotterranee, è una delle principali priorità del momento. Il pozzo poco profondo dotato di una piccola pompa

a mano svolge ancora un ruolo importante nel contesto di un rapido potenziamento dei servizi idrici dei villaggi; pertanto, è necessario dedicare una maggiore attenzione alla manutenzione di tali strutture. L'obiettivo finale è garantire alle famiglie l'accesso all'acqua, che vedrebbe un graduale passaggio dalle pompe manuali di comunità alle reti idriche; ancora una volta, però, tali reti sarebbero alimentate principalmente da acque sotterranee. Potenzialmente, l'uso dell'energia solare per il pompaggio ha molteplici vantaggi in termini di sicurezza idrica e zero emissioni nette. Ma questo cambiamento presuppone che i pozzi siano in grado di sopperire in modo sostenibile al fabbisogno idrico di colture ad alto rendimento (>100 metri cubi al giorno), il che richiederà investimenti sostanziali nello sfruttamento delle conoscenze in materia di idrogeologia al fine di definire l'ubicazione appropriata del pozzo.

4.4 Preoccupazioni per l'ambiente

4.4.1 Minacce alla sostenibilità

Le principali sfide relative all'uso sostenibile delle acque sotterranee per l'approvvigionamento idrico urbano sono:

- vincoli dovuti alle risorse limitate nel caso delle città più grandi;
- frequente degrado qualitativo causato da: servizi igienici *in situ* inadeguati, stoccaggio con perdite di idrocarburi, smaltimento casuale di effluenti industriali e municipali, e discariche di rifiuti solidi non soggette ad alcun controllo (IAH, 2015; Lapworth et al., 2017);
- tendenza a sfruttare eccessivamente le risorse idriche sotterranee all'interno delle aree urbane, dove le aziende idriche effettuano ingenti prelievi; a questa pratica si può accompagnare l'intrusione salina, nonché la subsidenza che ha un impatto negativo sulle infrastrutture urbane;
- presenza di livelli elevati di contaminanti naturali (ad esempio, arsenico e fluoruro) in alcune acque sotterranee a livello locale, soprattutto in Asia meridionale e Africa orientale (Foster et al., 2020b).

Gli insediamenti urbani si sono spesso sviluppati sulle pianure costiere e si prevede che, a livello globale, la popolazione di tali zone crescerà fino a un miliardo nei prossimi decenni. Nelle aree costiere, l'eccessivo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee espone gli acquiferi a pericolose intrusioni di acqua salina su larga scala, un fenomeno che sarà ulteriormente aggravato dall'innalzamento del livello del mare indotto dai cambiamenti climatici.

I problemi ambientali legati allo sfruttamento delle acque sotterranee possono essere suddivisi in diverse categorie, relative a:

- subsidenza dovuta alla compattazione di acquitardi e materiali degli acquiferi, che provocano gravi cedimenti delle fondamenta degli edifici e accrescono il rischio di inondazione delle città costiere, a causa del sovrasfruttamento e dell'abbassamento della falda acquifera nella zona urbana (come nel caso di Bangkok e Pechino);
- allagamento dovuto alle acque sotterranee, che provocano inondazioni o sollevamenti di strutture interrate (grotte profonde, gallerie di trasporto, ecc.), derivanti dal riempimento della falda a seguito della cessazione del pompaggio delle acque sotterranee dagli acquiferi urbani.

Altre questioni specifiche, come la conservazione delle fondamenta che si ergono su pali di legno, richiedono una politica che miri a mantenere il livello piezometrico degli acquiferi urbani poco profondi ad una quota determinata e specifica.

L'aumento dell'intensità delle precipitazioni derivante dai cambiamenti climatici in alcune aree ha avuto come risultato tassi eccezionali di infiltrazione delle acque sotterranee, nonché



I problemi di contaminazione più gravi sorgono nelle aree urbane con una bassa copertura di reti fognarie, in cui buona parte dei reflui fecali domestici viene scaricata in latrine a fossa

acquiferi arroccati, dando luogo a inondazioni sotterranee in aree che in precedenza non erano state interessate da questo problema.

Ci sono, naturalmente, ulteriori preoccupazioni per l'ambiente derivanti dal prelievo intensivo di acque sotterranee per vari scopi. Tra queste, la principale è la riduzione del deflusso nei fiumi, che ne alimenta il flusso di base, nonché nelle zone umide da essi dipendenti.

4.4.2 Questioni relative ai servizi igienico-sanitari e al drenaggio in ambito urbano

L'urbanizzazione modifica notevolmente il "ciclo delle acque sotterranee", generando alcuni vantaggi e numerosi pericoli. I servizi igienico-sanitari e i sistemi di drenaggio urbani esercitano una grande influenza sui tassi di ricarica e sulla qualità delle acque sotterranee.

È necessaria un'attenta valutazione della sostenibilità delle risorse idriche sotterranee e della loro vulnerabilità all'inquinamento quando si elaborano progetti in merito a servizi igienico-sanitari e drenaggio in ambito urbano. Laddove si fa ricorso alle falde acquifere non confinate per l'approvvigionamento idrico urbano, sarà inoltre importante orientare il drenaggio delle acque piovane concentrate su tetti e aree pavimentate verso aree sotterranee, in modo da massimizzare la ricarica degli acquiferi. Tuttavia, il passaggio dai servizi igienico-sanitari *in situ* ai sistemi fognari in aree urbane già consolidate non è completamente realizzabile nelle città in via di sviluppo, perché la densità della popolazione limita lo spazio disponibile e il costo è spesso proibitivo. Dati questi vincoli, i servizi igienico-sanitari *in situ* costituiscono sempre più spesso la norma, e la loro progettazione e manutenzione sono state migliorate per garantire una gestione e uno smaltimento sicuri dei fanghi fecali (Peal et al., 2020).

L'impatto di servizi igienico-sanitari inadeguati o inadatti sulle acque sotterranee varia ampiamente in base alla vulnerabilità all'inquinamento dei diversi acquiferi e ai tipi di fanghi fecali e rifiuti solidi che possono contaminarli. I problemi più gravi sorgono nelle aree urbane con una bassa copertura di reti fognarie, in cui buona parte dei reflui fecali domestici viene scaricata in latrine a fossa. Di norma ciò va a scapito dei soggetti più emarginati (donne e bambine risultano di gran lunga più a rischio di contrarre malattie causate da agenti patogeni e tossine come conseguenza dell'esposizione alle acque reflue). Nelle città dei paesi in via di

Riquadro 4.5 Grande dipendenza dalle acque sotterranee ma con rischi significativi a Lusaka

Lusaka è cresciuta rapidamente, passando da 500.000 abitanti nel 1978 a 2,8 milioni nel 2018. Da tempo dipende dalle falde acquifere locali per il suo approvvigionamento idrico. Nel 2018, il servizio idrico ha gestito 228 pozzi per fornire circa 140 milioni di litri al giorno, con un impianto di trattamento del fiume che ha provveduto la popolazione di ulteriori 80 milioni di litri al giorno. I servizi idrici sono ancora caratterizzati da elevate perdite di acqua e da una scarsa riscossione delle entrate, ma è stata presa una "iniziativa a favore dei poveri" perforando pozzi autonomi per rifornire chioschi d'acqua a un prezzo agevolato di 0,25 dollari al metro cubo (40-70% del prezzo normale).

Inoltre, ci sono migliaia di pozzi privati da cui in totale si estraggono fino a 300 milioni di litri al giorno. Nelle aree periurbane a basso reddito, la maggior parte delle famiglie fa ancora affidamento su pozzi poco profondi dove la falda acquifera arriva a meno di 3 metri, ma la formazione calcarea dolomitica da cui attinge (sebbene sia ad alto rendimento) è molto vulnerabile all'inquinamento delle acque reflue urbane e degli scarichi industriali. A proposito dei servizi igienico-sanitari, le latrine a fossa sono la soluzione più diffusa e, date le condizioni del terreno, costituiscono un serio pericolo per la qualità delle acque sotterranee e causano frequenti epidemie di colera. Sono in corso alcuni progetti su larga scala per estendere la rete fognaria principale e la capacità di trattamento delle acque reflue, ma negli insediamenti periurbani informali la loro applicazione risulta difficile e costosa.

Fonte: adattato da Foster et al. (2020c, riquadro 1, pag. 126).

sviluppo e nei più grandi insediamenti informali, la maggior parte della popolazione dispone di servizi igienico-sanitari *in loco* (fosse settiche, vari tipi di latrine e pozzi neri, e non mancano casi di defecazione all'aperto), il che comporterà un significativo inquinamento degli acquiferi poco profondi a causa di nitrati, prodotti chimici di comunità e prodotti farmaceutici. Le falde acquifere più vulnerabili saranno interessate anche dall'inquinamento derivante da organismi patogeni, un fenomeno ben documentato nel caso di alcune città (riquadro 4.5).

In quelle località del mondo in via di sviluppo in cui la copertura della rete fognaria principale costituisce il fulcro delle infrastrutture igienico-sanitarie, le disposizioni per lo smaltimento e il riutilizzo delle acque reflue rimangono ampiamente inadeguate, con rischi di inquinamento significativi per gli acquiferi alluvionali periurbani. È dunque di fondamentale importanza evitare l'irrigazione agricola o di servizio con acque reflue nelle aree di cattura dei pozzi pubblici, a meno che non siano sottoposte a un trattamento terziario.

Laddove lo smaltimento dei rifiuti solidi avviene tramite le discariche, e soprattutto dove queste sono progettate e gestite male, il carico di inquinamento delle acque sotterranee su scala locale sarà più vario e potenzialmente più tossico, se le discariche in questione non hanno rivestimenti impermeabili e gli effluenti non vengono gestiti in modo adeguato. Mentre a livello locale si possono osservare tipologie più gravi di inquinamento delle acque sotterranee a causa della gestione inadeguata delle acque reflue industriali, l'inquinamento derivante dal settore domestico e municipale rappresenta una minaccia molto più diffusa in quei contesti in cui predominano i servizi igienico-sanitari *in situ* e le discariche di rifiuti solidi.

4.4.3 Consumo di energia relativo alle acque sotterranee

L'impiego di pompe motorizzate per pozzi comporta un consumo energetico significativo e anche i costi di pompaggio iniziano a crescere nel caso di acquiferi sovrasfruttati, che vedono un continuo abbassamento della falda. Tuttavia, il consumo di energia delle pompe per pozzi è ancora modesto rispetto ai quantitativi di energia necessari al funzionamento di complessi impianti di trattamento delle acque e al trasferimento a lunga distanza delle risorse idriche superficiali. Pertanto, a condizione che l'inquinamento delle acque sotterranee da nitrati, solventi e pesticidi possa essere ridotto al minimo, il fabbisogno energetico totale per lo sfruttamento delle fonti e la distribuzione delle acque sotterranee è molto inferiore a quello relativo alle risorse idriche superficiali (tranne dove queste ultime sono alimentate per gravità).

Laddove l'elettrificazione è diffusa, la fonte di energia più comune per il pompaggio delle acque sotterranee è l'elettricità di rete, ma nell'Africa subsahariana e in alcune altre regioni c'è ancora una forte dipendenza dalle pompe con motore diesel o dalle pompe manuali. Negli ultimi anni si è assistito a un notevole aumento dell'uso dei pannelli solari come fonte di energia per il pompaggio delle acque sotterranee, ed è probabile che la situazione non cambi in futuro.

Di norma, il costo dell'energia per la fornitura di acque sotterranee in ambito urbano viene riacquisito per mezzo delle tariffe idriche, comunemente con un sussidio per i volumi sociali minimi recuperati attraverso tariffe più elevate per volumi maggiori (vedere WWAP, 2019, capitolo 5).

4.5 Ruolo delle parti interessate

Diverse parti interessate svolgono un ruolo importante nel processo di estrazione delle acque sotterranee per l'approvvigionamento idrico degli insediamenti umani. Queste vanno dalle agenzie nazionali responsabili delle risorse idriche sotterranee e dell'approvvigionamento idrico alle relative municipalità locali, e persino ai singoli proprietari di pozzi.

Le agenzie nazionali hanno la responsabilità di garantire:

- la regolamentazione di base in materia di estrazione delle acque sotterranee;
- un adeguato coordinamento in relazione alle acque sotterranee tra gli attori nazionali, le autorità di bacino, le organizzazioni locali di utenti delle suddette risorse e le organizzazioni umanitarie e di soccorso, a seconda dei casi;
- dei meccanismi efficaci per il monitoraggio delle acque sotterranee e l'applicazione delle relative normative;
- il coordinamento orizzontale con gli altri dipartimenti che operano nel settore delle acque sotterranee;
- il supporto per accordi operativi relativi agli acquiferi transfrontalieri.

Le municipalità locali dovranno:

- assicurarsi che il sistema locale di autorizzazioni relative alle risorse idriche sia funzionante;
- sottolineare la necessità di prestare attenzione all'attività e alla manutenzione dei pozzi;
- coordinare la gestione dei rifiuti solidi e delle acque reflue per proteggere le acque sotterranee;
- consultare e supportare i gruppi locali che si occupano di servizi igienico-sanitari e gestione dei rifiuti;
- comunicare agli agricoltori la necessità di prevenire l'inquinamento delle acque sotterranee;
- incoraggiare gli istituti di istruzione e formazione professionale (compresi i gruppi di giovani) a includere i temi dell'approvvigionamento idrico e della gestione delle acque sotterranee nei loro programmi di studio.

4.6 Osservazioni conclusive



È assolutamente necessario considerare sempre gli studi condotti sistematicamente sulle acque sotterranee urbane nel contesto della pianificazione urbana su scala dettagliata

1. Le acque sotterranee svolgono chiaramente un ruolo importante nell'approvvigionamento idrico urbano, nonché un ruolo fondamentale nell'approvvigionamento idrico dei villaggi rurali e degli insediamenti di sfollati in tutto il mondo, ma alcuni fattori tendono a rendere difficile definire con precisione la reale portata di questo ruolo. Le ragioni includono l'attuale incapacità di differenziare chiaramente i tipi di fonti di approvvigionamento idrico nelle banche dati nazionali e internazionali, e il fatto che l'attività di estrazione dell'acqua da pozzi privati spesso rimane non regolamentata o illegale, per cui non viene registrata nelle banche dati pubbliche.
2. È assolutamente necessario considerare sempre gli studi condotti sistematicamente sulle acque sotterranee urbane nel contesto della pianificazione urbana su scala dettagliata, per mitigare conflitti inutili tra l'uso pubblico e privato di questa risorsa, per garantire soluzioni valide al problema dell'approvvigionamento idrico degli insediamenti di sfollati, e per evitare problemi ambientali e sociali imprevedibili e costosi legati alle forniture idriche alimentate dalle acque sotterranee.
3. I servizi idrici devono attivarsi molto di più al fine di proteggere i pozzi o le sorgenti rilevanti di cui dispongono attraverso la promozione di restrizioni sull'uso del suolo (su colture agricole e sviluppo edilizio) nelle zone di cattura delle acque sotterranee, nell'interesse della salvaguardia della salute pubblica e della riduzione del costo dell'approvvigionamento idrico.
4. Di particolare interesse in relazione alla sostenibilità e al costo delle acque sotterranee per l'approvvigionamento idrico umano sono gli effetti dello sfruttamento eccessivo di tali risorse per l'agricoltura irrigua e l'inquinamento delle stesse causato

dall'agricoltura e dall'industria (vedere capitoli 3 e 5). Di pari importanza sono gli effetti dell'inquinamento dovuto a servizi igienico-sanitari inadeguati o inadatti che interessano le acque sotterranee, nonché i rischi di contaminazione causati da una cattiva progettazione dei pozzi e/o da una realizzazione non idonea degli stessi.

5. Vi è inoltre l'esigenza impellente di promuovere la piena interazione delle principali parti interessate in relazione alle acque sotterranee e al monitoraggio delle stesse: servizi idrici, agenzie ambientali, autorità municipali e organizzazioni locali di utenti delle acque sotterranee. Le banche dati risultanti da questa attività di monitoraggio congiunto dovrebbero essere accessibili a tutti. Esiste una necessità parallela di istituire quadri stabili di collaborazione a lungo termine tra le aziende idriche urbane e i centri di ricerca accademici locali per una maggiore conoscenza delle risorse idriche sotterranee.

Capitolo 5

Acque sotterranee e settore industriale

UNIDO

Helmut Krist e John Payne

Con il contributo di Christian Susan (UNIDO), Cate Lamb e Laureen Missaire (CDP)



5.1 Contesto

Il settore industriale e quello energetico sono generalmente ben consapevoli di ciò che li circonda a livello del suolo e sopra di esso. Elementi come fiumi, laghi e variabilità climatica sono percepibili, così come i rischi che possono presentare per la redditività delle aziende. Eppure la falda acquifera che si trova sotto i corpi idrici è spesso, letteralmente, dimenticata. Ciò è sorprendente, poiché i suddetti settori spesso fanno affidamento sull'autoapprovvigionamento che in molte località è alimentato da acque sotterranee. Queste ultime sono in grado di fornire una risorsa molto utile e spesso sottoutilizzata per l'industria, ma devono essere gestite in modo sostenibile di comune accordo con le altre parti interessate. Si tratta infatti di una risorsa fondamentale per molti settori, e in quanto tale contribuisce all'aumento dell'occupazione e alla crescita economica.

Ad attingere alle acque sotterranee sono i settori manifatturiero, minerario, petrolifero e del gas, dell'energia elettrica, ingegneristico ed edilizio. I settori che presentano una maggiore dipendenza dalle acque sotterranee attraverso le catene di fornitura includono il settore tessile, alimentare e delle bevande. I loro prelievi combinati possono portare a una maggiore competizione o interazione tra le diverse industrie, nonché con altri settori, comunità e con l'ambiente naturale, con conseguenze a volte impreviste, come l'abbassamento estremo delle falde, l'inquinamento delle acque sotterranee e la subsidenza (UNEP, 2019).

5.2 Estrazione e utilizzo delle acque sotterranee nel settore industriale

5.2.1 Quantità

Le statistiche relative ai prelievi idrici e all'utilizzo dell'acqua nel settore industriale sono estremamente limitate. Il settore industriale e quello energetico sono responsabili del 19% dei prelievi di acqua dolce a livello mondiale (Aquastat, s.d.). Questa cifra si riferisce alle acque prelevate direttamente (incluse le acque sotterranee). I dati rivelano anche la presenza di notevoli differenze geografiche, con i prelievi per usi industriali che variano dal 5% in Africa al 57% in Europa. Tuttavia, i dati di Aquastat non vengono analizzati nelle statistiche relative ai prelievi di acque sotterranee destinati all'industria. Tali dati sono disponibili solo per alcuni paesi industrializzati a reddito più elevato. Lo United States Geological Survey (Dieter et al., 2018) mostra che negli Stati Uniti il totale dei prelievi di acque sotterranee per l'autoapprovvigionamento industriale è diminuito significativamente dal 1985 al 2015 (figura 5.1), mentre le acque superficiali sono ancora la principale fonte a cui questo settore attinge. Secondo un'altra stima, le acque sotterranee costituiscono il 27% dei volumi di acqua prelevati a livello globale dall'industria manifatturiera (Döll et al., 2012)¹.

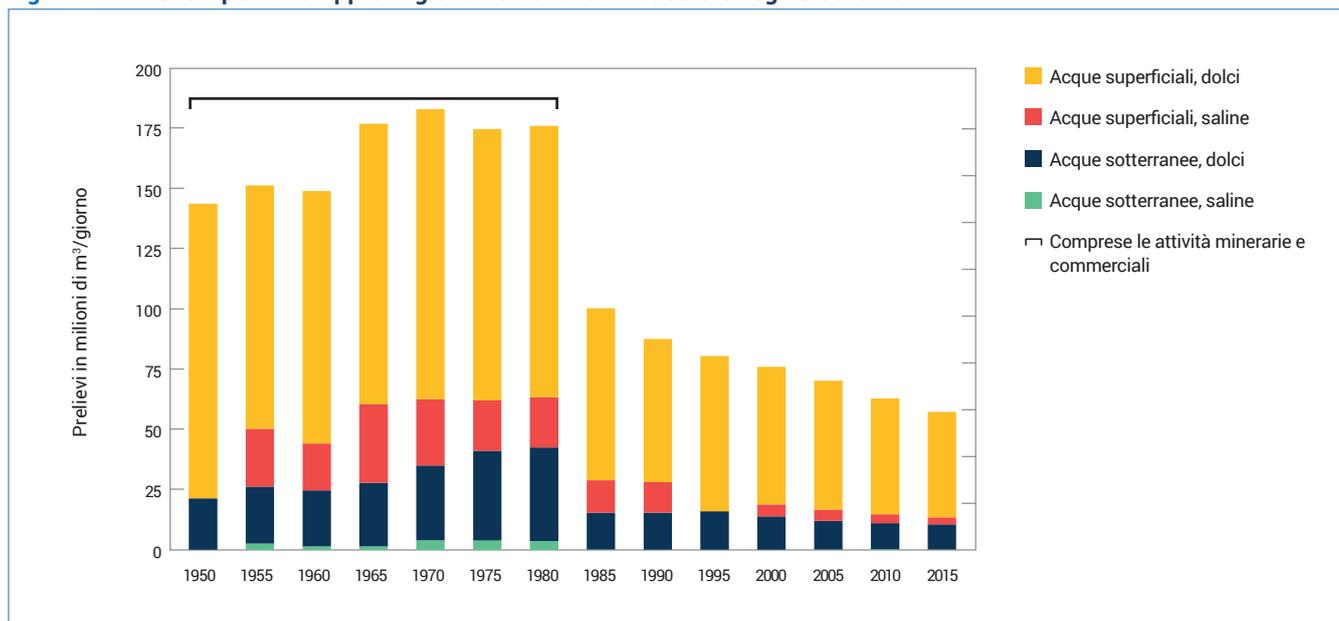
I 15 paesi che secondo le stime hanno prelevato i maggiori quantitativi di acque sotterranee nel 2010 sono mostrati nella tabella 5.1, che evidenzia chiaramente come la portata dei prelievi destinati all'industria vari significativamente da paese a paese, oscillando fra l'1% e il 48%.

Dati più recenti del 2015 (tabella 5.2) mostrano molti degli stessi paesi e i cambiamenti registrati in merito alla portata dei prelievi di acqua da essi effettuati, con Cina e Indonesia che hanno prelevato quantitativi di acqua di gran lunga superiori a quelli risparmiati da altre nazioni.

La ridotta disponibilità di risorse idriche sotterranee può essere un fattore limitante per lo sviluppo industriale, poiché alcune industrie utilizzano più acque sotterranee che superficiali. In alcuni casi, le acque sotterranee vengono utilizzate al fine di preservare le risorse idriche di superficie per la popolazione locale – per lo più nelle regioni caratterizzate da scarsità idrica –

¹ Secondo i dati CDP del 2020 (non pubblicati), a livello globale e in tutti i settori, il 39% delle aziende ha riferito di aver ridotto i prelievi di acque sotterranee rispetto all'anno precedente (2019), il 30% di averli mantenuti più o meno immutati e il 24% di averli aumentati. Le aziende prendono in considerazione i prelievi di acque sotterranee, sia da fonti rinnovabili che non rinnovabili, utilizzate per le loro attività dirette (CDP, inedito).

Figura 5.1 Prelievi per l'autoapprovvigionamento idrico industriale negli Stati Uniti



Fonte: adattato da Dieter et al. (2018, fig. 17F, pag. 53).

Tabella 5.1 I 15 paesi che secondo le stime prelevano annualmente i maggiori quantitativi di acque sotterranee, 2010

Paese	Popolazione nel 2010 (migliaia)	Estrazione di acque sotterranee			
		Estrazione di acque sotterranee stimata nel 2010 (km³/anno)	Analisi per settore		
			Estrazione di acque sotterranee per l'irrigazione (%)	Estrazione di acque sotterranee per uso domestico (%)	Estrazione di acque sotterranee per uso industriale (%)
India	1.224.614	251,0	89	9	2
Cina	1.341.335	112,0	54	20	26
Stati Uniti	310.384	111,7	71	23	6
Pakistan	173.593	64,8	94	6	0
Iran	73.974	63,4	87	11	2
Bangladesh	148.692	30,2	86	13	1
Messico	11.423	29,5	72	22	6
Arabia Saudita	27.448	24,2	92	5	3
Indonesia	239.871	14,9	2	93	5
Turchia	72.752	13,2	60	32	8
Russia	142.985	11,6	3	79	18
Siria	20.411	11,3	90	5	5
Giappone	126.536	10,9	23	29	48
Thailandia	69.122	10,7	14	60	26
Italia	60.551	10,4	67	23	10

Fonte: Margat e Van der Gun (2013).

Tabella 5.2

I nove paesi che annualmente prelevano i maggiori quantitativi di acqua per uso industriale (km³/anno)

Paese	2015	Cambiamento assoluto dal 1965
Stati Uniti	248,4	-55,5
Cina	133,5	+87,8
Russia	39,6	-7,9
Canada	33,1	-2,9
Germania	32,6	-5,2
Indonesia	24,7	+24,3
Francia	21,6	-2,9
India	17,0	+1,8
Italia	16,3	+7,3

Fonte: Ritchie e Roser (2017), sulla base di dati Aquastat.

per il loro approvvigionamento alimentare e idrico quotidiano. Un buon esempio in questo senso è offerto dall'industria tessile di finitura del Pakistan e di altre regioni interessate da scarsità idrica. L'industria tessile di finitura a Karachi deve far fronte a un'estrema carenza di acqua di processo, e le risorse idriche sotterranee precedentemente disponibili sono ora esaurite. L'applicazione delle tecniche di scarico liquido zero (nell'acronimo inglese ZLD) è una possibile soluzione per fare in modo che i processi di finitura tessile non subiscano interruzioni.

Un altro esempio è la sfida che deve affrontare una nuova fabbrica in crescita a Tesla, nel Brandeburgo (Germania). A causa delle limitate risorse idriche sotterranee della regione, il servizio idrico regionale ha sollevato preoccupazioni su come il progetto potrebbe influenzare le forniture di acqua potabile, il che a sua volta ha portato a una discussione sulla disponibilità regionale di acque sotterranee (IGB, 2020). Questo esempio indica che determinare un'adeguata allocazione delle acque sotterranee non è un problema limitato unicamente ai paesi in via di sviluppo.

5.2.2 Produzione

Nel settore industriale, le acque sotterranee vengono utilizzate per molti scopi diversi, tra cui la produzione, la lavorazione, il lavaggio, la diluizione, il raffreddamento e il trasporto dei prodotti. Inoltre, le acque sotterranee sono utilizzate da impianti di fusione, raffinerie di petrolio e industrie che producono prodotti chimici, alimentari e cartari (CDC, s.d.). Alcune attività industriali fanno grande affidamento sulle acque sotterranee, mentre altre, come l'estrazione mineraria, possono anche causare il trasferimento o l'esaurimento delle acque sotterranee attraverso il loro defluire in altri ecosistemi, come i sistemi idrici superficiali.

Nel 2020, su un totale di 1.375 imprese manifatturiere di tutto il mondo che hanno comunicato i propri dati al CDP (ex Carbon Disclosure Project), più della metà (il 54%) indicava le acque sotterranee provenienti da fonti non rinnovabili e rinnovabili quale risorsa essenziale per le proprie attività. Di queste imprese, il 46% dichiarava di avere ridotto i prelievi di acque sotterranee, il 32% di averli mantenuti immutati, e il 21% di averli aumentati rispetto ai livelli del 2019 (CDP, inedito).

Acqua di processo

Sono diversi i processi industriali che attingono alle risorse idriche sotterranee in aree in cui le disponibilità di acque superficiali risulta limitata in termini di quantità, ma anche in situazioni in cui la qualità riveste un ruolo importante. Le acque sotterranee sono spesso meno contaminate delle acque superficiali e richiedono meno trattamenti. Settori come il tessile e il conciario, nonché quelli dell'abbigliamento, della produzione di cellulosa e



Nel settore industriale, le acque sotterranee vengono utilizzate per molti scopi diversi, tra cui la produzione, la lavorazione, il lavaggio, la diluizione, il raffreddamento e il trasporto dei prodotti

carta, presentano un elevato consumo specifico di acqua. Ad esempio, la lavorazione a umido di un chilo di tessuto di cotone richiede da 250 a 350 litri di acqua (Kiron, 2014). L'industria conciaria presenta un consumo specifico di acqua che varia dai 170 ai 550 litri per pelle (Schwarz et al., 2017). A livello europeo, il volume dei prelievi di acqua destinati alla produzione di carta per la realizzazione di pasta di cellulosa, carta e cartone è stato di circa 3.700 milioni di metri cubi nel 2012 (SpotView, 2018), di cui il 90% proveniva da acque superficiali e l'8,5% da fonti sotterranee. Queste operazioni di trattamento utilizzano spesso acque sotterranee prelevate autonomamente: tale fenomeno si osserva non solo nei paesi in via di sviluppo, dove a volte il monitoraggio risulta inadeguato, ma anche nei paesi industrializzati come gli Stati Uniti.

L'industria tessile fa un ampio uso di acque sotterranee. In Bangladesh, ad esempio, questo settore si rifornisce di acque sotterranee per le varie sezioni dell'impianto di trattamento a umido, e quindi necessita fortemente di una gestione efficiente dell'acqua (Haque et al., 2021). Quasi tutti i coloranti e i prodotti chimici, speciali e di finitura, vengono applicati a substrati tessili attraverso bagni ad acqua e processi a umido. Inoltre, la maggior parte delle fasi di preparazione del tessuto, tra cui sbazzatura, purga, candeggio e mercerizzazione, attingono a sistemi acquosi e acque sotterranee (Kiron, 2014).

Come mostra la tabella 5.3, i processi di lavorazione della lana e dei tessuti a base di feltro sono le operazioni tessili a maggiore intensità idrica (la lavorazione della lana consuma mediamente circa 280 litri di acqua al chilo). Le cifre mostrano anche che il consumo di acqua in questo settore varia notevolmente.

Tabella 5.3

Consumo di acqua nella lavorazione tessile negli Stati Uniti (in l/kg di produzione)

Utilizzo di acqua nella lavorazione dei tessili			
Sottocategorie di lavorazione	Utilizzo minimo di acqua	Utilizzo medio di acqua	Utilizzo massimo di acqua
Lana	110	285	660
Tessuto	5	110	510
Lavorazione a maglia	20	80	380
Tappeti	8	45	160
Gomitoli/Filati	3	100	560
Non tessuto	2,5	40	80
Feltro	33	210	930

Fonte: adattato da US EPA (1996, tabella 2-33, pag. 65).

Un esempio di città in cui la qualità e la quantità delle acque sotterranee sono state influenzate negativamente dalla rapida industrializzazione, problema noto soprattutto nei paesi in via di sviluppo, è Tiruppur (India). La città è fortemente dipendente dalle attività di lavorazione tessile intensiva, ma fa anche affidamento sulle acque sotterranee come principale fonte di acqua potabile. I campioni hanno mostrato che le acque sotterranee sono contaminate da sali utilizzati nella lavorazione dei tessuti (Grönwall e Jonsson, 2017a).

Lavaggio e pulizia

Numerosi processi produttivi necessitano di considerevoli quantitativi di acqua per il lavaggio e per la pulizia dei prodotti al termine della fase di produzione, al fine di separare i residui delle sostanze chimiche impiegate. Tali sostanze rimangono nell'effluente e necessitano di un trattamento per proteggere l'ambiente e la salute umana. Dati specifici sulla quantità di acque sotterranee utilizzate per scopi di lavaggio e pulizia nei diversi settori non sono disponibili.

● ● ●
**Le acque
sotterranee
hanno un impatto
significativo
sulle attività di
ingegneria ed
edilizia**

Raffreddamento

L'utilizzo delle acque sotterranee per fini di raffreddamento dipende in larga misura dalla localizzazione e dalla tipologia di industria, con conseguenti e notevoli differenze tra paesi. I settori dell'energia primaria e della produzione di energia elettrica sono quelli che singolarmente utilizzano i maggiori quantitativi di acqua in ambito industriale². I processi ad alto consumo energetico richiedono grandi quantità di acqua di raffreddamento. Ad esempio, le fonderie di acciaio e metalli utilizzano 30 metri cubi di acqua per tonnellata di acciaio, mentre le raffinerie utilizzano 1,5 metri cubi di acqua per 1 metro cubo di petrolio greggio. Negli Stati Uniti, il 15% dell'acqua di processo utilizzata nelle raffinerie proviene da acque sotterranee (US Department of Energy, 2016).

5.2.3 Bevande e acqua in bottiglia

I settori delle bevande, delle acque in bottiglia e di quelle minerali sono unici per il fatto che in questi contesti le acque sotterranee sono una materia prima che diventa il prodotto. Secondo una ricerca di mercato, tali settori dovrebbero crescere dell'8% all'anno (Facts & Factors, 2020). I bacini idrografici e gli acquiferi utilizzati come fonti di acqua minerale per il consumo umano necessitano di un'attenzione particolare, poiché devono essere protetti da qualsiasi tipo di inquinamento microbiologico e chimico.

Le grandi aziende internazionali alimentari e delle bevande sono in crescente competizione e in conflitto con le comunità locali e i municipi riguardo alla quantità di acqua che può essere prelevata senza esaurire le risorse idriche sotterranee locali e incidere sulle forniture per uso domestico e di altro tipo. Ad esempio, nella città di Guelph (Canada) i cittadini hanno manifestato contro il rinnovo del permesso di estrazione dell'acqua per l'impianto di imbottigliamento di Nestlé nella vicina Aberfoyle, che preleva l'acqua dallo stesso acquifero che alimenta l'approvvigionamento di Guelph. La conseguenza è stata una moratoria sul permesso (CBC, 2016). Un'opzione per risolvere i conflitti imminenti riguardanti le risorse idriche sotterranee comuni potrebbe essere l'applicazione dello standard internazionale di *stewardship* dell'acqua (AWS, 2019).

Secondo i dati mondiali del CDP, nel 2020 il 72% delle società di distribuzione di bevande ha dichiarato che le acque sotterranee erano rilevanti per le proprie attività. Di questo 72%, il 26% ha riferito che i propri prelievi di acque sotterranee erano più o meno gli stessi dell'anno precedente (2019), il 42% che erano inferiori, il 18% che erano aumentati e l'8% che era il primo anno in cui si effettuavano queste misurazioni (CDP, inedito).

5.2.4 Ingegneria ed edilizia

Le acque sotterranee hanno un impatto significativo sulle attività di ingegneria ed edilizia. Come nel caso dell'estrazione mineraria (vedere sezione 5.4), nella migliore delle ipotesi questa risorsa costituisce un impedimento, e nella peggiore un problema importante (troppe acque sotterranee nel posto sbagliato al momento sbagliato); dunque, per questi segmenti dell'industria essa non è né un bene vantaggioso né una risorsa nascosta. Le costruzioni sotterranee, come i tunnel, richiedono spesso un drenaggio temporaneo o continuo. Scavi profondi ed edifici con grandi aree sotterranee, come piani interrati e parcheggi, affrontano le stesse sfide, spesso aggravate dai grandi volumi di acqua da rimuovere e anche dalle pressioni sulla risorsa causate dagli elevati prelievi locali o regionali. A differenza dell'attività mineraria, che si concentra principalmente nelle aree più remote, dove spesso le acque sotterranee sono relativamente incontaminate, quella edilizia riguarda solitamente le aree urbane, dove le acque sotterranee possono essere già inquinate, e richiedono quindi un trattamento al momento della disidratazione e prima dello scarico. In effetti, la questione di dove scaricare le quantità talvolta notevoli di acqua può rivelarsi impegnativa nelle aree

² L'Agenzia internazionale per l'energia stima che il settore industriale e quello energetico (energia primaria e produzione di energia elettrica) siano entrambi responsabili di circa il 10% ciascuno del totale dei prelievi di acqua a livello globale (IEA, 2016a).

popolate e richiedere l'elaborazione di autorizzazioni e regolamenti. Inoltre, la disidratazione sia temporanea che permanente può abbassare significativamente i livelli delle acque sotterranee, influire sull'approvvigionamento idrico alimentato da fonti di questo tipo e aumentare i costi operativi e di manutenzione.

Nell'ambito della meccanica del suolo e dell'ingegneria civile, le acque sotterranee sono una questione fondamentale. Secondo il principio della sollecitazione efficace, la presenza di falde acquifere influisce sulla resistenza del suolo e sui carichi che possono essere da esso sopportati. Inoltre, le fluttuazioni dei livelli delle falde acquifere (stagionali e talvolta dovute alla disidratazione) hanno un ruolo particolarmente significativo nell'influenzare la stabilità dei pendii. Su scala più ampia, l'esaurimento delle falde acquifere e l'abbassamento dei livelli delle acque sotterranee possono portare a una grave subsidenza, come evidenziato nel noto caso di Giacarta, dove in alcune località sono stati osservati tassi di cedimento da 1 a 20-28 centimetri all'anno (Abidin et al., 2011). Diventa dunque necessario rimpiazzare e riparare infrastrutture ed edifici, il che è compito del settore ingegneristico e di quello edile. In altre località, i fenomeni carsici provocati dall'erosione sotterranea delle rocce calcaree (carbonatiche) da parte delle acque sotterranee acide determinano la creazione di grotte e vuoti che possono causare cedimenti edilizi a livello del suolo e perdita di vite umane. Le doline in Florida (Stati Uniti) costituiscono un ottimo esempio in questo senso.

5.3 Industria, qualità delle acque sotterranee e inquinamento

5.3.1 Minacce per le acque sotterranee derivanti dall'attività industriale

Lo scarico e l'infiltrazione nel terreno di reflui industriali non trattati o solo parzialmente trattati, ad esempio mediante pozzi di iniezione, possono inquinare le acque sotterranee e di conseguenza influenzare altri usi della risorsa relativi all'irrigazione, all'acqua potabile e a vari settori industriali. Gli impatti negativi della contaminazione del suolo e della lisciviazione, causati da discariche industriali vecchie e non adeguatamente progettate, nonché dalle miniere dismesse, possono comportare rischi significativi per l'ambiente e la salute umana. Ciò può verificarsi anche quando le ricadute del particolato industriale presente nelle emissioni atmosferiche si depositano sul suolo e vengono successivamente trasportate nelle acque sotterranee mediante le infiltrazioni di pioggia.

Tabella 5.4 Contaminanti industriali comuni delle acque sotterranee suddivisi per fonte

Fonti di inquinamento	Tipo di contaminante
Stazioni di servizio e autofficine	Benzene, altri idrocarburi aromatici, fenoli, alcuni idrocarburi alogenati
Smaltimento di rifiuti solidi	Ammonio, salinità, alcuni idrocarburi alogenati, metalli pesanti
Industrie metallurgiche	Tricloroetilene, tetracloroetilene, altri idrocarburi alogenati, metalli pesanti, fenoli, cianuro
Pittura e vernice a smalto	Alchilbenzene, tetracloroetilene, altri idrocarburi alogenati, metalli, alcuni idrocarburi aromatici
Industria del legno	Pentaclorofenolo, alcuni idrocarburi aromatici
Lavaggio a secco	Tricloroetilene, tetracloroetilene
Produzione di pesticidi	Vari idrocarburi alogenati, fenoli, arsenico
Smaltimento di fanghi di depurazione	Nitrati, vari idrocarburi alogenati, piombo, zinco
Concerie	Cromo, vari idrocarburi alogenati, fenoli
Esplorazione ed estrazione di petrolio e gas	Salinità (cloruro di sodio), idrocarburi aromatici
Minerali metalliferi ed estrazione del carbone	Acidità, vari metalli pesanti, ferro, solfati

Fonte: adattato da AGW-Net/BGR/IWMI/CapNet/ANBO/IGRAC (2015, tabella 8.1, pag. 9).



Il settore industriale e quello minerario hanno un grande potenziale per aumentare l'efficienza nell'uso dell'acqua, per incoraggiare il riciclo e il riutilizzo di questa risorsa, nonché per limitarne l'inquinamento

I contaminanti industriali rilevati nelle acque sotterranee coprono un'ampia gamma di parametri fisici, chimici inorganici, chimici organici, batteriologici e radioattivi. Nella tabella 5.4 sono mostrati alcuni contaminanti comuni delle acque sotterranee, le fonti di inquinamento associate e i loro effetti.

Gli idrocarburi sono uno dei più comuni contaminanti delle acque sotterranee. Galleggiano o affondano nelle acque sotterranee a seconda della loro densità. Gli idrocarburi clorurati, come quelli usati come solventi o per il lavaggio a secco, possono essere cancerogeni. Anche una piccola quantità può essere sufficiente per contaminare grandi volumi di acque sotterranee oltre gli standard di sicurezza. Anche i metalli pesanti, come il cromo esavalente usato dall'industria della placcatura, sono pericolosi. Altri metalli di questo tipo, come l'arsenico, possono essere naturalmente presenti nelle acque sotterranee e limitarne l'idoneità all'uso industriale.

5.3.2 Affrontare l'inquinamento delle acque sotterranee derivante dall'attività industriale

Il settore industriale e quello minerario hanno un grande potenziale per aumentare l'efficienza nell'uso dell'acqua, per incoraggiare il riciclo e il riutilizzo di questa risorsa, nonché per limitarne l'inquinamento. Al fine di ridurre o di evitare gli impatti negativi causati dall'uso industriale delle acque sotterranee, saranno necessari tecniche e metodi di produzione efficiente e pulita (nell'acronimo inglese RECP) e l'impiego di parchi eco-industriali (nell'acronimo inglese EIP) per raggiungere l'Obiettivo di sviluppo sostenibile 12.4 relativo a produzione e consumo sostenibili. Catene del valore efficienti dal punto di vista delle risorse, utilizzando l'approccio dell'economia circolare, ridurranno al minimo il consumo di materie prime, acqua ed energia.

Il quadro internazionale per i parchi eco-industriali (UNIDO/Banca mondiale/GIZ, 2021) afferma che un EIP dovrebbe dare priorità alla gestione, all'uso, all'efficienza e al trattamento sostenibili dell'acqua. Gli EIP utilizzano l'acqua in modo responsabile, tenendo conto dei problemi locali di scarsità d'acqua e dei bacini idrici sensibili. Un EIP dovrebbe anche pianificare un aumento dell'efficienza idrica per le imprese ubicate nella sua area e in quella circostante nel suo insieme. A causa della mancanza di acqua superficiale, nelle regioni caratterizzate da scarsità idrica molti EIP devono attingere le risorse idriche necessarie dalle acque sotterranee. Altrettanto importanti sono il trattamento delle acque reflue e la promozione della circolarità dell'acqua. Il riciclaggio di questa risorsa dovrebbe avere la priorità sui sistemi ZLD.

I registri delle emissioni e dei trasferimenti di sostanze inquinanti (nell'acronimo inglese PRTR) sono strumenti utili in quanto segnalano le emissioni degli impianti industriali nell'acqua, nell'aria e nel suolo (OCSE, s.d.). La divulgazione di queste informazioni al pubblico, attraverso organizzazioni come CDP e Global Reporting Initiative (GRI), si è rivelata un meccanismo efficace anche per tracciare e guidare l'azione delle aziende al fine di ridurre ed evitare gli impatti negativi dell'uso delle acque sotterranee in ambito industriale.

Lo scarico liquido zero

L'obiettivo principale dello ZLD è prevenire lo scarico delle acque reflue e i suoi impatti negativi. Lo ZLD mira a trattare gli effluenti per recuperarli come acqua pulita e riutilizzarli nei processi industriali, portando il consumo di acqua a livelli prossimi allo zero. In quanto tale, è una forma di riciclo dell'acqua di processo volta a tenere sotto controllo l'inquinamento idrico.

Lo ZLD si ottiene in più fasi, in primo luogo rendendo l'effluente idoneo al trattamento, attraverso il trattamento fisico-chimico convenzionale, l'osmosi inversa e/o il trattamento biologico. Successivamente, una serie di fasi di post-trattamento porta durezza, limo, torbidità e sostanze organiche a un livello tale per cui non si verifica l'incrostazione delle membrane.

Il Governo indiano ha imposto per legge lo ZLD alla sua industria tessile e dell'abbigliamento, provvedimento entrato in vigore nel 2006 nel Tamil Nadu. Molte fabbriche sono state chiuse

dall'Alta corte statale, a causa della loro incapacità di soddisfare i requisiti di conformità (Kiran e Rao, 2019). La politica dello ZLD è stata estesa a nove Stati del bacino del fiume Gange e applicata a cinque settori industriali: tessile, conciario, produzione di cellulosa e carta, lavorazione dello zucchero e distillerie. «Le ricerche e gli sviluppi recenti relativi allo ZLD lo sostituiscono con il concetto di scarico liquido "minimo", che consente un recupero fino al 95% dello scarico liquido. Ciò tiene conto del fatto che il raggiungimento del 3-5% finale di eliminazione dei liquidi per ottenere lo ZLD può quasi raddoppiare il costo del trattamento» (Grönwall e Jonsson, 2017b, pag. 27).

Bonifica delle acque sotterranee

Le tecniche di bonifica delle acque sotterranee prevedono il trattamento delle le acque sotterranee inquinate riducendo gli inquinanti fino a livelli accettabili o convertendoli in prodotti innocui.

Ciò è spesso possibile grazie a una combinazione di tecnologie di trattamento biologico, chimico e fisico. Le tecniche di trattamento biologico comprendono il bio-aumento, il *bioventing*, il *biosparging*, il *bioslurping* e la fitodepurazione. Alcune tecniche di trattamento chimico includono iniezione di ozono o di ossigeno, precipitazione chimica, separazione della membrana, scambio ionico, assorbimento del carbonio, ossidazione chimica acquosa e recupero potenziato del tensioattivo, mentre altre possono essere applicate utilizzando nanomateriali. Le comuni tecniche di trattamento fisico includono *pump and treat*, *air sparging*, estrazione a doppia fase e tecniche di membrana come l'osmosi inversa.

5.4 Miniere e acque sotterranee

● ● ●
**L'attività
mineraria ha una
relazione diversa
e più diretta con le
acque sotterranee
rispetto alla
maggior parte
degli altri settori
industriali**

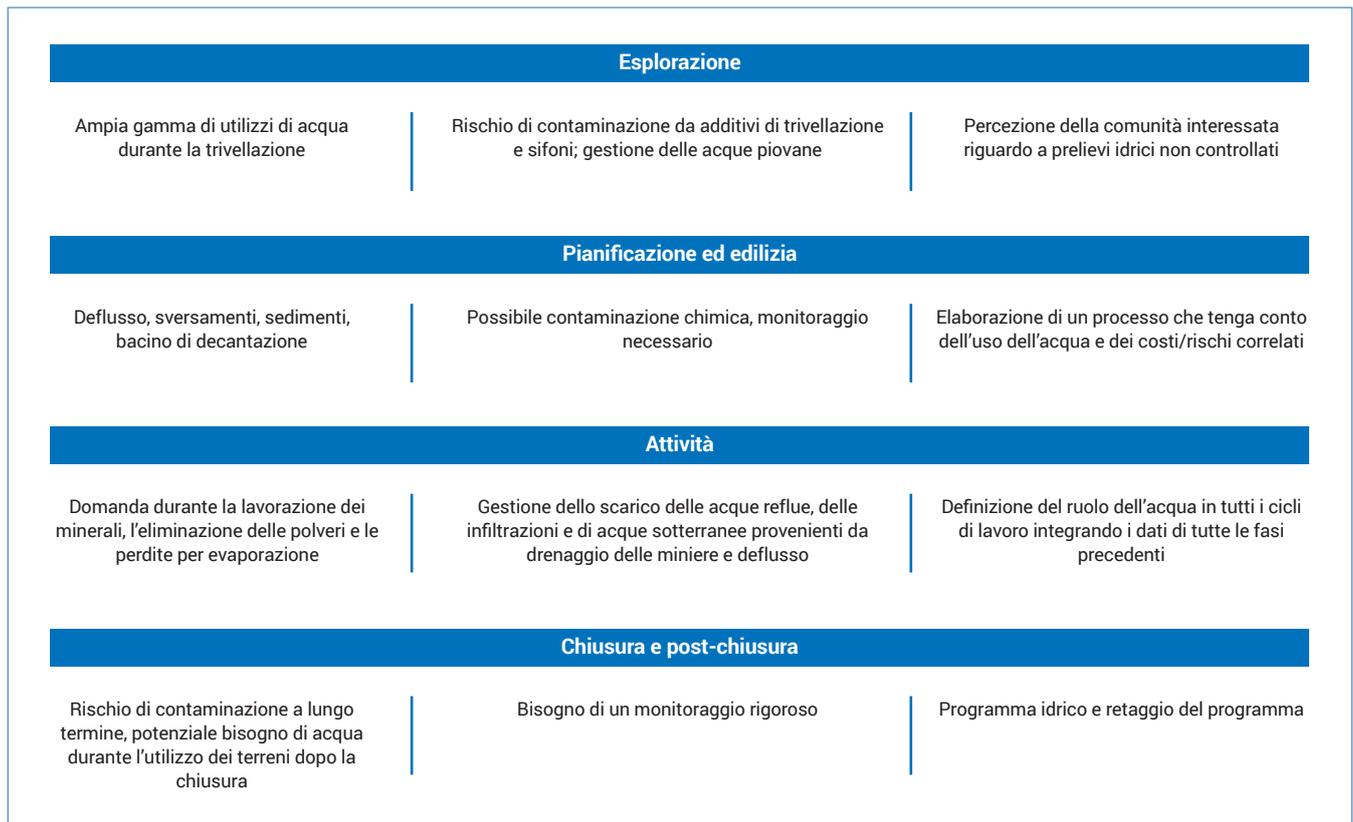
L'attività mineraria ha una relazione diversa e più diretta con le acque sotterranee rispetto alla maggior parte degli altri settori industriali; nelle regioni semiaride, può dipendere interamente da tali risorse. L'interazione dell'attività mineraria con l'acqua dolce avviene spesso nel contesto delle acque sotterranee, e la loro relazione può essere conflittuale. Da un lato, l'acqua è un bene e una risorsa utile nell'estrazione e nella lavorazione dei minerali; dall'altro, però, spesso prevede una responsabilità intrinseca. Dal lato vantaggioso di questa equazione, l'acqua è necessaria per l'estrazione, la separazione e la lavorazione del minerale, l'abbattimento delle polveri, il trasporto dei liquami e il lavaggio. Dal lato delle responsabilità, le acque sotterranee sono un elemento di disturbo o un inconveniente, poiché sia le miniere sotterranee che quelle a cielo aperto in molti casi richiedono un prosciugamento frequente o continuo per poter funzionare; inoltre, vi è il rischio di contaminare una falda acquifera locale, che può essere fonte di acqua potabile. Lo smaltimento dell'acqua presenta anche criticità per il trattamento se la risorsa è stata contaminata dalle attività minerarie. L'entità della disidratazione e del trattamento può aumentare significativamente i costi operativi.

Ad esempio, l'attività mineraria in Polonia richiede il prosciugamento di un chilometro cubo di acqua all'anno (Kowalczyk et al., 2010). Considerando che una famiglia di tre persone utilizza mediamente 230 metri cubi all'anno³, i quantitativi prosciugati corrispondono a quelli necessari a soddisfare il fabbisogno di oltre 4,3 milioni di famiglie, ovvero di circa 13 milioni di persone. L'uso dell'acqua durante il ciclo minerario è mostrato nella figura 5.2.

La responsabilità che deriva dalle attività minerarie che utilizzano acque sotterranee e determinano il loro prosciugamento può essere onerosa in termini di trasferimento e trattamento delle acque sotterranee e dei costi associati. Tali questioni e impatti sono riassunti nella tabella 5.5. Ci sono anche problemi correlati, riguardanti la sicurezza dei lavoratori, delle lavoratrici e di chi vive nelle aree circostanti così come gli impatti sull'acqua potabile e sull'ambiente. Il fatto che nel 2020 solo due società minerarie abbiano segnalato come rischio la lisciviazione di inquinanti nei corpi idrici sotterranei evidenzia che potrebbe essere necessaria una maggiore attenzione al riguardo (CDP, inedito).

³ Consumo medio di acqua della città di Toronto. www.toronto.ca/311/knowledgebase/kb/docs/articles/revenue-services/customer-service/call-centre/call-centre/city-of-toronto-average-water-consumption.html.

Figura 5.2 Consumo di acqua durante il ciclo di vita di un progetto minerario



Fonte: IFC (2014, fig. 1, pag. 5).

Tabella 5.5 Impatti sulle acque sotterranee da miniere attive e dismesse

Natura della lavorazione/attività	Impatti e problemi delle acque sotterranee
Approvvigionamento di acque sotterranee per i processi estrattivi	Interferenza con gli utenti di pozzi preesistenti, o esaurimento permanente degli acquiferi, soprattutto in caso di falde acquifere non rinnovabili o con scarsa ricarica nelle regioni aride.
Attenuazione della pressione sulle acque sotterranee per la stabilità della pendenza	Spesso in formazioni a bassa permeabilità; è soprattutto una questione geotecnica con impatti limitati sulle acque sotterranee.
Drenaggio per i corridoi di accesso e le superfici delle miniere	In miniere o cave ampie e/o profonde, ciò può causare notevoli coni di influenza con impatti sugli utenti di pozzi e sugli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee.
Afflusso improvviso di acque sotterranee verso le gallerie minerarie	Potenziale perdita di vite, danni a beni strumentali e alla continuità dell'attività mineraria con effetti anche su sorgenti ed ecosistemi idraulicamente collegati.
Chiusura delle miniere con innalzamento della falda	Può comportare nuove zone di deflusso delle acque sotterranee e mobilitazione di acque sotterranee di scarsa qualità in sistemi di flusso regionali.
Lisciviazione <i>in situ</i> di minerali	Rischio di percolato altamente acido e alcalino che, con il trasporto dei minerali estratti, inquina le acque sotterranee.
Inquinamento accidentale/incidentale di acque sotterranee dovuto ad attività minerarie	Drenaggio di acqua di miniera e residui, infiltrazione sotto una diga che attiva le fonti d'inquinamento e può incidere sulla qualità delle acque sotterranee (specialmente nell'estrazione di carbone, lignite e metalli pesanti).

Fonte: IAH (2018, pag. 2).

5.5 Energia, produzione di energia elettrica e acque sotterranee

La contaminazione delle acque sotterranee deriva comunemente dall'ossidazione e dalla dissoluzione della pirite dal minerale di solfuro (il drenaggio delle miniere acide è un problema che esiste da tempo nell'industria mineraria) o dal drenaggio delle acque sotterranee saline e dai percolati. Secondo i risultati delle indagini nazionali condotte negli anni '90 e 2000, nel Regno Unito circa 9.000 chilometri quadrati di corpi idrici sotterranei erano a rischio di inquinamento derivante da metalli (IAH, 2018). Anche gli impianti di stoccaggio dei residui, comuni a molte miniere, possono causare inquinamento delle acque sotterranee (riquadro 5.1).

L'estrazione mineraria può utilizzare le stesse tecnologie disponibili per altri settori industriali per gestire l'acqua, ridurne l'utilizzo e migliorarne la qualità. In alcuni casi è possibile usare acqua di qualità inferiore. Ad esempio, l'acqua salina può essere migliore per alcuni processi di separazione (Prosser et al., 2011). La gestione delle acque sotterranee può essere incorporata in regolamenti che coprono un approccio "dalla A alla Z" come parte delle licenze (IAH, 2018). Inoltre, l'industria mineraria, attraverso le sue varie attività, può disporre internamente di ampi dati sull'ubicazione e l'estensione degli acquiferi e sulle proprietà ad essi relative. Tali dati, se resi pubblicamente disponibili, si aggiungerebbero al corpus di conoscenze esistente e sarebbero molto utili per idrogeologi, governi e servizi di approvvigionamento idrico.

Molto è stato scritto sul nesso acqua-energia, ma ci sono poche informazioni sulla componente delle acque sotterranee, sia nel contesto della produzione di energia che in quello dell'uso dell'energia per prelevare, trasferire e trattare le acque sotterranee. Come per l'industria, i dati sull'uso delle acque sotterranee nel settore energetico solitamente non sono separati da quelli relativi all'uso complessivo di acqua dolce o all'autoapprovvigionamento. Poiché la raccolta di dati può concentrarsi prevalentemente sui paesi a reddito più elevato, talvolta non è possibile raccogliere dati relativi ad altri paesi, soprattutto quelli in cui le falde acquifere potrebbero non essere presenti o facilmente accessibili.

Riquadro 5.1 Vantaggi del monitoraggio della qualità delle acque sotterranee: il caso di AngloGold Ashanti a Cerro Vanguardia S.A. (Argentina)

Cerro Vanguardia S.A. (CVSA) è la più grande miniera d'oro e d'argento per dimensioni e produzione nella regione della Patagonia in Argentina. In questo contesto, è stato installato un impianto di stoccaggio degli sterili (nell'acronimo inglese TSF), dove il residuo di miniera lavorato viene depositato continuamente sotto forma di liquame contenente acqua e sterili o residui. L'impasto liquido si separa nel TSF e l'acqua, che ha tracce di cianuro residuo, viene continuamente riciclata per essere riutilizzata nel processo di recupero dell'oro. Il TSF è circondato da una rete di pozzi di monitoraggio per verificare se gli sterili coinvolti nel processo stanno in qualche modo intaccando le acque sotterranee. Il programma di monitoraggio valuta la presenza di metalli pesanti e cianuri.

Nel 2003, il monitoraggio di routine dell'acqua ha identificato un picco isolato nei livelli di cianuro in un pozzo nel TSF. Le indagini hanno identificato una vena di quarzo nel substrato roccioso che fungeva da condotto, consentendo al cianuro di entrare nelle acque sotterranee. È stata avviata un'importante operazione di sterro per coprire la vena sotto la diga di sterili con uno spesso rivestimento in polietilene ad alta densità (HDPE), impedendo così il passaggio dell'acqua. Il rivestimento in HDPE era caratterizzato da due strati, con una serie di sensori elettronici installati tra di essi per rilevare le eventuali infiltrazioni. Il monitoraggio continuo delle acque sotterranee intrapreso da quando è stato installato l'HDPE indica che il rivestimento sta funzionando, impedendo al cianuro di raggiungere le acque sotterranee.

Fonte: adattato da ICMM (2012, pagg. 28-29).

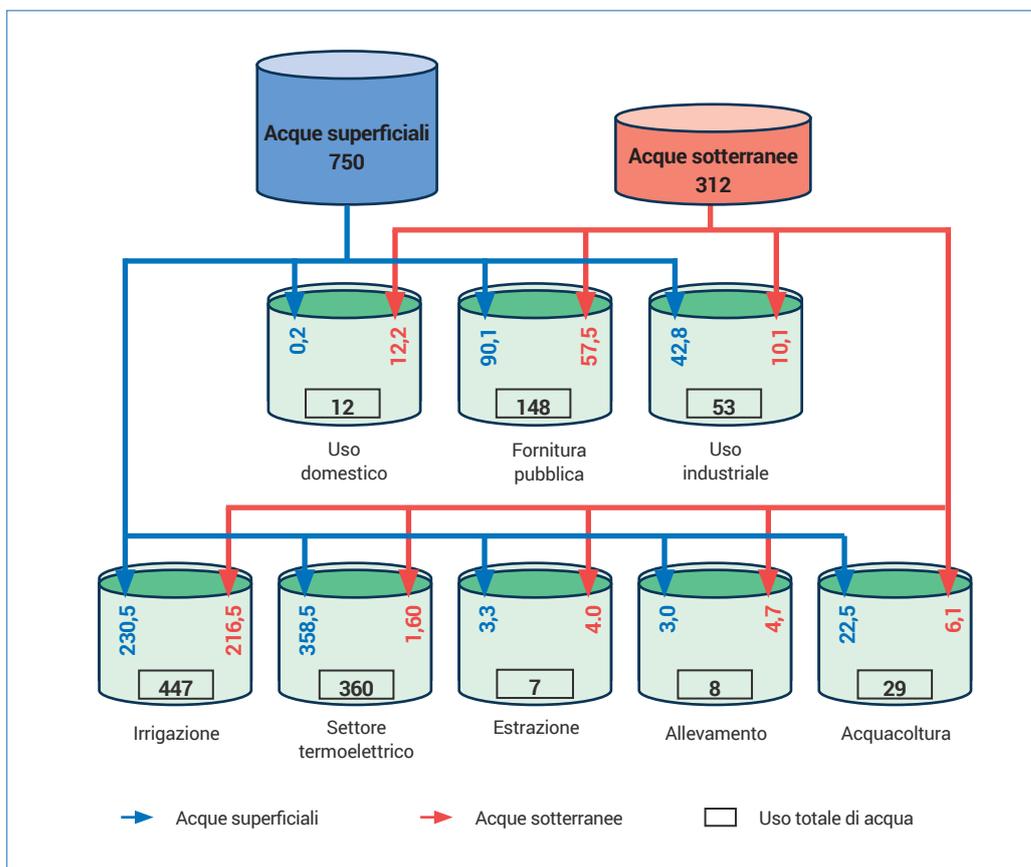
5.5.1 Utilizzo delle acque sotterranee per la produzione di energia

Alcuni dati a livello nazionale sono raccolti solamente nei paesi a reddito più elevato. La figura 5.3 mostra una ripartizione del consumo idrico negli Stati Uniti per il 2015 (USGS, s.d.). Questa figura indica che dalle acque sotterranee proviene circa il 29% dell'acqua dolce utilizzata e che solo lo 0,5% di questo 29% viene usato per la produzione di energia termoelettrica⁴, mentre l'industria utilizza il 3,2% e la maggior parte – il 70% – viene impiegata per l'irrigazione.

Figura 5.3

Fonte e uso dell'acqua dolce negli Stati Uniti, 2015

Nota: i dati sono espressi in milioni di metri cubi al giorno.



Fonte: adattato da USGS (s.d.).

Il Canada conduce un'indagine biennale sulle acque industriali, che fornisce molti dettagli sull'uso dell'acqua, compreso quello delle acque sotterranee per l'energia (Statistics Canada, s.d.). La tabella 5.6 riporta i dati del 2017 per il settore termoelettrico. Si può notare che, come negli Stati Uniti, le acque sotterranee forniscono solo una minuscola percentuale dell'acqua complessivamente consumata. L'analisi non pubblicata dei dati globali del CDP per il 2020 ha rilevato che, delle 37 società di produzione di energia che hanno divulgato informazioni sull'acqua, il 57% dipendeva dalle acque sotterranee (CDP, inedito).

I dati sull'uso delle acque sotterranee nell'ambito della produzione di energia primaria, come petrolio e gas, non sono facilmente reperibili. Tuttavia, nel 2014 la produzione di energia primaria ha utilizzato il 12% dei prelievi idrici complessivi destinati al settore energetico (IEA, 2016a). L'analisi inedita del CDP basata su dati del 2020 indica che, delle 52 compagnie petrolifere e del gas che hanno divulgato informazioni sull'acqua da loro utilizzata, l'85%

⁴ «I prelievi per l'energia termoelettrica sono stati di 133 Bgal/g [500 Mm³/d] nel 2015 e hanno rappresentato i livelli più bassi da prima del 1970. I prelievi di acque superficiali hanno rappresentato oltre il 99% dei prelievi totali di energia termoelettrica e il 72% di quelli di superficie – i prelievi d'acqua provenivano da fonti d'acqua dolce. ... I prelievi di energia termoelettrica hanno rappresentato il 41% dei prelievi totali di acqua dolce per tutti gli usi, e i prelievi di acqua dolce per la produzione di energia termoelettrica hanno rappresentato il 34% dei prelievi totali di acqua dolce per tutti gli usi.» (Dieter et al., 2018, pag. 1).

Tabella 5.6
Consumo di acqua
nella produzione di
energia termoelettrica
in Canada (2017), per
fonte

Generazione di energia termoelettrica	Milioni di m ³
Fonte di acqua dolce, approvvigionamento pubblico o municipale	26,8
Fonte di acqua dolce, autoapprovvigionamento, corpi idrici superficiali	20.505,3
Fonte di acqua dolce, autoapprovvigionamento, acque sotterranee	0,4
Fonte di acqua dolce, autoapprovvigionamento, altro	32,9
Fonte di acqua salina, autoapprovvigionamento, acque sotterranee	0,0
Fonte di acqua salina, autoapprovvigionamento, acqua di marea	2.700,9
Fonte di acqua salina, autoapprovvigionamento, altro	1,1

Fonte: Statistics Canada (s.d).

dipendeva dalle acque sotterranee (CDP, inedito). I biocarburanti richiedono molta acqua e, se la loro produzione fa affidamento sui sistemi di irrigazione, le acque sotterranee diventano spesso una componente significativa di questo processo. Nonostante questo, la loro relativa impronta idrica per unità di energia appare significativamente più bassa rispetto a quella di altre fonti di energia primaria. Ad esempio, mentre il petrolio greggio utilizza 1,06 m³/GJ, la biomassa in Brasile utilizza in media 61 m³/GJ (Gerbens-Leenes et al., 2008).

5.5.2 Energia per l'uso delle acque sotterranee

Quando si parla di nesso acqua-energia, spesso ci si concentra soprattutto sull'acqua. Il ruolo e l'uso dell'energia nel settore idrico hanno meno visibilità e, sebbene l'Agenzia internazionale per l'energia (IEA) abbia affrontato questo aspetto in modo più completo (IEA, 2016a), la disponibilità di informazioni specifiche sulle acque sotterranee è comunque piuttosto limitata.

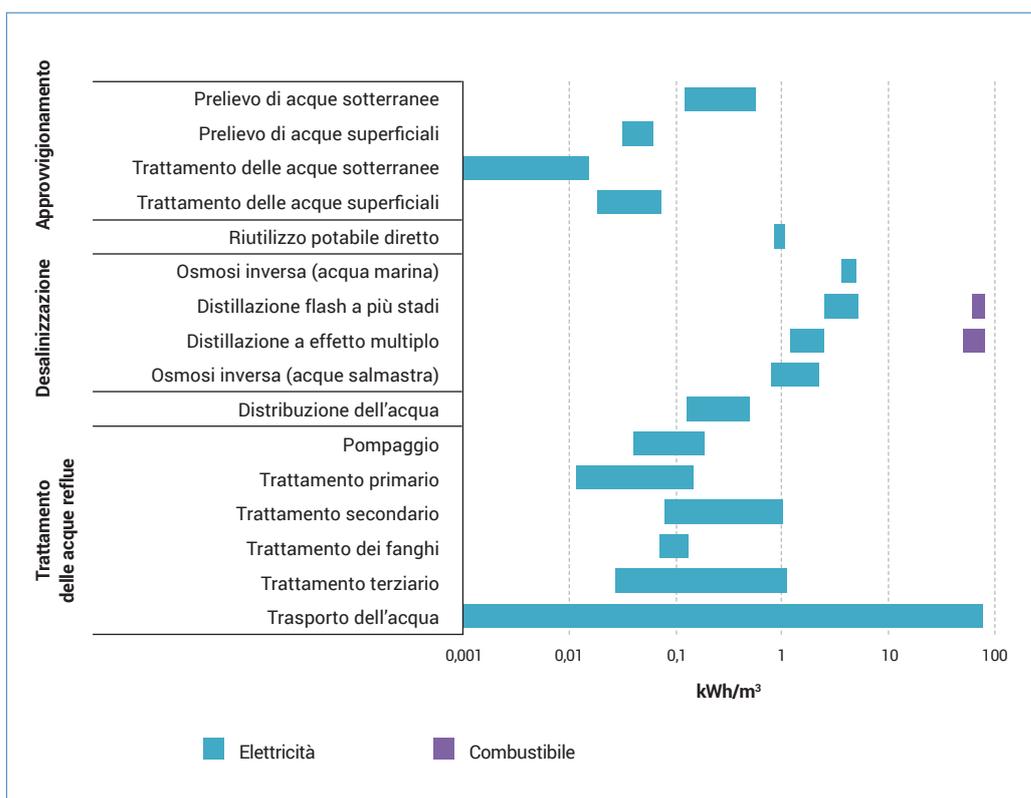
Nel rapporto relativo all'anno 2014, l'IEA ha stimato che l'energia necessaria per trattare, sottoporre ai processi dovuti e trasferire l'acqua è approssimativamente di 120 milioni di tep⁵ (o circa l'1% del consumo totale mondiale di 9.425 milioni di tep nel 2014 – IEA, 2016b), che più o meno corrispondono alla domanda totale di energia dell'Australia. Al settore elettrico è destinato quasi il 60% di questo totale (circa 820 terawattora o il 4% del consumo totale di elettricità a livello globale)⁶, che equivale al consumo totale di elettricità della Russia. Circa il 40% dell'energia elettrica necessaria per trattare, sottoporre ai processi dovuti e trasferire l'acqua viene utilizzata per prelevare le acque sotterranee e superficiali⁷. Se queste stime vengono integrate con la stima secondo la quale dalle acque sotterranee proverrebbe circa un terzo dei prelievi di acqua a livello globale, allora per l'estrazione di questa risorsa sarebbero necessari circa 108 terawattora all'anno, pari allo 0,5% del consumo globale di elettricità. Potrebbe non sembrare un numero elevato, ma su scala locale la situazione può essere molto diversa. Un esempio di caso estremo è l'India, dove il 60% dell'elettricità utilizzata nel settore idrico è destinata all'estrazione di acque sotterranee. Questa cifra può essere meglio compresa se si considera che l'India rappresenta approssimativamente il 26% dei prelievi di acque sotterranee effettuati a livello globale (Margat e Van der Gun, 2013). Il pompaggio delle acque sotterranee con l'elettricità consuma circa sette volte più energia rispetto all'estrazione delle acque superficiali (in kilowattora al metro cubo) (figura 5.4). Si prevede che la domanda di elettricità per il pompaggio delle acque sotterranee crescerà con l'aumento dell'estrazione,

⁵ tep = tonnellate equivalenti di petrolio; 1 tep = 11,63 megawattora.

⁶ Il saldo è l'energia termica, principalmente pompe diesel per il pompaggio delle acque sotterranee agricole e il gas naturale per gli impianti di desalinizzazione in Medio Oriente e Nordafrica.

⁷ Il trattamento delle acque reflue utilizza circa il 25% dell'energia elettrica prodotta (sebbene questo dato salga al 42% nei paesi sviluppati), mentre la loro distribuzione quasi il 20%.

Figura 5.4
Energia utilizzata
per vari processi nel
settore idrico



Fonte: IEA (2016a, fig. 8, pag. 28).
Tutti i diritti riservati.

dell'esaurimento dello stoccaggio e del relativo calo del livello di questa risorsa, combinato con l'abbandono del pompaggio a gasolio. Tuttavia, le cose stanno in modo diverso per quanto riguarda l'utilizzo di energia per il trattamento, poiché le acque sotterranee sono generalmente meno contaminate delle acque superficiali e necessitano di un trattamento minore. Vale anche la pena notare che la desalinizzazione consuma fino a due volte più energia dell'estrazione delle acque sotterranee (figura 5.4).

5.5.3 Energia e contaminazione delle acque sotterranee

Anche se il settore energetico sembra utilizzare quantitativi ridotti di acque sotterranee, può avere effetti profondi sulla loro qualità. Il carbone utilizzato nella produzione di elettricità per la generazione di energia termica è ben noto per i suoi effetti ambientali dannosi, come le emissioni di CO₂ e mercurio e i conseguenti impatti sulla qualità dell'aria. Inoltre, ha un impatto significativo anche sulle acque sotterranee, a causa della lisciviazione derivante da discariche di rifiuti di cenere di carbone. Questo fenomeno è stato studiato negli Stati Uniti (riquadro 5.2) e gli effetti potrebbero durare per molti anni. Dato il gran numero di centrali elettriche a carbone in tutto il mondo, si potrebbe giustamente concludere che gli impatti sulle acque sotterranee a livello globale potrebbero essere significativi.

Anche il *fracking* effettuato per l'estrazione di gas naturale, in particolare negli acquiferi poco profondi, può presentare rischi significativi per la contaminazione delle acque sotterranee. Le fonti di inquinamento includono le acque reflue provenienti dalle acque di formazione, le acque di riflusso e i liquidi di perforazione e fratturazione (IEA, 2016a). Le normative e le migliori pratiche (incluso il riciclaggio e il riutilizzo) possono ridurre la quantità di acqua richiesta e i relativi rischi. Le alternative all'acqua o l'uso della schiuma per ridurre il consumo idrico presentano anche degli svantaggi.

● ● ●
**Il fracking
effettuato per
l'estrazione di
gas naturale, in
particolare negli
acquiferi poco
profondi, può
presentare rischi
significativi per la
contaminazione
delle acque
sotterranee**

Riquadro 5.2 Discariche di ceneri di carbone: il lascito dell'inquinamento delle acque sotterranee

Il carbone contiene molte sostanze chimiche tossiche, tra cui arsenico, radio e altri agenti cancerogeni, diversi metalli che possono compromettere lo sviluppo del cervello dei bambini e molteplici sostanze chimiche tossiche per la vita acquatica. La combustione del carbone per produrre elettricità concentra queste sostanze chimiche tossiche nelle ceneri del carbone di scarto. Per gran parte del XX secolo, questi rifiuti sono stati scaricati in bacini di raccolta e discariche non rivestite, che hanno consentito l'infiltrazione di tali sostanze nelle acque sotterranee e determinato la contaminazione di queste ultime.

Nel 2015, la US Environmental Protection Agency (US EPA) ha finalizzato un regolamento federale per lo smaltimento delle ceneri di carbone: la "Coal Ash Rule", che stabilisce i requisiti per il monitoraggio delle acque sotterranee. I dati del 2018 relativi a 4.600 pozzi di monitoraggio delle acque sotterranee comprendevano oltre 550 bacini e discariche di cenere di carbone, che rappresentano oltre il 75% delle centrali a carbone degli Stati Uniti. I dati hanno mostrato che quasi tutte le acque sotterranee ubicate sotto le centrali a carbone (91%) sono contaminate, a volte a livelli significativi. Arsenico e litio sono tra le sostanze più comuni riscontrate dalle analisi, e la maggior parte delle piante presenta livelli pericolosi di almeno quattro sostanze chimiche tossiche che possono filtrare dalle ceneri di carbone. Inoltre, il problema è aggravato dai vecchi depositi dismessi di ceneri di carbone, che non sono coperti dal regolamento.

Fonte: adattato da EIP (2019).

5.6 Responsabilità dell'industria in relazione alle acque sotterranee

● ● ●
*L'industria
sta prestando
sempre maggiore
attenzione ai rischi
e alle conseguenti
sfide relative alla
fornitura di acqua
dolce*

L'industria sta prestando sempre maggiore attenzione ai rischi e alle conseguenti sfide relative alla fornitura di acqua dolce. Nella misura in cui le acque sotterranee fanno parte dell'approvvigionamento di acqua dolce, l'industria deve essere sempre più consapevole di questa risorsa, o della sua mancanza, poiché può avere un'influenza significativa sulla redditività delle imprese, sul ritorno sull'investimento e sui profitti. Ciò vale in particolare nel caso delle regioni aride, dove l'industria fa più uso di acque sotterranee. Secondo l'ultimo rapporto del CDP relativo ai rischi idrici, i costi dell'inazione (301 miliardi di dollari) sono di ben cinque volte maggiori rispetto a quelli di azione (55 miliardi di dollari) (CDP, 2021). Questo è il caso della maggior parte dei settori, ad eccezione di quelli della produzione di energia e delle infrastrutture, poiché in tali contesti vengono effettuati ingenti investimenti nei portfoli per la transizione energetica. Inoltre, le opportunità commerciali per investire nella sicurezza idrica sono stimate a 711 miliardi di dollari.

Nel 2018 si è registrato un calo del 7% del numero di aziende che hanno effettuato prelievi di acque sotterranee non rinnovabili, ma allo stesso tempo si è registrato un aumento significativo delle aziende che hanno segnalato prelievi da tutte le fonti, comprese le acque sotterranee rinnovabili (CDP, 2018). Il rapporto CDP per il 2020 afferma che «quasi i due terzi delle aziende che hanno partecipato al sondaggio stanno ora riducendo o almeno mantenendo costanti i prelievi di acqua», ma solo il 4,4% segnala miglioramenti per quanto riguarda l'inquinamento idrico (CDP, 2021, pag. 4). L'analisi inedita del CDP basata sui dati del 2020 suggerisce che il numero di aziende che mantengono immutati o riducono i loro prelievi di acque sotterranee rinnovabili e non rinnovabili è balzato al 25% (721 su 2934) (CDP, inedito).

Molte tecnologie e pratiche di gestione volte ad aumentare l'efficienza delle risorse idriche e ridurre l'uso sono disponibili per un'azione sul sito dell'impianto in relazione ai rischi per le acque sotterranee. Gli audit dell'acqua e le impronte idriche identificano le aree deboli dove possono essere introdotte misure incentrate sullo scarico zero, sul riutilizzo e sul riciclo dell'acqua per colmare le lacune. Tali misure possono essere incoraggiate anche nelle aziende coinvolte nella catena di fornitura. Se le acque sotterranee sono considerate nel bilancio idrico, si terrà conto di esse nell'elaborazione delle suddette misure di efficienza, e potrebbero trovare spazio anche nel campo delle iniziative RECP. Questi sforzi possono culminare nella creazione di EIP in cui le industrie cooperano in modo simbiotico in relazione ai vari input e output necessari come energia, rifiuti e acqua. Il passo

successivo è verso un'economia circolare, che possa funzionare su scala locale e regionale con aspirazioni a livello nazionale, e di cui la sostenibilità dell'uso delle acque sotterranee sarà parte integrante.

Gli strumenti economici hanno assunto una prospettiva più ampia negli ultimi anni, poiché le istituzioni finanziarie che si occupano dei prestiti alle imprese stanno prestando attenzione al livello di rischio idrico, che naturalmente include le acque sotterranee. Il CDP mette in guardia sui pericoli per «reputazione, entrate e stabilità finanziaria» derivanti dai rischi idrici (CDP, 2018, pag. 11). Le istituzioni finanziarie sono alla ricerca di aziende «per scindere produzione e consumo dall'esaurimento delle risorse idriche» (pag. 11). Il CDP segnala che, nel 2020, 2.934 aziende su 5.537 (oltre la metà) hanno divulgato dati sull'acqua quando richiesto dai loro investitori o clienti (CDP, 2021).

Tuttavia, al fine di accedere alle risorse idriche sotterranee e utilizzarle in modo sostenibile, per la gestione complessiva della risorsa (riquadro 5.3), è necessaria la cooperazione, la condivisione e la collaborazione con le numerose altre parti interessate. Questo approccio valorizza l'acqua in molti modi, dalla contabilità economica al valore monetario, passando attraverso il valore ambientale e i valori socioculturali, come quelli ricreativi, culturali e spirituali (Nazioni Unite, 2021). Alcuni dei principali fattori di valore aziendali e istituzionali sono mostrati nella figura 5.5. Diverse organizzazioni stanno attivamente promuovendo la gestione aziendale dell'acqua e pubblicando linee guida. Queste ultime includono l'Alliance for Water Stewardship (AWS) e il CEO Water Mandate.

Esiste anche una dimensione diversa nella definizione della geografia della gestione. A differenza delle acque superficiali, dove i bacini idrografici formano territori naturali di amministrazione, i confini degli acquiferi sono meno definiti e spesso difficili da definire. La gestione di una risorsa idrica sotterranea può coprire un'area molto più ampia e coinvolgere molte più parti interessate.

Riquadro 5.3 Collaborazione tra PT Multi Bintang e UNIDO

Nella parte orientale dell'isola di Java, la società indonesiana Heineken Operating Company, PT Multi Bintang, in collaborazione con l'Organizzazione delle Nazioni Unite per lo sviluppo industriale (UNIDO) ha inaugurato una cooperazione fra settore pubblico e privato per ovviare alla scarsità d'acqua. Basandosi sugli investimenti pilota di PT Multi Bintang e sull'istituzione di Aliansi Air come piattaforma multi-stakeholder, la Global Environment Facility (GEF) ha approvato un progetto di *upscaling* nel marzo 2021. Con un budget approvato dal GEF di 1,8 milioni di dollari, il Ministero dell'Ambiente e delle Foreste (MOEF) e UNIDO provvederanno alla costruzione di pozzi di assorbimento, schemi agroforestali e foreste di bambù ripariale. Ciò migliorerà la ritenzione idrica nel bacino idrografico così come la percolazione dell'acqua e aumenterà la ricarica delle acque sotterranee. Il progetto lavorerà al mantenimento degli acquiferi e al ripristino di circa 1 milione di metri cubi all'anno di acque sotterranee. Queste misure sono state identificate dalle parti interessate del governo, della società civile, del mondo accademico e del settore privato in un seminario partecipativo e inclusivo di coinvolgimento degli stakeholder dal basso come prerequisito per garantire la fornitura sostenibile di acqua alle persone e alle imprese. Con l'evolversi del progetto, verranno identificate opportunità per un ulteriore potenziamento degli altri 14 bacini di utenza prioritari selezionati dal Governo dell'Indonesia. Ciò avverrà in stretta collaborazione con il MOEF, la divisione indonesiana della Water Stewardship Alliance e la Water Resilience Coalition, appena istituita, che ha riunito le principali entità del settore privato indonesiano interessate a impegnarsi e cooperare nella gestione dell'acqua.

Fonte: UNIDO (inedito).

Figura 5.5

Fattori di valore per le aziende e le comunità relativi alla gestione dell'acqua



Fonte: IFC (2014, fig. 2, pag. 9).

5.7 La via da seguire

L'industria e l'energia utilizzano generalmente meno acqua rispetto ad altri importanti settori, come l'agricoltura e le municipalità, e di conseguenza decisamente meno acque sotterranee. Tuttavia, possono avere un impatto molto significativo sulla qualità di tali risorse attraverso scarichi, sversamenti e lisciviazione dei rifiuti. Con questo non si vuole suggerire che l'industria e l'energia dovrebbero evitare di usare le acque sotterranee, anzi in qualche modo tale uso potrebbe alleviare lo stress sulle risorse idriche superficiali, riducendo la pressione su di esse a beneficio di altri utenti. L'industria privata e il settore energetico hanno una flessibilità adeguata per procedere rapidamente e la disponibilità di mezzi per contribuire efficacemente all'uso sostenibile delle acque sotterranee in termini di quantità e qualità, caratteristiche di cui a volte altri settori, tra i quali quello pubblico, non dispongono.

Il settore industriale e quello energetico hanno un maggiore controllo, attraverso la loro proprietà e le strutture organizzative, sui quantitativi di acque sotterranee che utilizzano. Di conseguenza, possono agire in modo più agile e rapido dei governi. Il riutilizzo e il riciclo dell'acqua, le iniziative a scarico zero, i progetti RECP e gli EIP si concentrano tutti sul risparmio idrico. Queste attività a loro volta fanno parte del passaggio a un'industria più verde, a una politica incentrata sugli aspetti ambientali, sociali e di governance e alla gestione dell'acqua per l'industria e l'energia; inoltre, possono intrecciarsi con i miglioramenti dell'Industria 4.0⁸ (vedere Nazioni Unite, 2021, capitolo 6, pag. 93) in piani della società e del governo più ampi e attività come la gestione integrata delle risorse idriche (nell'acronimo inglese IWRM) e orientarsi verso economie circolari. Anche il settore finanziario si sta indirizzando in modo evidente verso investimenti sostenibili: questo avrà un effetto a catena, favorendo gli attori operanti nel settore industriale ed energetico che usano le acque sotterranee in modo sostenibile e incoraggiando altri a fare altrettanto.

⁸ L'industria 4.0 è la trasformazione digitale dell'industria manifatturiera e della produzione, nonché dei relativi processi di creazione di valore.

Capitolo 6

Acque sotterranee ed ecosistemi

WWAP

Tom Gleeson, Xander Huggins* e Richard Connor

Relatore speciale sui diritti umani all'acqua potabile sicura e ai servizi igienico-sanitari

Pedro Arrojo-Agudo ed Enric Vázquez Suñé**

Con il contributo di Karen Villholth (IWMI), Melissa Rohde (TNC), Jac van der Gun (WWAP), David Kreamer e Marisol Manzano (IAH), Luciana Scrinzi e Giuseppe Arduino (UNESCO-IHP), Tales Carvalho Resende (UNESCO WHC), Nils Moosdorf (Università di Kiel), Virginia Walsh (WASD) e Astrid Harjung (AIEA)

* Università di Victoria, Global Institute for Water Security

** IDAEA-CSIC



6.1 Introduzione agli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee

Gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (nell'acronimo inglese GDE) sono costituiti da piante, animali e funghi che dipendono dal flusso, dalla temperatura o dalle caratteristiche chimiche delle acque sotterranee per tutti o alcuni dei loro bisogni idrici (Murray et al., 2003; Foster et al., 2006; Kløve et al., 2011) (figura 6.1). I GDE sono estremamente diversi tra di loro e possono essere suddivisi in tre classi in base al tipo di acque sotterranee presente all'interno dell'ecosistema (Eamus et al., 2015; figura 6.2). Questi includono:

- GDE acquatici, che dipendono dall'interazione tra le acque sotterranee e quelle superficiali, come sorgenti, zone umide ed estuari, nonché dal deflusso delle acque sotterranee e dal flusso di base in fiumi, torrenti, zone umide e zone costiere;
- GDE terrestri, che dipendono da acque sotterranee accessibili da un punto di vista ecologico;
- GDE sotterranei, che dipendono da acquiferi e sistemi carsici, comprese le zone iporeiche dei fiumi e delle pianure alluvionali.

Pur costituendo classi diverse, i GDE possono essere strettamente collegati fra loro e dipendenti dallo stesso acquifero, come nel caso della vegetazione ripariale vicino a un fiume e dello stesso ecosistema fluviale. I GDE contengono specie endemiche che dipendono dalle condizioni di vita create dalle acque sotterranee; essi possono anche essere il fulcro di insediamenti umani, centro di attività religiose e culturali e persino fonte di conflitto (Kreamer et al., 2015; Nazioni Unite, 2021).

Figura 6.1

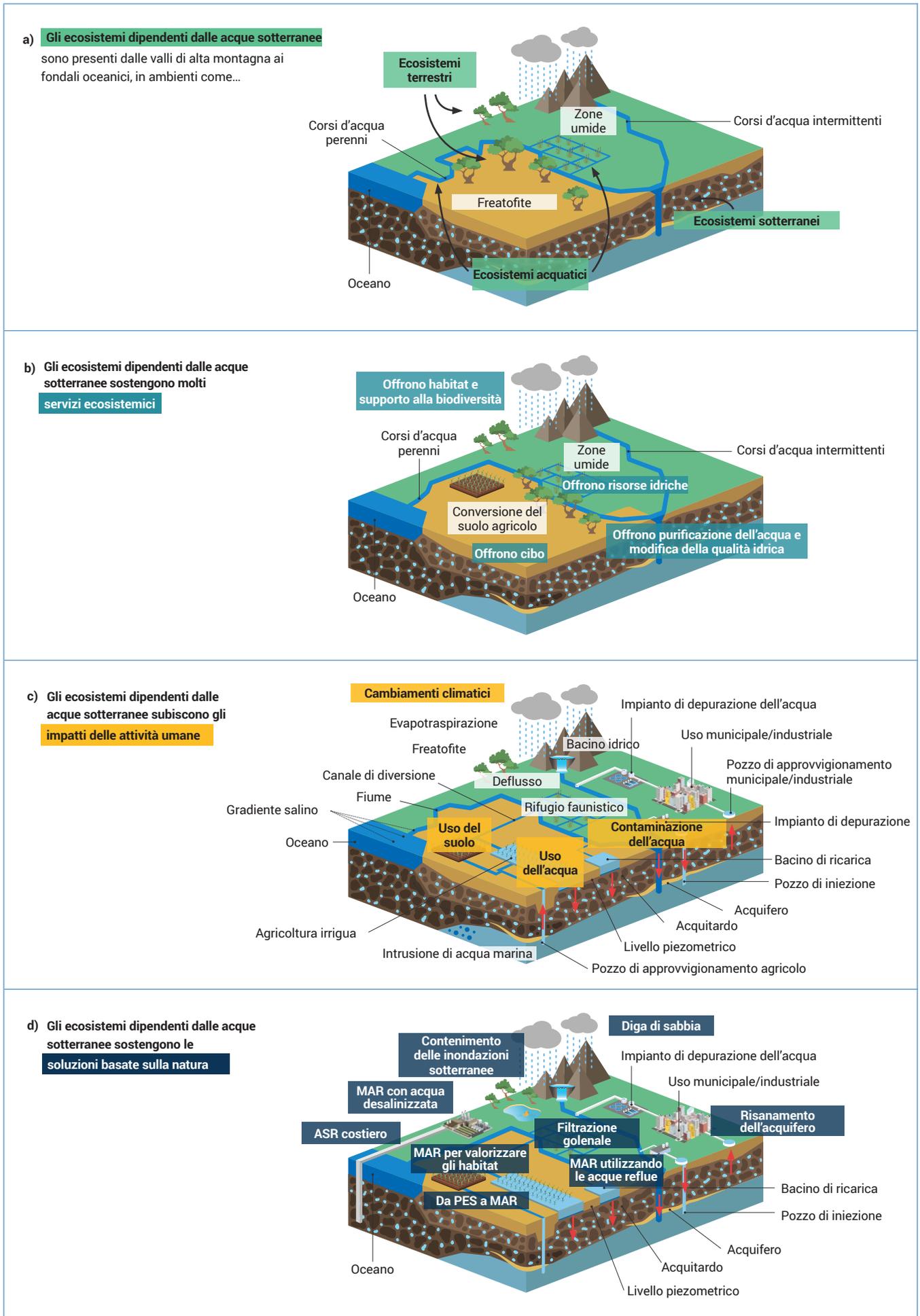
Esempio di un ecosistema dipendente dalle acque sotterranee: una veduta aerea di pianure alluvionali e isole nel delta dell'Okavango (Botswana)



Foto: Vadim Petrakov/
Shutterstock.

La dipendenza dalle acque sotterranee può essere continua, stagionale od occasionale, e diventa evidente quando una specie perde l'accesso alle acque sotterranee abbastanza a lungo da esserne danneggiata, sia in termini di riduzione del tasso di crescita o riproduzione che di aumento della mortalità. Alcune specie dipendono completamente dalle acque sotterranee, come quelle che fanno affidamento sulle sorgenti o sul flusso di base costante di fiumi, laghi o zone costiere. Ma la dipendenza dalle acque sotterranee può essere più difficile da riconoscere per altre specie, perché una combinazione di fonti d'acqua (ad esempio acque sotterranee, acque superficiali, precipitazioni, flusso di ritorno dell'irrigazione, deflusso delle acque piovane) fornisce determinate condizioni di vita in diverse stagioni o fasi del ciclo vitale.

Figura 6.2 Interazioni tra acque sotterranee, ecosistemi, attività umane e soluzioni basate sulla natura

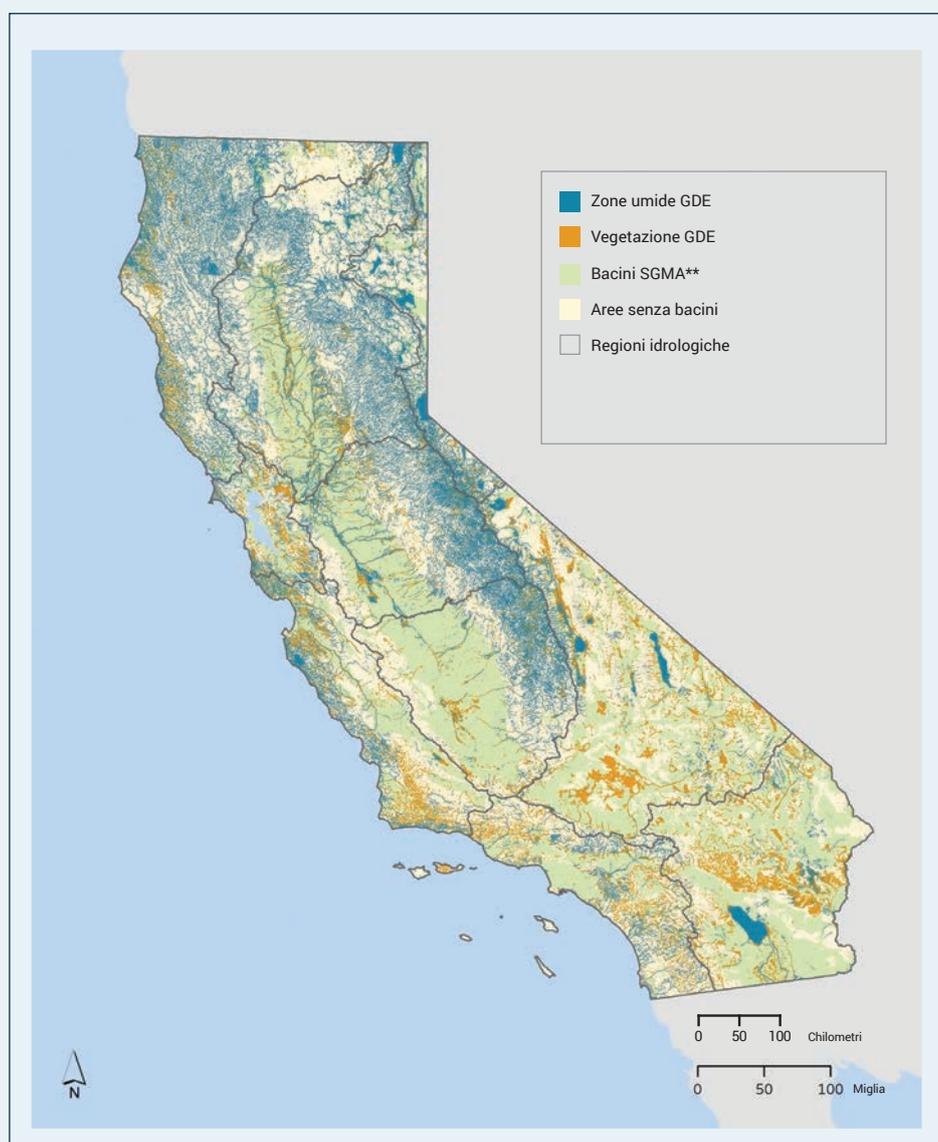


Fonti: a), b) e c) sulla base di Maven's Notebook (2015); d) sulla base di Villholth e Ross (s.d.).

Riquadro 6.1 Mappatura degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee in California (Stati Uniti)

La mappatura degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (nell'acronimo inglese GDE) è il primo passo verso una corretta gestione degli stessi. Ad oggi, la mappatura dei GDE è stata principalmente un processo localizzato che prevedeva un controllo da parte di esperti ed esperte e studi sul campo dispendiosi in termini di tempo per verificare la dipendenza di un ecosistema dalle acque sotterranee. In California, i GDE sono stati mappati per la prima volta utilizzando un approccio basato sull'inferenza incentrato sulle caratteristiche idrologiche del paesaggio (sorgenti, zone umide e fiumi supportati dal flusso di base; Howard e Merrifield, 2010). Questa mappatura ha portato all'elaborazione di indicatori specifici per identificare e considerare gli impatti sui GDE ai sensi del Sustainable Groundwater Management Act (SGMA) della California. Per supportare le agenzie locali nell'identificazione dei GDE nei loro bacini, la mappa elaborata è stata perfezionata attraverso la mappatura della vegetazione mediante telerilevamento (Klausmeyer et al., 2018) e un set di dati spaziali fornito online*. Realizzare mappature dei GDE a scale paesaggistiche più ampie è sempre più possibile grazie al telerilevamento e alle analisi spaziali, condotti utilizzando sistemi di informazione geografica (Eamus et al., 2015). L'organizzazione The Nature Conservancy è a capo di un progetto mondiale di mappatura dei GDE che prevede l'utilizzo di Google Earth Engine per elaborare enormi set di dati globali ottenuti mediante telerilevamento, relativi all'uso del suolo e al clima, che saranno pubblicati nel 2022.

Mappatura degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee in California



Fonte: prodotto dagli autori sulla base del database NCCAG (Klausmeyer et al., s.d.).

* gis.water.ca.gov/app/NCDataSetViewer/.

** I bacini SGMA si riferiscono a bacini ad alta priorità ai sensi del Sustainable Groundwater Management Act (SGMA) della California.

6.2 Ubiquità degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee



**Gli ecosistemi
acquatici
dipendenti dalle
acque sotterranee
sono presenti
in diverse aree,
dalle valli di alta
montagna ai
fondali oceanici,
compresi anche i
deserti**

I GDE sono stati mappati per alcune giurisdizioni, come la California (Stati Uniti d'America, riquadro 6.1) e l'Australia (Doody et al., 2017). La mappatura è una componente importante nel campo interdisciplinare emergente dell'ecoidrogeologia, che mira a colmare le lacune di conoscenza esistenti tra idrologia, idrogeologia ed ecologia (Cantonati et al., 2020) utilizzando vari metodi (Eamus et al., 2015; Segretariato della Convenzione di Ramsar, 2013; Kalbus et al., 2006, Murray et al., 2003).

Gli ecosistemi acquatici dipendenti dalle acque sotterranee sono presenti in diverse aree, dalle valli di alta montagna ai fondali oceanici, compresi anche i deserti. Forse gli ecosistemi che con più evidenza dipendono dalle acque sotterranee sono le sorgenti: ecosistemi molto diversificati, endemici e abbondanti che si trovano in oltre 2,5 milioni di località, tra cui grotte, oasi, cascate, geysir e altri punti di emersione delle acque sotterranee (Cantonati et al., 2020). Sebbene piccoli, gli habitat in prossimità di queste sorgenti sono eccezionalmente ricchi di biodiversità. Uno studio condotto nell'Arizona settentrionale (Stati Uniti) ha rilevato che il 20% della flora di un'intera foresta si trovava in sorgenti che costituivano meno dello 0,001% del paesaggio (Kreamer et al., 2015). Le oasi del deserto sono grandi sorgenti, ma hanno ricevuto poca attenzione nella letteratura sugli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee nonostante la loro importanza a livello globale (774 oasi sono documentate nell'Atlante delle oasi del Sahara e della regione araba e 225, tra sorgenti e oasi di acqua dolce, sono incluse nell'elenco di Ramsar delle zone umide di importanza internazionale).

L'ecologia di molte zone umide, laghi, fiumi e altri corpi idrici superficiali dipende dalle complesse interazioni tra acque sotterranee e superficiali, che possono cambiare nel tempo nel corso delle stagioni o degli anni, e diversificarsi in base all'area all'interno delle zone umide, dei laghi o dei fiumi (Swanson et al., 2021; Kreamer e Springer, 2008). Le zone umide sono qui indicate, in conformità con la loro definizione ai sensi dell'articolo 1.1 della Convenzione di Ramsar, come «distese di paludi, di stagni, di torbiere o di acque naturali o artificiali, permanenti o temporanee, in cui l'acqua è stagnante o corrente, dolce, salmastra o salata, comprese distese di acqua marina la cui profondità, a bassa marea, non superi i sei metri» (Segretariato della Convenzione di Ramsar, 2013).

Il deflusso delle acque sotterranee alimenta i flussi di base di torrenti e fiumi; si tratta di una fonte essenziale di acqua da cui dipende il rischio di prosciugamento di questi corsi durante i periodi di siccità (Boulton e Hancock, 2006; Larned et al., 2010). Il flusso di base può contribuire per quasi il 100% alla portata del flusso di un corso d'acqua in alcune regioni umide (Beck et al., 2013) (figura 6.3); al contrario, nelle regioni aride, esso può contribuire in modo non significativo. In questi ambienti, le reti dei corsi d'acqua effimeri possono essere importanti fonti di ricarica delle acque sotterranee (Cuthbert et al., 2016). Gli acquiferi arroccati possono costituire un importante sostegno per gli ecosistemi delle acque superficiali, poiché i livelli delle acque sotterranee tendono a diminuire più a causa dell'evaporazione che delle infiltrazioni verso il basso. Alcuni esempi importanti sono le pozze nei corsi d'acqua effimeri che possono conservare una certa biodiversità durante i periodi di assenza di flusso, garantendone la sopravvivenza in questi corpi idrici isolati (Bonada et al., 2020).

Il deflusso delle acque sotterranee verso gli ambienti marini è un fenomeno ampiamente diffuso nel contesto delle aree costiere (Luijendijk et al., 2020). Crea ecosistemi unici in cui acqua salata e acqua dolce si mescolano (Lecher e Mackey, 2018), e possono essere una fonte di nutrimento sostanziale per le acque costiere e gli estuari. Ciò può portare all'eutrofizzazione e all'ipossia, soprattutto laddove i bacini idrografici a monte sono fortemente sfruttati a causa dell'agricoltura intensiva e dell'urbanizzazione (Santos et al., 2021; Hosono et al., 2012). Gli elevati livelli di salinità degli ambienti *sabkha* terrestri¹ costieri

¹ Una pianura fangosa o sabbiosa costiera sopratidale, in cui si accumulano minerali evaporitici salini a causa di un clima che varia da semiarido ad arido.



Le interazioni tra le acque sotterranee e gli ecosistemi hanno un'importanza crescente nei principali ecosistemi di acqua dolce del mondo

sono per lo più riequilibrati dalle acque sotterranee, le quali permettono la formazione di soluti che rimangono inalterati dopo l'evaporazione dell'acqua e creano questi biomi speciali (Yechieli e Wood, 2002). In acque ad alta salinità come quelle del Mar Morto, l'afflusso di acque sotterranee favorisce ecosistemi locali che altrimenti non sarebbero in grado di tollerare la salinità (Ionescu et al., 2012). In molte aree interne desertiche, ai margini delle saline sono comunemente presenti anche preziose zone umide con ecologie delicate (Marazuela et al., 2019).

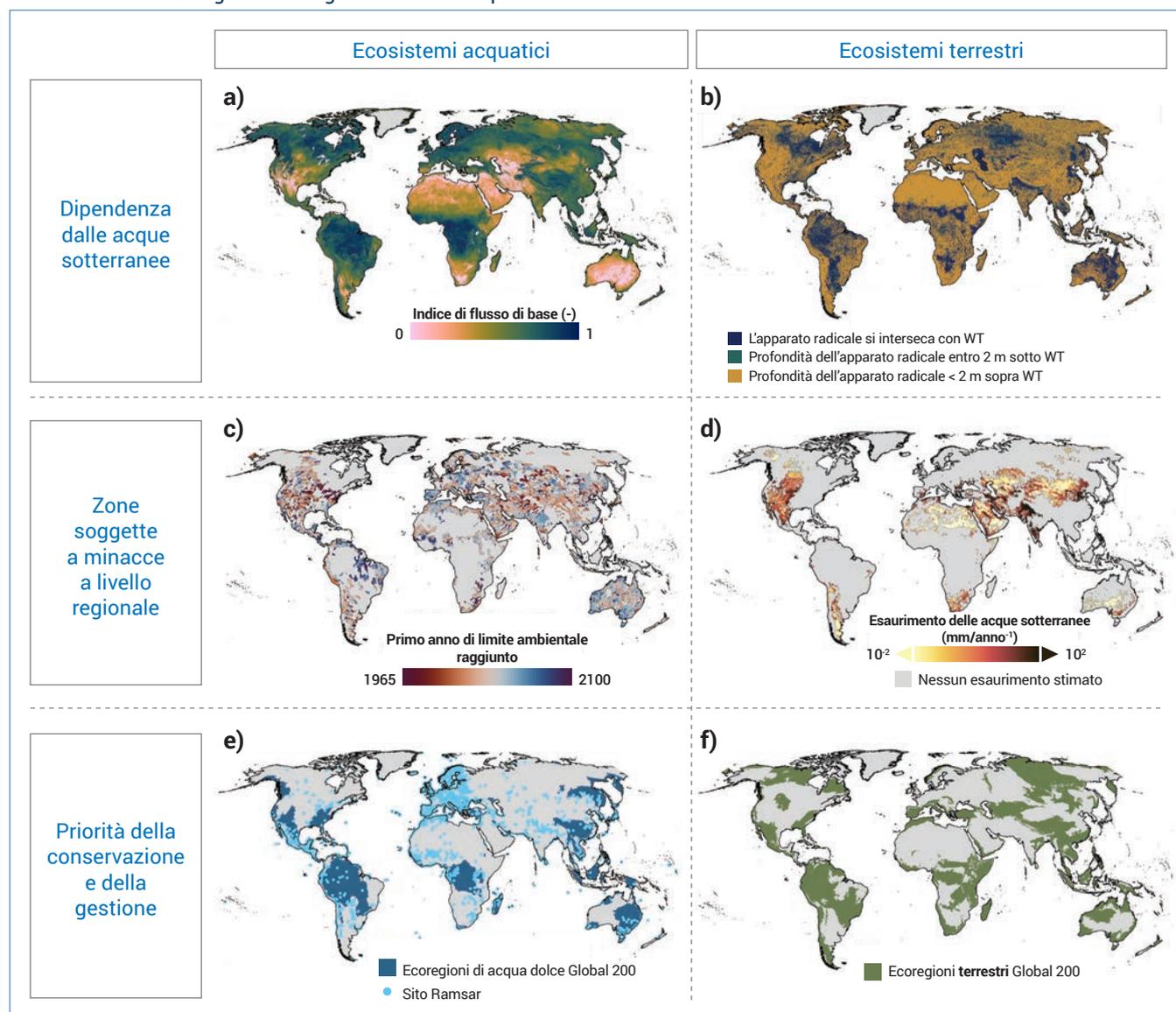
Gli ecosistemi terrestri dipendono dalle acque sotterranee nei paesaggi gestiti e naturali in tutti i biomi antropogenici (Ellis e Ramankutty, 2008) del mondo in cui le piante possono accedere a esse (Fan et al., 2017; figura 6.2a). L'impatto delle diverse coperture forestali sull'infiltrazione e sulla ricarica sono alquanto dibattuti (Ellison et al., 2017). Anche l'effetto della silvicoltura sulla ricarica delle acque sotterranee e sui flussi di bassa stagione è variabile, con impatti diversi a seconda delle regioni e dei climi, nonché delle varie fasi del ciclo forestale (Reynolds and Thompson, 1988). Gli impatti sulla vegetazione non sono stati ancora studiati a fondo o considerati nella gestione della ricarica delle acque sotterranee. Nel Sahel, i livelli delle acque sotterranee sono aumentati nel corso dei decenni soprattutto perché a una vegetazione principalmente naturale radicata in profondità si sono progressivamente sostituite colture più superficiali e che consumano meno acqua (Favreau et al., 2009). Negli ambienti aridi le pozze d'acqua spesso sono alimentate pressoché esclusivamente dalle acque sotterranee, che rivestono quindi un ruolo cruciale per sostenere le complesse reti alimentari degli ambienti più aridi, come ad esempio le savane. Le pozze d'acqua scavate dalla fauna selvatica svolgono spesso un ruolo vitale e mettono in evidenza l'intricato legame che intercorre tra acque sotterranee, supporto dell'ecosistema e biodiversità (Lundgren et al., 2021). Nei biomi dei terreni coltivati e dei pascoli, le acque sotterranee supportano l'ecologia dei paesaggi, sia gestiti che naturali, anche se questi paesaggi sono generalmente visti da una prospettiva agricola piuttosto che ecologica. Infine, le zone rivierasche, quelle umide e altri corpi idrici superficiali spesso dipendono dalle acque sotterranee e possono fornire servizi ecosistemici essenziali. Ad esempio, nelle aree più umide, le foreste ripariali e le zone umide possono purificare il deflusso e il drenaggio, ricchi di azoto, provenienti dalle attività agricole e di allevamento (Bahn e An, 2020), riducendo il carico di nutrienti nei GDE. Al contrario, nelle aree più aride, le inondazioni stagionali possono migliorare la ricarica delle acque sotterranee nelle pianure alluvionali, mentre la sedimentazione può fornire importanti apporti di nutrienti con un conseguente miglioramento del suolo (Talbot et al., 2018).

Gli ecosistemi sotterranei sono ampiamente diffusi, ma generalmente poco conosciuti. Organismi e microrganismi, pur variando in composizione e quantità, sono presenti in tutti gli acquiferi (Humphreys, 2006, Danielopol et al., 2003). Questi ecosistemi sotterranei spesso aiutano a purificare l'acqua e influiscono sullo stoccaggio degli acquiferi, a volte aumentandolo attraverso la bioturbazione e il nutrimento a base di biofilm, e altre volte limitandolo attraverso l'ostruzione dello spazio dei pori. In molti luoghi, l'uso del suolo influenza fortemente la quantità, la composizione e la struttura della comunità degli invertebrati sotterranei; Tione et al. (2016) descrivono un esempio relativo all'Argentina. Poiché gli ecosistemi sotterranei sono sensibili ai cambiamenti nella qualità delle acque sotterranee, il monitoraggio della loro portata e di altri bioindicatori all'interno di questi ecosistemi può fornire approcci alternativi e utili per tenere traccia dei cambiamenti nella qualità delle acque sotterranee (Griebler e Avramov, 2015).

Le interazioni tra le acque sotterranee e gli ecosistemi hanno un'importanza crescente nei principali ecosistemi di acqua dolce del mondo, come quelli che si trovano nell'elenco delle ecoregioni di acqua dolce prioritarie per la conservazione globale (Olsson et al., 2002; figura 6.3e), compresi alcuni fiumi dell'Australia orientale, il fiume Indo, il fiume Congo, il Rio delle Amazzoni, il fiume Colorado; e altri importanti complessi di zone umide come il delta dell'Okavango nell'Africa meridionale, le paludi di Sudd nel Sud Sudan, il delta

del Niger interno nel Sahel e il Pantanal in America meridionale. Queste regioni non solo forniscono un habitat per livelli di biodiversità significativi a livello globale, ma sono anche cruciali per processi più ampi del sistema Terra, inclusi il ciclo dei nutrienti, il sequestro del carbonio e i processi atmosferici ed energetici (Erwin, 2009). Indicativo della portata e della gravità delle implicazioni derivanti dalle minacce per gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee in tutto il mondo (sezione 6.3) è il fatto che molte di queste regioni sperimentino regolarmente siccità (Australia orientale), soffrano di un abbassamento continuo delle falde acquifere (fiume Indo, fiume Colorado) o conosceranno in futuro uno stoccaggio delle acque sotterranee sempre più variabile o anomalo a causa dei cambiamenti climatici (Delta dell'Okavango; Hughes et al., 2011).

Figura 6.3 Modelli globali di dipendenza dalle acque sotterranee, zone soggette a minacce a livello regionale e priorità per la conservazione e la gestione degli ecosistemi acquatici e terrestri



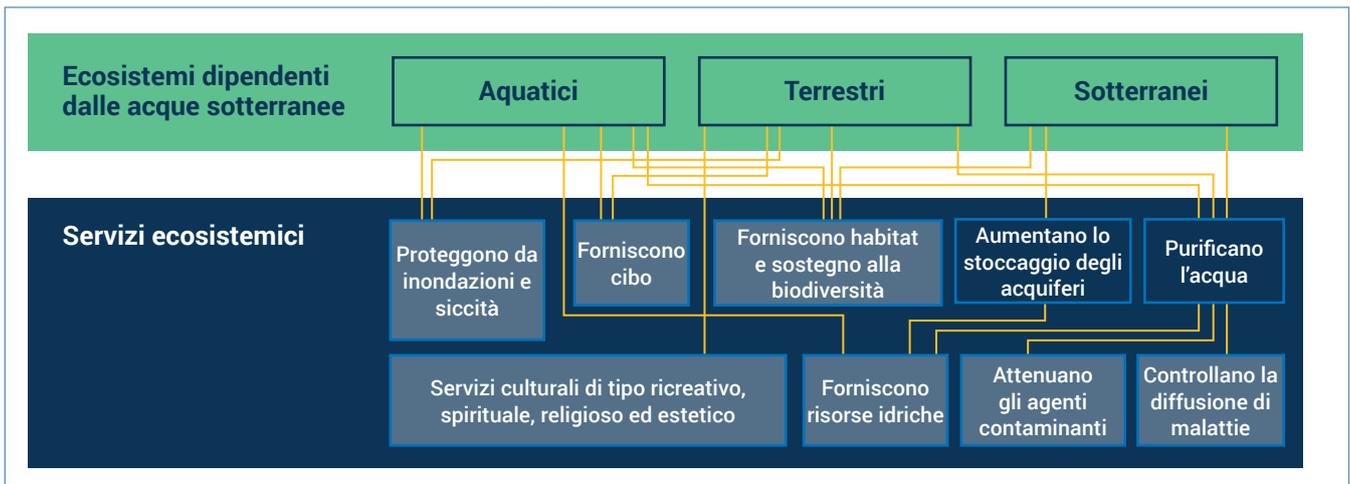
Nota: a) indice del flusso di base, che rappresenta il contributo delle acque sotterranee e di altre fonti d'acqua regolata; b) relazione tra il livello piezometrico (nell'acronimo inglese WT) e la profondità massima di radicazione delle piante; c) anno in cui verrà raggiunto il limite del flusso ambientale secondo le stime (sezione 6.4); d) tassi di esaurimento delle acque sotterranee; e) siti Ramsar (zone umide di importanza internazionale) e siti Global 200 (relativi alle ecoregioni di acqua dolce); f) siti Global 200 relativi alle ecoregioni terrestri. Le ecoregioni Global 200 sono un insieme prioritario di 238 ecoregioni (53 terrestri, 142 di acqua dolce e 43 marine, non incluse qui) definite al fine di proteggere le aree caratterizzate da un'eccezionale biodiversità ed ecosistemi rappresentativi.

Fonti: autori, sulla base dei dati di: a) Beck et al. (2013); b) Fan et al. (2013 e 2017); c) De Graaf et al. (2019); d) Wada et al. (2010); e) Ramsar Sites Information Service (s.d.) e Olson e Dinerstein (2002); f) Olson e Dinerstein (2002).

6.3 Minacce per i servizi ecosistemici relativi alle acque sotterranee

Possiamo definire i servizi ecosistemici come i numerosi e vari benefici per l'uomo offerti dall'ambiente naturale (IPBES, 2019). I GDE supportano servizi ecosistemici essenziali (figure 6.2 e 6.4). Ciascun tipo di GDE sostiene un certo numero di servizi ecosistemici culturali, di supporto, di approvvigionamento, e di regolazione (figura 6.2, vedere anche sezione 1.5). I GDE acquatici e terrestri forniscono habitat, supportano la biodiversità, attenuano le inondazioni e la siccità e forniscono cibo; al tempo stesso, offrono servizi culturali, ricreativi, spirituali e valori estetici. Nel corso della storia umana, le sorgenti hanno ispirato l'arte e la musica, sono state sia causa di conflitti e guerre che strumento strategico in tali contesti, e hanno costituito luogo di cerimonie e credenze religiose (Kreamer et al., 2015). Molte culture indigene credono che le sorgenti, le zone umide e gli ecosistemi ad esse associati abbiano un valore intrinseco più ampio, al di là dei servizi che forniscono alle persone (Nazioni Unite, 2021). Anche gli ecosistemi sotterranei forniscono importanti servizi, come la conservazione e la fornitura di risorse idriche, la riduzione della concentrazione di contaminanti e il controllo delle malattie (Griebler e Avramov 2015). Questi servizi sono talvolta chiamati servizi ecosistemici relativi alle acque sotterranee (Manzano e Lambán, 2011). I GDE e i servizi ecosistemici collegati alla vegetazione e ai suoli nelle zone insature, svolgono un ruolo fondamentale nella protezione degli acquiferi dalla contaminazione, assicurando la loro separazione fisica dagli inquinanti, consentendo processi biofisici quali la filtrazione, la biodegradazione e l'assorbimento di sostanze contaminanti, oltreché agevolando e proteggendo la ricarica naturale (CGIAR WLE, 2015).

Figura 6.4 Collegamento tra i tipi di ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee e i servizi ecosistemici che forniscono



Fonte: autore.

I GDE e i servizi ecosistemici sono generalmente sottorappresentati negli Obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite. L'importanza delle acque sotterranee è scarsamente colta e riconosciuta nei traguardi relativi ai suddetti Obiettivi, il che è aggravato dalla mancanza di dati sulle acque sotterranee utili a livello globale, aggiornati e rilevanti in relazione agli Obiettivi di sviluppo sostenibile, e dalla mancanza di chiarezza sui collegamenti essenziali tra questi ultimi e gli acquiferi (Guppy et al., 2018). Il ruolo delle acque sotterranee negli ecosistemi acquatici è legato ai traguardi 6.4 (uso e scarsità d'acqua) e 6.6 (ecosistemi legati all'acqua). Il traguardo 6.4, l'unico nel contesto degli Obiettivi di sviluppo sostenibile che attualmente rende operativi i servizi legati alle acque sotterranee e agli ecosistemi, incorpora i flussi ambientali nell'indicatore di "stress idrico" 6.4.2. L'indicatore prevede una metodologia e strumenti online per il calcolo dell'estrazione sostenibile delle acque sotterranee collegati alle linee guida sulla valutazione del flusso ambientale (FAO, 2019). Il traguardo 6.6 monitora i cambiamenti che subiscono nel tempo gli ecosistemi legati all'acqua come zone umide,

● ● ●
La qualità, la temperatura e la contaminazione dell'acqua sono tutti fattori che hanno un impatto sugli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee e sui servizi che essi forniscono

fiumi, laghi, bacini idrici e acque sotterranee (Dickens et al., 2017). Ma fino ad oggi, l'attenzione relativa alla raccolta dei dati si è concentrata sull'estensione dell'area delle acque superficiali e non su quelle sotterranee, né sulla differenziazione o sulla mappatura dei GDE, ciò costituisce una lacuna importante nella metodologia legata agli Obiettivi di sviluppo sostenibile.

I GDE e i relativi servizi ecosistemici sono minacciati dall'esaurimento delle acque sotterranee, dai cambiamenti climatici e dai cambiamenti nell'uso del suolo (figure 6.2, 6.3 e 6.5). L'esaurimento delle acque sotterranee e il persistente abbassamento delle falde acquifere hanno un impatto sia sugli ecosistemi acquatici che su quelli terrestri (figura 6.5). Le aree maggiormente soggette all'esaurimento di questa risorsa (figura 6.3d) si trovano in tutto il mondo, spesso in regioni con prelievi intensivi di acque sotterranee per l'irrigazione. L'esaurimento e la diminuzione del flusso dovuti al pompaggio delle acque sotterranee preoccupano non poco in relazione alla salute degli ecosistemi acquatici (Gleeson e Richter, 2017). Gli impatti ecologici dell'esaurimento dei flussi (figura 6.3c) si verificano quando questi flussi sono inferiori a quelli ambientali (definiti nella sezione 6.4); si prevede che entro la metà del secolo tale situazione interesserà circa il 40-80% di tutti i bacini con pompaggio attivo delle acque sotterranee (De Graaf et al., 2019).

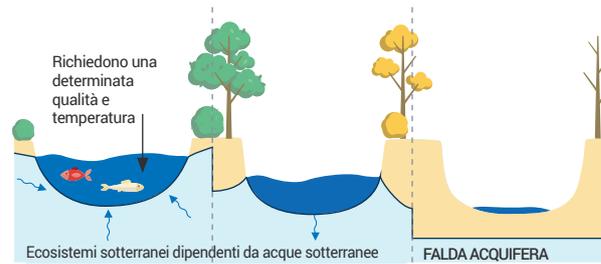
In tutto il mondo, si sta verificando un significativo prosciugamento delle sorgenti, delle zone umide e delle oasi. Gli impatti dei cambiamenti climatici sui GDE (Kløve et al., 2014) sono importanti da considerare, soprattutto perché le acque sotterranee spesso fungono da cuscinetto durante i periodi di siccità, sia alimentando naturalmente i corsi d'acqua, sia indirettamente, attraverso prelievi più intensi per uso umano durante tali periodi. L'indebolimento di queste funzioni può essere dannoso per i sistemi umani ed ecologici. Infine, i cambiamenti nell'uso del suolo influiscono sui GDE. Ad esempio, la perdita di foreste secche ha portato alla salinizzazione in alcune regioni dell'Australia (Clarke et al., 2002) e in quella del Chaco in Argentina e Paraguay (Giménez et al., 2016; Marchesini et al., 2013).

La qualità, la temperatura e la contaminazione dell'acqua sono tutti fattori che hanno un impatto sui GDE e sui servizi che essi forniscono (figura 6.5). Sebbene la quantità delle acque sotterranee (volume, livello, flusso e loro variazioni nel tempo) costituisca il tema principale di questo capitolo, anche la qualità (allo stato naturale e sotto l'influenza degli impatti umani) e la temperatura di tali risorse sono aspetti essenziali. Ogni ecosistema è condizionato da specifici requisiti di qualità dell'acqua e ciò che è appropriato in alcuni ecosistemi può essere dannoso in altri. Ad esempio, la salinità nelle zone umide costiere o nelle saline è necessaria per questi ecosistemi. Tuttavia, in altri ambienti, come gli ecosistemi terrestri, un aumento della salinità dovuto agli acquiferi sollevati artificialmente a causa del cambiamento dell'uso del suolo (ad esempio per la deforestazione in Australia) o di un'irrigazione eccessiva (come nel caso della bassa valle dell'Indo, Pakistan) può portare a degrado dell'habitat, diminuzione della produzione agricola, erosione del suolo, alterazione del ciclo biogeochimico e diminuzione dello stoccaggio del carbonio (Foster e Chilton, 2003). La contaminazione geogenica (cioè con contaminanti chimici presenti in natura) colpisce la salute di milioni di persone in tutto il mondo e può inoltre avere un impatto sui GDE, costituendo un problema che richiede maggiore attenzione (Bretzler e Johnson, 2015). I GDE possono essere compromessi da contaminanti organici noti ed emergenti (pesticidi, prodotti farmaceutici, droghe ricreative, tensioattivi e prodotti per la cura personale) e dall'inquinamento causato da nutrienti derivanti dalle acque reflue domestiche, urbane e agricole. I contaminanti organici e i loro prodotti di degradazione possono causare problemi di salute, inclusi effetti sullo sviluppo e sulla riproduzione dell'essere umano, della fauna selvatica e degli ecosistemi stessi (Campbell et al., 2006). Sappiamo ancora poco sugli ecosistemi colpiti dalla contaminazione delle acque sotterranee poiché gli studi effettuati in passato sugli impatti della contaminazione sugli ecosistemi si sono concentrati sulle acque superficiali.

Figura 6.5

Impatti ecologici della diminuzione della qualità e della quantità delle acque sotterranee

a) Ecosistemi acquatici dipendenti dalle acque sotterranee

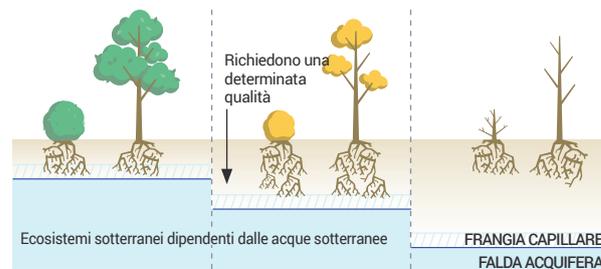


Risposte ecologiche alla diminuzione di disponibilità di acque sotterranee

Nessun esaurimento Grave esaurimento

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Alta produttività • Popolazione in buona salute • Diversità di specie • Condizioni di flusso ideali | <ul style="list-style-type: none"> • Diminuzione della produttività e della crescita • Diminuzione della biodiversità • Diminuzione della riproduzione e della selezione | <ul style="list-style-type: none"> • Crescita della mortalità • Comparsa di specie invasive • Cambiamenti nella struttura e nella funzione degli ecosistemi |
|--|---|--|

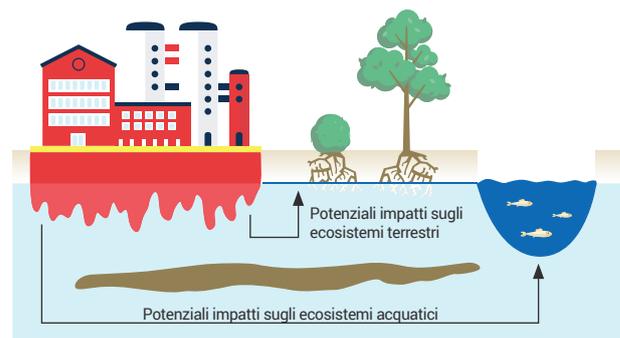
b) Ecosistemi terrestri dipendenti da acque sotterranee



c) Processi di salinizzazione guidati dall'uomo



d) Trasporto di agenti inquinanti



Nota: a) e b) risposte ecologiche alla diminuzione della disponibilità di acque sotterranee: a) ecosistemi acquatici e b) terrestri dipendenti dalle acque sotterranee; c) e d) qualità dell'acqua e impatti della contaminazione sugli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee: c) processi di salinizzazione del suolo e delle acque sotterranee dovuti al cambiamento dell'uso del suolo, al pompaggio nelle aree costiere e all'irrigazione, e d) impatti locali e regionali degli eventi di contaminazione dovuti ai sistemi regionali di flusso delle acque sotterranee.

Fonti: a) e b) sulla base di Rohde et al. (2017, fig. 2, pag. 297), c) sulla base di Foster e Chilton (2003, fig. 8, pag. 1965), d) autori

6.4 Gestione congiunta delle risorse idriche e del territorio, soluzioni basate sulla natura e protezione dell'ecosistema

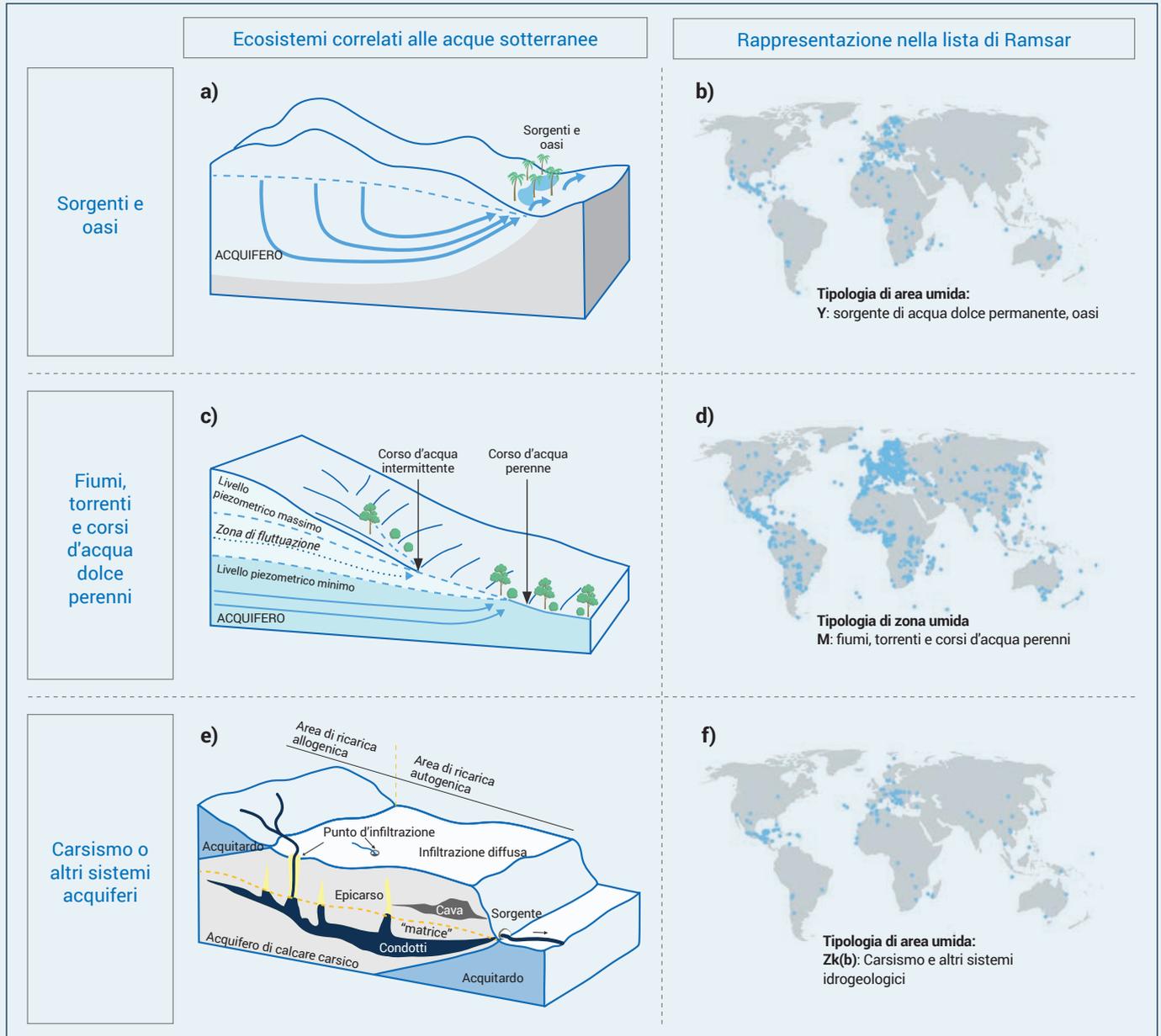
Il benessere comune delle acque sotterranee, degli ecosistemi e degli esseri umani può essere accresciuto da una migliore gestione di questa risorsa, dalla gestione congiunta dell'acqua e del territorio, dalle soluzioni basate sulla natura (WWAP/UN-Water, 2018) e da una migliore protezione dell'ecosistema. La gestione delle acque sotterranee, come descritto nel capitolo 11, si concentra spesso su questa ricchezza o sugli acquiferi stessi. Sebbene sia importante, ciò è spesso insufficiente per garantire che queste acque e gli ecosistemi che ne dipendono continuino a fornire i servizi ecosistemici più importanti. Al contrario, la conoscenza o la gestione delle acque sotterranee spesso non è sufficientemente considerata nel contesto della protezione e della gestione degli ecosistemi. Anche se il deflusso delle acque sotterranee e il flusso di base sono fondamentali per mantenere in buono stato molti ecosistemi acquatici, la dipendenza dalle acque sotterranee di questi sistemi spesso non viene presa in considerazione nella mappatura degli habitat di acqua dolce o della biodiversità (McManamay et al., 2017). Ad esempio, l'elenco Global 200 delle ecoregioni del World Wildlife Fund (sottoclassi terrestri, d'acqua dolce e marine) non considera direttamente o esplicitamente le acque sotterranee né mappa i GDE (riquadro 6.1) quando evidenzia le aree chiave di protezione per gli ecosistemi acquatici e terrestri (Olson e Dinerstein, 2002). Considerare esplicitamente le acque sotterranee nella gestione congiunta dell'acqua e del territorio, nelle soluzioni basate sulla natura e nella protezione dell'ecosistema è un importante punto di partenza per conseguire la sostenibilità delle acque sotterranee e dell'ecosistema.

Riquadro 6.2 Acque sotterranee, zone umide di importanza internazionale (siti Ramsar) e siti designati dall'UNESCO, come siti del patrimonio mondiale, riserve della biosfera e geoparchi

Le acque sotterranee sono poco rappresentate nelle reti globali di conservazione, come l'elenco di Ramsar delle zone umide di importanza internazionale (Segretariato della Convenzione di Ramsar, 2013) e i siti designati dall'UNESCO (siti del patrimonio mondiale, riserve della biosfera e geoparchi). L'elenco di Ramsar riconosce le zone umide (siti Ramsar) che sono significative per "l'umanità nel suo insieme" in base alla rarità del sito, alla diversità biologica che lo caratterizza e ai criteri della comunità ecologica. L'elenco di Ramsar (figura) identifica le acque sotterranee o le loro espressioni di superficie come «sorgenti d'acqua dolce permanenti; oasi» e «carso e altri sistemi idrologici sotterranei», nonché ambienti dipendenti dalle acque sotterranee come «fiumi, corsi d'acqua e torrenti di acqua dolce». Le Parti della Convenzione di Ramsar sono individualmente responsabili della designazione dei siti e di un buon uso e gestione delle zone umide transfrontaliere. Tuttavia, non esiste una valutazione sistematica del ruolo di supporto delle acque sotterranee nella rete globale dei siti Ramsar né del ruolo di tali siti nel supporto alla conservazione delle risorse idriche sotterranee.

I siti designati dall'UNESCO offrono spazio per la sperimentazione e l'esemplificazione dello sviluppo sostenibile. Insieme ai siti Ramsar, i siti designati dall'UNESCO sono fondamentali per raggiungere i traguardi previsti dagli Obiettivi di sviluppo sostenibile. Le zone umide globali, indicate dai siti Ramsar, contribuiscono a 75 indicatori relativi agli Obiettivi di sviluppo sostenibile (Segretariato della Convenzione di Ramsar, 2018). Attualmente, ci sono più di 130 siti Ramsar che coincidono interamente o parzialmente con più di 100 siti designati dall'UNESCO. Un esempio indicativo è il sito del patrimonio mondiale del delta dell'Okavango (Sito Ramsar del sistema del delta dell'Okavango) in Botswana, una grande zona umida interna colpita dalle inondazioni che forma un mosaico di percorsi d'acqua, pianure alluvionali e isole (figura 6.1). L'acqua sotterranea sotto le isole funge da pozzo per i minerali disciolti a causa del "pompaggio dell'acqua" da parte degli alberi e della vegetazione, che rimuovono l'acqua attraverso l'evapotraspirazione impedendo così la salinizzazione di questo sistema idrologico virtualmente chiuso e dominato dall'evaporazione. Questo processo consente alle acque superficiali del delta di rimanere dolci, fornendo una fonte d'acqua per la fauna selvatica e la popolazione locale nel mezzo dell'arido deserto del Kalahari (UNESCO, s.d.). Nonostante la loro importanza nel mantenere la resilienza di diversi ecosistemi, non esiste uno studio completo delle dipendenze o delle relazioni delle acque sotterranee tra i siti designati dall'UNESCO. I siti designati dalla Convenzione di Ramsar e dall'UNESCO possono sostenersi a vicenda ed essere complementari al fine di garantire che i processi ecosistemici e i valori culturali siano pienamente integrati nella protezione e nella gestione di tali siti.

Rappresentazione degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee nell'elenco di Ramsar delle zone umide di importanza internazionale



Fonti: a) e c) sulla base di Foster et al. (2006, fig. 1, pag. 2); b), d) ed f) autori, sulla base dei dati della RSIS (s.d.); e) sulla base di Goldscheider e Drew (2007, fig. 1.1, pag. 3).

Le acque sotterranee fanno parte sia del ciclo idrologico che di complessi ecosistemi acquatici, terrestri e sotterranei. È quindi essenziale integrare la gestione di queste acque con la pianificazione e la protezione degli ecosistemi e dei bacini idrografici, come avviene attualmente a diverse scale: subnazionale (come in California), nazionale (come in Sudafrica o Australia) o sovranazionale (come nell'Unione europea) (Rohde et al., 2017). Una pianificazione dell'uso del suolo che dia maggiore spazio alle acque sotterranee prevede generalmente due elementi: i) il mantenimento della quantità delle risorse e la protezione della qualità, sulla base della vulnerabilità di un sistema acquifero o di un acquifero all'esaurimento, alla subsidenza, al degrado o all'inquinamento; e ii) la protezione delle sorgenti intorno ai singoli siti di prelievo delle acque sotterranee, come pozzi o sorgenti, con particolare attenzione alla protezione dall'inquinamento (Smith et al., 2016).

Riquadro 6.3 Soluzioni basate sulla natura per proteggere gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee

Le soluzioni basate sulla natura possono essere efficaci nel contesto della gestione, protezione o ripristino degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (nell'acronimo inglese GDE) grazie alla loro capacità di ridurre gli impatti antropici (uso del suolo e cambiamenti climatici, estrazione delle acque sotterranee, carichi di nutrienti dovuti alle pratiche agricole, fonti di inquinamento puntuale e diffuso). Due esempi evidenziano la diversità delle soluzioni basate sulla natura e i loro impatti sui GDE.

Le soluzioni basate sulla natura sono state progettate e applicate nel bacino idrografico del lago artificiale Sulejów (Polonia), un'area caratterizzata da fioriture di cianobatteri dovute al forte inquinamento delle acque sotterranee con nitrati e fosforo, derivanti da fonti di inquinamento non puntuali. Una zona sotterranea di segatura di pino mista a terreno o calcare ha portato a una riduzione delle concentrazioni di fosfati e nitrati nelle acque sotterranee rispettivamente del 58% e dell'85% (Izydorczyk et al., 2013; Frątczak et al., 2019).

Un altro esempio di infrastruttura naturale basata sulle acque sotterranee proviene dalla parte costiera e rurale del Bangladesh. Qui, schemi di raccolta locale dell'acqua piovana e stoccaggio delle acque sotterranee progettati con attenzione supportano la sicurezza e la resilienza idrica nelle aree afflitte dalla salinità e dalla presenza di arsenico naturale nelle acque sotterranee (Ahmed et al., 2018). Questi schemi catturano le precipitazioni stagionali, che spesso vanno perse a causa del deflusso superficiale verso il mare, attraverso semplici pozzi e filtri, rendendole disponibili durante tutto l'anno. Inoltre, a causa della densità delle acque sotterranee saline, l'acqua dolce infiltrata tende a galleggiarvi sopra senza mescolarsi. Ogni schema serve piccole comunità che contano fino a diverse centinaia di persone; queste, dopo un'adeguata formazione, sono in grado di mantenere e far funzionare il sistema da sole. Tali sistemi sono stati introdotti in oltre 100 comunità in Bangladesh e presentano grande potenzialità in aree soggette a inondazioni ma caratterizzate da scarse risorse idriche.

Le soluzioni basate sulla natura relative alle acque sotterranee (a volte chiamate anche infrastrutture naturali basate sulle acque sotterranee) utilizzano e gestiscono intenzionalmente i processi e i sistemi relativi alle acque sotterranee e al sottosuolo al fine di aumentare lo stoccaggio dell'acqua, la ritenzione delle inondazioni, la qualità dell'acqua e le funzioni o i servizi ambientali a vantaggio generale della sicurezza idrica, della resilienza umana e della sostenibilità ambientale (Villholth e Ross, s.d.). In materia di acque sotterranee, la più nota soluzione basata sulla natura è la ricarica gestita degli acquiferi, a cui si ricorre sempre più spesso (vedere riquadro 7.1 e sezione 11.5) (Dillon et al., 2019). Esistono altre soluzioni in uno spettro di possibilità che va dalle infrastrutture grigie (più ingegnerizzate) a quelle verdi (più naturali), tra cui l'agricoltura di conservazione, i bacini di infiltrazione dell'acqua, la raccolta del deflusso, la filtrazione delle sponde del fiume e il biorisanamento *in situ* delle acque sotterranee. Molte città hanno installato infrastrutture verdi per migliorare la qualità e la quantità dell'acqua (le cosiddette città spugna; Harris, 2015), tuttavia mancano la conoscenza e la comprensione della qualità e dei potenziali impatti dell'acqua infiltrata negli acquiferi urbani (riquadro 6.3).

Infine, i GDE di solito non sono direttamente o formalmente protetti; alla loro protezione infatti, in particolare nel caso di quelli terrestri e sotterranei, molto spesso non si presta attenzione (Kreamer et al., 2015). Un'importante eccezione in questo senso è la Convenzione di Ramsar (riquadro 6.2), che ha sviluppato un quadro di gestione delle acque sotterranee in sette fasi per mantenere il carattere ecologico delle zone umide di importanza internazionale (Segretariato della Convenzione di Ramsar, 2010). Molte di queste zone sono transfrontaliere

e richiedono una cooperazione internazionale che ne assicuri la protezione e lo sviluppo sostenibile, con un focus esplicito su acque sotterranee e acquiferi condivisi (vedere capitolo 12). Un altro strumento ampiamente utilizzato per proteggere gli ecosistemi acquatici è il monitoraggio dei flussi ambientali, ovvero della quantità, dei tempi e della qualità dei flussi di acqua dolce e dei livelli necessari per sostenere gli ecosistemi acquatici che, a loro volta, supportano le culture, le economie, i mezzi di sussistenza sostenibili e il benessere degli esseri umani (Arthington et al., 2018). Ad esempio, la Direttiva quadro sulle acque dell'Unione europea stabilisce delle soglie in merito a quantità e qualità delle acque sotterranee per i GDE (Parlamento europeo/Consiglio europeo, 2000). In questo caso, i flussi ambientali minimi non devono essere considerati come "esigenze ecologiche", ma come "restrizioni a vari usi" (sia nel caso dei GDE che delle acque sotterranee vicine), al fine di evitare che tali flussi risultino in competizione con la domanda di acqua ad uso umano. Esistono molti metodi di calcolo del flusso ambientale, ma sono pochissimi quelli che quantificano o anche considerano esplicitamente il contributo ad essi apportato dalle acque sotterranee (FAO, 2019; Gleeson e Richter, 2017). Infine, è necessario comprendere meglio gli aspetti relativi alla qualità dell'acqua dei flussi ambientali associati alle acque sotterranee.

Capitolo 7

Acque sotterranee, acquiferi e cambiamenti climatici

UNESCO-IHP

Richard Taylor e Alice Aureli

IAH

Diana Allen, David Banks, Karen Villholth e Tibor Stigter

Con il contributo di Mohammad Shamsudduha (UCL-IRDR), Maxine Akhurst (BGS), Niels Hartog (KWR), Harmen Mijnlief e Rory Dalman (TNO), Bridget Scanlon (UTexas-Austin), Timothy Green (USDA), Yuliya Vystavna (IAEA), Tommaso Abrate (WMO), Pedro Arrojo-Agudo (Relatore speciale sui diritti umani all'acqua potabile sicura e ai servizi igienico-sanitari), Tatiana Dmitrieva e Mahmoud Radwan (UNESCO-IHP), Guillaume Baggio Ferla (UNU-INWEH), Ziad Khayat (UNESCWA), Eva Mach (IOM) e Enric Vázquez Suñé (IDAEA-CSIC)



7.1 Introduzione

I cambiamenti climatici influenzano fortemente l'offerta e la domanda di acqua dolce a livello globale. Il riscaldamento di ~1°C nell'ultimo mezzo secolo a livello mondiale ha avuto un impatto diretto sulla fornitura di acqua dolce attraverso l'aumento delle precipitazioni estreme, episodi di inondazioni e siccità più frequenti e intensi, l'incremento dei tassi di evapotraspirazione, l'innalzamento del livello del mare e il cambiamento dei regimi delle precipitazioni e dell'acqua di disgelo. Le acque sotterranee, la più grande riserva diffusa di acqua dolce al mondo, svolgono per loro natura un ruolo vitale nel consentire alle società di adattarsi alla carenza idrica sia saltuaria che prolungata causata dai cambiamenti climatici. È inoltre essenziale soddisfare la crescente domanda di acqua per realizzare molti degli Obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, inclusi il 2 (fame zero), il 6 (acqua per tutti) e il 13 (azione per il clima). Gli acquiferi che trasmettono e immagazzinano le acque sotterranee possono anche contribuire alla mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso l'uso dell'energia geotermica per ridurre le emissioni di anidride carbonica (CO₂), nonché attraverso la cattura e lo stoccaggio di CO₂. Questo capitolo esamina la più recente conoscenza degli impatti dei cambiamenti climatici sulla quantità e sulla qualità delle acque sotterranee, nonché le opportunità, i rischi e le sfide poste dallo sfruttamento degli acquiferi per l'adattamento ai cambiamenti climatici e la loro mitigazione.

7.2 Impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee



Le acque sotterranee, la più grande riserva diffusa di acqua dolce al mondo, svolgono per loro natura un ruolo vitale nel consentire alle società di adattarsi alla carenza idrica sia saltuaria che prolungata causata dai cambiamenti climatici

I cambiamenti climatici influenzano i sistemi idrici sotterranei direttamente attraverso modifiche nel bilancio idrico sulla superficie terrestre e indirettamente attraverso variazioni nei prelievi di acque sotterranee come risposta delle società ai cambiamenti nella disponibilità di acqua dolce (figura 7.1 – Taylor et al., 2013a; Lall et al., 2020). Gli impatti dei cambiamenti climatici sui bilanci idrici terrestri possono essere ulteriormente modificati dalle attività umane come l'uso del suolo e il cambiamento della copertura del suolo (nell'acronimo inglese LULC; Favreau et al., 2009; Amanambu et al., 2020). Il riscaldamento globale innesca anche il rilascio di acqua dolce dallo stoccaggio a lungo termine nelle calotte glaciali continentali e l'espansione termica degli oceani, entrambi fattori che contribuiscono sostanzialmente all'innalzamento del livello del mare (nell'acronimo inglese SLR).

7.2.1 Impatti diretti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee

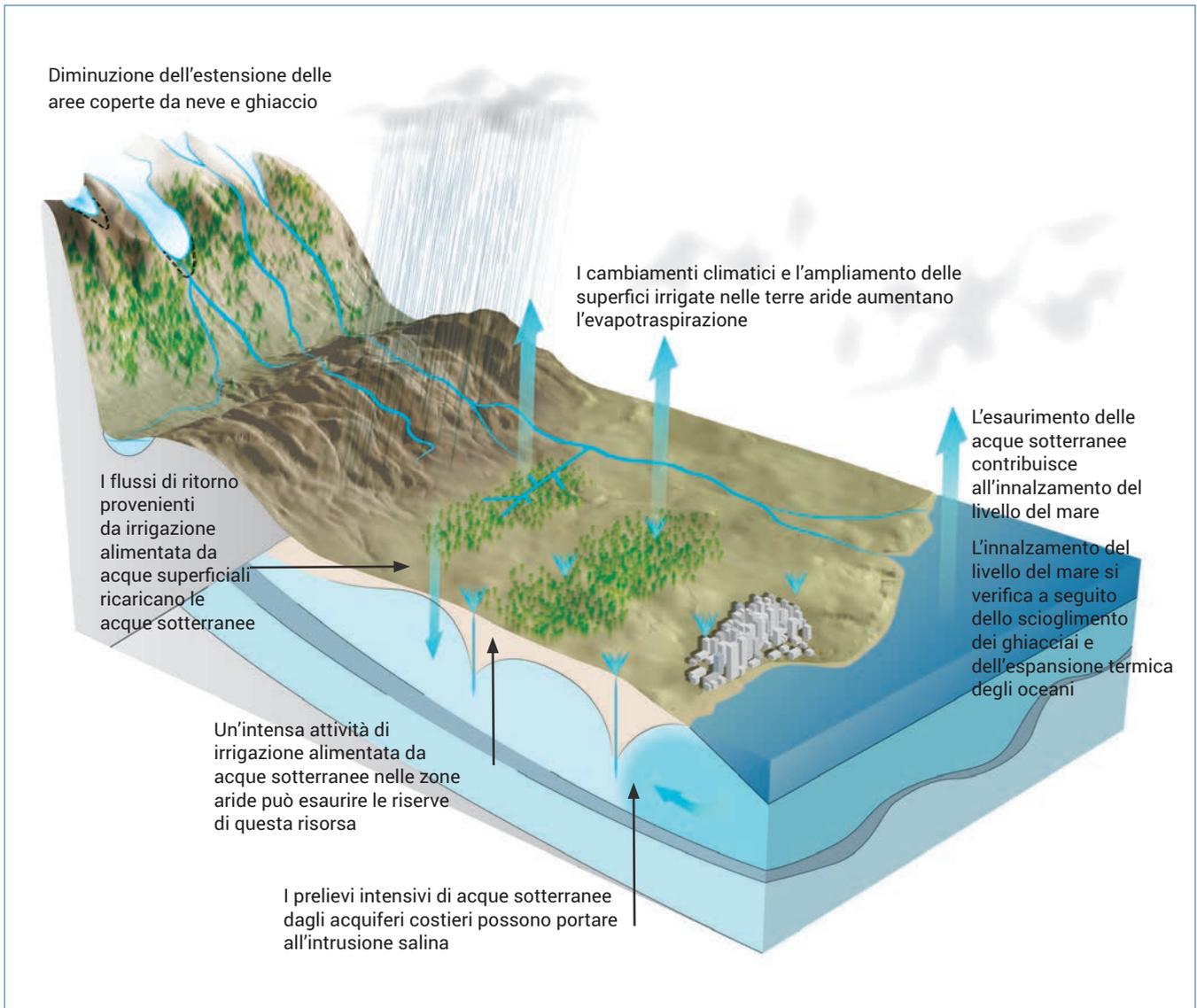
I cambiamenti climatici hanno un impatto diretto sulla rigenerazione naturale delle acque sotterranee. Questa ricarica può avvenire direttamente attraverso le precipitazioni (cioè ricarica diffusa) e gli apporti dalle acque superficiali, inclusi flussi effimeri, zone umide o laghi (cioè ricarica puntuale). Quest'ultimo processo è più diffuso nelle zone aride¹ (Scanlon et al., 2006; Cuthbert et al., 2019a). A livello globale, le stime medie della ricarica diffusa contemporanea modellizzate (dal 1960 al 2010) oscillano da 110 a 140 millimetri all'anno (Mohan et al., 2018; Müller Schmied et al., 2021), equivalenti a 15-19 chilometri cubi all'anno, e comprendono circa il 40% delle risorse di acqua dolce rinnovabili del mondo (Müller Schmied et al., 2021). Tuttavia, persiste una sostanziale incertezza nelle proiezioni globali degli impatti dei cambiamenti climatici sulla ricarica delle acque sotterranee. Questa incertezza deriva principalmente dai limiti presentati dai modelli di circolazione globale (nell'acronimo inglese GCM) nella rappresentazione dei cambiamenti climatici, così come da quelli dei modelli idrologici globali (nell'acronimo inglese GHM) riguardo alla ricarica delle acque sotterranee (Reinecke et al., 2021).

Cambiamenti nelle precipitazioni e nell'evapotraspirazione

Il clima e la copertura del suolo determinano in gran parte i tassi di precipitazione (P) e di evapotraspirazione (ET), mentre il suolo e la geologia sottostanti determinano se un surplus d'acqua (P - ET) può essere trasmesso a un acquifero sottostante. L'aumento dei tassi di ET dovuto al riscaldamento globale limita la generazione di surplus d'acqua; a livello mondiale si stima che l'ET sia aumentata di circa il 10% tra il 2003 e il 2019 (Pascolini-Campbell et al., 2021).

¹ Le zone aride sono aree con un clima subumido, semiarido, arido o iperarido.

Figura 7.1 Interazioni principali tra acque sotterranee e cambiamenti climatici che mostrano come gli impatti diretti e indiretti dei cambiamenti climatici influiscono sui sistemi acquiferi



Fonte: autori, adattato e rivisto da Taylor et al. (2013a).

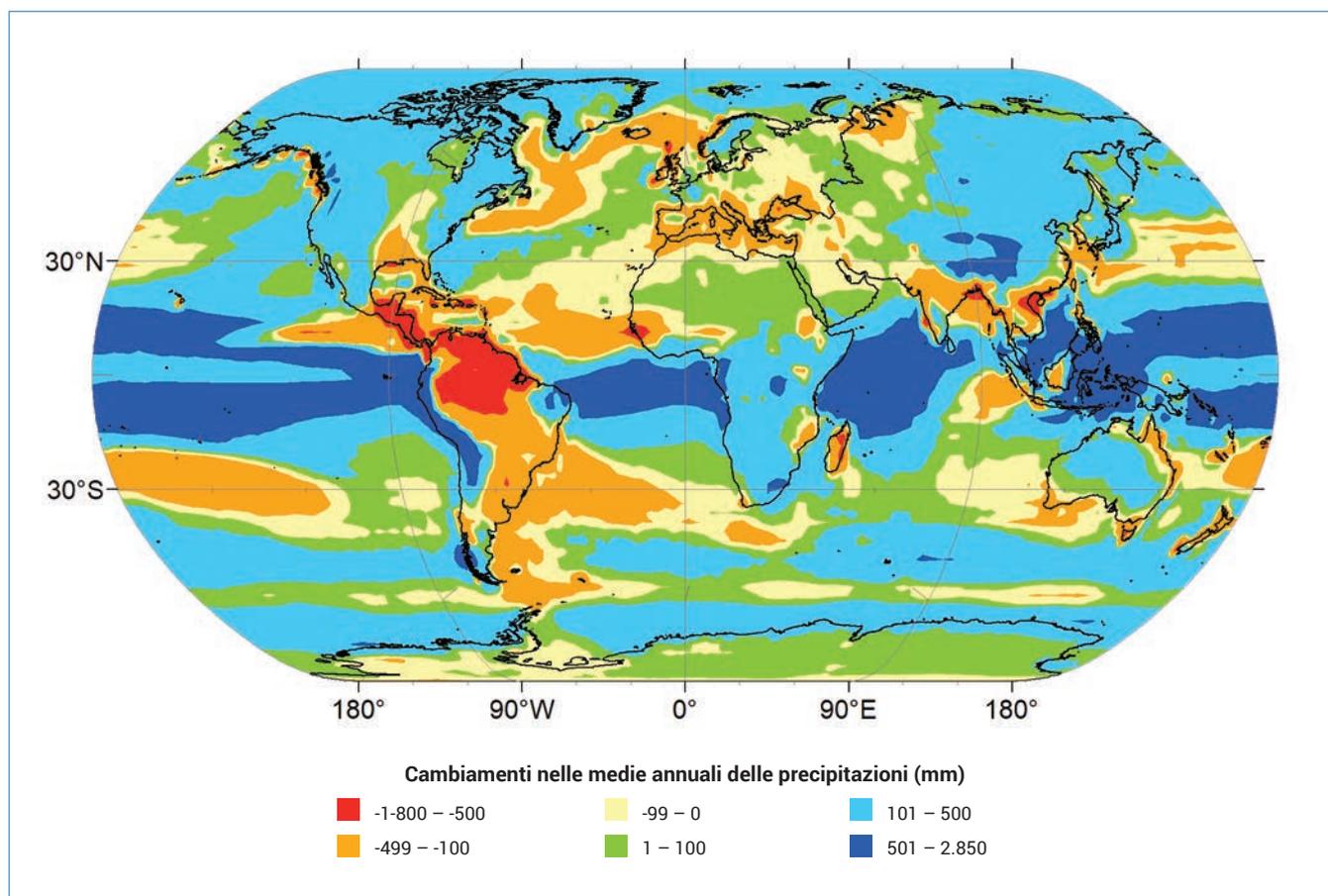
La variabilità spaziale nella ricarica diffusa è controllata principalmente dalla distribuzione delle precipitazioni. Con il riscaldamento del pianeta, tuttavia, persiste una notevole incertezza su dove, quando e quanta pioggia o neve cadrà. Una delle conclusioni principali del quinto *Rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sui cambiamenti climatici* (IPCC, 2014a, pag. 1085), ovvero l'idea che le risposte idrologiche ai cambiamenti climatici possano essere riassunte nel fenomeno per cui "l'umidità diventa più umida e la siccità più secca", si è rivelata troppo semplicistica (Byrne e O'Gorman, 2015). Si prevedono sostanziali riduzioni delle precipitazioni nelle regioni equatoriali umide delle Americhe e dell'Asia, laddove ci si attendono i maggiori aumenti sugli oceani all'altezza dei tropici e non sulla terraferma (figura 7.2).

Nel corso del tempo si è notato che gli eventi climatici estremi (ad esempio siccità e inondazioni), che influenzano fortemente la ricarica delle acque sotterranee, sono spesso correlati a fenomeni di variabilità climatica come El Niño-Oscillazione meridionale (nell'acronimo inglese ENSO, ad esempio vedere Taylor et al., 2013b; Kolusu et al., 2019) e l'oscillazione multidecennale atlantica (Green et al., 2011). Tuttavia, non vi è un consenso nelle previsioni su come tali fenomeni di variabilità climatica su larga scala, come ENSO,

risponderanno al riscaldamento globale (McPhaden et al., 2020). Durante la lunga siccità cosiddetta del “millennio” che ha interessato l’Australia dal 1995 al 2010, lo stoccaggio delle acque sotterranee nel bacino dei fiumi Murray-Darling è diminuito in modo sostanziale e continuo di circa 100 ± 35 chilometri cubi dal 2000 al 2007 in risposta a una forte riduzione della ricarica e all’assenza di eventi piovosi estremi (Leblanc et al., 2009). Condizioni più umide, tuttavia, non sempre portano a una maggiore ricarica delle acque sotterranee: l’incidenza di maggiori precipitazioni invernali (superiori alla media di ben 2,5 volte) negli Stati Uniti sudoccidentali durante gli anni interessati da ENSO, ad esempio, possono dare origine a un aumento dell’evapotraspirazione dalle fioriture nel deserto che consumano in gran parte o interamente l’acqua in eccesso (Scanlon et al., 2005).

Un impatto osservato e diffuso dei cambiamenti climatici che influenza la ricarica delle acque sotterranee è l’intensificazione delle precipitazioni. Poiché l’aria più calda trattiene più umidità, è necessaria una maggiore evapotraspirazione per raggiungere i punti di condensazione (rugiada) in una condizione di riscaldamento globale. Questa transizione si traduce in un minor numero di eventi di precipitazioni leggere e in precipitazioni abbondanti più frequenti (Myhre et al., 2019). Tale “intensificazione” delle precipitazioni è maggiore ai tropici (Allan et al., 2010), dove si prevede che la maggior parte della popolazione mondiale vivrà entro il 2050 (Gerland et al., 2014). Le conseguenze di questa distribuzione mutevole delle precipitazioni globali includono un’umidità del suolo più variabile e ridotta, inondazioni più frequenti e intense, nonché siccità più lunghe e frequenti.

Figura 7.2 Cambiamenti previsti nelle precipitazioni medie annue a livello globale dovuti ai cambiamenti climatici



Nota: le aree in rosso (blu scuro) e marrone (azzurro) indicano dove sono previste sostanziali riduzioni (aumenti) delle precipitazioni nel corso di questo secolo. I cambiamenti sono definiti come la differenza tra la precipitazione media annuale prevista (2071-2100) secondo il Coupled-Modelled Inter-Comparison Project Phase 5 (CMIP5) e la precipitazione media annuale osservata (1979-2019) secondo il Global Precipitation Climatology Project (GPCP v2.3).

Fonte: autori, sulla base dei dati CMIP5 di Taylor et al. (2012a) e dei dati GPCP da Adler et al. (2003).



Un impatto osservato e diffuso dei cambiamenti climatici che influenza la ricarica delle acque sotterranee e l'intensificazione delle precipitazioni

Si prevede che la transizione verso eventi di precipitazione meno frequenti ma di maggiore entità migliorerà la ricarica delle acque sotterranee in molte parti del mondo. È stato dimostrato che le forti piogge contribuiscono oltremodo alla ricarica delle acque sotterranee in corrispondenza dei tropici (Jasechko e Taylor, 2015; Cuthbert et al., 2019a; MacDonald et al., 2021), comprese le zone aride, dove precipitazioni estreme (forti) creano corpi idrici superficiali effimeri che generano una ricarica locale (Favreau et al., 2009; Taylor et al., 2013b; Seddon et al., 2021). Il contributo sproporzionatamente maggiore delle forti piogge alla ricarica delle acque sotterranee è stato notato in modo simile nelle zone aride al di fuori dei tropici in Australia (Crosbie et al., 2012) e negli Stati Uniti sudoccidentali (Small, 2005). Gli aumenti episodici dello stoccaggio delle acque sotterranee dovuto alla ricarica, stimati dai dati del satellite della missione GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)² nelle zone aride di tutto il mondo, sono associati a precipitazioni annuali estreme (>90° percentile; figura 7.3). Al contrario, nelle regioni temperate caratterizzate da acquiferi poco profondi che possono risalire rapidamente alla superficie del suolo durante forti piogge, i potenziali incrementi di ricarica sono limitati (Rathay et al., 2018) e possono verificarsi allagamenti degli acquiferi (Macdonald et al., 2012).

Cambiamenti riguardanti i ghiacciai e la neve

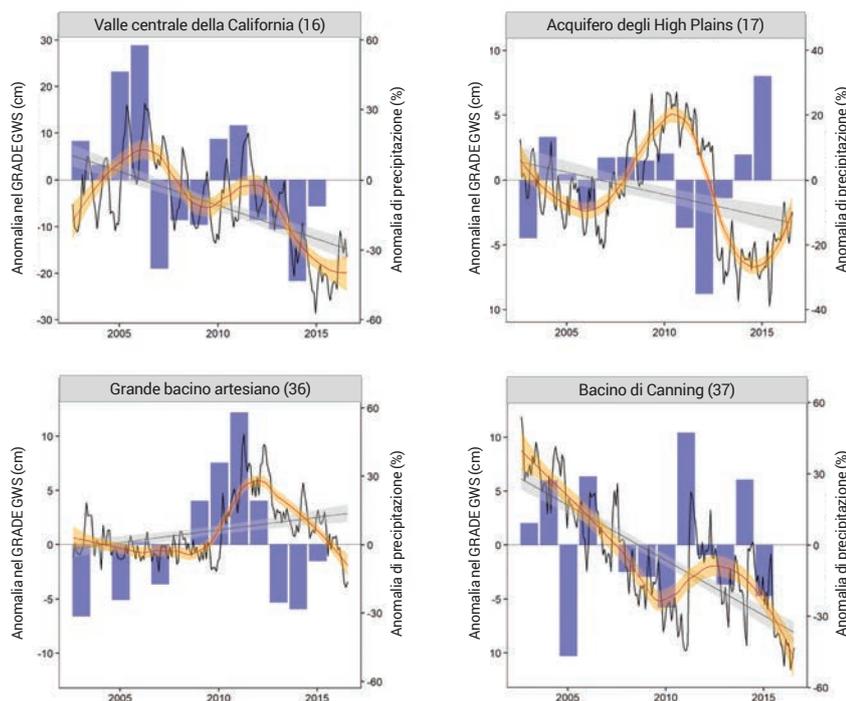
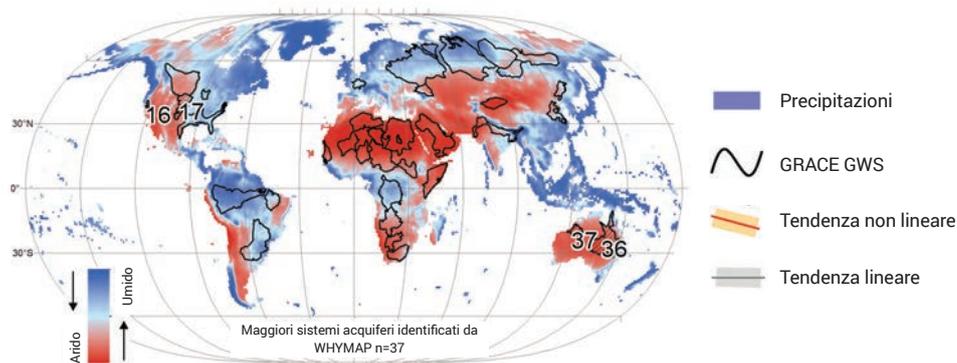
Alle latitudini settentrionali continentali, così come nelle regioni montuose e polari, il riscaldamento globale altera i regimi di flusso dell'acqua di disgelo proveniente dal ghiaccio e dalla neve, influenzando la ricarica delle acque sotterranee. Nelle regioni temperate, il riscaldamento si traduce in un minor accumulo e in uno scioglimento precoce delle nevi, così come in più precipitazioni invernali che cadono sotto forma di pioggia e in una maggiore frequenza di eventi di pioggia su neve (Harpold e Kohler, 2017). L'impatto aggregato di questi effetti è una riduzione della durata stagionale e dell'entità della ricarica, che riduce l'accumulo di acqua nei bacini idrografici e acuisce le difficoltà dovute alle basse portate che caratterizzano le estati estreme (Dierauer et al., 2018). Gli acquiferi nelle valli di montagna mostrano variazioni nei tempi e nell'entità di: 1) livelli massimi delle acque sotterranee dovuti a uno scioglimento primaverile e 2) bassi livelli delle acque sotterranee associati a periodi più lunghi di flusso di base ridotto (figura 7.1; Allen et al., 2010). I flussi estivi ridotti dei torrenti possono essere aggravati dal calo dei livelli delle acque sotterranee, al punto che il flusso può diventare inadeguato a soddisfare i requisiti idrici domestici e agricoli (vedere sezione 7.2.2) e non riuscire a mantenere funzioni ecologiche come gli habitat acquatici per pesci e altre specie. Questi cambiamenti idrologici sono aggravati dalla temperatura più elevata delle basse portate estive (Dierauer et al., 2018).

Le conseguenze dello scioglimento dei ghiacciai alpini sulle acque sotterranee non sono ancora chiare. Quando i ghiacciai si ritirano a causa dei cambiamenti climatici, la produzione di acqua di disgelo inizialmente aumenta fino a un massimo, noto come "picco dell'acqua", prima di diminuire mentre i ghiacciai continuano a ritirarsi; si ritiene che circa la metà dei bacini di drenaggio glaciali del mondo abbia superato il picco dell'acqua (Huss e Hock, 2018). Nelle Ande tropicali del Perù, i flussi dell'acqua di disgelo dei ghiacciai diminuiscono costantemente dopo il picco dell'acqua, ma durante la stagione secca le acque sotterranee continuano a riversarsi nei corsi d'acqua, mantenendo il flusso di base durante la stagione secca (Somers et al., 2019). Allo stesso modo, analisi recenti evidenziano aumenti della ricarica mirata a causa dell'incremento dell'apporto dell'acqua di disgelo al flusso dei corsi d'acqua nelle zone aride ghiacciate (Liljedahl et al., 2017). A lungo termine i cambiamenti climatici causeranno una riduzione della ricarica dovuta all'aumento dell'evapotraspirazione, che può ridurre l'apporto dell'acqua di disgelo, la quale genera una ricarica volta a ovviare alla bassa portata estiva (Taylor et al., 2013a).

² <https://grace.jpl.nasa.gov/mission/grace-fo/>.

Figura 7.3

Cambiamenti nello stoccaggio mensile delle acque sotterranee e nelle precipitazioni annue in quattro grandi sistemi acquiferi nelle zone aride degli Stati Uniti e dell'Australia



Nota: gli anni interessati da precipitazioni estreme (90° percentile) includono il 2006 (Valle centrale della California), il 2015 (acquifero degli High Plains), il 2011 (Grande bacino artesiano) e il 2011 (bacino di Canning). Serie di variazioni mensili nello stoccaggio delle acque sotterranee derivate dai dati satellitari della missione GRACE con variazioni delle precipitazioni annuali, Unità di ricerca climatica (CRU) v. 4.01 (Harris et al., 2014) e tendenze non lineari e lineari adattate.

L'inviluppo ombreggiato vicino alle tendenze indica un intervallo di fiducia del 95%; le posizioni dei quattro grandi sistemi acquiferi (definiti da WHYMAP, 2008) sono mostrate sulla mappa del mondo in alto a sinistra, con l'indice di aridità come ombreggiatura blu-rossa.

Fonte: autori, basato su Shamsudduha e Taylor (2020).

Il congelamento stagionale dei suoli che interessa circa il 50% dei terreni esposti nell'emisfero settentrionale (Zhang et al., 2003) svolge un'importante funzione di controllo sull'infiltrazione dovuta allo scioglimento della neve e influenza fortemente la quantità e i tempi del deflusso invernale e primaverile nelle regioni fredde (Hayashi, 2013). Dal 1901 al 2002, l'estensione del terreno ghiacciato, su base stagionale, nell'emisfero settentrionale è diminuita del 7% a causa dell'aumento della temperatura dell'aria (Lemke et al., 2007). I cambiamenti climatici modificano anche la distribuzione e l'estensione del permafrost, alterando l'umidità del suolo, la stagionalità del flusso e la quantità di acqua immagazzinata sopra e sotto il suolo (Walvoord e Kurylyk, 2016). Il maggiore scioglimento dei ghiacci in seguito ai cambiamenti climatici riduce la distribuzione e lo spessore del permafrost, creando nuovi percorsi sotterranei laterali che aumentano i collegamenti tra gli acquiferi e le acque superficiali (Lamontagne-Hallé et al., 2018). Questa transizione spiega il paradosso osservato nell'Artico sia della bagnatura o *wetting* (cioè aumento del flusso di base verso i fiumi a valle) che dell'essiccazione o *drying* (cioè restringimento delle zone umide e dei laghi a monte).



L'impatto del solo aumento del livello del mare sull'intrusione di acqua marina è spesso piccolo rispetto a quello dell'estrazione di acque sotterranee



I cambiamenti climatici presentano rischi diretti per la qualità delle acque sotterranee, non solo come risultato dell'aumento delle precipitazioni estreme, ma anche a causa della riduzione della ricarica

Innalzamento del livello del mare e salinizzazione degli acquiferi costieri

Gli acquiferi costieri costituiscono l'interfaccia tra i sistemi idrologici oceanici e terrestri e forniscono una fonte fondamentale di acqua dolce per le persone nelle regioni costiere. L'innalzamento globale del livello del mare di circa 3 millimetri all'anno dal 1990, rispetto a circa un millimetro all'anno dal 1902 al 1990 (Dangendorf et al., 2017), ha causato l'intrusione di acqua di mare negli acquiferi costieri di tutto il mondo (Michael et al., 2013). L'intrusione di acqua di mare dipende da una varietà di fattori oltre che dall'innalzamento stesso, tra cui la geologia costiera e la topografia, nonché il rifornimento e l'estrazione di acque sotterranee dolci (Stigter et al., 2014). La minaccia rappresentata dall'aumento del livello del mare per le acque sotterranee è più alta per i delta a bassa altitudine (ad esempio i delta del Gange-Brahmaputra e del Mekong) e per le isole con tassi limitati di deflusso delle acque sotterranee, che includono i piccoli Stati insulari in via di sviluppo (nell'acronimo inglese SIDS; Holding et al., 2016).

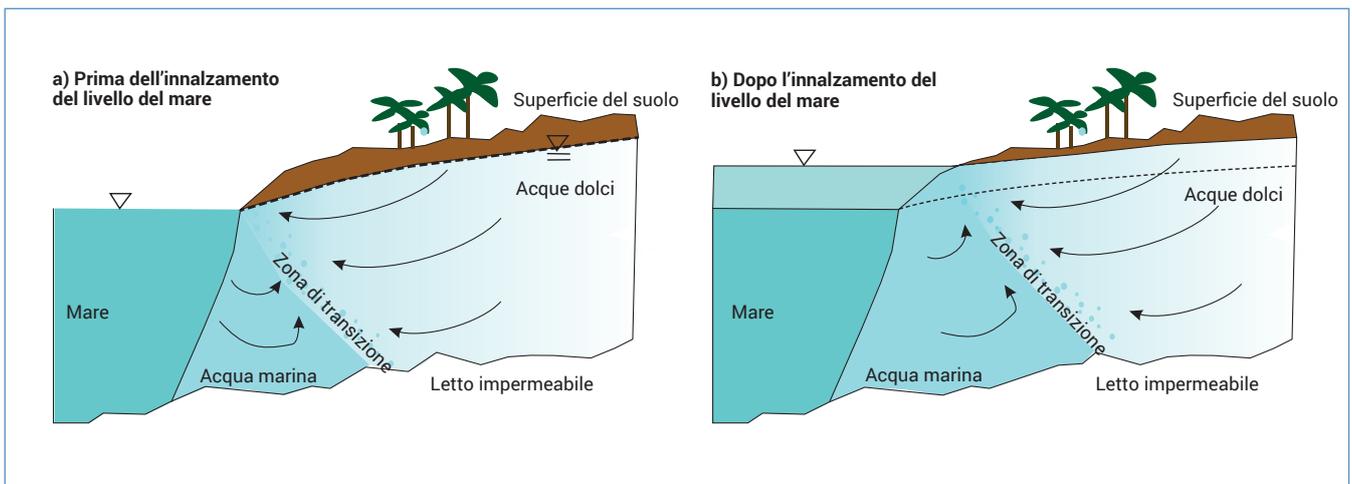
L'intrusione di acqua di mare è la conseguenza di uno spostamento verso l'interno dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata nel sottosuolo (figura 7.4). Gli impatti dell'innalzamento del livello del mare sono aggravati dalle inondazioni di acqua di mare durante le mareggiate, dai cicloni (Holding e Allen, 2015; Ketabchi et al., 2016; Shamsudduha et al., 2020) e dagli tsunami (Villholth, 2013b), causando intrusioni verticali e laterali nell'acquifero. Gli atolli (cioè le isole della barriera corallina) sono esempi estremi di tali ambienti vulnerabili (Werner et al., 2017), dove le lenti di acque sotterranee dolci sono altamente dinamiche ed eterogenee a causa degli effetti combinati di una geologia complessa, eventi oceanici episodici, forte variabilità climatica, e interventi umani (ad esempio cambiamenti nell'uso e nella copertura del suolo e pompaggio delle acque sotterranee).

L'impatto del solo aumento del livello del mare sull'intrusione di acqua marina è spesso piccolo rispetto a quello dell'estrazione di acque sotterranee (Ferguson e Gleeson, 2012). Di conseguenza, l'intrusione di acqua di mare è spesso osservata in modo più evidente negli acquiferi costieri fortemente sfruttati con un'elevata densità di popolazione (ad esempio Giacarta; Gaza, Stato di Palestina). Il pompaggio intensivo di acque sotterranee può accelerare l'intrusione di acqua di mare attraverso la subsidenza del suolo, come è stato osservato in Arabia Saudita, Australia, Bangladesh, Cina, Indonesia e Stati Uniti (Polemio e Walraevens, 2019; Nicholls et al., 2021), dove i tassi di subsidenza possono superare quelli di innalzamento del livello del mare previsti. I delta a bassa altitudine, in cui il sottosuolo è dominato da sedimenti argillosi inclini alla compattazione a causa dell'abbassamento del livello piezometrico, sono particolarmente vulnerabili all'intrusione di acqua marina (Herrera-García et al., 2020).

Altri impatti diretti dei cambiamenti climatici sulla qualità delle acque sotterranee

I cambiamenti climatici presentano rischi diretti per la qualità delle acque sotterranee, non solo come risultato dell'aumento delle precipitazioni estreme, ma anche a causa della riduzione della ricarica. Precipitazioni intense (ad esempio maggiori di dieci millimetri al giorno) possono facilitare la ricarica e mobilitare contaminanti come cloruro e nitrato nella zona vadosa immediatamente al di sopra degli acquiferi delle zone aride (ad esempio vedere Gurdak et al., 2007) e delle regioni temperate (Graham et al., 2015); inoltre, il deflusso superficiale può intercettare rifiuti mal gestiti e sostanze chimiche immagazzinate sopra o vicino al suolo, che poi filtrano negli acquiferi (OMS, 2018). In aree con servizi igienico-sanitari inadeguati, questi eventi possono anche portare a scaricare nella falda agenti patogeni microbici fecali e sostanze chimiche (ad esempio nitrati) attraverso terreni poco profondi (ad esempio vedere Taylor et al., 2009; Sorensen et al., 2015; Houéménou et al., 2020), a volte favoriti da percorsi di flusso preferenziali come i macropori del suolo (Beven e Germann, 2013). Infatti, la ricarica dovuta a eventi piovosi intensi in tali ambienti è stata associata a focolai di malattie diarroiche, compreso il colera (Olago et al., 2007; De Magny et al., 2012). I cambiamenti nelle pratiche igienico-sanitarie, indotti dalla siccità, nella città di Ramotswa nel semiarido Botswana hanno portato al passaggio da servizi igienico-sanitari alimentati da acqua (WC con scarico) a strutture igienico-sanitarie *in loco* (ad esempio latrine a fossa), che hanno aumentato il rischio di contaminazione delle acque sotterranee (McGill et al., 2019).

Figura 7.4 Impatto dell'innalzamento del livello del mare (SLR) sull'intrusione di acqua marina in un sistema acquifero costiero non confinato in pendenza



Fonte: autori, adattato da Ketabchi et al. (2016).

Le riduzioni della ricarica delle acque sotterranee attribuite ai cambiamenti climatici nella regione mediterranea (ad esempio vedere Stigter et al., 2014) hanno portato alla concentrazione di soluti come cloruro, nitrato e arsenico nei suoli e negli acquiferi poco profondi, a causa della maggiore evaporazione e della minore diluizione (Mas-Pla e Mencio, 2019).

La combinazione del riscaldamento globale e dell'effetto dell'urbanizzazione, che viene definito isola di calore, sulle temperature del sottosuolo ha implicazioni anche per la qualità delle acque sotterranee, a causa dei cambiamenti nella solubilità e nella concentrazione di contaminanti come il manganese e il carbonio organico disciolto (Taniguchi et al., 2007; Riedel, 2019; McDonough et al., 2020). Lo scioglimento del permafrost rilascia gas serra (ad esempio metano, anidride carbonica e protossido di azoto) e aumenta i rischi di contaminazione dovuti alle attività minerarie favorendo una maggiore connettività idrologica tra le acque sotterranee e le acque superficiali.

● ● ●
Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee possono essere maggiori a causa dei suoi effetti indiretti sulla domanda di acqua per l'irrigazione

7.2.2 Impatti indiretti dei cambiamenti climatici

L'aumento dei prelievi di acque sotterranee deriva indirettamente dai cambiamenti climatici in quanto le società si sforzano di adattarsi all'aumento dell'evapotraspirazione associata al riscaldamento globale (figura 7.1), nonché all'aumento della variabilità e al calo generale dell'umidità del suolo e della disponibilità di acqua superficiale. In effetti, gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee possono essere maggiori a causa dei loro effetti indiretti sulla domanda di acqua per l'irrigazione (Taylor et al., 2013a). Le strategie che impiegano le acque sotterranee per adattarsi a precipitazioni più variabili (meno affidabili) e per soddisfare la crescente domanda alimentare a livello mondiale (capitolo 3) presentano chiare conseguenze per la governance e la gestione sostenibile di queste risorse (capitoli 2 e 10), portando potenzialmente all'esaurimento o alla contaminazione degli acquiferi, che incidono sui flussi ambientali (De Graaf et al., 2019; Jasechko et al., 2021) e compromettono gli ecosistemi che ne dipendono (capitolo 6). I modelli su scala globale suggeriscono che tra il 1991 e il 2016 l'irrigazione ha rappresentato circa il 65% dei prelievi globali di acqua dolce e circa l'88% del consumo idrico (Müller Schmied et al., 2021); si stima che dalle acque sotterranee provenga il 25% di tutti i prelievi e il 37% del consumo totale. Questa redistribuzione su larga scala dell'acqua dolce da fiumi, laghi e acque sotterranee verso i terreni agricoli ha portato all'esaurimento delle acque sotterranee nelle regioni con irrigazione alimentata principalmente da queste risorse; all'accumulo di acque sotterranee a seguito della ricarica determinata dai flussi di ritorno

7.3 Resilienza e vulnerabilità dei sistemi acquiferi ai cambiamenti climatici

● ● ●
*La relazione tra
cambiamenti
climatici e sistemi
acquiferi differisce
fondamentalmente
da quella che
sussiste tra i
cambiamenti
climatici e i sistemi
idrici superficiali*

provenienti dall'irrigazione alimentata da acque superficiali; e alle modifiche dei climi locali come conseguenza di una maggiore evapotraspirazione dai terreni irrigati (figura 7.1). L'espansione dell'agricoltura irrigua e pluviale complica anche il rapporto tra cambiamenti climatici e acque sotterranee, poiché gli ecosistemi agricoli non rispondono ai cambiamenti delle precipitazioni allo stesso modo degli ecosistemi naturali.

Il ristagno idrico nelle aree interne, amplificato dall'irrigazione alimentata dalle acque superficiali e dall'aumento della ricarica derivante dalla conversione della vegetazione naturale in colture con un apparato radicale poco profondo (Favreau et al., 2009), può portare all'innalzamento degli acquiferi e alla salinizzazione del suolo attraverso il flusso capillare verso l'alto dell'acqua, che poi evapora. Molte aree irrigate del mondo si trovano quindi ad affrontare il duplice problema della salinizzazione del suolo e del ristagno idrico. Questi problemi interessano attualmente oltre il 20% del totale dell'area irrigata a livello globale (Singh, 2021).

Le acque sotterranee sono la più grande riserva diffusa di acqua dolce al mondo, con un volume stimato di circa 23 milioni di chilometri cubi depositato nei due chilometri più superficiali della crosta continentale terrestre (Gleeson et al., 2016). Sebbene una piccola frazione di questo volume (meno del 6%) sia considerata "moderna" (ossia rinnovata meno di 50 anni fa), tale quantità (circa 1,4 chilometri cubi) equivale a uno specchio d'acqua con una profondità di circa tre metri che si estende su tutti i continenti, superando tutte le altre componenti di acqua non congelata del ciclo idrologico attivo. La relazione tra cambiamenti climatici e sistemi acquiferi differisce radicalmente da quella che sussiste tra i cambiamenti climatici e i sistemi idrici superficiali, poiché la riserva diffusa delle acque sotterranee deriva da contributi di ricarica che avvengono in periodi che variano da anni o decenni a millenni (Ferguson et al., 2020). Tali tempi di permanenza delle acque sotterranee spiegano la maggiore resilienza dei sistemi acquiferi alla variabilità del clima e ai cambiamenti climatici rispetto alle acque superficiali, come dimostrato dalle soluzioni alla siccità basate sulle acque sotterranee (sezione 7.4) e dai maggiori tempi nel lungo periodo osservati tra prelievi, esaurimento e ricarica delle acque sotterranee (Cuthbert et al., 2019b). Lo sviluppo di un approvvigionamento idrico resiliente ai cambiamenti climatici comporterà, in molte parti del mondo, l'uso delle acque sotterranee combinato all'uso dell'acqua di fiumi, laghi e bacini idrici superficiali. Vi sono ancora molte cose da fare in termini di ottimizzazione della gestione congiunta di queste fonti, tra cui la presa di coscienza crescente che i sistemi sono spesso interconnessi; nelle zone umide, le acque sotterranee alimentano principalmente i fiumi e altri sistemi idrici superficiali, mentre nelle zone aride i flussi fluviali effimeri spesso riforniscono le acque sotterranee (Scanlon et al., 2016).

7.3.1 Sistemi acquiferi resilienti ai cambiamenti climatici

La resilienza naturale dei sistemi acquiferi ai cambiamenti climatici varia considerevolmente ed è regolata principalmente dalla geologia, dalla vegetazione, dalla topografia e dal clima, sia passato che presente. I sistemi acquiferi comprendenti sequenze di rocce sedimentarie spesse ed espansive (ad esempio calcare, arenaria), che tipicamente filtrano e immagazzinano grandi volumi di acque sotterranee, sono più resistenti alla variabilità e ai cambiamenti climatici rispetto a quelli ubicati all'interno di ambienti rocciosi duri (ad esempio rocce cristalline fratturate), che possiedono capacità più limitate di far percolare e immagazzinare le acque sotterranee (Cuthbert et al., 2019b). I sistemi acquiferi nelle regioni umide che ricevono una ricarica regolare possono essere più sensibili ai problemi climatici come la siccità, ma possono ripristinarsi abbastanza velocemente. Al contrario, i sistemi acquiferi nelle zone aride, dove la ricarica è bassa ed episodica, sono meno sensibili alla variabilità climatica a breve termine (stagionale o interannuale), ma vulnerabili alle tendenze climatiche a lungo termine, da cui saranno lenti a riprendersi (Opie et al., 2020). Anche la resilienza ai cambiamenti climatici degli approvvigionamenti idrici provenienti dai sistemi acquiferi è strettamente legata al contesto (Gleeson et al., 2020b) e dipende, tra gli altri fattori, dall'entità dei prelievi di acque sotterranee. Ad esempio, l'estrazione a moderata intensità per l'approvvigionamento idrico domestico da acquiferi alterati di roccia cristallina

con bassa capacità di stoccaggio che ricevono ricarica ogni anno nell'Africa equatoriale a clima umido è generalmente resistente all'esaurimento delle acque sotterranee. L'estrazione di acque sotterranee in gran parte "fossili" da acquiferi sedimentari su scala regionale (ad esempio arenaria nubiana, sabbie del Kalahari) nelle zone aride africane (MacDonald et al., 2021) è resiliente al clima, ma in definitiva insostenibile, e dipende prevalentemente dallo stoccaggio e dalla disponibilità delle acque sotterranee.

7.3.2 Sistemi acquiferi vulnerabili ai cambiamenti climatici

I sistemi acquiferi vulnerabili ai cambiamenti climatici includono quelli in cui gli impatti (descritti nella sezione 7.2) sono ampiamente indipendenti dai prelievi umani (esempi dall'1 al 4) e quelli in cui l'intensità dei prelievi umani gioca un ruolo fondamentale sull'aumento della vulnerabilità ai cambiamenti climatici (esempi dal 5 all'8):

1. *Sistemi acquiferi costieri e deltaici a basso rilievo*, come quelli che si trovano nei megadelta asiatici e nei piccoli Stati insulari in via di sviluppo³ che sono vulnerabili all'innalzamento del livello del mare, mareggiate e impatti dei cambiamenti climatici sulla ricarica;
2. *Sistemi acquiferi nelle latitudini settentrionali continentali o nelle regioni alpine e polari* dove la ricarica e il deflusso a lungo termine sono influenzati dal cambiamento dei regimi delle acque di disgelo (ad esempio Montagne Rocciose e bacino dell'Indo) e da un permafrost in disgelo (ad esempio Canada e Russia) che aumenta la connettività idrologica e rischi di contaminazione;
3. *Acquiferi in città a basso reddito in rapida espansione* (ad esempio Dakar, Lucknow e Lusaka) e *grandi comunità informali e di sfollati* (ad esempio in Bangladesh, Kenya e Libano) che dipendono dalla fornitura di servizi igienico-sanitari *in loco* (ad esempio latrine a fossa e fosse settiche), dove l'aumento della frequenza delle precipitazioni estreme può accrescere la lisciviazione dei contaminanti superficiali e vicini alla superficie;
4. *Acquiferi alluvionali poco profondi sottostanti i fiumi stagionali nelle zone aride*, alimentate dal deflusso di fiumi effimeri (Duker et al., 2020) con una capacità di stoccaggio che dipende in gran parte dalle dimensioni del fiume stesso e dallo spessore dei depositi di sabbia; i sistemi più piccoli hanno una capacità di stoccaggio limitata e sono altamente vulnerabili a precipitazioni più variabili, comprese le siccità di lunga durata previste a causa dei cambiamenti climatici;
5. *Sistemi acquiferi soggetti a pompaggio intensivo per l'irrigazione alimentata da acque sotterranee nelle zone aride* (ad esempio nell'India nordoccidentale; nella Valle centrale e nelle alte pianure della California, Stati Uniti; l'acquifero di Souss, Marocco; le pianure della Cina settentrionale) dove il consumo di acque sotterranee è elevato e dove la riduzione della ricarica a causa dei cambiamenti climatici potrebbe minacciare la continuità della redditività dell'agricoltura irrigua;
6. *Acquiferi soggetti a pompaggio intensivo per il consumo delle città nelle zone aride* (ad esempio Lahore e San Antonio) dove potenziali riduzioni della ricarica a causa dei cambiamenti climatici potrebbero minacciare la continua redditività dell'approvvigionamento idrico pubblico, dato che altre fonti d'acqua costanti sono limitate o non esistono;
7. *Acquiferi costieri soggetti a pompaggio intensivo* (ad esempio Gaza, Giacarta e Tripoli), dove il pompaggio riduce i livelli delle acque sotterranee e comporta una sostanziale intrusione salina oltre a quella dovuta dall'innalzamento del livello del mare;
8. *Sistemi acquiferi a basso stoccaggio e ricarica nelle zone aride* (ad esempio Bulawayo e Ouagadougou), dove le fonti d'acqua costanti alternative sono limitate o non esistono e la ricarica è episodica, per cui anche piccole riduzioni di questa possono portare all'esaurimento delle acque sotterranee.

³ www.unesco.org/new/en/natural-sciences/priority-areas/sids/resources/sids-list/.

7.4 Adattamenti ai cambiamenti climatici basati sulle acque sotterranee: l'intervento umano

Gli adattamenti ai cambiamenti climatici basati sulle acque sotterranee sfruttano lo stoccaggio diffuso di tali risorse e la capacità dei sistemi acquiferi di immagazzinare le eccedenze idriche (ad esempio stagionali o episodiche). Questi sistemi incorrono in perdite per evaporazione sostanzialmente inferiori rispetto alle infrastrutture convenzionali, come le dighe di superficie. Si prevede che nei prossimi decenni aumenterà l'importanza delle acque sotterranee come cuscinetto vitale per gli impatti dei cambiamenti climatici, che includono non solo la siccità e l'aumento dell'evapotraspirazione, ma anche una maggiore variabilità dell'umidità del suolo e delle acque superficiali (sezione 7.3). Le "rivoluzioni verdi" in Asia si sono basate sull'uso continuo e diffuso di acque sotterranee poco profonde per l'irrigazione durante la stagione secca da parte dei piccoli agricoltori e sulla maggiore resilienza regionale alla disponibilità stagionale di acqua (Schneider e Asch, 2020). Nell'Africa tropicale ci sono richieste crescenti (Cobbing, 2020) per attingere dalle riserve di acque sotterranee per migliorare la resilienza dell'acqua e delle forniture alimentari al clima, nel perseguimento degli Obiettivi di sviluppo sostenibile 2, 6 e 13, tra gli altri. Gli adattamenti alla carenza di approvvigionamento idrico causati dal clima in città come Dar es Salaam (Tanzania) nel 1997 e Città del Capo (Sudafrica) nel 2017 hanno comportato non solo riduzioni della domanda di acqua dolce ma anche, dal lato della disponibilità, la messa in atto di strategie per un utilizzo sempre maggiore delle acque sotterranee, insieme a quelle superficiali, come fonte di acqua dolce resiliente ai cambiamenti climatici (CoCT, 2019). Inoltre, migliori servizi igienico-sanitari e per l'igiene personale possono migliorare la resilienza delle forniture idriche alimentate dalle acque sotterranee ai cambiamenti climatici nelle comunità densamente popolate e a basso reddito, riducendo i rischi di contaminazione fecale (OMS, 2019).

Le risposte umane ai cambiamenti climatici che utilizzano adattamenti basati sulle acque sotterranee includono una serie di strategie di ricarica gestita degli acquiferi (nell'acronimo inglese MAR) per aumentare la disponibilità di acqua dolce (vedere la sezione 11.5). Dillon et al. (2019) dividono le strategie MAR in quattro grandi categorie: a) modifica del letto del corso d'acqua, b) filtrazione delle sponde, c) distribuzione dell'acqua e d) pozzi di ricarica. Ogni strategia è descritta con esempi applicativi nel riquadro 7.1.

7.5 Mitigazione dei cambiamenti climatici basata sulle acque sotterranee tramite energia geotermica a basse emissioni di carbonio

L'energia geotermica è il calore immagazzinato e trasmesso nel sottosuolo. Questa sezione si concentra sulle acque sotterranee in quanto queste possono facilitare lo stoccaggio, il passaggio e l'estrazione di energia geotermica. Lo sviluppo dell'energia geotermica svolge un ruolo importante nella riduzione delle emissioni di CO₂ e nel consentire la transizione verso fonti energetiche sostenibili. Se i fluidi sotterranei ad alta entalpia (>150°C) vengono utilizzati per produrre elettricità e riscaldamento, anche le acque sotterranee a bassa entalpia (da 40°C a 150°C) possono essere utilizzate, principalmente per il riscaldamento. Inoltre, le acque sotterranee poco profonde a bassa temperatura (spesso tra 5°C e 25°C) possono essere utilizzate per fornire raffreddamento e riscaldamento a basse emissioni di carbonio tramite pompe di calore geotermiche (nell'acronimo inglese GSHP).

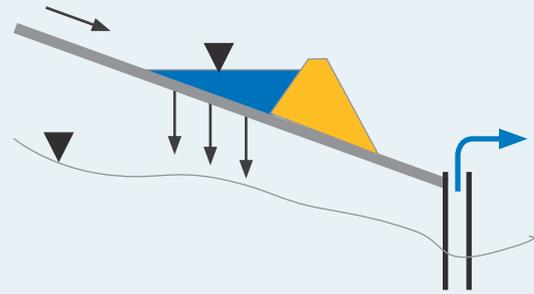
7.5.1 Energia geotermica per la produzione di elettricità a basse emissioni di carbonio

La produzione di elettricità da fonte geotermica richiede solitamente una perforazione profonda per accedere alle alte temperature e una significativa permeabilità a tali profondità per consentire la libera circolazione dei fluidi. I fluidi utilizzati possono essere acque sotterranee naturali contenute in acquiferi sedimentari profondi (ad esempio in Italia e in California negli Stati Uniti) o complessi ignei (ad esempio in El Salvador, Islanda e Kenya). In alternativa, dove le rocce hanno una permeabilità limitata, possono essere stimolate artificialmente o fratturate idraulicamente per consentire il passaggio dei fluidi introdotti, formando un "sistema geotermico avanzato" (nell'acronimo inglese EGS, ad esempio Soultz-sous-Forêts in Francia). La generazione di elettricità richiede convenzionalmente la produzione di vapore in superficie per azionare le turbine. L'elettricità può, tuttavia, essere generata a temperature più basse (<180°C) in sistemi a ciclo binario, e l'acqua calda prodotta viene utilizzata per vaporizzare fluidi organici (ad esempio butano o pentano ad alta pressione) che azionano le turbine.

Riquadro 7.1 Strategie di ricarica gestita degli acquiferi (MAR)

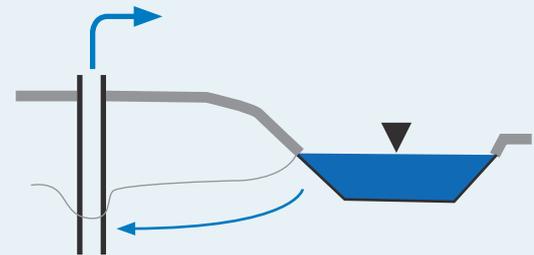
(a) Modifica del letto del corso d'acqua

La modifica del letto del corso d'acqua descrive infrastrutture come piccole dighe, stagni e serbatoi che trattengono il deflusso superficiale per fornire acqua potabile e per l'irrigazione tramite infiltrazione diretta, rinnovando gli acquiferi sottostanti. L'applicazione di questa strategia MAR ha una lunga storia nel contesto degli acquiferi di roccia dura dell'India peninsulare (Boisson et al., 2014) e nelle pianure alluvionali del Rajasthan nell'India nordoccidentale (Dashora et al., 2018). Altri esempi includono enormi dighe di ricarica in Oman che vengono gestite in combinazione con la deviazione e distribuzione dell'acqua in una serie di bacini di ricarica collegati (Dillon et al., 2019).



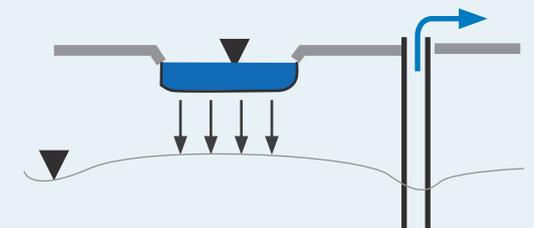
(b) Filtrazione delle sponde

La filtrazione delle sponde si riferisce al processo di miglioramento dell'infiltrazione delle acque superficiali attraverso l'estrazione delle acque sotterranee vicino a fiumi e altri corpi idrici superficiali in modo da aumentare il gradiente idraulico dalle acque superficiali al pozzo di pompaggio. Come riportato da Dillon et al. (2019), l'approvvigionamento idrico della città di Budapest si basa interamente sulla filtrazione delle sponde del fiume Danubio.



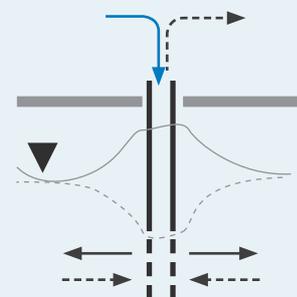
(c) Distribuzione dell'acqua

La distribuzione si riferisce all'uso delle acque alluvionali al fine di aumentare l'umidità del suolo per la produzione alimentare su terreni agricoli asciutti. I progetti di distribuzione dell'acqua che impiegano gli scarichi delle inondazioni dal fiume Colorado in Arizona (Stati Uniti) hanno dimostrato di aumentare lo stoccaggio delle acque sotterranee per le città delle zone aride come Phoenix e Tucson (Scanlon et al., 2016). Nei Paesi Bassi, l'acqua trattata del fiume Reno viene trasportata tramite condotte fino alle dune nelle aree costiere dove viene infiltrata nei bacini come forma di ricarica delle acque sotterranee (Sprenger et al., 2017).



(d) Pozzi di ricarica (nell'acronimo inglese ASR)

La pratica dei pozzi di ricarica consiste nell'iniettare acqua negli acquiferi tramite pozzi ed è spesso indicato come Aquifer Storage and Recovery (ASR) o Aquifer Storage Transfer and Recovery (ASTR). Nell'Europa settentrionale, le eccedenze stagionali (invernali) di acque superficiali raccolte nei bacini idrici vengono spesso trasferite in acquiferi poco profondi tramite pozzi di iniezione per sostenere gli aumenti previsti della domanda estiva di acqua (Hiscock et al., 2011). Nelle zone costiere del Bangladesh, la resilienza delle comunità rurali all'aumento della salinità lungo la costa è stata migliorata grazie alla creazione di lenti d'acqua dolce all'interno di acquiferi poco profondi, parzialmente salini e confinati. Ciò si ottiene mediante l'iniezione di acqua di stagno stagionale proveniente dagli scarichi delle inondazioni o dall'acqua piovana raccolta in pozzi con drenaggio per gravità (Sultana et al., 2015). A Windhoek, Namibia, la resilienza dell'approvvigionamento idrico della città alla variabilità del clima e ai cambiamenti climatici è stata aumentata attraverso il trasferimento, tramite pozzi di iniezione, di acque superficiali stagionali trattate nel sistema acquifero fratturato di quarzite (Murray et al., 2018).



Fonte: sulla base di IAH (2005).

● ● ●
Una delle principali opportunità offerte dall'energia geotermica a bassa entalpia è il suo contributo alla decarbonizzazione del riscaldamento e del raffreddamento domestico, commerciale e industriale

Nel 2020, circa 30 paesi generavano un totale di 95 terawattora (TWh_e) di elettricità geotermica all'anno, con una capacità installata totale di 16 gigawatt (GW_e). Ciò segna un aumento di 3,7 gigawatt (GW_e) rispetto al 2015 a un costo stimato di 10,4 miliardi di dollari⁴. I maggiori paesi produttori (in ordine di capacità installata totale) sono: Stati Uniti, Indonesia, Filippine, Turchia e Kenya, tutti noti per le loro zone geotermiche e vulcaniche attive (Huttrer, 2021). La crescita relativa dell'energia eolica e solare negli ultimi anni ha superato quella dell'elettricità da fonte geotermica, il che riflette l'inferiorità del costo e del rischio percepito della prima e i periodi di ritorno dell'investimento più brevi. Tuttavia, le centrali geotermiche sono, contrariamente alle centrali eoliche e solari, adatte a produrre un carico elettrico di base. Si prevede che la capacità installata aumenterà del 20% circa tra il 2020 e il 2025 (Huttrer, 2021).

7.5.2 Utilizzo delle acque sotterranee per i sistemi di riscaldamento e di raffreddamento a basse emissioni di carbonio

Una delle principali opportunità offerte dall'energia geotermica a bassa entalpia è il suo contributo alla decarbonizzazione del riscaldamento e del raffreddamento domestico, commerciale e industriale, che rappresenta almeno il 40% del consumo energetico globale e delle emissioni di CO₂ (IEA, 2019b). La capacità geotermica installata per la fornitura termica diretta (compresi i GSHP) nel 2020 è stata di quasi 108 gigawatt (GW_t), segnando un tasso di crescita di circa il 9% annuo, con 284 terawattora (TWh_t) forniti all'anno (Lund e Tóth, 2020). I paesi leader includono (in ordine di capacità installata) la Cina, gli Stati Uniti e la Svezia, con i paesi scandinavi che presentano un elevato assorbimento pro capite (principalmente a causa dei GSHP). Della capacità installata, 78 gigawatt (GW_t) (72%) sono stati forniti da pompe di calore geotermiche (Lund e Tóth, 2020).

Le acque sotterranee che si trovano a moderate profondità (comprese tra 0 e 200 metri) hanno solitamente una temperatura piuttosto costante, leggermente più calda della temperatura media annuale dell'aria (figura 7.5). Si va quindi da circa 5°C nella Scandinavia settentrionale a oltre 25°C nell'Africa subsahariana. Solitamente, la temperatura aumenta da 2,5°C a 3°C ogni 100 metri di profondità, così che a una profondità di 1,5 chilometri le temperature spesso si avvicinano ai 50°C o li superano. Se a tali profondità è presente un acquifero trasmissivo, questo può essere utilizzato per il riscaldamento diretto di singoli edifici, più edifici (reti di teleriscaldamento), piscine, serre per l'orticoltura o strutture per l'acquacoltura. Dopo che il calore è stato estratto dalle acque sotterranee tramite uno scambiatore di calore, l'acqua "termicamente esausta" viene spesso restituita al giacimento tramite un pozzo (o pozzi) di reiniezione al fine di mantenere la pressione del giacimento ed evitare la potenziale contaminazione superficiale da parte di soluti naturali indesiderati. Tali sistemi sono definiti sistemi geotermici ad anello aperto (figura 7.5, Fridleifsson et al., 2008; Banks, 2012; Kramers et al., 2012).

Come i grandi edifici moderni (uffici, data center, ospedali, ecc.), anche molti processi industriali hanno un grande fabbisogno di raffreddamento, indipendentemente dalla stagione o dai climi in cui si trovano. Ne consegue dunque che la necessità di un raffreddamento a basse emissioni di carbonio aumenterà probabilmente con l'avanzare dei cambiamenti climatici. Acque sotterranee poco profonde e relativamente fredde (ad esempio da 10°C a 12°C in molte parti del Regno Unito) sono adatte per ricevere calore in eccesso ed effettuare il raffreddamento, tramite una pompa di calore geotermica. Le acque sotterranee fredde poco profonde possono essere utilizzate anche per il riscaldamento tramite GSHP. Una pompa di calore è un dispositivo refrigerante alimentato elettricamente che trasferisce il calore da un mezzo freddo (ad esempio acquiferi a 10°C) a un mezzo caldo (ad esempio un sistema di riscaldamento centralizzato a 45°C)⁵. Sebbene le tecnologie eoliche e solari possano generare

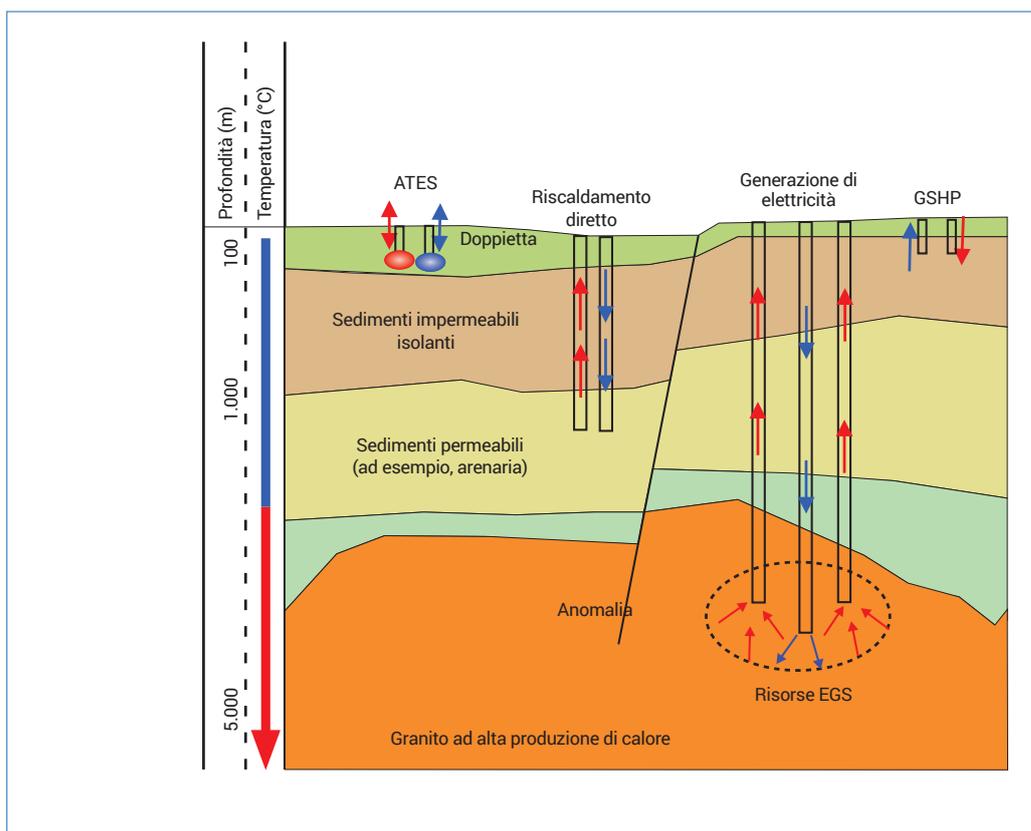
⁴ Si noti che GW (gigawatt) è un'unità di potenza (tasso di erogazione di energia), mentre TWh (terawattora) è un'unità di energia totale erogata. I pedici e e t si riferiscono rispettivamente all'energia elettrica e termica.

⁵ Si noti che le pompe di calore non necessitano di acquiferi: possono anche estrarre calore da terreni e rocce insaturi/a bassa permeabilità, dalle acque superficiali, dalle acque reflue e dall'aria.

elettricità a basse emissioni di carbonio, esistono relativamente poche tecnologie per fornire riscaldamento alle stesse condizioni. La pompa di calore è una tecnologia chiave che utilizza l'elettricità in modo altamente efficiente per fornire riscaldamento e raffreddamento. Potrebbe essere in grado di fornire 3,5 kilowatt di calore a un edificio per ogni kilowatt di energia elettrica consumata, con conseguente notevole riduzione dei costi e delle emissioni di CO₂. Si stima che nel 2020 circa 6,5 milioni di pompe di calore geotermiche saranno installate in tutto il mondo, rappresentando la parte in più rapida crescita del settore geotermico (Lund e Tóth, 2020).

Figura 7.5

Diagramma schematico che mostra i diversi tipi di sistemi di energia geotermica, tra cui lo stoccaggio dell'energia termica nell'acquifero (ATES), la pompa di calore geotermica (GSHP) e il sistema geotermico avanzato (EGS)



Fonte: autori, adattato da Driscoll e Middlemis (2011).

L'uso della tecnologia geotermica poco profonda (bassa entalpia) per il riscaldamento e il raffreddamento è particolarmente interessante nei climi continentali temperati, dove si verifica un grande "sbalzo" stagionale della temperatura dell'aria e dove le temperature delle acque sotterranee non sono solo molto più calde di quelle dell'aria invernale, ma anche molto più fresche rispetto a quelle dell'aria estiva. Qui il calore in eccesso dei processi di raffreddamento, trasferito nel terreno durante l'estate, può essere immagazzinato nell'acquifero e recuperato per essere utilizzato durante l'inverno. Questo processo prende il nome di stoccaggio di energia termica nell'acquifero (nell'acronimo inglese ATES). Nei paesi che per primi hanno adottato questa tecnologia, come i Paesi Bassi e la Svezia, il suolo e le acque sotterranee sono visti sempre di più come un solo componente (una fonte stagionale, un pozzo o un "ammortizzatore" termico) nelle reti flessibili di teleriscaldamento e raffreddamento di 5^a generazione (ad esempio vedere Verhoeven et al., 2014, Buffa et al., 2019).

7.5.3 Impatti, rischi e incentivi

Gli impatti ambientali di sistemi geotermici ben progettati sono limitati, ma possono verificarsi impatti negativi se gli acquiferi sono gestiti male. Laddove non viene praticata la reiniezione di fluidi geotermici, lo stoccaggio delle acque sotterranee può esaurirsi e



La cattura e il sequestro del carbonio è il processo di immagazzinamento del carbonio negli acquiferi profondi per ridurre l'accumulo di CO₂ in atmosfera

può verificarsi un fenomeno di subsidenza, come osservato a Shanghai (Cina; Banks, 2012). Laddove le acque sotterranee “termicamente esauste” vengono reimmesse, i rischi sono inferiori ma possono comunque verificarsi movimenti locali del suolo e l'elevata densità di reti di riscaldamento o raffreddamento può portare a variazioni di temperatura dell'acquifero. Le variazioni nette della temperatura dell'acquifero possono avere un impatto ambientale e, in definitiva, anche rendere la risorsa geotermica meno adatta allo sfruttamento. Ad esempio, il quadro normativo dei Paesi Bassi richiede che i sistemi ATES siano piuttosto bilanciati termicamente per evitare tali sbalzi di temperatura (Dutch ATES, 2016). La reiniezione delle acque sotterranee mal gestita comporta anche il rischio di mescolare risorse idriche sotterranee di buona qualità con quelle di scarsa qualità, portando potenzialmente a un deterioramento generale della loro qualità. I sistemi geotermici profondi, dove vengono applicate pressioni di reiniezione elevate, devono monitorare attentamente il rischio di microsismicità (Holmgren e Werner, 2021). Oltre agli impatti ambientali, allo sviluppo dell'energia geotermica possono esserci limitazioni economiche e basate sul rischio. I costi e i rischi del progetto tendono ad aumentare con la profondità poiché il costo della perforazione cresce esponenzialmente con essa, e la conoscenza idrogeologica diventa meno certa. Una volta che il pozzo è stato costruito, un operatore o un'operatrice deve affrontare la sfida quasi ovvia di prevenire l'intasamento dei pozzi di reiniezione, nonché i costi legati al monitoraggio delle prestazioni, della temperatura e della chimica del pozzo. Poiché la perforazione in profondità per raggiungere nuove risorse geotermiche ad alta entalpia comporta una spesa in conto capitale “anticipata” considerevole e un notevole rischio economico di fallimento dell'esplorazione, diventa opinabile l'idea secondo cui la produzione di energia geotermica debba essere sovvenzionata a un determinato tasso per megawattora prodotto. Un approccio più appropriato potrebbe essere uno schema assicurativo supportato dal governo o dal settore industriale per sostenere i rischi dello sviluppo di una nuova prospettiva geotermica, come è stato fatto nei Paesi Bassi (RVO, 2015).

7.6 Mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso la cattura e il sequestro del carbonio

La cattura e il sequestro del carbonio (nell'acronimo inglese CCS) è il processo di immagazzinamento del carbonio negli acquiferi profondi per ridurre l'accumulo di CO₂ in atmosfera. Viene usato perché si stima che i serbatoi naturali di CO₂ (cioè foreste, oceani e suolo) non riescano ad accogliere le quantità crescenti emesse dall'essere umano e dunque a mitigare le loro conseguenze sui cambiamenti climatici. Il CCS riduce le emissioni di CO₂ da fonti puntuali come processi industriali o produzione di energia attraverso la cattura chimica della CO₂ emessa. Questa CO₂ viene quindi compressa e iniettata negli strati sotterranei a profondità superiori a 800 metri dove le pressioni e le temperature prevalenti sono sufficienti per convertire la CO₂ dallo stato gassoso a quello liquido. I siti geologici adatti allo stoccaggio di CO₂ includono acquiferi profondi e serbatoi di idrocarburi impoveriti che sono ricoperti da un acquitardo. La CO₂ galleggiante (meno densa) sale e migra attraverso la formazione ma è fisicamente intrappolata dalla roccia di copertura (acquitardo). La CO₂ da singole fonti è immagazzinata in siti pilota per la ricerca sul processo di CCS (ad esempio Ketzin, Germania (Wiese e Nimtz, 2019); Lacq, Francia (Prinet et al., 2013); In Salah, Algeria (Ringrose, 2018); Aquistore, Canada (Lee et al., 2018a)) e strutture operative (Sleipner e Snøhvit, Norvegia (Chadwick et al, 2012; Ringrose, 2018); Decatur, USA (Finley, 2014); Gorgon, Australia (Trupp et al., 2021)). Sono previsti progetti anche in siti industriali, dove molti emettitori di CO₂ possono utilizzare lo stesso sito o gli stessi siti di stoccaggio (Porthos, Paesi Bassi; Northern Lights, Norvegia; Teesside, Regno Unito).

Lo stoccaggio geologico di CO₂ su larga scala (cioè progetti dell'ordine di un milione di tonnellate di CO₂ all'anno) include i progetti Sleipner e Snøhvit nel Mare del Nord e il Quest Project in Canada (Government of Alberta, 2019). In ciascuno di questi siti, ogni anno viene catturato e immagazzinato in modo permanente circa un milione di tonnellate di CO₂ che altrimenti verrebbe rilasciato nell'atmosfera. Ampie formazioni acquifere saline, sia onshore che offshore, hanno una capacità teorica di immagazzinare miliardi di tonnellate di CO₂,

sebbene la capacità pratica utilizzabile sarà inferiore (Bachu et al., 2007; Bradshaw et al., 2007; Bachu, 2015; Goodman et al., 2016; Celia, 2017). Poiché i siti sono spesso lontani da grandi fonti di emissione e il trasporto intercontinentale di CO₂ comporta costi elevati, il potenziale economico del CCS è specifico per ogni paese e regione. Nella maggior parte delle regioni, le capacità di stoccaggio di per sé non rappresentano un vincolo all'uso del CCS, ma sono comunque necessari sussidi governativi per coprire i costi. Il CCS è considerato uno strumento importante per ridurre le emissioni dei combustibili fossili del settore industriale e per ottenere emissioni nette negative, se combinato con la combustione della biomassa e la cattura diretta dall'aria (IPCC, 2014b).

Capitolo 8

Prospettive regionali sulle acque sotterranee

- 8.1 UNESCO**
Jayakumar Ramasamy, Anne Lilande e Samuel Partey
IAH
Seifu Kebede Gurmessa e Alan MacDonald*
- 8.2 UNECE**
Annukka Lipponen**, Sarah Tiefenauer-Linardon, Sonja Koeppel e Andreas Scheidleder***
Con il contributo di Sharon Megdal (Centro di ricerca sulle risorse idriche, Università dell'Arizona), Nihat Zal (AEA) et Xuan Che (DUNSD)
- 8.3 UNECLAC**
Silvia Saravia Matus
CeReGAS
Alberto Manganelli e Lucía Samaniego
UNESCO
Miguel Doria e Camila Tori
Con il contributo di Alba Llavona e Lisbeth Naranjo (UNECLAC)
- 8.4 UNESCAP**
Solene Le Doze e Dennis Lee
Con il contributo di Danielle Gaillard-Picher (GWP)
- 8.5 UNESCWA**
Ziad Khayat, Tracy Zaarour e Carol Chouchani Cherfane

* Affiliato al British Geological Survey (Servizio geologico britannico)

** Presso il Ministero finlandese dell'agricoltura e delle foreste al momento della pubblicazione

*** Umweltbundesamt (Agenzia per l'ambiente dell'Austria)



8.1 Africa subsahariana



Circa 400 milioni di persone nell'Africa subsahariana non hanno accesso nemmeno ai servizi idrici di base

8.1.1 Introduzione

Circa 400 milioni di persone nell'Africa subsahariana non hanno accesso nemmeno ai servizi idrici di base. La maggior parte di queste persone vive in aree rurali (OMS/UNICEF, 2021). Anche le città, dove i collegamenti alle abitazioni sono più comuni, soffrono di interruzioni della fornitura idrica e flussi inaffidabili a causa della domanda elevata e in aumento (Healy et al., 2020). Pertanto, la priorità assoluta per la maggior parte dei paesi è migliorare l'accesso, prima ai servizi di base e poi alle forniture domestiche gestite in modo sicuro. I cambiamenti climatici esercitano una pressione ulteriore sulle risorse idriche superficiali a disposizione, causando problemi di scarsità d'acqua e siccità sempre più frequenti, che minacciano i progressi compiuti finora (Taylor et al., 2013a). Il vasto aumento della domanda di acqua dovuto alla crescita della popolazione e alla rapida urbanizzazione si aggiunge a tale pressione e accentua la necessità di un maggiore impiego di servizi idrici resilienti al clima.

Lo sfruttamento delle acque sotterranee è quindi un soluzione dalle grandi potenzialità per soddisfare la necessità di un approvvigionamento idrico in rapido aumento in tutta l'Africa subsahariana, sia per la sopravvivenza umana che per promuovere lo sviluppo economico (Cobbing e Hiller, 2019). Le acque sotterranee, essendo la più grande risorsa di acqua dolce disponibile, sono altamente affidabili per sostenere i mezzi di sussistenza, specialmente durante lunghi periodi di scarse precipitazioni o di siccità, e potrebbero aiutare ad affrontare i problemi della scarsità d'acqua e degli shock legati alla siccità (Banca mondiale, 2018a; MacAllister et al., 2020). L'utilizzo delle acque sotterranee per la fornitura di acqua potabile attraverso pompe condivise e pozzi domestici privati è ben consolidato nella maggior parte dei paesi, ma vi è ancora molta strada da fare e il tempo stringe. L'utilizzo per l'irrigazione dei campi e per usi industriali rimane basso ad eccezione di alcune aree ben delimitate, come avviene in Sudafrica, Zambia e Zimbabwe (Pavelic et al., 2012). In una condizione caratterizzata da cambiamenti climatici uniti alla crescita economica, la priorità più grande per i paesi rimane l'adozione delle migliori pratiche per lo sfruttamento e la gestione delle risorse idriche sotterranee, al fine di soddisfare le richieste concorrenti, riconoscendo al contempo l'importante ruolo svolto da questa risorsa nel sostenere gli ecosistemi di acqua dolce (Tuinhof et al., 2011). Questa sezione fornisce una panoramica sulle risorse idriche sotterranee nell'Africa subsahariana, nonché sulle opportunità e sulle sfide legate allo sfruttamento di questa importante risorsa.

8.1.2 Stato delle acque sotterranee

Le acque sotterranee costituiscono la base dell'approvvigionamento idrico in gran parte dell'Africa e il loro sfruttamento è in aumento con la crescita della domanda di acqua sicura (MacDonald et al., 2021). Le risorse idriche sotterranee in Africa sono spesso considerate come aventi il potenziale per realizzare una trasformazione socioeconomica complessiva (Foster et al., 2012), per superare l'attuale variabilità idrologica (Grey e Sadoff, 2007) e per soddisfare la domanda futura. Studi recenti chiedono di risvegliare il "gigante dormiente" delle acque sotterranee (Cobbing e Hiller, 2019) attraverso un maggiore uso di quelle poco profonde per l'irrigazione (Gowing et al., 2020) e attraverso il loro sfruttamento, grazie all'energia solare, per l'irrigazione e per le reti idriche (Wu et al., 2017; Gaye e Tindimugaya, 2019).

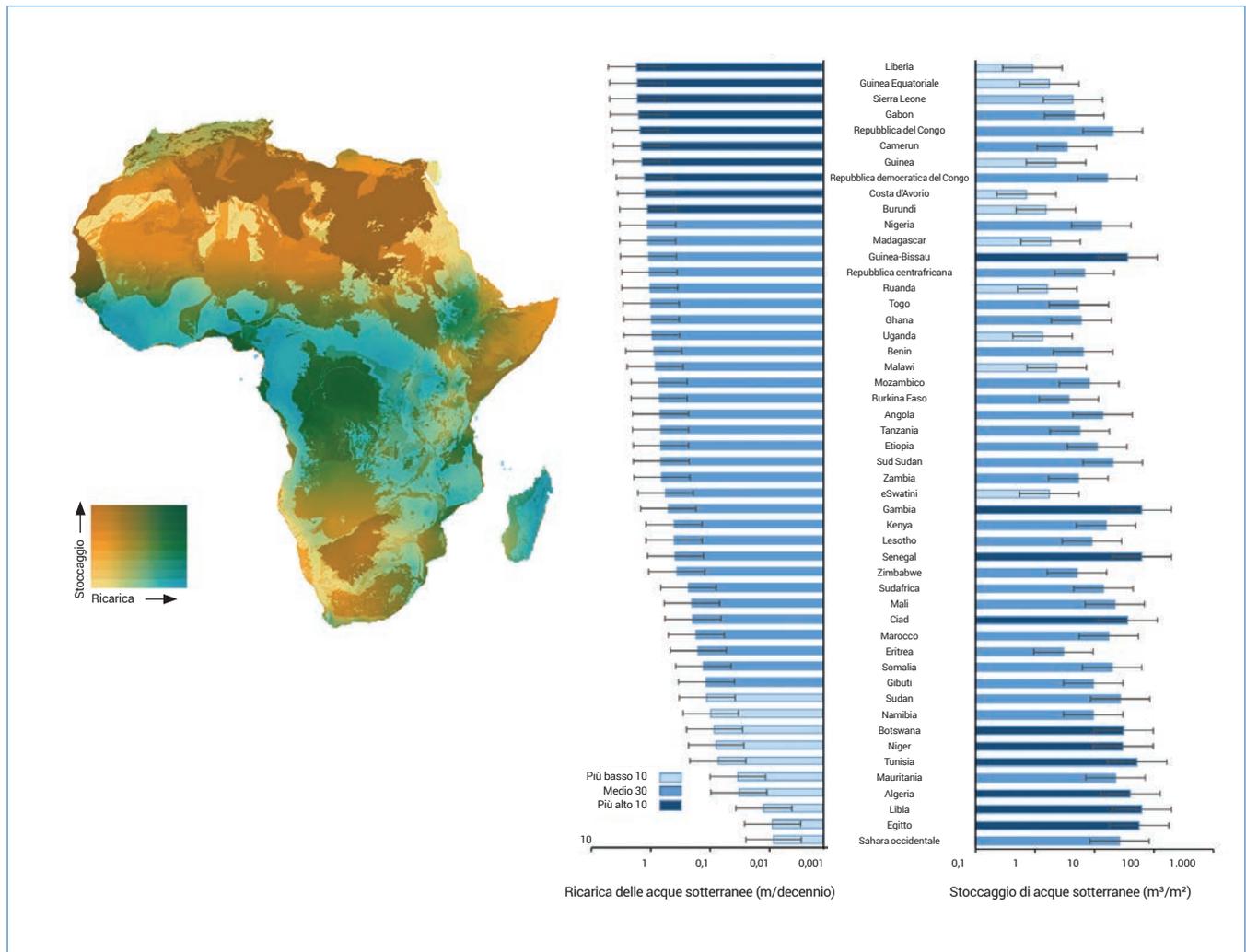
Le aspettative sulle acque sotterranee non sono irrealizzabili. Un'ampia indagine idrogeologica condotta in tutto il continente rivela che l'Africa possiede grandi risorse idriche sotterranee. MacDonald et al. (2012), attraverso un studio che ha prodotto la prima mappa quantitativa delle acque sotterranee dell'Africa, hanno stimato che la riserva totale delle acque sotterranee in Africa sia di 0,66 milioni di chilometri cubi (da 0,36 a 1,75 milioni di chilometri cubi). Non tutte le riserve sono disponibili per l'estrazione, ma il volume stimato è più di 100 volte quello del rinnovo annuale delle risorse di acqua dolce in Africa (MacDonald et al., 2012). È interessante notare che, per quanto riguarda i cambiamenti climatici, Cuthbert et al. (2019a) hanno concluso che le tendenze climatiche future potrebbero influenzare le riserve idriche superficiali dell'Africa senza

però provocare la riduzione delle risorse idriche sotterranee a causa della loro dipendenza dalla ricarica derivante da eventi piovosi intensi, che ci si aspetta aumentino in futuro. Pertanto, si prevede che le acque sotterranee saranno sempre più utilizzate come fonte di approvvigionamento idrico affidabile in tutta l'Africa (Giordano, 2009; MacDonald e Calow, 2009). Tuttavia, l'eterogeneità riguardo alla ricarica, alla capacità di stoccaggio e alla permeabilità dell'acquifero determinerà quali sottoregioni potranno beneficiare maggiormente delle acque sotterranee. Lo stoccaggio e la ricarica degli acquiferi determinano la resilienza dei sistemi idrici sotterranei ai cambiamenti climatici e quindi la futura sicurezza idrica. Secondo MacDonald et al. (2021, figura 8.1, pagg. 10-11), «la maggior parte dei paesi africani caratterizzati da una scarsa riserva di acque sotterranee presenta precipitazioni annuali elevate e quindi una ricarica regolare. Al contrario, molti paesi africani caratterizzati da scarse precipitazioni, generalmente considerati in una situazione di insicurezza idrica, dispongono di una notevole riserva di acque sotterranee, ricaricata per lo più millenni fa. [...] Diversi paesi, in particolare (ma non esclusivamente) in Nordafrica, presentano una notevole sicurezza idrica se si tiene conto della riserva di acque sotterranee. Questa riserva permette di attutire gli effetti dell'estrazione sul sistema regionale delle acque sotterranee». Ciononostante, l'attuale pompaggio delle acque sotterranee sarà in definitiva a spese delle generazioni future. Gli aspetti economici, finanziari e ambientali dell'esaurimento delle riserve non dovrebbero essere trascurati. La riserva di acque sotterranee è generalmente bassa nell'Africa occidentale e centrale (figura 8.1). In queste sottoregioni, infatti, le riserve di acque sotterranee vengono ricaricate regolarmente e costituiscono una fonte di acqua affidabile, sebbene la capacità di stoccaggio limitata possa significare che i paesi in quest'area potrebbero essere vulnerabili a periodi prolungati di siccità.

Lo sfruttamento delle potenzialità proprie delle acque sotterranee al fine di generare risultati positivi in termini di sostentamento dipende da molte sfide di natura geofisica e relative alla governance a livello locale e regionale. Una delle sfide idrogeologiche riguarda la qualità delle acque sotterranee. La maggior parte delle riserve di acque sotterranee comprende sia acqua dolce che salmastra. Tuttavia, un numero considerevole di acquiferi nelle aree aride e semiaride, nonché nelle pianure costiere, è inquinato da contaminanti geogenici come salinità e fluoruro (Idowu e Lasisi, 2020). Gli esempi includono l'intrusione di acqua salata nelle pianure costiere dell'Africa settentrionale che vanno dall'Egitto alla Tunisia. Le acque sotterranee nella rift dell'Africa orientale presentano spesso elevate concentrazioni di fluoro: uno studio in Etiopia ha rilevato che oltre il 40% dei pozzi nella Rift Valley etiopica presenta concentrazioni superiori agli standard stabiliti dall'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) e quindi costituiscono un rischio maggiore per la salute (Tekle-Haimanot et al., 2006).

Anche il deterioramento di origine antropica della qualità delle acque sotterranee è in aumento ed è causato da fattori quali le attività minerarie (ad esempio in Sudafrica), pratiche irrigue inadeguate (ad esempio nella valle del Nilo e nel bacino del fiume Senegal) e l'urbanizzazione (ad esempio a Nairobi, Accra, Maputo, ecc.; Lapworth et al., 2017). Una recente indagine condotta in Etiopia, Malawi e Uganda rivela che quasi il 20% dei pozzi d'acqua ha superato lo standard dell'OMS per la qualità batteriologica (Lapworth et al., 2020). I problemi relativi alla qualità delle acque sotterranee possono essere aggravati dai cambiamenti climatici e dall'innalzamento del livello del mare, che porta a una maggiore salinizzazione delle acque sotterranee attraverso la concentrazione di sale dovuta all'evaporazione o attraverso l'intrusione di acqua di mare. La ricarica generata da eventi piovosi intensi può anche aumentare la contaminazione batteriologica. A causa dell'eterogenea formazione geologica, le zone costiere dell'Africa lunghe 40.000 chilometri sono costituite da una moltitudine di sistemi acquiferi (Steyl e Dennis, 2010) con notevoli differenze riguardo allo stato di intrusione di acqua salata. L'intrusione di acqua salata indotta dallo sfruttamento eccessivo degli acquiferi costieri ha portato all'aumento della salinità in numerosi paesi, tra cui Egitto, Kenya, Libia, Tanzania e Tunisia.

Figura 8.1 Resilienza delle acque sotterranee ai cambiamenti climatici. Elevate riserve di acque sotterranee contro i cambiamenti delle precipitazioni a breve termine e un'elevata ricarica media delle acque sotterranee a lungo termine consentono a un acquifero di essere rapidamente ripristinato dopo la siccità



Fonte: MacDonald et al. (2021, fig. 4, pag. 7). Contiene materiale del Servizio geologico britannico (British Geological Survey) © UKRI 2021. Con licenza CC BY 3.0 IGO.

8.1.3 Disponibilità e utilizzo delle risorse idriche sotterranee per l'irrigazione

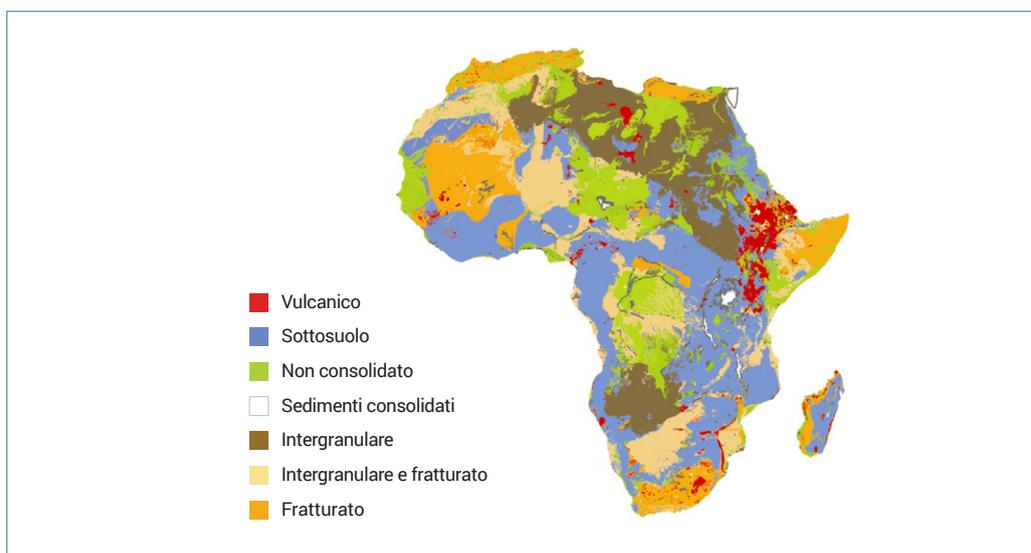
Gran parte dell'Africa subsahariana si estende su quattro grandi categorie di acquiferi, mostrati nella figura 8.2 (MacDonald et al., 2012):

1. Acquiferi di rocce vulcaniche: acquiferi complessi multistrato sottostanti a gran parte del Corno d'Africa, generalmente con rese variabili dove le acque sotterranee si trovano in fratture;
2. Acquifero con basamento cristallino esposto alle intemperie: acquifero poco profondo, esteso ma irregolare, con una bassa resa dei pozzi, di circa un litro al secondo, e una bassa capacità di stoccaggio;
3. Acquiferi con grandi formazioni non consolidate e depositi alluvionali minori: acquiferi poco profondi non consolidati che forniscono rendimenti moderati e tassi di ricarica spesso favorevoli grazie al loro collegamento con i fiumi;
4. Acquiferi di rocce sedimentarie consolidate: acquiferi più spessi con ricarica variabile, caratterizzati da prospettive di rendimenti più alti a fronte di costi di perforazione più elevati.

L'uso attuale delle acque sotterranee per l'irrigazione è limitato, in parte a causa delle implicazioni sui costi associati all'esplorazione e allo sfruttamento delle acque sotterranee e alle difficoltà di finanziamento. Secondo Siebert et al. (2010), solo il 3-5% della terra coltivata totale nell'Africa subsahariana viene irrigata, e la maggior parte è concentrata in tre paesi: Madagascar, Sudafrica e Sudan. L'agricoltura è, tuttavia, la principale fonte di sostentamento per molte persone. Il settore agricolo contribuisce a circa il 30% del prodotto interno lordo (PIL) nell'Africa subsahariana, ma impiega circa il 65% della popolazione, per la maggior parte donne (Banca mondiale, 2018a); inoltre, i raccolti sono prodotti quasi interamente attraverso agricoltura pluviale. Data l'importanza del settore agricolo in Africa, qualsiasi miglioramento in tale settore ha il potenziale di trasformare le condizioni di vita della popolazione. Lo sfruttamento delle acque sotterranee potrebbe fungere da catalizzatore per la crescita economica aumentando l'estensione delle aree irrigate e quindi migliorando i rendimenti agricoli e la diversità delle colture e, in definitiva, trasformando l'intera catena del valore (Schoengold e Zilberman, 2007).

Figura 8.2
Distribuzione delle principali tipologie di acquiferi in Africa

Fonte: MacDonald et al. (2012, fig. 4B, pag. 6). Contiene materiale del Servizio geologico britannico (British Geological Survey) © UKRI 2012. Con licenza CC BY 3.0 IGO.



8.1.4 Sfide legate allo sfruttamento delle acque sotterranee

Nonostante le grandi potenzialità legate allo sfruttamento delle acque sotterranee nella regione subsahariana, diversi fattori ostacolano un maggiore utilizzo della risorsa. La maggior parte di queste criticità è comune a tutti i paesi. La principale sfida della governance è superare l'inerzia nell'assetto istituzionale. Fino al decennio passato, le acque sotterranee hanno ricevuto poca attenzione da parte delle persone responsabili delle politiche. Ad esempio, mentre i paesi dell'Asia sudorientale hanno sfruttato le loro risorse idriche sotterranee per trasformare l'attività agricola negli anni '70 e '80, in Africa non ci sono state iniziative del genere. L'Africa ha anche trascurato molti altri importanti sviluppi a livello globale relativi all'utilizzo delle acque sotterranee. A livello mondiale, molti paesi hanno iniziato a costruire banche dati sulle acque sotterranee e sviluppare mappe idrogeologiche negli anni '80, ma queste sono ancora rare in Africa. Il monitoraggio regolare dei livelli o della qualità delle acque sotterranee, che costituisce il primo passo verso la gestione delle acque sotterranee, è limitato a pochi paesi (IGRAC, 2020). Ci sono poche università che includono le acque sotterranee nei loro programmi e pochi organismi professionali per chi si occupa di idrogeologia o trivellazione. La condivisione di dati e informazioni è ancora agli inizi, nonostante la rapida crescita e la disponibilità degli strumenti di acquisizione dei dati. I quadri normativi per proteggere e salvaguardare le acque sotterranee a livello nazionale sono



Trovare personale qualificato con la capacità di condurre studi idrogeologici e geofisici è raro

deboli o non vengono applicati. Sembra che a poco a poco le acque sotterranee stiano cominciando ad essere prese maggiormente in considerazione, forse a causa della consapevolezza del ruolo fondamentale che queste svolgono nel raggiungimento degli obiettivi di approvvigionamento idrico. Ad esempio, sono state recentemente avviate diverse iniziative a livello continentale, regionale e nazionale. Queste includono, ad esempio, l'Istituto per la gestione delle acque sotterranee della Comunità di sviluppo dell'Africa meridionale (nell'acronimo inglese SADC) e il Groundwater Desk Office con il relativo programma per le acque sotterranee all'interno del Consiglio dei ministri africani sull'acqua (nell'acronimo inglese AMCOW).

La questione finanziaria continua a essere un aspetto critico per lo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee. Il divario tra il finanziamento attuale e quello necessario per realizzare l'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 è più alto per l'Africa subsahariana, dove l'approvvigionamento idrico universale richiederebbe un budget dieci volte maggiore rispetto all'attuale livello di investimento di 13,2 miliardi di dollari (Watts et al., 2021). Gran parte di questo importo è necessario per il funzionamento, la manutenzione e il ripristino dei sistemi esistenti, che spesso non riescono ad attrarre finanziamenti.

Trovare personale qualificato con la capacità di condurre studi idrogeologici e geofisici è raro. Pertanto, il lavoro è spesso svolto da personale semiqualeficato, il che sovente si traduce in infrastrutture di scarsa qualità o in pozzi posizionati in modo inappropriato, con conseguenti problemi di funzionalità a lungo termine. Per l'ubicazione e la costruzione dei pozzi ad alto rendimento necessari per l'irrigazione su larga scala o per l'approvvigionamento urbano, il complesso ambiente idrogeologico che caratterizza gran parte dell'Africa richiede una notevole esperienza, che, ancora una volta, è difficile da trovare. La generale mancanza di professionisti e professioniste in materia di acque sotterranee ha un impatto sul personale delle istituzioni e degli uffici del governo locale e nazionale in molti paesi, ostacolando le iniziative emergenti per supervisionare un monitoraggio, una pianificazione e un utilizzo efficaci della suddetta risorsa.

Le natura delle acque sotterranee può rappresentare una sfida per il loro sfruttamento. Gran parte del continente presenta acquiferi di roccia cristallina, che generalmente limitano le rese dei pozzi a meno di un litro al secondo. Diversi paesi dell'Africa orientale presentano acquiferi di roccia vulcanica, che contengono depositi limitati e percorsi di flusso complessi (figura 8.2). I grandi acquiferi di rocce sedimentarie del Nordafrica si trovano generalmente lontano dal punto in cui vi è più bisogno di acqua. La qualità delle acque sotterranee nella rift dell'Africa orientale può essere critica a causa degli elevati livelli di fluoro. La contaminazione antropica nelle aree urbane è spesso aggravata da servizi igienico-sanitari inadeguati. Non è stata ancora constatata una contaminazione diffusa da nitrati o pesticidi, sebbene ciò possa seguire i modelli osservati in altre parti del mondo con l'intensificarsi delle pratiche agricole. Benché spesso il trattamento delle acque sotterranee sia economicamente più conveniente rispetto a quello delle acque superficiali, è probabile che i costi di questa attività aumentino in futuro.

8.1.5 Studi di caso e buone pratiche

Ci sono molti esempi di utilizzo delle acque sotterranee nell'Africa subsahariana. Il riquadro 8.1 fornisce l'esempio di Città del Capo e delle misure adottate dalla città per garantire che dai rubinetti continuasse a scorrere acqua. Storicamente, Città del Capo dipendeva dalle fonti d'acqua di superficie per soddisfare il proprio fabbisogno idrico. Tuttavia, l'aumento della popolazione unito ai cambiamenti climatici ha causato una crisi dovuta alla scarsità idrica che si è potuta risolvere in parte grazie alle acque sotterranee.

Nel 1990, il consiglio della città di Nairobi ha chiuso i pozzi utilizzati per fornire acqua alla città quando è stato commissionato l'approvvigionamento idrico superficiale dal fiume Tana (con una capacità di 520 milioni di litri al giorno). Tuttavia, nel 2002, l'interruzione

della rete di alimentazione (a causa di una frana), unita al persistere di elevate perdite della risorsa dai bacini e ai mancati incassi del sistema di distribuzione, ha impedito alla città di soddisfare il proprio fabbisogno idrico, e la disponibilità di acqua è stata ridotta al di sotto di 200 milioni di litri al giorno. Per far fronte a questa situazione e per cercare di mitigare la crisi di approvvigionamento idrico, principalmente in modo privato, sono stati perforati molti pozzi e la capacità è aumentata a circa 300 milioni di litri al giorno (Tuinhof et al., 2011).

Un altro strumento utilizzato nella regione è la ricarica gestita degli acquiferi (nell'acronimo inglese MAR), che comporta la modifica del paesaggio o lo sviluppo di infrastrutture per migliorare le infiltrazioni d'acqua nel terreno per l'uso durante i periodi di siccità (vedere riquadro 7.1 e sezione 11.5). Questa tecnologia è stata adottata a Windhoek (riquadro 8.2).

Riquadro 8.1 Crisi dell'approvvigionamento idrico di Città del Capo

Città del Capo è la seconda città più grande del Sudafrica, con una popolazione di circa 3,7 milioni di persone. Ben sei bacini idrici situati sulle montagne intorno alla città le forniscono la maggior parte dell'acqua, immagazzinando circa 900 milioni di metri cubi. A partire dal 2015, una grave siccità ha ridotto i volumi immagazzinati in queste riserve a livelli critici. Senza precipitazioni abbondanti nel 2018, vi era dunque la reale possibilità di un "giorno zero", ovvero un giorno in cui dai rubinetti della città non sarebbe più uscita acqua.

Città del Capo ha risposto alla crisi in diversi modi. Le perdite nel sistema di distribuzione dell'acqua sono state ridotte a circa il 17%, la metà della media nazionale. Attraverso campagne di sensibilizzazione e restrizioni idriche è stato dimezzato il consumo totale di acqua in città a circa 200 milioni di metri cubi all'anno. Gli impianti temporanei di desalinizzazione e il ricorso d'emergenza alle acque sotterranee hanno potenziato la fornitura (rispettivamente con 6 e 55 milioni di metri cubi all'anno). Sono stati perforati pozzi autonomi in scuole, ospedali e altri luoghi importanti per ridurre la loro vulnerabilità in caso si fosse verificato un giorno zero.

Fonte: adattato dalla Banca mondiale (2018a, riquadro 6, pag. 34).

Riquadro 8.2 Schema di ricarica gestita degli acquiferi (MAR) di Windhoek

Windhoek (la capitale della Namibia) riceve precipitazioni annuali pari a 360 millimetri, il che la rende una delle capitali più aride della Terra. All'inizio degli anni '90, le fonti d'acqua esistenti a Windhoek (tre dighe e una zona di captazione delle acque sotterranee) iniziarono a stentare a soddisfare la crescente domanda di acqua. Gli studi mostrarono che le nuove fonti d'acqua, come l'acqua di mare dissalata pompata dalla zona costiera, erano distanti e sfruttarle sarebbero state troppo costose.

Il personale esperto in materia di urbanistica ha risposto con una serie di soluzioni innovative: durante i periodi di eccedenza, l'acqua trattata veniva immagazzinata negli acquiferi, in modo che fosse protetta dall'evaporazione e potesse essere utilizzata durante i periodi di carenza idrica. Windhoek ha anche iniziato a riutilizzare una parte delle sue acque reflue, trattandole secondo gli standard per l'acqua potabile in un nuovo impianto. Altre strategie impiegate includevano la gestione della domanda, volta a individuare le perdite d'acqua, limitarne l'uso per l'irrigazione dei giardini e aumentare la consapevolezza pubblica. Windhoek ha quindi iniziato a gestire un approvvigionamento idrico a "doppia condotta" in alcune aree: le acque reflue semidepurate da un vecchio impianto di trattamento sono state distribuite per l'irrigazione di campi sportivi, parchi e cimiteri al fine di risparmiare acqua potabile. Il programma MAR di Windhoek e altre azioni di gestione dell'acqua si sono rivelate molto meno costose rispetto ad altre soluzioni di approvvigionamento idrico e hanno reso Windhoek un leader mondiale nell'uso sostenibile dell'acqua riciclata e nella ricarica gestita degli acquiferi.

Fonte: adattato dalla Banca mondiale (2018a, riquadro 7, pag. 36).

● ● ●
Attualmente, lo sfruttamento delle acque sotterranee nell'Africa subsahariana non è limitato dalla scarsità di questa risorsa, ma piuttosto dalla mancanza di investimenti

8.1.6 Opportunità e risposte dal territorio

È chiaro che nell'Africa subsahariana esistono opportunità per un maggiore sfruttamento delle acque sotterranee al fine di soddisfare la crescente domanda di acqua causata dalla crescita demografica ed economica, dalla rapida urbanizzazione e dalla diffusione delle pratiche di irrigazione. Poiché i cambiamenti climatici continuano a influenzare i modelli delle precipitazioni, causando una pressione crescente sulle risorse idriche superficiali, le acque sotterranee, grazie alla loro capacità tampone, offrono la possibilità di far fronte a tali incertezze legate al clima e fornire un approvvigionamento idrico più affidabile. L'uso congiunto delle acque sotterranee e superficiali presenta delle potenzialità considerevoli, con le forniture di acque sotterranee che aggiungono resilienza e capacità alle risorse idriche superficiali, specialmente nelle città in rapida crescita (Jacobsen et al., 2013).

Tuttavia, il crescente utilizzo delle acque sotterranee può minacciare il servizio ecosistemico fornito dalle stesse come flusso di base ai fiumi e agli ecosistemi acquatici. È già stato dimostrato che il flusso di base si è ridotto a Nairobi, dove le acque sotterranee sono state ampiamente utilizzate (Oiro et al., 2020), e il deflusso delle acque sotterranee nei fiumi dalle miniere abbandonate ha causato un'ampia contaminazione in Sudafrica (Ochieng et al., 2010). Anche gli acquiferi transfrontalieri richiedono una gestione particolare, ma in molte circostanze favoriscono la cooperazione e la comprensione reciproca, piuttosto che causare conflitti.

Attualmente, lo sfruttamento delle acque sotterranee nell'Africa subsahariana non è limitato dalla scarsità di questa risorsa, ma piuttosto dalla mancanza di investimenti. C'è un urgente bisogno di trovare modi per sbloccare il potenziale delle acque sotterranee, al fine di aiutare a sviluppare mezzi di sussistenza sostenibili e raggiungere una crescita equa. Ciò comporta investimenti in infrastrutture, istituzioni, professionisti e professioniste formate e conoscenza della risorsa.

I progressi tecnologici (come l'osservazione della Terra, l'energia rinnovabile e metodi avanzati di perforazione) possono supportare la valorizzazione delle acque sotterranee, ma devono essere accompagnati da una solida comunità di persone esperte e specializzate, per ottenere il meglio dalle tecnologie.

Storicamente, gli investimenti nelle acque sotterranee erano visti come meno vantaggiosi rispetto a quelli nelle acque superficiali, poiché gran parte delle infrastrutture non erano visibili e quindi ritenute più soggette a corruzione. Tuttavia, studi condotti nell'Africa subsahariana hanno dimostrato che lo sviluppo della gestione delle acque sotterranee non è molto più soggetto a corruzione rispetto ad altri settori (Plummer, 2012). Saranno tuttavia necessari investimenti per migliorare gli standard di costruzione e il tasso di funzionalità dei punti di raccolta dell'acqua. Sono inoltre necessari investimenti nelle istituzioni preposte alla gestione delle acque sotterranee per garantire che gli sviluppi futuri non minaccino la sostenibilità della risorsa.

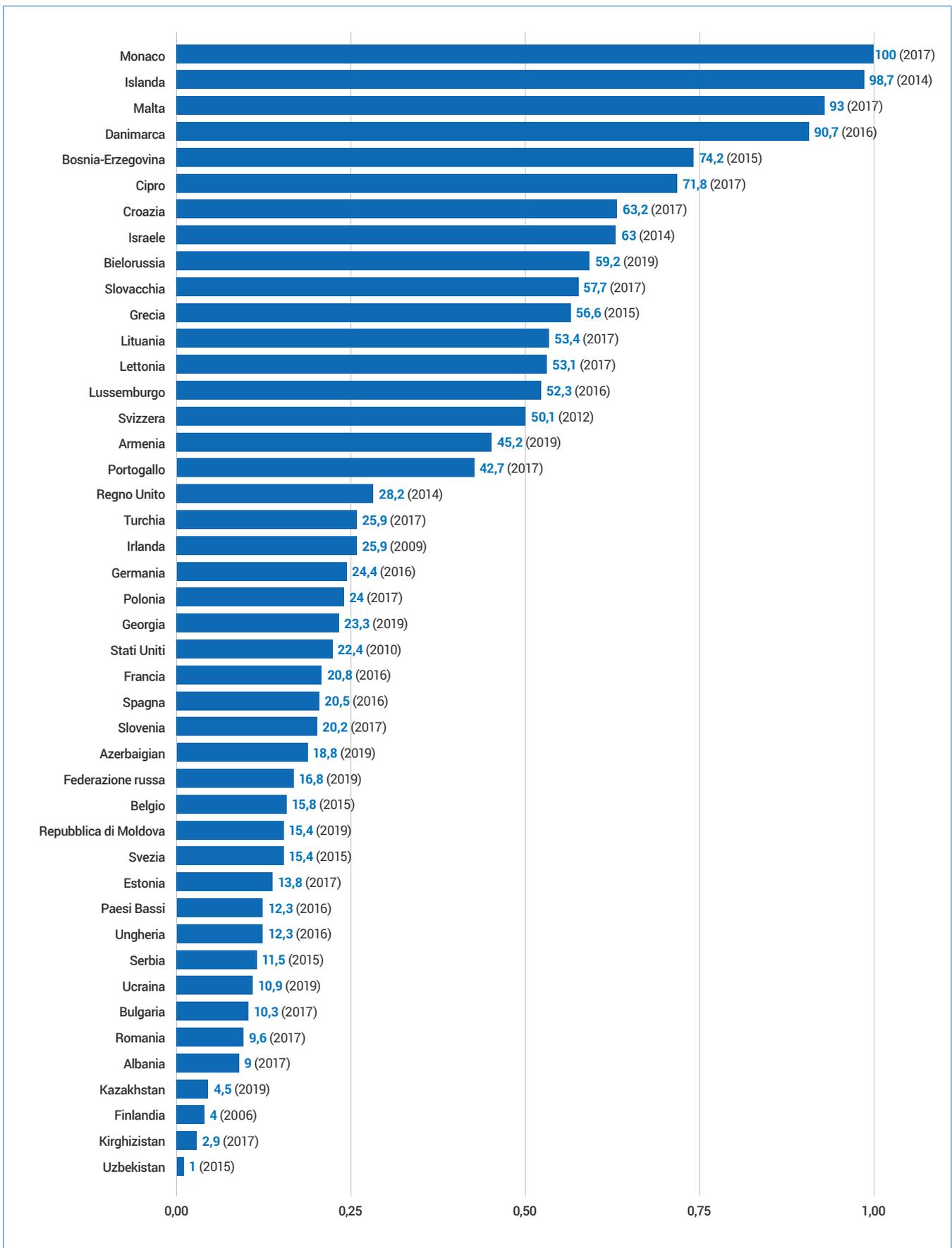
8.2 Europa e America settentrionale

Le caratteristiche delle acque sotterranee e la loro disponibilità variano tra l'Europa e l'America settentrionale e all'interno di queste regioni, riflettendo le differenze geologiche e idrologiche (vedere prologo, figura 6). Questo capitolo affronta brevemente il tema dell'estrazione delle acque sotterranee nelle diverse sottoregioni, le particolarità della loro governance in ciascuna di esse e alcune urgenti sfide proprie di questa risorsa (ad esempio l'inquinamento).

8.2.1 Prelievo e utilizzo delle acque sotterranee

La quantità di acque sotterranee sul prelievo totale di acqua dolce varia notevolmente da paese a paese in tutta l'Europa e l'America settentrionale: da 1% a 100% (figura 8.3).

Figura 8.3 Percentuale delle acque sotterranee sul totale dell'acqua dolce (lorda) estratta nei paesi selezionati (ultimo anno disponibile)



Fonte: UNSD, sulla base dei dati Eurostat, OCSE e UNSD Environment Questionnaire.

Nel 2017, il 24% dei prelievi totali di acqua effettuati nell'area dell'Unione europea (UE), Islanda, Liechtenstein, Norvegia, Svizzera e Turchia proveniva dalle acque sotterranee (AEA, 2019). Le acque sotterranee costituiscono un'importante fonte di acqua per uso domestico: circa il 75% della popolazione dell'UE dipende dalle acque sotterranee per l'approvvigionamento idrico (Commissione europea, 2008). Queste risorse sono rilevanti anche per gli usi industriali e agricoli (irrigazione).

Negli Stati Uniti, il prelievo di acque dolci sotterranee nel 2015 è stato stimato in 311,5 milioni di metri cubi al giorno, circa l'8% in più rispetto al 2010 (Dieter et al., 2018), mentre i prelievi totali di acqua dolce hanno registrato una tendenza al ribasso a partire dal 2005. In Canada, il 30,3% della popolazione fa affidamento sulle acque sotterranee per l'uso in ambito municipale, domestico e rurale (Governo del Canada, 2013).

Tabella 8.1 Alcune caratteristiche generali della governance delle acque sotterranee per ciascuna subregione, in una prospettiva di integrazione regionale (dati meramente indicativi)

Subregione	Unione europea (UE)	Europa orientale, Caucaso e Asia centrale	America settentrionale
Livello di integrazione regionale e uniformità di approcci alla governance delle acque sotterranee	La Direttiva quadro sulle acque (WFD) e la Direttiva sulla protezione delle acque sotterranee applicano un approccio integrato alla gestione delle acque superficiali e sotterranee. Armonizzazione regionale e coerenza nel contesto delle politiche sono promosse dalla Strategia di implementazione comune, che comprende il Gruppo di lavoro sulle acque sotterranee.	Storicamente, questa area aveva un approccio comune, che con il tempo di è diversificato di paese in paese. Comunemente, le acque sotterranee sono soggette ad autorità diverse rispetto alle acque superficiali. Si assiste a una progressiva diffusione dell'approccio della WFD nelle vicinanze dell'UE.	Decentralizzazione: Stati (federali) individuali (Stati Uniti), province e territori (Canada) svolgono un ruolo chiave nella gestione delle acque sotterranee. Vi sono differenze significative tra gli Stati membri degli Stati Uniti in termini di politiche relative alle acque sotterranee, anche in riferimento ai collegamenti con le acque superficiali.

8.2.2 Evoluzione della gestione e della governance delle acque sotterranee

La tabella 8.1 fornisce una panoramica indicativa di alcuni aspetti relativi all'integrazione a livello regionale della governance delle acque sotterranee nelle sottoregioni discusse in questo capitolo.

Gli obiettivi ambientali della Direttiva quadro sulle acque dell'UE (nell'acronimo inglese WFD), che dal 2000 ha fornito un quadro giuridico regionale sulla politica delle acque, obbligano gli Stati membri dell'UE a prevenire il deterioramento e a proteggere, migliorare e ripristinare il buono stato delle acque sotterranee, con riferimento sia allo stato quantitativo che chimico (riquadro 8.3).

La Direttiva quadro sulle acque richiede l'identificazione e la caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei e, insieme ai dati di monitoraggio, la valutazione dell'impatto delle pressioni umane sulle acque sotterranee. La direttiva affronta anche i rischi di mancato conseguimento degli obiettivi ambientali e stabilisce misure per raggiungere e mantenere un buono stato quantitativo e chimico. Essa, infine, ha contribuito ad armonizzare gli approcci alla delineazione e alla valutazione dei corpi idrici sotterranei (nell'acronimo inglese GWB), anche nelle vicinanze dell'UE (riquadro 8.4).

Fino a poco tempo fa le leggi sull'acqua dell'Europa orientale, del Caucaso e dell'Asia centrale non prevedevano il modello di gestione integrata delle acque superficiali e sotterranee.

● ● ●
La Direttiva quadro sulle acque ha contribuito ad armonizzare gli approcci alla delineazione e alla valutazione dei corpi idrici sotterranei

Riquadro 8.3 Stato quantitativo e chimico dei corpi idrici sotterranei nell'Unione europea

Durante il secondo ciclo dei piani di gestione dei bacini idrografici (2016-2021) nell'UE, è stato valutato lo stato dei corpi idrici sotterranei (AEA, 2018a; vedere figura seguente), dimostrando che è stato raggiunto un buono stato chimico per il 74% di tali corpi idrici (nell'acronimo inglese GWB, un'unità di gestione), mentre è stato raggiunto un buono stato quantitativo per l'89% di essi (AEA, 2019). Quando si fa riferimento a buono stato quantitativo, si intende che la risorsa idrica sotterranea disponibile non dovrebbe essere ridotta a causa dei prelievi, ma anche che dovrebbero essere evitati gli impatti sulle acque superficiali collegate o sugli ecosistemi terrestri dipendenti dalle acque sotterranee.

Stato quantitativo e chimico dei corpi idrici sotterranei



Nota: (*): media regionale; AT (Austria), BE (Belgio), BG (Bulgaria), CY (Cipro), CZ (Repubblica Ceca), DE (Germania), DK (Danimarca), EE (Estonia), ES (Spagna), FI (Finlandia), FR (Francia), GR (Grecia), HR (Croazia), HU (Ungheria), IE (Irlanda), IT (Italia), LT (Lituania), LU (Lussemburgo), LV (Lettonia), MT (Malta), NL (Paesi Bassi), NO (Norvegia), PL (Polonia), PT (Portogallo), RO (Romania), SE (Svezia), SI (Slovenia), SK (Slovacchia) e UK (Regno Unito).

Fonte: AEA (2018a), sulla base dei dati riportati dagli Stati membri dell'UE nell'ambito della Direttiva quadro sulle acque.

Riquadro 8.4 Transizione difficile dalla valutazione idrogeologica alla contabilizzazione delle pressioni umane

L'iniziativa Plus dell'Unione europea sull'acqua per i paesi del partenariato orientale (EUWI+, 2016-2021) ha sostenuto l'attuazione dei principi di gestione integrata della Direttiva quadro sulle acque per i corpi idrici superficiali e sotterranei nei paesi del partenariato orientale Armenia, Azerbaigian, Bielorussia, Georgia, Repubblica di Moldova e Ucraina. In particolare per le acque sotterranee, si è trattato di un cambiamento impegnativo, passando dal precedente approccio tradizionale incentrato sui singoli problemi locali e descrivendo solamente la situazione idrogeologica e lo status chimico delle acque sotterranee, a una prospettiva più olistica di delineazione dei corpi idrici sotterranei (nell'acronimo inglese GWB, la gestione delle unità della Direttiva quadro sulle acque) e considerando anche le significative pressioni umane e il loro impatto sulla quantità e sulla qualità delle acque sotterranee. Con il supporto dell'EUWI+ sono stati delineati in totale 117 corpi idrici sotterranei (di cui 42 transfrontalieri). La cooperazione tra Bielorussia e Ucraina, che adottano entrambe misure per applicare la Direttiva quadro sulle acque con riferimento ai GWB transfrontalieri (Lyuta et al., 2021), illustra il processo e sottolinea la necessità di armonizzarlo a livello transfrontaliero.

● ● ●
Con riferimento ai 42 paesi che condividono le risorse idriche in Europa e America settentrionale, i quadri giuridici e istituzionali per la cooperazione transfrontaliera coprono sempre più acquiferi

Una migliore protezione era necessaria poiché, ad esempio, le licenze di estrazione non erano sufficientemente utilizzate e monitorate (UNECE, 2011). In molti di questi paesi, il monitoraggio e la valutazione delle acque sotterranee sono peggiorati dopo lo scioglimento dell'Unione Sovietica, anche se alcuni paesi mantengono una forte tradizione tecnico-scientifica. Ne è un esempio la Georgia: dal 1990 al 2013 non vi sono state attività di monitoraggio centralizzato e dal 2013 sono state gradualmente aggiunte o riattivate stazioni di monitoraggio, con il supporto di diversi progetti (EUWI+, 2020). I frequenti cambiamenti politici e amministrativi hanno in molti casi portato alla frammentazione, e il monitoraggio e la valutazione delle acque sotterranee sono ancora comunemente separati dalla gestione complessiva delle acque.

Anche negli Stati Uniti si sono verificati cambiamenti sostanziali nella governance delle acque sotterranee. Esistono differenze significative tra i quadri giuridici dei singoli Stati in tale materia, anche nel modo in cui è considerata la connessione idrologica tra acque superficiali e sotterranee (Megdal et al., 2014). La maggior parte dei quadri normativi tratta la quantità e la qualità dell'acqua separatamente, con enti statali responsabili organizzati in maniera frammentata (Gerlak et al., 2013). In California, il Sustainable Groundwater Management Act (California Department of Water Resources, 2014) ha introdotto una riforma della governance delle acque sotterranee a livello statale che ha istituito agenzie locali per la sostenibilità delle acque sotterranee. Esse hanno la responsabilità innanzitutto dello sviluppo e della verifica del rispetto delle norme sulla gestione di questa risorsa (Kiparsky et al., 2017). In Canada, la Costituzione stabilisce che le province e i territori hanno giurisdizione legale primaria sulle acque superficiali e sotterranee, mentre il governo federale ha poteri per gestire le acque sotterranee nel contesto dei terreni federali, compresi i parchi nazionali (Rivera, 2014).

Con riferimento ai 42 paesi che condividono le risorse idriche in Europa e America settentrionale, i quadri giuridici e istituzionali per la cooperazione transfrontaliera coprono sempre più acquiferi. Dei 36 paesi che condividono acquiferi transfrontalieri nella regione, 24 hanno riferito che le disposizioni operative coprono il 70% o più della loro area acquifera transfrontaliera (UNECE/UNESCO, 2021). Il quadro istituzionale e giuridico, in particolare la Convenzione sulla protezione e l'uso dei corsi d'acqua transfrontalieri e dei laghi internazionali, hanno rafforzato la cooperazione nella regione (Lipponen e Chilton, 2018).

8.2.3 Sfide e opportunità legate alle acque sotterranee

Di seguito sono illustrate tre questioni che interessano le acque sotterranee, e quindi gli usi e le attività socioeconomiche che dipendono da esse, o in cui queste sono parte della soluzione: i cambiamenti climatici e la scarsità d'acqua, gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee e, infine, l'inquinamento, compresi gli inquinanti emergenti.

I cambiamenti climatici e la scarsità idrica

Gli Stati di tutta la regione sono alle prese con la necessità di far fronte alle pressioni esercitate dai prelievi di acqua, ulteriormente aggravate dai cambiamenti climatici; le acque sotterranee sono una risorsa cruciale in questo senso, in quanto possono fornire alcune possibili soluzioni.

Nel 2015, durante i mesi estivi, il 33% della popolazione della regione che include l'UE, nonché Liechtenstein, Norvegia e Svizzera, è stata esposta a condizioni di stress idrico¹ (AEA, 2019). Gli Stati membri dell'UE si stanno impegnando nello scambio di informazioni sulle buone pratiche per affrontare le pressioni esercitate dai prelievi d'acqua, tenendo conto dei cambiamenti climatici. Nell'UE è in fase di elaborazione un documento di orientamento sulla MAR.

Le misure previste dal Governo del Kazakhstan (2018) mirano a ridurre la scarsità d'acqua, sia a livello nazionale che regionale, a distribuire le risorse idriche transfrontaliere, a utilizzare gli acquiferi in modo efficiente e sostenibile, a costruire nuove infrastrutture, ad aumentare la copertura forestale dei bacini idrografici e a regolamentare gli scarichi nell'ambiente.

Negli Stati Uniti, il calo dei livelli delle acque sotterranee e i conflitti tra gli utenti sono tra le priorità comuni relative alla governance delle acque sotterranee identificate dall'agenzia statale (insieme alla qualità dell'acqua e alla sua contaminazione; Megdal et al., 2014; Petersen-Perlman et al., 2018). Il marketing dell'acqua è stato studiato negli Stati Uniti come mezzo per fornire un incentivo finanziario a chi detiene i diritti sulle acque sotterranee a investire nella conservazione dell'acqua al fine di realizzare un profitto sulla parte non utilizzata o sul trasferimento ad altri utenti. Nello stato dell'Arizona, la ridotta disponibilità di acqua ha portato all'uso degli effluenti come fonte alternativa, mentre le modifiche legislative autorizzano crediti di stoccaggio negoziabili a lungo termine attraverso la ricarica degli acquiferi dall'acqua o dagli effluenti del fiume Colorado (Bernat et al., 2020).

Gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee

Nell'UE, il ciclo del piano di gestione dei bacini idrografici terminato nel 2021 mostra che il collegamento tra le acque sotterranee e gli ecosistemi acquatici associati e gli ecosistemi terrestri dipendenti da esse è preso sempre più in considerazione dagli Stati membri. Questo serve per identificare meglio tali ecosistemi, considerare in misura maggiore gli aspetti quantitativi e qualitativi e continuare a stabilire adeguati valori soglia per le acque sotterranee in base alle esigenze dell'ecosistema. I progressi sono supportati da relazioni tecniche (ad esempio vedere Commissione europea, 2011, 2014, 2015).

La ricarica gestita degli acquiferi (nell'acronimo inglese MAR) fornisce modi per sfruttare le riserve degli acquiferi in caso di flussi variabili (vedere riquadro 7.1 e sezione 11.5). Le organizzazioni non governative (ONG) ambientali quantificano la ricarica delle acque sotterranee negli acquiferi locali, nonché i vantaggi per l'ecosistema e la riduzione del rischio di inondazione, il che aiuta a creare partnership con molteplici benefici. In California, gli agricoltori possono ricevere un compenso monetario per la ricarica delle acque sotterranee all'inizio dell'autunno, quando l'acqua è particolarmente scarsa. Tali pratiche di inondazione

¹ Lo "stress idrico" si verifica quando la percentuale di utilizzo dell'acqua rispetto alle risorse di acqua dolce rinnovabili in un dato momento e luogo (in questo esempio a livello di bacino idrografico) supera il 20%.

● ● ●
In molti paesi europei, le acque sotterranee sono utilizzate principalmente per l'acqua potabile, il che sottolinea la necessità di controllare la loro qualità per evitare potenziali rischi per la salute

controllata forniscono anche habitat umidi temporanei essenziali per gli uccelli costieri che migrano lungo la Pacific Flyway, che spesso non hanno un posto dove fermarsi durante le lunghe migrazioni (The Nature Conservancy, s.d.). Ulteriori esperienze provenienti dagli Stati Uniti mostrano che i fondi per l'acqua hanno consentito di proteggere gli spazi verdi all'interno delle comunità locali e intorno ad esse e, nel caso dell'acquifero di Edwards in Texas che rifornisce la città di San Antonio, di migliorare la qualità dell'acqua che permette la ricarica degli acquiferi (The Nature Conservancy, 2019).

Qualità delle acque sotterranee, inquinanti e rischi per la salute

Gli inquinanti che più comunemente determinano una scarsa qualità delle acque sotterranee nell'UE sono i nitrati e i pesticidi. Sebbene gli inquinanti provenienti dall'agricoltura siano dominanti (e questo problema non è limitato all'Europa), anche i prodotti chimici industriali e le sostanze legate all'estrazione mineraria causano l'inquinamento chimico delle acque sotterranee in diversi distretti idrografici (figura 8.4; AEA, 2018b). Maggiori informazioni sui "nuovi" inquinanti o inquinanti "emergenti" nelle acque sotterranee sono necessarie. In linea con la Direttiva 2014/80/UE (che modifica la Direttiva sulle acque sotterranee, 2006/118/CE, sotto l'egida della Direttiva quadro sulle acque sotterranee) è stato avviato un processo di creazione di una "lista di controllo" per le sostanze presenti nelle acque sotterranee, con il duplice scopo di «aumentare la disponibilità dei dati di monitoraggio sulle sostanze che presentano un rischio effettivo o anche solo potenziale per i corpi idrici sotterranei e di facilitare l'identificazione di sostanze, compresi gli inquinanti emergenti, per le quali dovrebbero essere stabiliti standard di qualità delle acque sotterranee o valori soglia» (Commissione europea, 2014b). Finora sono stati presi in considerazione prodotti farmaceutici, sostanze per- e polifluoroalchiliche (nell'acronimo inglese PFAS) e metaboliti di pesticidi non rilevanti.

In molti paesi europei, le acque sotterranee sono utilizzate principalmente per l'acqua potabile, il che sottolinea la necessità di controllare la loro qualità per evitare potenziali rischi per la salute. Tali sforzi sono attuati mediante la definizione degli obiettivi nazionali fissati dai paesi nel quadro del protocollo UNECE/OMS sull'acqua e la salute (UNECE/OMS, 2019). Al riguardo, i Paesi Bassi hanno segnalato il rilevamento di nuove sostanze, come prodotti farmaceutici, microplastiche e nanoparticelle, tra le criticità per il mantenimento della qualità delle acque sotterranee e superficiali (OCSE, 2019a). In uno studio condotto negli Stati Uniti, è stato identificato almeno un composto ormonale o farmaceutico nel 6% di 844 siti di acque sotterranee utilizzati per l'approvvigionamento pubblico, il che suggerisce che gli acquiferi presentano una vulnerabilità limitata alla contaminazione da parte di questi composti (Bexfield al., 2019). Tuttavia, alcuni di questi inquinanti organici emergenti e i loro metaboliti possono rappresentare una minaccia per i corpi idrici sotterranei, forse per decenni in determinate condizioni, a causa dei lunghi tempi di permanenza (Lapworth et al., 2012).

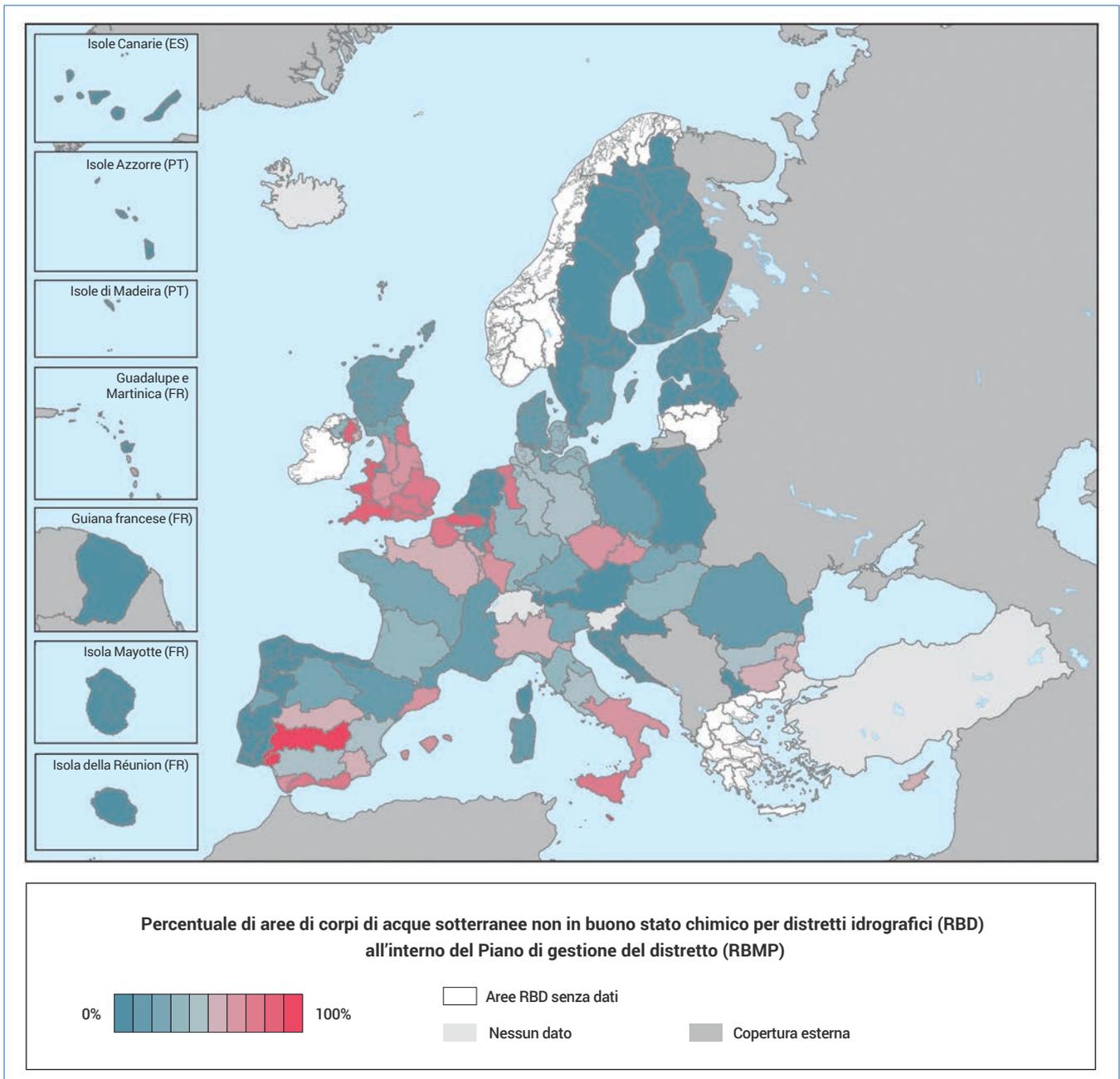
Nell'Europa orientale e nel Caucaso, un monitoraggio limitato (delle sostanze e/o della frequenza) e/o il modo restrittivo in cui tale monitoraggio è stato stabilito dalla legislazione ostacolano talvolta l'applicazione di un approccio di controllo basato sul rischio anche poco compatibile in termini di costi (sorveglianza e monitoraggio operativo)².

8.2.4 Risposte alle questioni relative alle acque sotterranee

I diversi quadri normativi e sistemi di governance determinano l'adozione di soluzioni diverse nell'Unione europea, nell'Europa orientale, nel Caucaso, in Asia centrale e in America settentrionale (tabella 8.2). Oltre alla necessità di collaborazione tra diversi utenti in una determinata regione, vi è una crescente consapevolezza della natura transfrontaliera di molti acquiferi e, quindi, della necessità di una cooperazione intergiurisdizionale (vedere capitolo 12).

² UBA (inedito)

Figura 8.4 Percentuale della superficie dei corpi idrici sotterranei che non si trova in “buono stato chimico” suddivisi per distretto idrografico



Fonte: adattato da AEA (2018b, mappa 4.1, pag. 51).

Tabella 8.2

Una selezione delle risposte di governance e/o di gestione alle criticità delle acque sotterranee in ciascuna sottoregione (solo a titolo indicativo)

Unione europea (EU)	Europa orientale, Caucaso e Asia centrale	America settentrionale
Miglioramento dello status quantitativo e chimico delle acque sotterranee secondo l'obiettivo generale del Quadro dei piani di gestione dei bacini idrografici. Armonizzazione degli approcci in tutta l'UE. Miglioramento della coerenza delle politiche (sostenuta da strategie trasversali come il piano d'azione dell'UE "Verso l'inquinamento zero per l'aria, l'acqua e il suolo – Un percorso verso un pianeta più sano per tutti").	Adozione di soluzioni tecniche per le acque sotterranee (ad esempio, modernizzazione delle infrastrutture idrauliche e miglioramento dell'efficienza). Rafforzamento della salvaguardia dell'ambiente, compresa quella delle risorse idriche sotterranee.	Stati Uniti: adottare e incentivare meccanismi basati sul mercato. Mercati idrici, redistribuzione dei diritti sull'acqua o dei crediti di stoccaggio. Cooperazione tra organizzazioni per la conservazione e settori economici che promuovono progetti multi-beneficio.

Come le preoccupazioni sulla quantità delle acque sotterranee, anche quelle sulla qualità delle acque sotterranee sono di primaria importanza. Studi e ricerche nella regione hanno rivelato problemi di qualità delle acque sotterranee, anche a causa di inquinanti emergenti. Per condurre un monitoraggio economicamente conveniente e sostenibile a lungo termine, è necessario stabilire alcune priorità al fine di trovare un equilibrio tra una copertura sufficiente nel monitoraggio ma anche un'attenzione adeguata agli inquinanti specifici. In generale, il monitoraggio e le competenze necessarie per l'analisi delle acque sotterranee sono responsabilità di istituzioni specializzate, mentre l'attuazione degli strumenti di politica idrica (ad esempio la Direttiva quadro sulle acque, come indicato nella tabella 8.1) richiede la cooperazione tra le istituzioni. In effetti, molte necessità e fattori determinanti sono gli stessi per le acque sotterranee e superficiali. A tal proposito, si stanno sviluppando politiche integrate e sforzi per garantire la coerenza dei processi.

8.3 America Latina e Caraibi

8.3.1 Introduzione

In America Latina e nei Caraibi, le acque sotterranee rappresentano una fonte d'acqua rilevante in quanto forniscono circa 3.700 chilometri cubi all'anno di acqua ai fiumi della regione (Campuzano et al., 2014). Ciò si traduce in 10.200 metri cubi pro capite all'anno di risorse idriche sotterranee rinnovabili, che rappresentano poco più di un terzo della dotazione idrica media pro capite all'anno nella regione. Inoltre, a causa della relativa abbondanza di acque superficiali e dell'utilizzo limitato delle acque sotterranee, meno del 30% dell'acqua dolce prelevata proviene da fonti sotterranee. Per i paesi che dipendono dalle acque sotterranee, circa la metà dei prelievi è utilizzata per l'irrigazione, un terzo viene utilizzato per uso domestico e il resto per uso industriale (Aguilar-Barajas et al., 2015). È probabile che la dipendenza dalle acque sotterranee aumenterà nei prossimi anni a causa di diversi fattori, tra cui la crescita della popolazione, l'urbanizzazione e i cambiamenti climatici.

Le acque sotterranee rappresentano una risorsa fondamentale e strategica (Espindola et al., 2020; UNESCO, 2007) nelle zone aride e semiaride, in particolare nel cosiddetto Corridoio secco dell'America centrale così come a Città del Messico, per non citare altre aree. Tuttavia, nell'intera regione esistono lacune riguardo alla protezione e al monitoraggio delle acque sotterranee, che favoriscono il loro sfruttamento intensivo e/o la loro contaminazione, mettendone in pericolo la sostenibilità (Campuzano et al., 2014) tanto quanto l'accesso all'acqua da parte delle popolazioni più vulnerabili, che dipendono da esse per l'approvvigionamento di acqua potabile (WWAP, 2019). Vedere la figura 8.5 per una panoramica sulle acque sotterranee e sui livelli di ricarica nella regione.

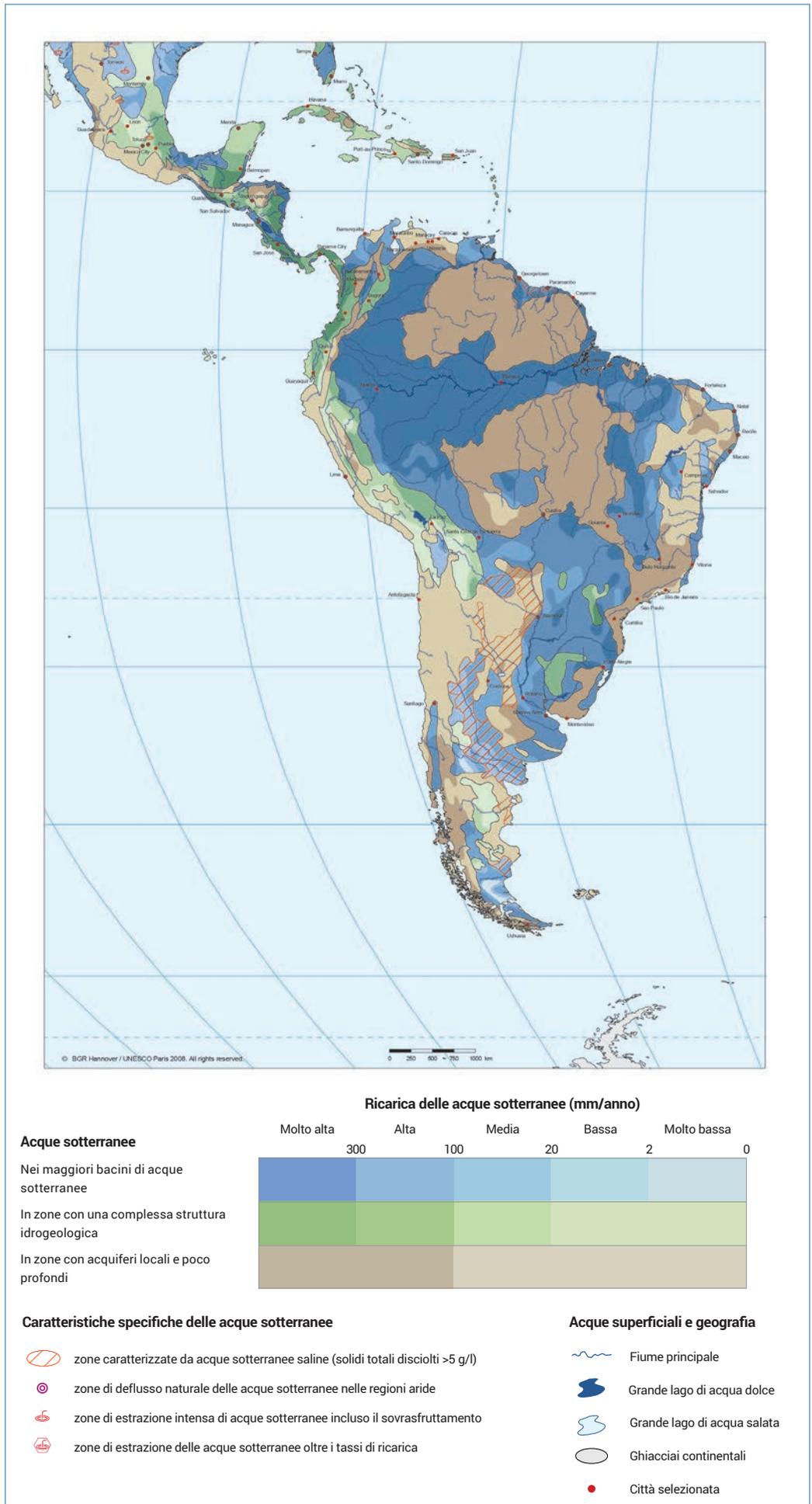
8.3.2 Principali usi delle acque sotterranee

Nel Messico settentrionale e centrale, nel Brasile nord-orientale, sulle coste del Perù e del Cile e nella zona preandina dell'Argentina, le acque sotterranee vengono utilizzate principalmente per irrigare i raccolti nelle aree più aride (Foster e Garduño, 2009). Le acque sotterranee e il sottosuolo che le contengono svolgono un ruolo importante nei sistemi di approvvigionamento idrico della maggior parte delle città dell'America Latina, e non solo in quelle in cui le acque sotterranee sono la principale fonte di approvvigionamento (ad esempio Città del Messico, León, Lima, Natal, San José e São Paulo, tra le tante³). In paesi come Costa Rica e Messico, le acque sotterranee riforniscono il 70% delle famiglie nelle aree urbane e sostengono praticamente tutta la domanda interna nelle aree rurali; da esse proviene inoltre il 50% dell'acqua utilizzata dal settore industriale (Campuzano et al., 2014). In altri paesi, gli acquiferi sono poco sfruttati a causa della mancanza di informazioni e di altri fattori (UNESCO, 2007). Anche l'industria

³ A Buenos Aires, dove l'uso delle acque sotterranee è diminuito in modo significativo a causa delle "importazioni di acque superficiali", hanno iniziato a verificarsi problemi relativi a servizi igienico-sanitari e drenaggio in diverse grandi aree (Foster e Garduño, 2009).

Figura 8.5

Velocità di ricarica dei principali sistemi acquiferi dell'America Latina e dei Caraibi





Le acque sotterranee e il sottosuolo che le contengono svolgono un ruolo importante nei sistemi di approvvigionamento idrico della maggior parte delle città dell'America Latina, e non solo in quelle in cui le acque sotterranee sono la principale fonte di approvvigionamento

mineraria della regione utilizza in modo intensivo le acque sotterranee, insieme al settore agricolo e a quello domestico. In Cile, ad esempio, il 63% dell'acqua utilizzata dal settore minerario proviene dagli acquiferi. L'uso delle acque sotterranee nell'attività mineraria rappresenta un importante rischio di inquinamento degli acquiferi, che può verificarsi in caso di perdite di acque reflue (Ruz et al., 2020).

8.3.3 Sfide per la gestione delle acque sotterranee

Diversi paesi devono affrontare lo sfruttamento eccessivo e la contaminazione delle loro acque sotterranee; tale fenomeno interessa alcune aree in Argentina, Brasile, Messico, Paraguay e Perù. Il Messico ha provato molteplici approcci⁴ per migliorare la gestione dei suoi acquiferi sovrasfruttati (Arroyo et al., 2015). In tutta la regione, i più comuni problemi di qualità delle acque sotterranee sono associati a sostanze indesiderate di origine naturale (principalmente arsenico e fluoruro), inquinanti di origine antropica (nitrati, inquinanti fecali, pesticidi), vari composti di origine industriale (sottoprodotti minerari, solventi organoclorurati, idrocarburi, composti fenolici, ecc.) e inquinanti emergenti, come cosmetici, antibiotici, ormoni e nanomateriali. Ad esempio, in Bolivia, la qualità delle acque sotterranee è minacciata dall'inquinamento industriale, agricolo e domestico, mentre in Honduras l'elevata domanda di acqua nelle aree urbane minaccia la futura disponibilità di questa risorsa (Ruz et al., 2020).

I problemi di cui sopra si traducono in un aumento del numero dei conflitti relativi all'accesso e all'uso dell'acqua nella regione. Questi conflitti sono spesso correlati alle decisioni prese nell'ambito della gestione dell'acqua tra diversi utenti e/o ai conflitti relativi all'accesso alla terra⁵, o ruotano attorno all'impatto delle attività riguardanti i minerali, l'estrazione di materiali da costruzione, i combustibili fossili, la giustizia climatica o i progetti energetici. Si stima che il numero di conflitti relativi all'inquinamento e all'esaurimento delle acque sotterranee iniziati tra il 2000 e il 2019 sia più di quattro volte superiore a quello dei conflitti iniziati tra il 1980 e il 1999 (ICTA-UAB, s.d.).

8.3.4 Sfide specifiche dei piccoli Stati insulari in via di sviluppo e di altre aree costiere

Nei Caraibi, dove le acque superficiali tendono ad essere relativamente scarse, circa il 50% dell'acqua prelevata proviene dalle acque sotterranee. Paesi come Bahamas, Barbados e Giamaica dipendono fortemente dalle acque sotterranee come principale fonte di approvvigionamento idrico. A Barbados, le acque sotterranee forniscono addirittura il 90% dell'approvvigionamento totale di acqua, in Giamaica circa l'84% e a Saint Kitts e Nevis intorno al 70%. Tuttavia, a Grenada, Dominica e Santa Lucia le acque sotterranee sono scarsamente utilizzate, a riprova dell'eterogeneità della regione dei Caraibi. L'eccessivo sfruttamento degli acquiferi, l'intrusione salina e l'inquinamento rappresentano una grave minaccia alle acque sotterranee in questa sottoregione, trasformandole in fonti insostenibili. «Una delle principali sfide per i gestori delle risorse idriche così come per i fornitori di servizi risiede nella difficoltà associata alla capacità di determinare una resa sicura degli acquiferi e di effettuare valutazioni periodiche dell'equilibrio tra resa e domanda. Spesso i dati idrogeologici necessari, i modelli e il personale specializzato sono insufficienti» (Cashman, 2014, pag. 1192).

In Belize, così come in molte altre aree costiere della regione in rapida espansione urbana, gli effetti dell'intrusione salina minacciano la qualità delle acque sotterranee (Campuzano et al., 2014; IGRAC, 2014; Ruz et al., 2020). Inoltre, i cambiamenti climatici e la variabilità del clima, in particolare l'aumento della frequenza e dell'intensità degli uragani, rappresentano le minacce maggiori per i piccoli Stati insulari in via di sviluppo (nell'acronimo inglese SIDS) dei Caraibi, a

⁴ Sforzi per raccogliere e analizzare informazioni, uso di strumenti di pianificazione e modellizzazione, programmi orientati alle politiche per ridurre l'eccessiva assegnazione dei diritti sull'acqua ed eliminazione dei sussidi per l'elettricità nelle aree rurali.

⁵ Gestione delle foreste, dell'agricoltura, della pesca e del bestiame.

causa delle mareggiate e delle infiltrazioni nei pozzi. Freeport, la principale città dell'isola Grand Bahama, ne è un esempio. La città è completamente rifornita da acque sotterranee. Nel 2019, il passaggio dell'uragano Dorian ha causato mareggiate che hanno allagato i principali pozzi dell'isola, provocando una diffusa salinizzazione delle acque che sono diventate salmastre. Sebbene valori di salinità elevati non causino problemi di salute immediati, anche se ingerita, l'acqua salmastra è molto sgradevole da consumare (Chaves, 2019).

8.3.5 Monitoraggio, gestione e governance

In America Latina e nei Caraibi, le reti di monitoraggio sono gestite con metodi diversificati. Alcuni paesi hanno programmi di monitoraggio nazionali, come Brasile, Cile, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Messico, Perù e Venezuela. Altri hanno reti locali, come l'Argentina, mentre Bolivia, Paraguay e Uruguay monitorano gli acquiferi di interesse specifico (ad esempio Purani, Patiño e Raigón – Ruz et al., 2020). Oltre a una maggiore copertura, frequenza e continuità degli strumenti e dei sistemi di monitoraggio, la gestione sostenibile delle acque sotterranee richiede anche conoscenze tecniche, cambiamenti istituzionali, strumenti giuridici ed economici e partecipazione sociale. A questo proposito, un sistema formale di concessioni e diritti di utilizzo delle acque sotterranee può contribuire direttamente all'allocazione razionale e, in alcuni casi, alla riallocazione delle acque sotterranee. Anche l'addebito dei costi di estrazione delle acque sotterranee può essere un importante strumento di gestione della domanda, ma richiede una base comune trasparente e accettata per quantificare l'estrazione e l'utilizzo dell'acqua (Foster e Garduño, 2009). Infine, inoltre, è importante che le informazioni relative alle acque superficiali siano incrociate con quelle relative alle acque sotterranee, poiché queste risorse sono spesso interdipendenti.

Attraverso il programma ISARM (Internationally Shared Aquifer Resources Management) per le Americhe (UNESCO, 2007; UNESCO/OAS, 2010), nella regione sono stati identificati 52 sistemi acquiferi transfrontalieri di cui si hanno livelli di conoscenza diversi.

Il sistema acquifero amazzonico è alla base di un'area stimata in 3,95 milioni di chilometri quadrati (OTCA, 2018). L'Agenzia nazionale brasiliana per l'acqua (ANA) ha condotto studi per ampliare le conoscenze idrogeologiche del sistema acquifero amazzonico in Brasile (nell'acronimo inglese SAAB), il più grande del paese e uno dei più grandi al mondo. Il SAAB è costituito da sedimenti formati dal periodo Cretaceo a quello Cenozoico di natura sabbiosa, limosa e argillosa che coprono le province idrogeologiche dell'Amazzonia e dell'Orinoco. Fa parte di un sistema acquifero transfrontaliero che si estende sotto aree della Bolivia, del Brasile, della Colombia, dell'Ecuador, del Perù e del Venezuela. In Brasile, ha una superficie di 2 milioni di chilometri quadrati negli Stati di Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia e Roraima, con una riserva permanente stimata di 124.000 chilometri cubi di acqua, situata nei bacini sedimentari di Marajó, Amazonas, Solimões e Acre. Gli Stati brasiliani di Pará e Amapá, frequentemente colpiti da siccità, fanno affidamento su questa fonte rispettivamente per il 79% e il 64% dei loro prelievi di acqua dolce (UNESCO, 2007; UNESCO/OAS, 2010; Hu et al., 2017).

Il sistema acquifero guaraní (nell'acronimo inglese GAS) è un acquifero transfrontaliero condiviso da quattro paesi dell'America Latina: Argentina, Brasile, Paraguay e Uruguay. Il GAS copre un'area stimata di 1,09 milioni di chilometri quadrati (OAS, 2009). A livello regionale, dalle zone di ricarica (aree affioranti del GAS) alle zone di deflusso, le acque sotterranee del GAS tendono a fluire da nord a sud, accompagnando l'orientamento del bacino sedimentario del Paraná. Nell'80% dell'area, il GAS è circondato da rocce basaltiche, con acque antiche e molto antiche (da 4.000 a più di 100.000 anni; Sindico et al., 2018). Lo sfruttamento degli acquiferi è stato intenso in alcune aree, a causa dell'espansione delle attività economiche e dell'inquinamento delle acque superficiali, nonché delle periodiche siccità. Circa l'80% delle acque sotterranee pompate viene utilizzato per l'approvvigionamento idrico pubblico, il 15% per i processi industriali e il 5% da stazioni termali geotermiche (Foster e Garduño, 2009). Una delle caratteristiche principali del GAS è il suo assetto di governance (riquadro 8.5).

Riquadro 8.5 L'accordo relativo all'acquifero guaraní (GAA)

Nel 2010 i quattro paesi che condividono l'accordo relativo all'acquifero guaraní (nell'acronimo inglese GAA; Argentina, Brasile, Paraguay e Uruguay) hanno deciso di negoziare un trattato (il primo nel suo genere) incentrato sulla gestione dell'acquifero guaraní, che si distingue anche per l'assenza di gravi conflitti per la risorsa naturale (Villar e Costa Ribeiro, 2011). I negoziati sono andati avanti per un decennio; il GAA è stato ratificato da tutte le parti interessate ed è entrato in vigore il 26 novembre 2020. Il GAA definisce un quadro di governance dell'acquifero transfrontaliero; contiene le regole generali del diritto internazionale applicabili alle risorse idriche transfrontaliere (sia superficiali che sotterranee). I paesi sono sovrani ma sono allo stesso tempo tenuti a cooperare e a non causare danni significativi agli Stati vicini (GAA, art. 6). I paesi si impegnano a utilizzare l'acquifero in modo razionale, sostenibile ed equo (GAA, art. 4). La realizzazione concreta di questi principi consisterà in un esercizio per ponderare e bilanciare diversi fattori. Sebbene questi non siano elencati nel GAA, possono essere trovati nel quadro giuridico internazionale emergente applicabile agli acquiferi transfrontalieri (Nazioni Unite, 1997, art. 6; e ILC, 2008, art. 5). Nel trattato sono incluse altre pratiche di gestione, come lo scambio di informazioni e le attività che possono interessare l'acquifero (GAA, art. 8). Di particolare importanza è l'impegno ad informare gli altri Stati qualora un'attività pianificata possa avere un impatto al di là dei confini di uno Stato (GAA, art. 9). Un'ulteriore previsione che vale la pena evidenziare è il riferimento alle aree critiche transfrontaliere (GAA, art. 14), che possono meritare una particolare attenzione da parte di tutti gli Stati.

Nota: il GAA (2020) è disponibile su: www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Guarani_Aquifer_Agreement-English.pdf.

● ● ●
L'importanza degli acquiferi per gli ecosistemi della regione, per lo sviluppo sociale e per le attività economiche aumenterà ulteriormente in un futuro prossimo a causa dei cambiamenti climatici e del loro impatto sul ciclo idrologico

Un altro importante acquifero è il sistema acquifero transfrontaliero del Pantanal, che si trova nel bacino del fiume Paraguay. L'area stimata dell'acquifero è di circa 141.500 chilometri quadrati (102.000 chilometri quadrati in Brasile, 21.500 in Bolivia, 18.000 in Paraguay; UNESCO/OAS, 2010). Questo sistema acquifero si distingue per il suo ruolo chiave nel mantenimento degli ecosistemi del Pantanal, nella regolazione naturale del regime delle precipitazioni e nell'approvvigionamento idrico delle comunità locali e delle popolazioni indigene. Trattandosi di un acquifero non confinato, è vulnerabile all'inquinamento, principalmente correlato alle attività agricole e zootecniche (García, 2015). Nell'ultimo decennio è stato minacciato dall'eccessiva sedimentazione nei fiumi e nelle zone umide, causata dall'erosione accelerata dovuta alla deforestazione negli altopiani e nelle piantagioni di soia. Questa sedimentazione riduce l'infiltrazione e la conseguente capacità di ricarica (UNESCO, 2007).

Nel 2006, l'ISARM-Americas ha identificato un acquifero transfrontaliero denominato "Esquipulas-Ocatepeque-Citalá", situato nell'area del Trifinio condivisa da El Salvador, Guatemala e Honduras. Il progetto Governance of Groundwater in Transboundary Aquifers (GGRETA), volto ad acquisire esperienza nella buona governance e nella gestione delle acque sotterranee, ha scelto questo acquifero come oggetto di un progetto dimostrativo. Nei suoi elaborati tutte le informazioni disponibili sull'acquifero transfrontaliero sono state raccolte, analizzate, ordinate per priorità e inserite in un sistema, con conseguente identificazione di lacune informative. Questo studio ha mostrato che quello che originariamente doveva essere un singolo acquifero è, in realtà, composto da due acquiferi (Esquipulas e Ocatepeque-Citalá) nel fondovalle dell'alto bacino del fiume Lempa. Questi due acquiferi mantengono il loro carattere transfrontaliero. L'acquifero di Esquipulas è condiviso da tutti i paesi, mentre quello di Ocatepeque-Citalá è condiviso da El Salvador e Honduras. In questo contesto, cresce l'interesse per accordi di monitoraggio e governance adeguati. Un'ulteriore caratteristica innovativa del progetto GGRETA è che incorpora una prospettiva di genere nel monitoraggio, nella valutazione e nella rendicontazione sull'acqua. Gli indicatori disaggregati per sesso comprendono: percezioni maschili e femminili sulla qualità e quantità dell'attuale disponibilità idrica; percezioni maschili e femminili dell'uguaglianza di genere nelle decisioni domestiche sull'acqua, sui servizi igienico-sanitari e sull'igiene (nell'acronimo inglese WASH); e la presenza delle donne nelle cooperative e nelle industrie legate all'acqua (UNESCO, 2016).

Per concludere, gli Stati sovrani con acquiferi nazionali e transfrontalieri richiederanno regole che aiutino a garantire l'uso sostenibile delle risorse idriche sotterranee. Nel caso di contesti transfrontalieri, questi ultimi possono richiedere lo sviluppo e il mantenimento di istituzioni sovranazionali, ma ciò di per sé non garantisce un uso equo e sostenibile dell'acquifero (vedere capitolo 12). Allo stesso modo, le istituzioni nazionali necessitano sia di informazioni che di autorità per promuovere un uso sostenibile dell'acquifero. La regione dell'America Latina e dei Caraibi ha bisogno di muoversi seguendo percorsi politici che armonizzino il processo decisionale, il monitoraggio e la gestione delle acque sotterranee sia a livello nazionale che internazionale. L'importanza degli acquiferi per gli ecosistemi della regione, per lo sviluppo sociale e per le attività economiche aumenterà ulteriormente in un futuro prossimo a causa dei cambiamenti climatici e del loro impatto sul ciclo idrologico. Sebbene le acque sotterranee regionali rimangano relativamente abbondanti, vi è un urgente bisogno di una gestione e di una governance migliori per garantirne un uso sostenibile. Pertanto, la ricerca, il lavoro sul campo e il monitoraggio dovrebbero colmare le lacune esistenti nelle conoscenze e fornire una base più solida per un processo decisionale informato e coordinato.

8.4 Asia e Pacifico

8.4.1 Contesto idrogeologico complessivo

L'Asia e il Pacifico sono la regione più grande del mondo sia in termini di superficie (28 milioni di chilometri quadrati) che di popolazione (4,7 miliardi). Le acque sotterranee fungono da importante fonte di approvvigionamento di acqua dolce e hanno svolto un ruolo chiave nello sviluppo socioeconomico della regione. Tuttavia, l'insostenibile prelievo di acque sotterranee, insieme agli impatti dei cambiamenti climatici, ha portato all'esaurimento degli acquiferi e all'aumento della scarsità d'acqua in numerose aree. Inoltre, la qualità della risorsa è minacciata da una varietà di fattori antropogenici e geogenici che contribuiscono ulteriormente allo stress idrico nella regione.

La presenza di acque sotterranee varia nella regione a causa dei suoi diversi contesti geologici. Gli acquiferi sedimentari, contenenti principalmente depositi provenienti da pianure alluvionali, si estendono in corrispondenza dei grandi fiumi come il Gange, il Mekong e lo Yangtze e forniscono condizioni favorevoli per la produttività delle acque sotterranee. Nelle regioni montuose dell'Asia centrale e settentrionale, le acque sotterranee si trovano generalmente in acquiferi costituiti da rocce dure articolate. Sebbene le zone aride interne dell'Asia centrale ricevano scarse precipitazioni e presentino tassi di evaporazione elevati, lo scioglimento della neve e dei ghiacciai in alta montagna fornisce una ricarica essenziale alle acque sotterranee. Gli acquiferi composti da roccia carbonatica sono ampiamente distribuiti nell'Asia sudorientale, i sistemi carsici sviluppati, composti da calcare stratificato, si trovano nella Cina meridionale e in parti della penisola indocinese mentre gli acquiferi soggiacenti le isole del Pacifico sono composti da roccia vulcanica quaternaria (Lee et al., 2018b; Villholth, 2013b). La figura 8.6 illustra le acque sotterranee e la ricarica della regione.

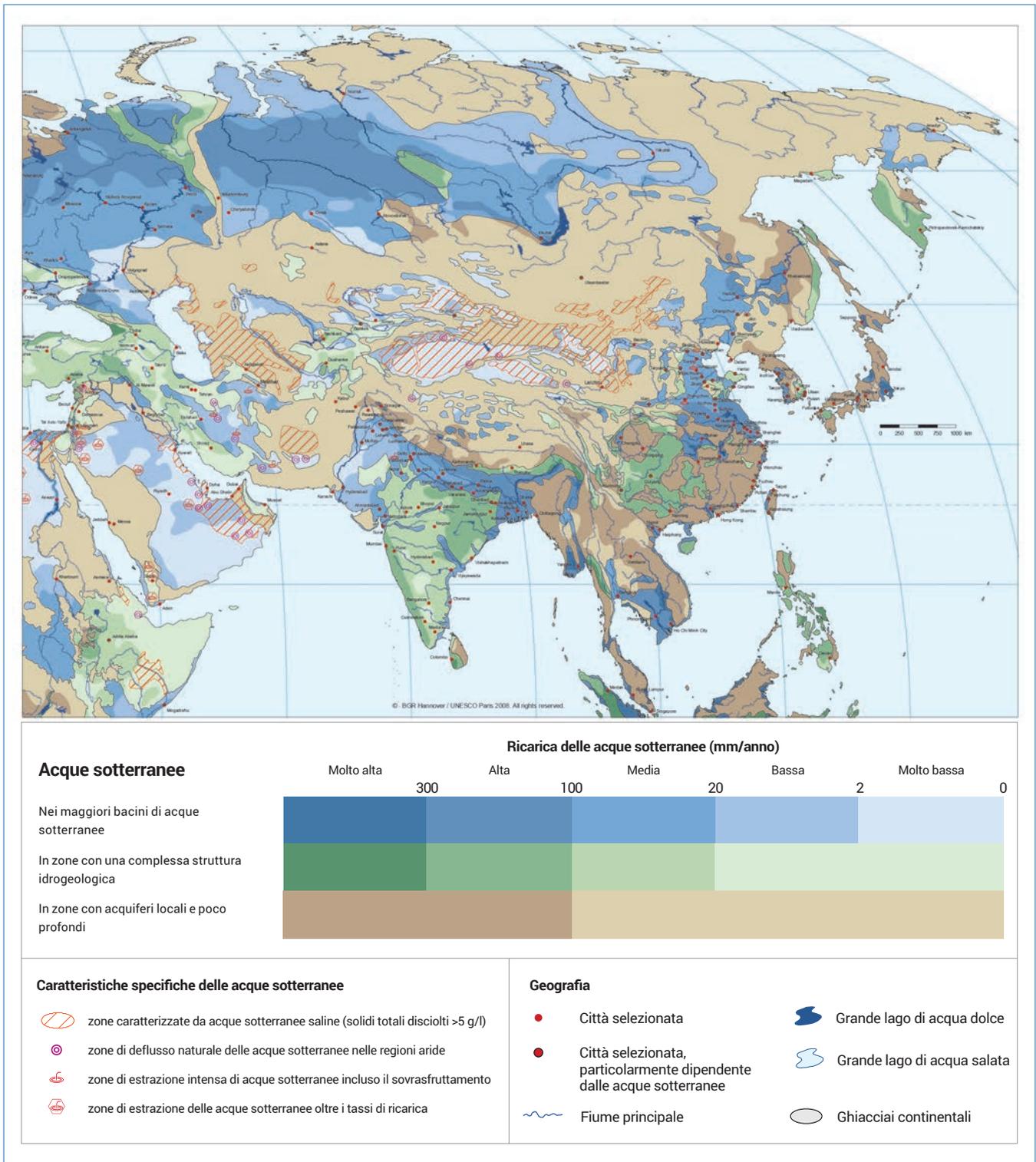
8.4.2 L'importanza delle acque sotterranee

La regione dell'Asia e del Pacifico preleva i maggiori quantitativi di acque sotterranee al mondo, e include sette dei dieci paesi con i più elevati livelli di prelievo: Bangladesh, Cina, India, Indonesia, Iran, Pakistan e Turchia (vedere tabella 5.1). Questi paesi da soli sono responsabili di circa il 60% del prelievo totale di acque sotterranee a livello mondiale (Aquastat, s.d.). Le ragioni principali dell'incremento nell'uso delle acque sotterranee nella regione riguardano l'aumento della domanda di acqua a causa della crescita demografica, del rapido sviluppo economico e del miglioramento del tenore di vita. L'utilizzo delle acque sotterranee ha fornito numerosi vantaggi per l'irrigazione, l'attività industriale, l'uso domestico, la resilienza alla siccità e il miglioramento dei mezzi di sussistenza. Questi benefici socioeconomici sono stati particolarmente importanti per il settore agricolo, che è fondamentale per lo sviluppo economico in molti paesi in



Le acque sotterranee fungono da importante fonte di approvvigionamento di acqua dolce e hanno svolto un ruolo chiave nello sviluppo socioeconomico della regione

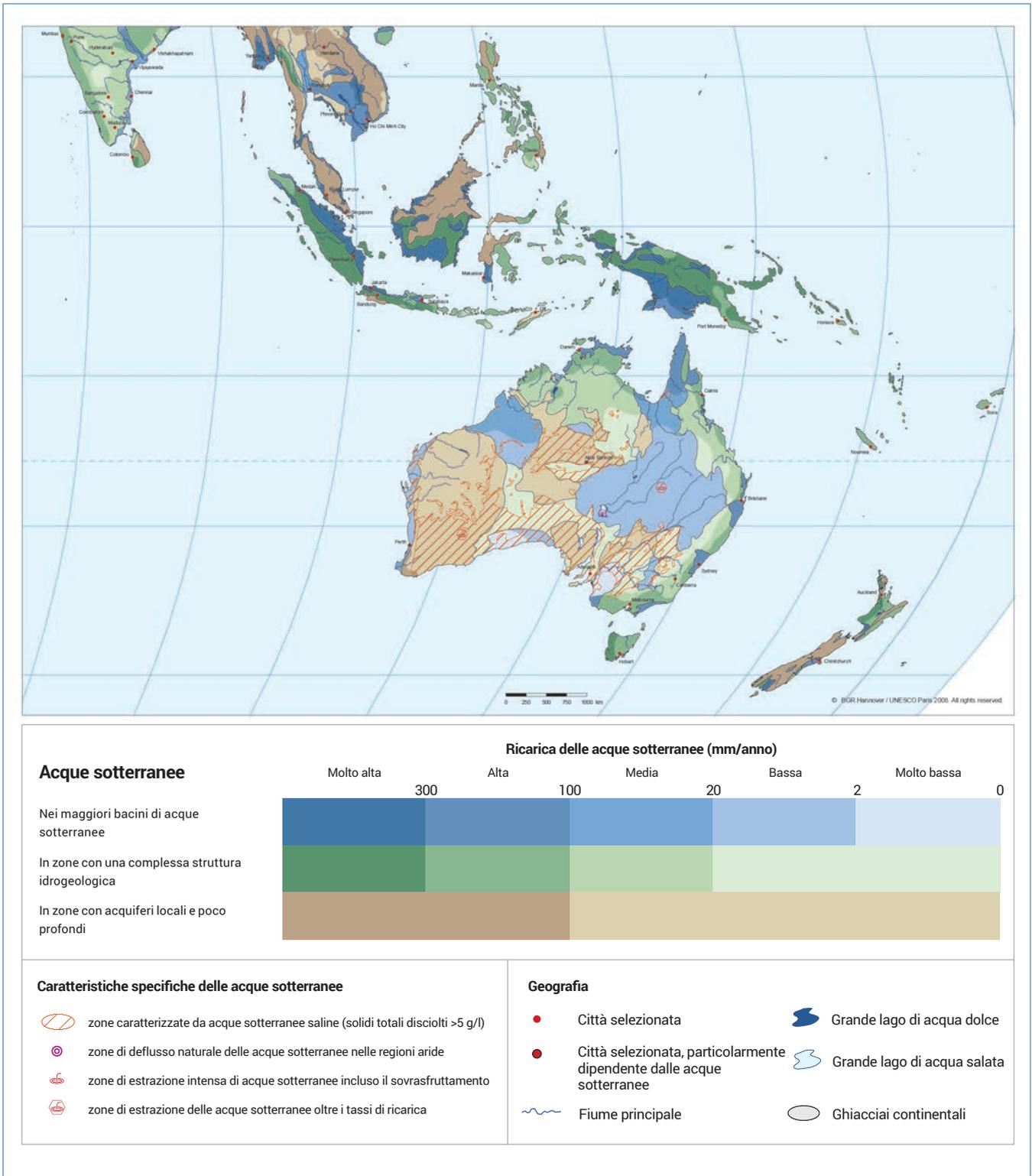
Figura 8.6 Acque sotterranee dell'Asia, dell'Australia e dell'Oceania



Fonte: BGR/UNESCO (2008).

via di sviluppo della regione e che è responsabile di circa l'82% dei prelievi totali di acqua (Aquastat, s.d.). Il rapido aumento dell'irrigazione alimentata dalle acque sotterranee, in particolare nella pianura della Cina settentrionale e nell'Asia meridionale tra il 1970 e il 1995, è stato il principale motore del boom agricolo nella regione (Shah et al., 2003). Essendo una risorsa fondamentale per l'irrigazione, le acque sotterranee contribuiscono alla sicurezza alimentare e alla riduzione della povertà. La dipendenza della regione da questa risorsa è associata all'aumento della produttività alimentare o alla mancanza di

Figura 8.6 Acque sotterranee dell'Asia, dell'Australia e dell'Oceania



Source : BGR/UNESCO (2008).

approvvigionamento idrico alimentato da acque superficiali. Ad esempio, dal 1960 al 2015, la popolazione indiana è quasi raddoppiata e, con essa, l'indice di produzione alimentare del paese è aumentato del 330% (Lee et al., 2018b). Se la dipendenza dell'agricoltura irrigua dalle acque sotterranee è evidente in tutta l'Asia meridionale e in Cina, il settore industriale e i municipi sono ugualmente grandi utilizzatori di acque sotterranee per quanto riguarda i centri urbani (Kataoka e Shivakoti, 2013). Le acque sotterranee sono anche la fonte preferita per rispondere alle necessità di acqua potabile e per scopi agricoli nell'Asia meridionale, poiché i canali delle acque superficiali sono stati storicamente

utilizzati come percorsi per i rifiuti domestici e industriali, rendendoli inadatti al suddetto utilizzo (Mukherjee, 2018). Inoltre, gli acquiferi costituiscono un rilevante rimedio contro le variazioni climatiche, poiché aiutano a garantire l'approvvigionamento idrico durante i periodi di maggiore siccità.

8.4.3 Sfide

Le acque sotterranee sono abbondanti nella maggior parte della regione dell'Asia e del Pacifico, ma il loro esaurimento ha sollevato preoccupazioni riguardo alla sostenibilità del loro utilizzo in Cina e in diverse parti dell'Asia centrale e meridionale, nonché in alcuni centri urbani dell'Asia sudorientale (Jia et al., 2019; Kataoka e Shivakoti, 2013; Lee et al., 2018b; Mukherjee, 2018). Il grave abbassamento delle acque sotterranee minaccia la produzione alimentare, i mezzi di sussistenza e le forniture idriche per uso industriale e provoca la subsidenza, l'intrusione di acqua di mare e danni ecologici. I cambiamenti climatici influiscono anche sulla variabilità delle precipitazioni nella regione, aggravando ulteriormente la pressione sulle acque sotterranee, in particolare nelle aree caratterizzate da clima semiarido e aridi e sui SIDS del Pacifico, dove le acque sotterranee costituiscono l'unica fonte affidabile di acqua dolce ma sono minacciate dall'innalzamento del livello del mare (Ashfaq et al., 2009; Asoka et al., 2017; Bouchet et al., 2019; Dixon-Jain et al., 2014). Inoltre, si prevede che aumenterà il rischio di scarsità idrica in quanto si stima che l'estrazione di acque sotterranee crescerà in futuro a causa dell'intensificazione della domanda di acqua da parte delle attività economiche e domestiche, mentre la loro ricarica diminuirà a causa delle variazioni climatiche (Hofmann et al., 2015).

Oltre all'esaurimento delle acque sotterranee, un problema altrettanto grave è rappresentato dalla loro contaminazione a causa di processi sia antropogenici che geogenici, poiché anche l'acqua non idonea al consumo contribuisce allo stress idrico nella regione (Hirji et al., 2017; MacDonald et al., 2016). La presenza di contaminanti geogenici come arsenico (acquifero del bacino indo-gangetico, delta del Fiume Rosso, delta del fiume Mekong), fluoruro (isole del Pacifico, India peninsulare meridionale, Sri Lanka, Cina centrale e occidentale) e uranio (Cina, India) comporta rischi significativi per la salute delle persone in tutta la regione (Coyte et al., 2018; Hara, 2006; Ministero dell'ambiente del Giappone/IGES, 2018; Le Luu, 2019; Mukherjee, 2018). I contaminanti di origine antropica nelle acque sotterranee, come i metalli pesanti (ovvero cadmio, cromo, piombo, mercurio), i coliformi, la salinità e i contaminanti emergenti⁶ sono un problema in aumento (Lapworth et al., 2018; Sui et al., 2015) così come la rapida urbanizzazione, l'intrusione dell'acqua marina, l'agricoltura intensiva e l'attività industriale, che continuano ad aumentare in questa regione. Inoltre, i sottoprodotti della disinfezione (nell'acronimo inglese DBP) richiedono un'attenzione particolare poiché la clorazione delle acque sotterranee con alogenuri e carbonio organico disciolto (nell'acronimo inglese DOC) può lasciare tracce di DBP tossici nell'acqua potabile (Coyte et al., 2019).

La rapida crescita economica e demografica, unita ad una pianificazione scadente e a una governance inadeguata, ha portato allo sfruttamento eccessivo e al degrado della qualità dell'acqua in alcune aree, minacciando la vita e i mezzi di sussistenza delle popolazioni che dipendono da questa risorsa vitale (Kataoka e Shivakoti, 2013; Lall et al., 2020; Shah et al., 2003). Ad esempio, il bacino del fiume Kharaa in Mongolia è un'area in fase di sviluppo economico e industriale importante – con benefici economici positivi derivanti da attività mineraria, agricoltura, zootecnia e turismo – ma queste attività, combinate con l'accelerazione dell'urbanizzazione, contribuiscono ad aumentare l'inquinamento delle acque sotterranee (Hofmann et al., 2010, 2015).

● ● ●
Una migliore governance delle acque sotterranee è necessaria con una certa urgenza, così come il sostegno popolare e la capacità di applicazione

⁶ I contaminanti emergenti sono costituiti da prodotti farmaceutici, pesticidi, prodotti chimici industriali, microplastiche, tensioattivi e prodotti per la cura della persona.

È stato dimostrato che l'inquinamento associato all'uso eccessivo di prodotti chimici in agricoltura influisce sulla qualità delle acque sotterranee che si trovano ben al di sotto della superficie. Nella pianura della Cina settentrionale, i nitrati sono stati rilevati a 24 metri di profondità (Chen et al., 2005).

È quindi fondamentale che lo sfruttamento e l'utilizzo continui delle acque sotterranee avvengano in modo sostenibile, al fine di ridurre la pressione su queste risorse. Sebbene le pratiche di gestione e i sistemi istituzionali, giuridici e normativi per affrontare i problemi delle acque sotterranee esistano in tutta la regione dell'Asia e del Pacifico, la governance delle acque sotterranee presenta delle difficoltà a causa dell'accesso libero e illimitato ad essa in molti paesi della regione (Kataoka e Shivakoti, 2013). Pertanto, una migliore governance delle acque sotterranee è necessaria con una certa urgenza, così come il sostegno popolare e la capacità di applicazione. I problemi relativi all'esaurimento delle acque sotterranee, alla subsidenza del suolo e alla contaminazione delle acque sotterranee richiedono un'azione impellente e una cooperazione transfrontaliera, al fine di mitigare le attuali tendenze negative e garantire la futura sicurezza idrica nella regione.

8.4.4 Risposte

Le acque sotterranee e le attività che dipendono da esse sono sistemi complessi. Pertanto, per un'elaborazione efficace delle politiche è necessaria una corretta comprensione delle condizioni idrogeologiche di un acquifero, della domanda di acqua e delle esigenze sociali ed economiche. Sebbene non esista una soluzione unica per le varie questioni che questi sistemi potrebbero dover affrontare, ci sono una serie di azioni e percorsi che i governi nazionali possono intraprendere per affrontare tali questioni. Di seguito sono riportati tre esempi di azioni intraprese dai governi per affrontare le sfide relative alle acque sotterranee.

Ricarica delle acque sotterranee in Rajasthan (India)

Il Rajasthan, lo Stato più arido dell'India, è soggetto a frequenti siccità ed è fortemente dipendente dalle acque sotterranee sia per l'irrigazione che per l'approvvigionamento di acqua potabile. A causa delle precipitazioni irregolari, dello sfruttamento eccessivo delle acque sotterranee e di perdite per evaporazione registrate come le più elevate nel paese, le comunità agricole della regione devono affrontare sfide crescenti al fine di soddisfare il proprio fabbisogno idrico. Nel 2016, il Governo del Rajasthan ha lanciato il Mukhyamantri Jal Swavlamban Abhiyan (MJSA), un programma per aiutare le comunità rurali a diventare autosufficienti nel soddisfare il proprio fabbisogno idrico. Concentrandosi sulla MAR (vedere riquadro 7.1 e sezione 11.5), il programma ha portato alla realizzazione di serbatoi per l'irrigazione, dighe, fossati e altre strutture di raccolta dell'acqua per catturare il deflusso. Il programma ha anche promosso la conservazione dell'acqua attraverso la microirrigazione e ha addirittura consentito di piantare alberi in terre desolate aride e di creare pascoli. I risultati a medio termine, dopo due monsoni, hanno mostrato che, su 21 distretti non desertici, 16 hanno visto un aumento del livello delle acque sotterranee di una media di 1,4 metri. Le valutazioni d'impatto hanno inoltre registrato un dato secondo il quale i villaggi partecipanti avrebbero ridotto del 56% il trasporto di acqua (cioè le autocisterne) rispetto ai villaggi non partecipanti (Verma e Shah, 2019).

Interventi volti ad arginare l'esaurimento delle acque sotterranee nella pianura della Cina settentrionale

La pianura della Cina settentrionale ha una delle minori disponibilità di risorse idriche pro capite sia a livello nazionale che globale. Il rapido sviluppo economico negli ultimi 40 anni è stato sostenuto dallo sfruttamento delle acque sotterranee, con un conseguente grave abbassamento del livello delle acque sotterranee che ha limitato l'ulteriore sviluppo nella regione. Negli ultimi anni sono stati attuati più piani di gestione dell'acqua per affrontare questo problema. Le azioni includono la raccolta dell'acqua piovana, la deviazione

dell'acqua del fiume da sud, la promozione di tecnologie di irrigazione per il risparmio idrico, il finanziamento di colture resistenti alla siccità e i progetti "Grain for Green"⁷. Come risultato di queste e altre misure, il tasso di esaurimento delle acque sotterranee sembra essere stato ridotto a Pechino e in parte della provincia di Hebei (Shao et al., 2017; Xu et al., 2018; Zhao et al., 2020).

Il programma di adattamento di Kiribati

La Repubblica di Kiribati è composta principalmente da atolli a bassa altitudine con un'area totale di 726 chilometri quadrati, situati nell'Oceano Pacifico centrale e occidentale. Kiribati è uno dei paesi più piccoli e remoti al mondo, geograficamente dispersi e vulnerabili ai cambiamenti climatici. Il paese è soggetto a frequenti e prolungate siccità, mentre l'innalzamento del livello del mare minaccia in modo significativo l'approvvigionamento di acqua dolce (acqua piovana e acque sotterranee poco profonde e non confinate). In tutto il paese, l'acqua potabile pulita e sicura proviene principalmente da lenti sottili di acque sotterranee che galleggiano sull'acqua di mare più densa all'interno dell'acquifero. A causa della loro fragile natura, se l'equilibrio delle lenti è disturbato a causa di siccità o eccessiva estrazione, le acque sotterranee diventano salmastre e inadatte all'uso potabile e all'irrigazione. Dal 2011 al 2018, il Governo di Kiribati ha compiuto numerosi sforzi per rafforzare la resilienza del paese ai cambiamenti climatici a livello nazionale, insulare e di comunità, con il sostegno e i contributi di partner operanti nel settore dello sviluppo.

Allargando le misure delle due precedenti fasi pilota, la Fase III del Kiribati Adaptation Program (KAP)⁸ ha visto l'adozione di un approccio olistico che includeva:

- il miglioramento dell'uso e della gestione dell'acqua mediante l'installazione di sistemi di raccolta dell'acqua piovana, oltre a sistemi di estrazione delle acque sotterranee che utilizzano tubi di infiltrazione orizzontali posti a basse profondità per estrarre l'acqua all'interno della lente d'acqua dolce;
- la riduzione delle perdite e degli sprechi d'acqua negli impianti esistenti;
- la tutela delle riserve idriche;
- il miglioramento della pianificazione a lungo termine per la gestione dell'acqua a livello locale;
- la protezione dall'erosione costiera investendo in protezioni, come dighe e piantagioni di mangrovie;
- il miglioramento della capacità del governo e della comunità di gestire gli impatti dei cambiamenti climatici e dei rischi naturali attraverso una politica nazionale di gestione delle coste, oltre a piani di adattamento gestiti localmente.

I rapporti di valutazione indicano che, attraverso il progetto, il numero di persone con accesso a fonti idriche migliorate è passato da 5.000 (nel 2017) a 12.780, superando del 116% l'obiettivo finale del progetto di 11.000 persone. Gli sforzi di ripristino riguardo ai sistemi idrici esistenti hanno consentito di rilevare ed eliminare perdite d'acqua pari a 645 metri cubi al giorno, mentre misure basate sulla natura unite a quelle ingegneristiche hanno fornito 1,87 chilometri di protezione dall'erosione costiera (Banca mondiale, 2019).

⁷ Ufficialmente noto come Programma di conversione dei terreni coltivati in foreste (nell'acronimo inglese CCFP), il programma paga gli agricoltori per piantare alberi sui loro terreni e fornisce alle famiglie nelle zone rurali terreni degradati da ripristinare.

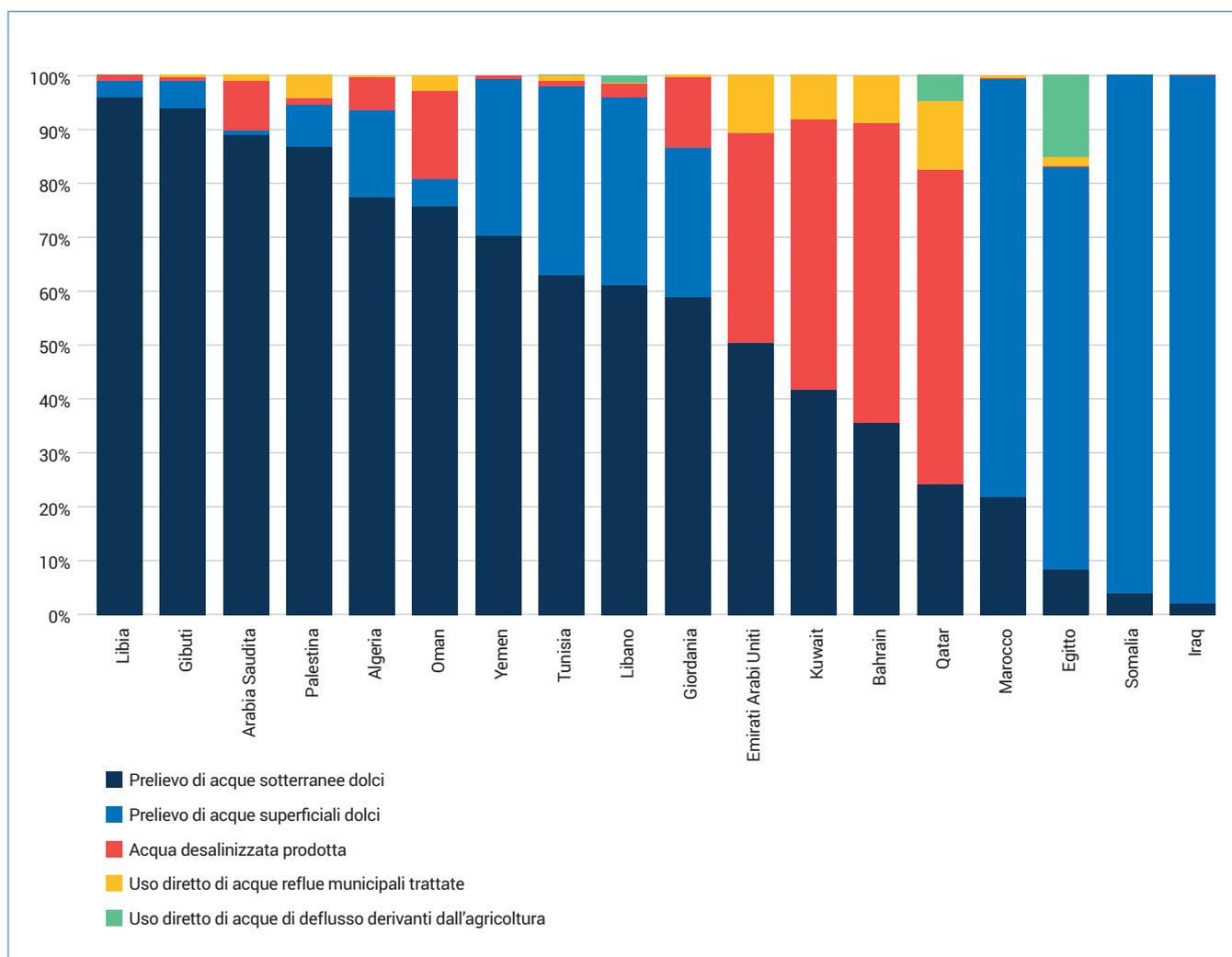
⁸ projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P112615.

8.5 La regione araba

8.5.1 Contesto regionale

La regione araba è una delle regioni più povere di acqua al mondo. Nel 2020, 19 Stati arabi su 22 si trovavano al di sotto della soglia di scarsità di acqua rinnovabile di 1.000 metri cubi pro capite all'anno, con 13 Stati situati al di sotto della soglia di scarsità idrica assoluta di 500 metri cubi pro capite all'anno (UNDESA, 2020; Aquastat, s.d.). Si prevede che, entro il 2050, 17 paesi arabi saranno al di sotto della soglia assoluta di scarsità d'acqua (UNDESA, 2020; Aquastat, s.d.). Questo ha spinto i paesi ad attingere ad altre risorse idriche convenzionali e non convenzionali al fine di soddisfare il proprio fabbisogno di acqua dolce. Le acque sotterranee sono la fonte d'acqua più utilizzata in almeno 11 dei 22 Stati arabi; da esse proviene oltre l'80% dei prelievi di acqua dolce in Libia, Gibuti, Arabia Saudita e Palestina (figura 8.7; Aquastat, s.d.).

Figura 8.7 Prelievi di acqua per fonte in Stati arabi selezionati



Nota: non tutti i dati si riferiscono allo stesso anno. Vengono utilizzati gli ultimi dati disponibili per ciascun paese.

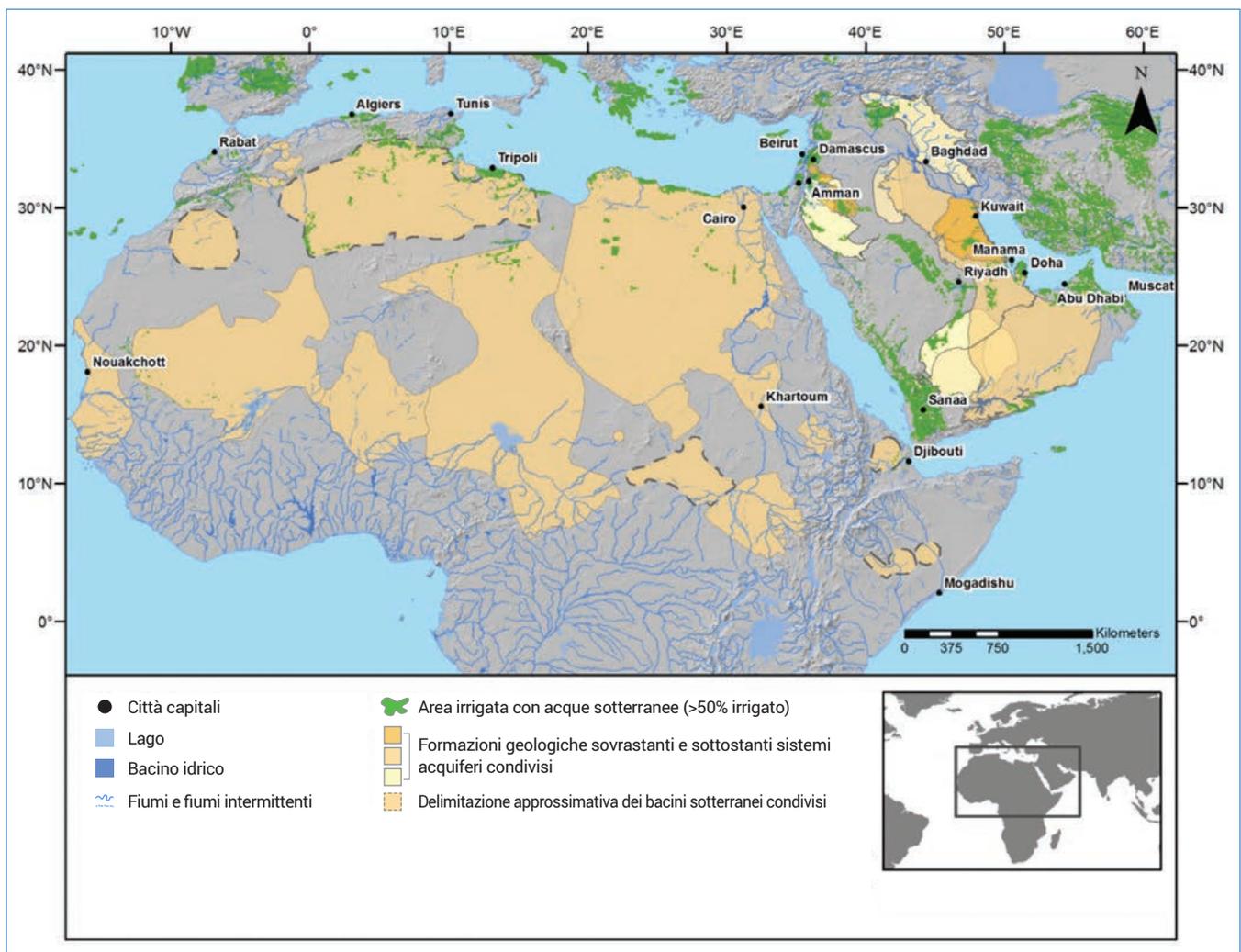
Fonte: sulla base dei dati di Aquastat (s.d.), Al-Zubari e Alajjawi (2020) per il Kuwait e Abd-El-Mooty et al. (2016) per l'Iraq.

Le acque sotterranee nella regione tendono inoltre ad estendersi su vaste aree geografiche e oltre i confini politici. La maggior parte di esse non è rinnovabile e deve essere gestita tenendo conto del fatto che è una risorsa limitata. Tuttavia, il monitoraggio dell'estrazione delle acque sotterranee rimane difficile, nonostante l'emergere di nuove tecnologie. Ciò ne complica la gestione, in particolare in un contesto transfrontaliero. Tutti gli Stati arabi, ad eccezione delle Comore, attingono da una o più risorse idriche sotterranee transfrontaliere,

con 42 sistemi acquiferi transfrontalieri che coprono quasi il 58% dell'area della regione in questione (figura 8.8). L'acquifero di arenaria nubiano ha un'area di 2,17 milioni di chilometri quadrati con uno stoccaggio di 373.000 miliardi di metri cubi di acqua, ed è condiviso da Ciad, Egitto, Libia e Sudan (Bakhbakhi, 2006).

È necessaria una stretta cooperazione per garantire che gli acquiferi transfrontalieri siano gestiti in modo adeguato. Sfortunatamente, nella regione esistono solo pochissimi casi di cooperazione sulle acque sotterranee. La Giordania e l'Arabia Saudita hanno firmato un accordo di cooperazione sull'acquifero Al-Disi/Saq-Ram nel 2015, con l'obiettivo di garantire una gestione corretta e un utilizzo sostenibile delle acque sotterranee, sotto la supervisione di un comitato tecnico congiunto⁹. La cooperazione sull'acquifero nubiano transfrontaliero, condiviso da Ciad, Egitto, Libia e Sudan, è realizzata attraverso un'autorità congiunta incaricata dello studio e dell'utilizzo delle acque sotterranee. La cooperazione e lo scambio di dati nel sistema acquifero del Sahara settentrionale (nell'acronimo inglese NWSAS) condiviso da Algeria, Libia e Tunisia è facilitato da un meccanismo di consultazione ospitato dall'Osservatorio del Sahara e del Sahel (UNESCWA, 2019).

Figura 8.8 Sistemi acquiferi transfrontalieri nella regione araba



Fonte: UNESCWA (2015, mappa 2, pag. 33). © UNESCWA.

⁹ Accordo tra il Governo del Regno hascemita di Giordania e il Governo del Regno dell'Arabia Saudita per la gestione e l'utilizzo delle acque sotterranee nello strato Al-Disi/Saq-Ram, 30 aprile 2015, https://internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Disi_Aquifer_Agreement-English2015.pdf.

● ● ●
**La crescente
consapevolezza
della grande
importanza delle
acque sotterranee
e della dipendenza
da esse ha portato
alcuni paesi arabi
a cercare nuovi
modi per gestire
questa risorsa
vitale**

8.5.2 Sfide relative alle acque sotterranee

La crescita demografica, lo sviluppo socioeconomico e i cambiamenti climatici stanno aumentando lo stress delle acque sotterranee e minacciano la sicurezza idrica nella regione. L'eccessiva estrazione delle acque sotterranee in molte parti della regione ha portato all'abbassamento dei livelli piezometrici, soprattutto nelle aree altamente popolate e agricole. Ciò è particolarmente allarmante in quanto le acque sotterranee sono la principale fonte di acqua per i gruppi vulnerabili che non sono formalmente collegati a fonti idriche pubbliche né hanno accesso ad esse. L'analisi dei dati della missione GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ha confermato una tendenza generale alla diminuzione delle riserve di acque sotterranee nella regione araba. Infatti, le anomalie nelle riserve rispetto alla media (2004-2009) mostrano che l'area caratterizzata da un calo delle riserve era aumentata del 75% nell'ottobre del 2011 e del 100% nell'ottobre del 2018 rispetto all'ottobre del 2002, mentre era aumentata del 65% nell'aprile del 2011 e del 95% nell'aprile del 2019 rispetto all'aprile del 2002 (figura 8.9). Ciò non solo rivela la significativa tendenza decrescente delle riserve di acque sotterranee tra il 2002 e il 2019 (figura 8.9, grafico), ma evidenzia anche l'effetto di variabilità stagionale sullo stoccaggio delle acque sotterranee unito ai prelievi eccessivi nel periodo di siccità. Inoltre, l'esaurimento delle acque sotterranee negli acquiferi e in particolare in quelli con risorse idriche non rinnovabili è stato stimato al 317% del volume rinnovabile negli Stati membri del Consiglio di cooperazione del Golfo (Al-Zubari et al., 2017).

Un'altra importante condizione che minaccia la disponibilità di acque dolci sotterranee di buona qualità è la contaminazione. Le pratiche agricole non sostenibili, così come le industrie e l'urbanizzazione, hanno un impatto significativo sulla qualità delle acque. La salinità delle acque sotterranee è il problema più frequentemente riscontrato nelle città costiere dove l'eccessiva estrazione provoca l'intrusione di acqua di mare. Ad esempio, il sistema acquifero Umm er Radhuma-Dammam presenta acqua salmastra o salina nella sua area costiera che comprende parti di Arabia Saudita, Bahrain, Emirati Arabi Uniti, Kuwait, Qatar, con un valore di solidi disciolti totali (nell'acronimo inglese TDS) superiore a 1 grammo al litro (UNESCWA/BGR, 2013).

I cambiamenti climatici stanno influenzando ulteriormente la disponibilità delle acque sotterranee attraverso una minore ricarica degli acquiferi e una diminuzione della disponibilità di acqua superficiale, portando a un aumento del pompaggio. Attraverso dei modelli idrogeologici basati sulle proiezioni dei modelli climatici, la Commissione economica e sociale delle Nazioni Unite per l'Asia occidentale (UNESCWA) ha rilevato che, secondo diversi scenari climatici, si potrebbe verificare un calo del livello piezometrico dell'acquifero di Ben Tadla in Marocco compreso tra 10 metri e oltre 25 metri tra il 2020 e il 2100, lasciando alcune zone dell'acquifero completamente asciutte (UNESCWA, prossima pubblicazione).

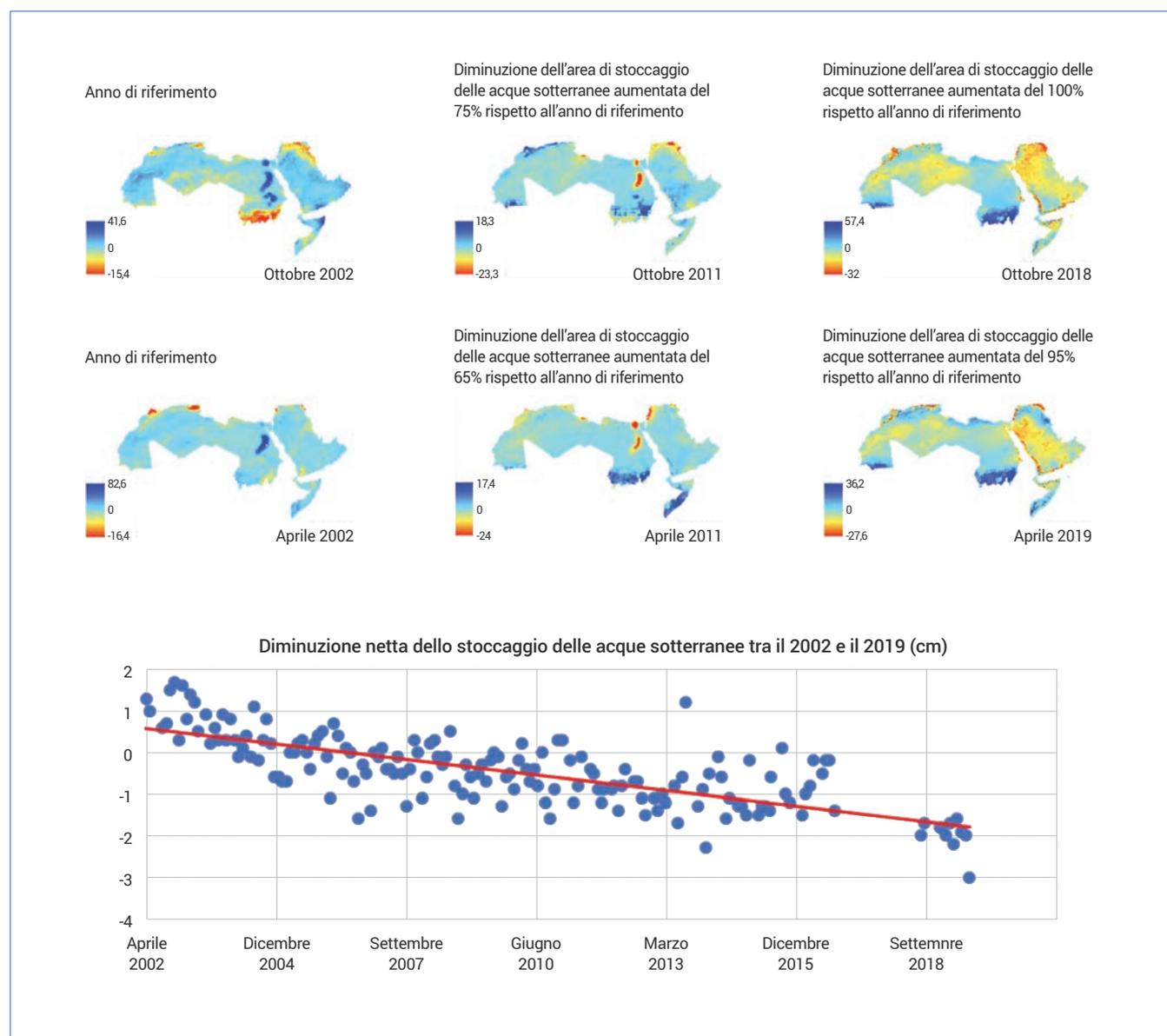
I limiti della governance delle acque sotterranee nella regione araba complicano la risposta a queste criticità. Un rapporto diagnostico regionale sulla governance di questa risorsa ha rilevato politiche e legislazioni inadeguate o carenti, oltre a una volontà politica inadeguata per la loro attuazione. Altre questioni critiche che la governance deve affrontare riguardano finanziamenti limitati, istituzioni e coordinamento non efficaci, sistemi di monitoraggio deboli e mancanza di informazioni, con conseguente scarsa comprensione dei sistemi acquiferi (Al-Zubari, 2014).

8.5.3 Innovazioni

La crescente consapevolezza della grande importanza delle acque sotterranee e della dipendenza da esse ha portato alcuni paesi arabi a cercare nuovi modi per gestire questa risorsa vitale. In Marocco, i "contratti di acquifero" sono stati introdotti come nuova misura di gestione partecipativa delle acque sotterranee al fine di migliorare la sostenibilità dell'uso di questa risorsa in base alle esigenze locali (vedere riquadro 8.6). Anche le conoscenze tradizionali continuano ad essere applicate, come gli *aflaj*, un antico sistema

di tunnel utilizzati per convogliare l'acqua per mezzo della gravità, principalmente da fonti sotterranee, per l'irrigazione. In Oman, oltre 3.000 canali *afraj* funzionanti continuano a fornire acqua per l'agricoltura. Le pratiche comuni e le disposizioni tradizionali supportano anche l'equa distribuzione dell'acqua alle parti interessate tra diverse generazioni (Ministero delle municipalità regionali, dell'ambiente e delle risorse idriche del Sultanato dell'Oman, 2006).

Figura 8.9 Modifica della riserva di acque sotterranee (spessore equivalente all'acqua allo stato liquido) nella regione araba tra il 2002 e il 2019 utilizzando i dati della missione GRACE (in cm)



Fonte: compilato da UNESCWA, basato su McStraw (2020) e su GRACE 2.0 (s.d.).

Molti paesi arabi stanno inoltre ricorrendo sempre più spesso alla MAR (vedere riquadro 7.1 e sezione 11.5) per compensare l'esaurimento delle acque sotterranee e migliorarne la qualità. Ad esempio, in Tunisia, a partire dal 2008 le acque reflue trattate sono state rilasciate in un bacino di infiltrazione tramite la MAR nell'acquifero di Korba. I risultati hanno mostrato un miglioramento in termini di salinità delle acque sotterranee, ma l'ostruzione ha ridotto l'efficacia di questo metodo (Jarraya-Horriche et al., 2020). In Qatar sono in corso di attuazione tre tipologie di MAR. La prima consiste nella ricarica tramite

pozzi posti in zone di depressione dove l'acqua piovana si accumula naturalmente; ciò viene attuato nelle aree extraurbane per la ricarica dei bacini idrogeologici. Il secondo tipo utilizza acqua riciclata, principalmente acque reflue trattate, per ricaricare pozzi profondi nel bacino di Doha. Il terzo tipo raccoglie e tratta le acque piovane urbane e le mescola con acque sotterranee poco profonde per ricaricare pozzi profondi nell'acquifero di Doha al fine di ridurre la salinità (Al-Muraikhi e Shamruk, 2017). Gli Emirati Arabi Uniti hanno iniziato a lavorare sulla MAR nel 2001, con il progetto Nizwa a Sharjah come primo esempio di successo dell'Aquifer Storage and Recovery (ASR) per un acquifero non confinato (Autorità per l'energia elettrica e l'acqua di Sharjah, 2015). Abu Dhabi è diventata quindi la sede della più grande iniziativa ASR del mondo (vedere riquadro 8.7), che prevede l'utilizzo di acqua dissalata per ricaricare un acquifero tra le dune del deserto vicino all'oasi di Liwa. L'acqua qui immagazzinata può essere recuperata in caso di emergenza (Stuyfzand et al., 2017). In Arabia Saudita, Emirati Arabi Uniti e Oman, le dighe di controllo costruite sui letti dei fiumi per deviare il deflusso e ricaricare gli acquiferi rimangono l'approccio MAR più comunemente praticato nella regione.

Altri paesi stanno ancora testando approcci di ricarica artificiale o li stanno mettendo in pratica su scala ridotta. Ad esempio, il Kuwait studia con progetti pilota l'ASR sugli acquiferi

Riquadro 8.6 Contratti di acquifero in Marocco

Il Marocco si trova ad affrontare una crescente insicurezza idrica, che ha contribuito a un uso insostenibile delle acque sotterranee. In risposta, nel 2006 il governo ha adottato una nuova soluzione di gestione che prevede "contratti di acquifero" tra tutti i consumatori di acque sotterranee nella regione di un determinato acquifero. Nell'ambito di questo quadro partecipativo, vengono stipulati accordi tra le parti interessate locali, comprese le organizzazioni governative, le istituzioni pubbliche, le associazioni di utenti nel settore agricolo e gli istituti di ricerca, per identificare i bisogni e garantire vantaggi reciproci al fine di migliorare la gestione e la disponibilità delle acque sotterranee. Ciò si discosta completamente dagli accordi di gestione centralizzata amministrati a livello nazionale.

L'utilizzo di contratti di acquifero è stato sperimentato per la prima volta nel bacino idrografico del fiume Souss Massa-Draa, che comprende tre acquiferi. Il contratto di acquifero di Souss firmato nel 2006 tra il governo e le parti interessate coinvolte stabilisce obiettivi generali di utilizzo dell'acqua definiti congiuntamente, ma con un focus particolare sulle acque sotterranee, e include un elenco delle attività necessarie concordate che devono essere realizzate per raggiungere questi obiettivi. Gli interlocutori locali hanno una responsabilità condivisa per la sostenibilità delle acque sotterranee, che rappresenta un incentivo per l'attuazione e lo sviluppo del contratto di acquifero.

Il contratto di acquifero di Souss ha portato alla firma dell'Accordo quadro per la protezione e l'utilizzo delle risorse idriche nel bacino di Souss-Massa, seguito da sei accordi specifici di partenariato aggiuntivi concordati dalle parti interessate locali. Questi hanno delineato obiettivi e attività specifici ispirati all'accordo quadro (Closas e Villholth, 2016).

Questo approccio contrattuale è il primo nella regione araba e mostra le opportunità offerte dal decentramento e dall'integrazione degli utenti locali nei processi decisionali partecipativi. Tuttavia, per tradurre questo approccio partecipativo in risultati concreti, è necessario fare di più per garantire l'inclusione dei piccoli agricoltori, comprese le donne e i gruppi emarginati, per non parlare dell'armonizzazione delle politiche tra i settori.

del Dammam e del gruppo del Kuwait sin dagli anni '80, utilizzando acqua dissalata e acque reflue trattate (Al-Rukaibi, 2010). In Bahrain, un recente studio ha identificato sei siti ottimali per applicare la MAR attraverso la raccolta dell'acqua piovana (Kadhem e Zubari, 2020). In Libano sono state completate le valutazioni preliminari per 22 siti che utilizzano fonti d'acqua naturali (fiumi e sorgenti) e 10 siti che utilizzano acque reflue trattate, al fine di ricaricare 12 bacini idrogeologici in via di esaurimento o contaminati con acqua di mare. La tecnica di ricarica è stata principalmente l'iniezione attraverso i pozzi, per la sua idoneità agli ambienti carsici e la sua economicità (UNDP/Ministero dell'energia e dell'acqua del Libano, 2014).

L'importanza delle acque sotterranee per la sicurezza idrica della regione araba in un clima che cambia richiede una migliore governance attraverso approcci di gestione innovativi, un utilizzo più efficiente delle tecnologie, finanziamenti dedicati per una conoscenza più approfondita della risorsa e una maggiore cooperazione regionale.

Riquadro 8.7 Applicazione della MAR ad Abu Dhabi

Il progetto Liwa negli Emirati Arabi Uniti è stato lanciato nel 2004 ed è il più grande progetto di MAR del mondo. Viene utilizzata l'Aquifer Storage and Recovery (ASR), che consiste nell'infiltrare l'acqua dissalata in un acquifero sabbioso di dune desertiche e nell'attingere all'acqua in condizioni di emergenza, senza trattamento. Il processo di ricarica è iniziato nel 2015 e l'acquifero ha raggiunto la piena capacità nel 2017.

L'ASR di Liwa non è un sistema standard, poiché l'ASR di solito è costituito solo da pozzi. Questa applicazione è invece composta da tre bacini di ricarica sotterranei, ciascuno circondato da 105 pozzi di recupero. L'obiettivo è infiltrare 26.500 metri cubi al giorno di acqua dissalata per 824 giorni con una concentrazione di solidi totali disciolti (TDS) inferiore a 250 ppm (parti per milione), e poter recuperare l'acqua ad una velocità di 170.280 metri cubi al giorno per 90 giorni con un TDS di circa 400 ppm in caso di emergenza. L'efficienza di recupero testata varia tra il 60% e l'85% e ha dimostrato la capacità della MAR di ridurre i rischi di catastrofi e supportare la risposta alle emergenze.

Fonte: Stuyfzand et al. (2017).

Capitolo 9

Creazione e aggiornamento della base di conoscenze

UNESCO-PHI

Bruce Misstear* e Alice Aureli

IGRAC

Arnaud Sterckx, Claudia Ruz Vargas, Konstantin Scheihing e Neno Kukurić

Con il contributo di Viviana Re (IAH), Cristina Copeland (CDP), Aldo Fiori e Christophe Cudennec (IAHS), e Kerstin Danert (Ask for Water GmbH per conto della Rural Water Supply Network)

* Affiliato al Trinity College di Dublino



9.1 Introduzione



Una solida base di conoscenze sulle acque sotterranee è essenziale per un processo decisionale efficiente e sostenibile

Una solida base di conoscenze sulle acque sotterranee è essenziale per un processo decisionale efficiente e sostenibile. Da quando è emersa come scienza nel XIX secolo, l'idrogeologia si è basata su una serie di metodi e strumenti volti a valutare le acque sotterranee a diverse scale e in vari contesti ambientali e sociali.

I dati sulle acque sotterranee ottenuti attraverso un monitoraggio regolare consentono l'identificazione di tendenze e modelli nei sistemi acquiferi, i quali sono indispensabili per simulare i processi in corso, o per prevedere possibili condizioni future attraverso l'analisi di scenari. I risultati dei calcoli del modello dovrebbero sempre essere accompagnati da analisi dell'incertezza. I dati raccolti e le informazioni generate devono essere condivisi con tutti coloro che dipendono dalle acque sotterranee o sono coinvolti nella loro gestione. Inoltre, la costruzione della base di conoscenze e la loro applicazione sul campo o nelle decisioni di gestione richiedono un'adeguata formazione degli specialisti e delle specialiste in materia di acque sotterranee.

Benché le valutazioni delle acque sotterranee richiedano dati sufficienti e affidabili, la loro acquisizione può spesso essere difficile. Tuttavia, progressi significativi nel campo dell'idrogeologia hanno consentito un'ampia comprensione delle proprietà degli acquiferi e dei principi fisici e chimici che regolano il flusso delle acque sotterranee e il trasporto dei contaminanti. Parallelamente, sono stati sviluppati vari metodi e strumenti per l'acquisizione e l'analisi dei dati (ad esempio i test sugli acquiferi, la geofisica, i rilievi idrologici e idrochimici, la modellistica numerica). Sebbene vi siano ancora questioni scientifiche che richiedono ulteriore attenzione, la ricerca nel settore dell'idrogeologia sta avanzando rapidamente e, attraverso l'adozione di un approccio interdisciplinare sta colmando le lacune grazie ad altre discipline come le scienze ambientali, la sociologia, le scienze in ambito sanitario, l'economia, il diritto e la scienza politica. Inoltre, viene prestata una crescente attenzione al rafforzamento della cooperazione tra le varie parti interessate attraverso approcci transdisciplinari come la socio-idrogeologia (Re, 2015; Hynds et al., 2018). Le conoscenze scientifiche in idrogeologia e i metodi e gli strumenti disponibili sono sufficienti per affrontare la maggior parte dei problemi di gestione delle acque sotterranee, come l'ubicazione dei pozzi, l'ottimizzazione dell'estrazione e la previsione dei suoi effetti su scala locale e regionale, la prevenzione della contaminazione, ecc. La sfida principale riguarda la scarsità di dati affidabili per le valutazioni relative alle acque sotterranee specifiche per area e per le analisi di scenario, soprattutto nei paesi a basso reddito, insieme alla diffusione limitata dei dati, delle informazioni e delle conoscenze tra chi opera nella ricerca, i professionisti e le professioniste del settore e chi prende le decisioni.

9.2 Lo studio delle acque sotterranee: caratterizzazione e valutazione

Poiché ogni acquifero così come il contesto in cui si trova è unico, è sempre necessaria una valutazione delle acque sotterranee a livello territoriale al fine di consentire una formulazione di politiche e una gestione di questa risorsa basate su dati concreti. Gli studi che hanno come oggetto d'indagine i sistemi fisici in cui vengono considerate solo le caratteristiche dell'acquifero (inclusi input e output), sono qui classificati nella categoria "caratterizzazione idrogeologica". Gli studi che includono altri aspetti, siano essi ambientali (ad esempio ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee), socioeconomici (ad esempio questioni di genere e costi dell'approvvigionamento idrico), legali (ad esempio regolamenti) e/o istituzionali (ad esempio capacità e autorizzazione), sono descritti qui come "valutazioni del sistema acquifero". Le valutazioni dei sistemi acquiferi su scala regionale, continentale e globale si basano principalmente sull'aggregazione e sul potenziamento delle valutazioni locali.

9.2.1 Caratterizzazione idrogeologica

La caratterizzazione idrogeologica comprende la stima dei parametri e delle variabili dell'acquifero, inclusa la sua estensione (ad esempio profondità e spessore) e le sue proprietà idrogeologiche (conducibilità idraulica, storatività, ecc.). Le variabili riguardano gli input (ricarica), gli output (deflusso) e lo stato dell'acquifero. La ricarica proviene principalmente

dalle precipitazioni (e anche dagli afflussi di acque superficiali), mentre il deflusso avviene tramite sorgenti e il flusso di base delle acque superficiali, evapotraspirazione (come avviene negli acquiferi poco profondi) e attraverso pozzi di estrazione. Le principali variabili che rappresentano lo stato dell'acquifero sono i livelli delle acque sotterranee e le variabili relative alla loro qualità come la temperatura dell'acqua, il pH e la conduttività elettrica (una misura indiretta della salinità). La tabella 9.1 fornisce un elenco dei parametri frequentemente inclusi nel monitoraggio della qualità delle acque sotterranee.

Tabella 9.1
Parametri
frequentemente inclusi
nel monitoraggio della
qualità delle acque
sotterranee

Parametri per trattamento di base	
EC	Conduttività elettrica
pH	Acidità
T	Temperatura
NO ₃	Nitrato
Cl	Cloruro
Parametri supplementari a frequenza più bassa	
Ca, Mg, Na, K	Cationi principali
Cl, HCO ₃ , SO ₄	Anioni principali
MDT	Totale dei solidi disciolti
Monitoraggio microbiologico di fonti di acqua potabile	
FC	Coliforme fecale
FS	Streptococco fecale
E. Coli	Escherichia coli
Parametri supplementari (richiesti in contesti idrologici specifici)	
F	Fluoruro
Fe	Sali di ferro solubili
As	Sali di arsenico solubili
Mn	Sali di manganese solubili
U	Sali di uranio solubili
P	Ortofosfato
NH ₄	Ammonio
Parametri aggiuntivi (se si identificano processi agricoli e industriali specifici)	
Pesticidi specifici	Metalli pesanti
Composti organici volatili selezionati	Determinati agenti inquinanti emergenti
Idrocarburi selezionati	

Fonte: adattato da IAH (2017, pag. 6).

Poiché il sottosuolo è solitamente costituito da diverse unità geologiche con diverse proprietà idrauliche, le acque sotterranee possono avere una varietà di proprietà fisiche e chimiche in luoghi differenti e a profondità differenti. Poiché la ricarica e il deflusso delle acque sotterranee sono processi complessi che variano nello spazio e nel tempo, stime numeriche affidabili possono essere effettuate solo sulla base di dettagliate osservazioni sul campo.

Tuttavia, le osservazioni dirette delle acque sotterranee e del sottosuolo sono limitate principalmente ai pozzi e alle sorgenti, dove possono essere misurati solo pochi dati, come la resa del pozzo, il deflusso delle sorgenti, il livello e la qualità delle acque sotterranee.



Spesso è difficile riconoscere il ruolo delle acque sotterranee e integrarlo adeguatamente nei processi decisionali, proprio a causa della diversità e della complessità dei processi in cui sono coinvolte

Altri dati sono stimati tramite metodi indiretti, inclusi i test di pompaggio, la geofisica, il tracciamento del colorante, i metodi di stima della ricarica e la modellazione numerica. Queste stime presentano un certo grado di incertezza e metodi di valutazione diversi possono portare a risultati differenti. Ciò vale anche per l'analisi di una variabile importante come la ricarica delle acque sotterranee (Scanlon et al., 2002; Healy, 2010; Walker et al., 2019). Le stime di parametri idraulici come la conduttività idraulica o la capacità di immagazzinamento possono differire di un ordine di grandezza a seconda dei test di pompaggio e dei metodi di interpretazione utilizzati. Inoltre, alcune variabili e parametri sono raramente quantificati sul campo attraverso metodi diretti o indiretti: vengono invece estrapolati sulla base di valori comuni disponibili nella letteratura pubblicata. La dispersibilità, ad esempio, un parametro che controlla i processi di trasporto del soluto, è solitamente dedotta dalla litologia e dalla scala del processo di trasporto del soluto (Schulze-Makuch, 2005).

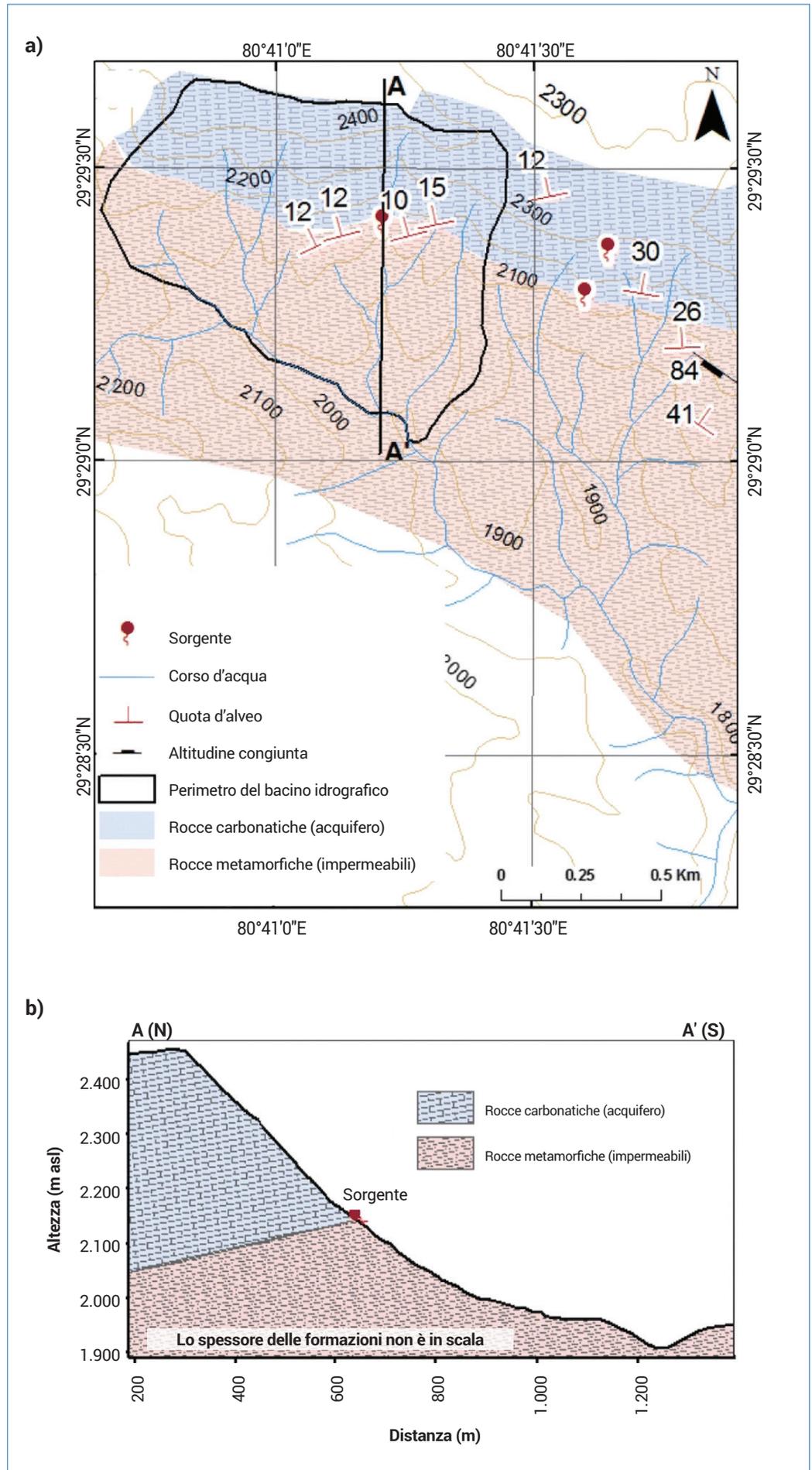
Poiché i dati puntuali misurati o stimati sul campo hanno una rappresentatività spaziale limitata, devono essere interpolati con attenzione, utilizzando informazioni continue e/o supplementari (ad esempio telerilevamento e geofisica) ove possibile. La qualità dell'indagine sul campo è fondamentale per una valutazione e spesso si raccomandano ulteriori lavori e verifiche sul campo. Le mappe idrogeologiche e le relative sessioni incrociate (figura 9.1) sono una parte necessaria di qualsiasi caratterizzazione degli acquiferi.

Oltre ai dati idrogeologici, la caratterizzazione richiede altri dati relativi al ciclo idrologico (ad esempio dati meteorologici, dati sulle acque superficiali e copertura del suolo). È inoltre fondamentale raccogliere dati sui prelievi di acque sotterranee. Nelle giurisdizioni in cui è richiesta la registrazione di nuovi pozzi, tali regolamenti possono consentire alle autorità pubbliche di controllare i prelievi di acque sotterranee. La maggior parte dei moduli di registrazione dei pozzi indicano dove viene pompata l'acqua, da chi, per quale scopo e in quale quantità. A volte, come nel caso dei pozzi dotati di pompe ad alto rendimento, i proprietari sono chiamati a pagare un canone o richiedere una licenza, che è un ulteriore modo per controllare i prelievi, e al contempo costituisce una fonte di reddito per gli enti preposti alla gestione di queste risorse. La registrazione di nuovi pozzi offre un'altra opportunità per raccogliere dati significativi sulle acque sotterranee da parte di chi li possiede o di chi effettua le perforazioni, inclusi registri stratigrafici, informazioni sulla qualità delle acque e sui loro livelli dopo il completamento del pozzo, nonché dati dei test condotti. Far rispettare la registrazione e la licenza dei pozzi può essere difficile e l'individuazione di quelli illegali è spesso difficoltosa e richiede tempo. Di conseguenza ve ne sono molti, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, dove i dati spesso non vengono raccolti e il prelievo può essere incontrollato.

9.2.2 Valutazione del sistema acquifero

Come evidenziato nei capitoli precedenti, le acque sotterranee svolgono un ruolo importante in una varietà di aspetti e processi ambientali e sociali, dalle zone umide alla produzione alimentare, dalla salute e dai servizi igienico-sanitari alla lotta ai cambiamenti climatici. Spesso però è difficile riconoscere il ruolo delle acque sotterranee e integrarlo adeguatamente nei processi decisionali, proprio a causa della diversità e della complessità dei processi in cui sono coinvolte. Pertanto, i sistemi acquiferi devono essere valutati nel contesto di questioni sociali e/o ambientali rilevanti, in modo interdisciplinare, integrando la caratterizzazione idrogeologica con analisi ambientali, socioeconomiche e politico-istituzionali. Oltre ai servizi di approvvigionamento (ad esempio la fornitura di acqua alle famiglie, all'agricoltura e all'industria), le acque sotterranee forniscono anche servizi di regolazione (ad esempio la capacità di tamponamento), socioculturali (ad esempio i bagni termali) e di supporto (ad esempio la prevenzione della subsidenza del suolo; vedere figura 1.3). Tutti questi aspetti devono essere presi in considerazione nella valutazione dei sistemi acquiferi.

Figura 9.1
Un esempio di carta
idrogeologica e di sezione
trasversale



I dati necessari per una valutazione interdisciplinare sono molto diversificati e provengono da un gran numero di fonti. Alcuni dati sociologici rilevanti per le valutazioni interdisciplinari (come le prospettive di genere in relazione all'approvvigionamento idrico) possono essere raccolti sul campo da chi possiede i pozzi e dagli utenti, insieme ai dati idrogeologici. Il coinvolgimento delle comunità locali durante le valutazioni promuove la successiva adozione di misure di gestione delle acque sotterranee adatte alle loro esigenze, che si rivelano essere fondamentali per la sostenibilità di tali misure. Questo approccio è promosso dalla rete socio-idrogeologica dell'Associazione internazionale degli idrogeologi (IAH; vedere anche Re, 2015).

9.3 Monitoraggio delle acque sotterranee

9.3.1 Monitoraggio *in situ*

Le acque sotterranee devono essere monitorate nel tempo in termini di quantità e qualità, per conoscere il comportamento e lo stato degli acquiferi e per identificare possibili cambiamenti negativi come l'eccessiva estrazione di acqua, la riduzione della ricarica (compresi gli effetti dei cambiamenti climatici) e l'inquinamento. I livelli delle acque sotterranee, come indicatori dello stato quantitativo del sistema acquifero, sono monitorati attraverso i pozzi (figura 9.2), manualmente o con registratori automatici (*data logger*). Inoltre, i registratori possono essere dotati di sensori che consentono la trasmissione telemetrica di dati a un database. La ricarica delle acque sotterranee è solitamente oggetto di stime, mentre diverse componenti del deflusso (estrazione tramite pozzi, deflussi sorgivi, deflussi fluviali) possono in linea di principio essere monitorati, utilizzando metodi e dispositivi diversi.

Il monitoraggio della qualità delle acque sotterranee prevede il campionamento in pozzi e sorgenti. Poiché la chimica di un campione di acque sotterranee può cambiare rapidamente una volta che queste raggiungono la superficie, alcuni parametri instabili (come il pH e la temperatura dell'acqua) devono essere misurati *in loco* (presso la testa pozzo o la sorgente), mentre le analisi complete vengono normalmente eseguite sui campioni portati in laboratorio. Laddove non vi siano laboratori nelle vicinanze, è possibile utilizzare kit da campo.

I programmi di monitoraggio delle acque sotterranee devono essere pianificati secondo obiettivi ben definiti, che determinano quali parametri devono essere monitorati (tabella 9.1), come, dove e con quale frequenza. Gli obiettivi dei programmi di monitoraggio nazionali sono generalmente quelli di raccogliere dati sullo stato e sulle tendenze a lungo termine delle acque sotterranee e di fornire input per la pianificazione della politica idrica (IGRAC, 2020). Un programma di monitoraggio della qualità delle acque sotterranee cerca di valutare i cambiamenti naturali o antropogenici nella chimica e nella microbiologia dell'acqua. Altri obiettivi potrebbero essere l'indagine su problemi specifici di inquinamento o di un'area di studio mirata. Il monitoraggio dettagliato su scala locale dei flussi sorgivi e dei livelli delle acque sotterranee è particolarmente importante per gli ecosistemi che dipendono da esse.

In molti paesi, il monitoraggio delle acque sotterranee è responsabilità di istituzioni pubbliche come i ministeri dell'acqua e le agenzie per la protezione ambientale (IGRAC, 2020), tuttavia anche altre organizzazioni, come le società di distribuzione dell'acqua e gli istituti di ricerca, potrebbero avere i propri programmi di monitoraggio. Ciononostante, numerosi paesi a basso reddito hanno reti di monitoraggio molto limitate o inattive (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019a; IGRAC, 2020), principalmente a causa dei costi di sviluppo, gestione e manutenzione di tali reti.

Il monitoraggio è impegnativo a causa della natura nascosta e tridimensionale del flusso delle acque sotterranee, del tempo di percorrenza impiegato (solitamente lungo) e della complessità del trasporto dei contaminanti. Possono essere necessari pozzi di osservazione separati (figura 9.3) o gruppi di piezometri posizionati all'interno di un pozzo a profondità diverse poiché i livelli dell'acqua e i gradienti idraulici possono variare sia tra gli acquiferi che al loro interno (Misstear et al., 2017). Anche l'ubicazione dei pozzi di monitoraggio gioca un ruolo importante. I campioni delle acque sotterranee



I programmi di monitoraggio delle acque sotterranee devono essere pianificati secondo obiettivi ben definiti, che determinano quali parametri devono essere monitorati, come, dove e con quale frequenza

devono essere prelevati in luoghi e profondità specifici a causa dell'idrogeologia (spesso complessa; inoltre, le vicine fonti di inquinamento o le modalità costruttive adottate per il monitoraggio dei pozzi possono influenzare fortemente i risultati ottenuti. In aggiunta, la frequenza di osservazione deve essere ben definita in base agli obiettivi di monitoraggio e alle caratteristiche delle serie temporali ipotizzate della variabile monitorata. I livelli delle acque sotterranee dovrebbero essere registrati a intervalli sufficientemente frequenti per identificare le variazioni stagionali e le tendenze a lungo termine derivanti dal cambiamento dei modelli di estrazione o dalle variazioni climatiche. La frequenza di campionamento dipenderà anche dal sistema di flusso delle acque sotterranee, così come l'uso del suolo influisce direttamente sulla loro qualità. Gli acquiferi altamente vulnerabili che forniscono servizi alle persone e all'ambiente devono essere monitorati più frequentemente. Per tutti questi motivi, i programmi di monitoraggio delle acque sotterranee dovrebbero essere definiti con attenzione e basarsi su solide conoscenze idrogeologiche, che includano un modello concettuale sufficientemente dettagliato dell'acquifero in esame.

Sebbene spesso relativamente costoso, il monitoraggio è un investimento saggio: identificare i problemi in una fase iniziale può essere altamente conveniente (Kim e Kim, 2019), poiché consente l'introduzione di misure di mitigazione prima che si verifichi un grave deterioramento della risorsa.

I programmi di monitoraggio convenzionali possono essere integrati da iniziative di *citizen science*, in cui i volontari e le volontarie effettuano misurazioni e forniscono campioni aggiuntivi. Il campionamento manuale può essere supportato con le nuove tecnologie, come le applicazioni di raccolta dei dati per smartphone, che rendono obsoleti i moduli cartacei e quindi riducono gli errori nella gestione dei dati. La *citizen science* va oltre la semplice misurazione: il coinvolgimento del pubblico (ad esempio tramite interviste semi-strutturate)

Figura 9.2

Moderno piezometro con registratore di dati e una scheda esplicativa per il pubblico (Parco nazionale De Alde Feanen, provincia della Frisia, Paesi Bassi)



Foto: Claudia Ruz Vargas.



Le tecniche di telerilevamento sono state utilizzate anche dalla comunità scientifica per migliorare il monitoraggio e la stima delle acque sotterranee

e il rafforzamento delle capacità per misurazioni *in situ* possono aiutare a garantire l'integrazione del know-how locale nelle valutazioni idrogeologiche (Re, 2015). In tal modo è possibile evitare una comunicazione unidirezionale dalla comunità scientifica verso la società civile. Sebbene finora applicata principalmente alle acque superficiali, la *citizen science* sta gradualmente trovando la sua strada anche nelle applicazioni relative alle acque sotterranee: ne sono un esempio i progetti in Libano (Baalbaki et al., 2019) e India (Maheshwari et al., 2014).

9.3.2 Telerilevamento

Il telerilevamento (osservazioni aeree e satellitari) è ampiamente utilizzato per studiare e prevedere i processi idrologici. Poiché i cambiamenti nei corpi idrici superficiali possono essere rilevati direttamente da osservazioni da remoto, il telerilevamento ha trovato un'ampia applicazione nella scienza idrologica e nella gestione di fiumi e laghi. Le tecniche di telerilevamento sono state utilizzate anche dalla comunità scientifica per migliorare il monitoraggio e la stima delle acque sotterranee (Güntner et al., 2007; Scanlon et al., 2002, 2012b; e Shamsudduha et al., 2017); in particolare, i risultati della missione GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ne hanno mostrato le potenzialità come ulteriore fonte di informazione sui cambiamenti nelle riserve di acque sotterranee, utilizzandole insieme ai modelli al fine di generare vari output, come gli indicatori di siccità (figura 9.4).

L'obiettivo scientifico principale della missione GRACE è misurare le variazioni nel campo gravitazionale terrestre. Queste misurazioni possono essere utilizzate per dedurre la variazione dello stoccaggio totale di acqua (ΔTWS) sulla Terra (Rodell et al., 2018). Sottraendo da ΔTWS la variazione di volume dell'acqua immagazzinata nelle altre componenti terrestri del ciclo idrogeologico (ovvero umidità del suolo, fiumi, laghi e bacini idrici, ghiaccio e ghiacciai) per lo stesso periodo di tempo, è possibile stimare la variazione dello stoccaggio delle acque sotterranee (ΔGWS).

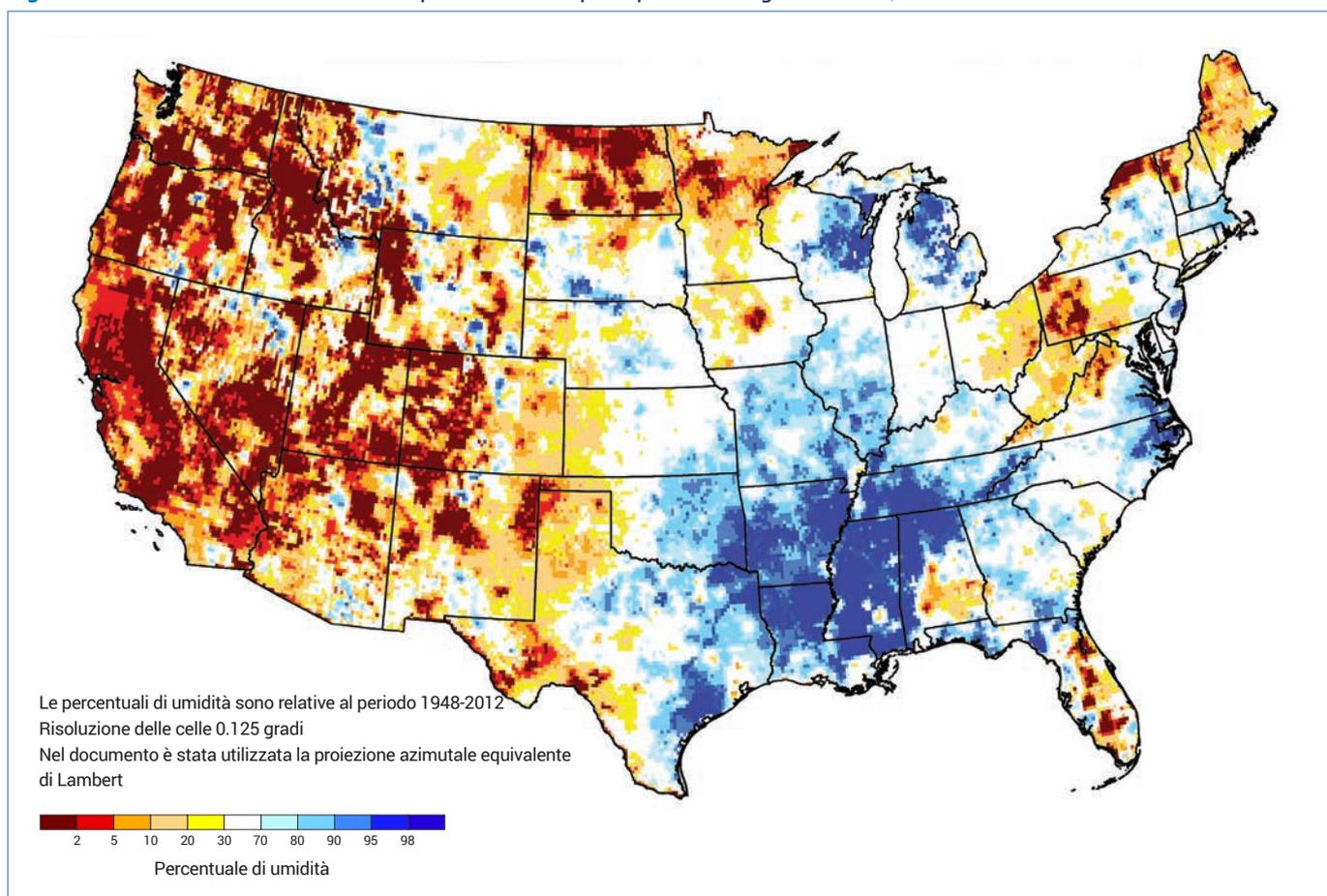
Figura 9.3

Gruppo di pozzi per il monitoraggio del livello dell'acqua a diverse profondità (copertura, strato roccioso poco profondo e profondo) in un sito nell'Irlanda orientale



Foto: Bruce Misstear.

Figura 9.4 Indicatore di siccità nelle acque sotterranee poco profonde degli Stati Uniti, basato sui risultati della missione GRACE



Fonte: NASA/NDMC (2021).

Il limite principale dell'applicazione dei risultati della missione GRACE è la risoluzione grossolana dei dati derivati dai satelliti. Inoltre, poiché ΔGWS è calcolato indirettamente, può includere errori accumulati dalle altre componenti considerate, alcune delle quali sono stimate mediante modellizzazione. Nonostante queste limitazioni, l'approccio è stato utilizzato in combinazione con altre fonti di dati al fine di migliorare l'accuratezza delle stime della variazione di stoccaggio delle acque sotterranee. Il progetto G3P (Global Gravity-based Groundwater Product) in corso fornirà un set di dati su scala mondiale, coerenti e liberamente accessibili, sulla variazione di stoccaggio delle acque sotterranee.

Sebbene i satelliti non forniscano indicazioni dirette sulla qualità delle acque sotterranee, sono in grado di fornire informazioni sull'uso del suolo e sulla geologia, che possono essere correlate alla qualità delle acque sotterranee e alla loro vulnerabilità all'inquinamento. Inoltre, i risultati del telerilevamento possono essere utilizzati come variabili aggiuntive per supportare la modellazione predittiva. Ad esempio, le previsioni relative a determinati contaminanti possono essere ricavate da informazioni sulle attività antropiche, come nel caso di problemi di salinità del suolo derivanti dall'irrigazione intensiva (WWQA, 2021; UNEP, 2020). Inoltre, le informazioni sulla subsidenza del suolo raccolte tramite il telerilevamento (ad esempio utilizzando un radar interferometrico ad apertura sintetica – InSAR) possono essere collegate alla variazione del livello delle acque sotterranee e alla loro estrazione.

9.4 Analisi di scenario e incertezza delle previsioni



I dati storici sulle variabili del sistema acquifero (ad esempio livelli delle acque sotterranee o salinità), acquisiti attraverso il monitoraggio, vengono utilizzati per identificare tendenze e modelli nel comportamento degli acquiferi

I dati storici sulle variabili del sistema acquifero (ad esempio livelli delle acque sotterranee o salinità), acquisiti attraverso il monitoraggio, vengono utilizzati per identificare tendenze e modelli nel comportamento degli acquiferi. Queste informazioni sono indispensabili quando si tenta di prevedere il cambiamento futuro della quantità e della qualità delle acque sotterranee. Tale previsione viene spesso effettuata attraverso un'analisi di scenario che utilizza modelli numerici, mediante i quali vengono analizzati i risultati di possibili input o interventi sul sistema acquifero.

Sia i modelli numerici deterministici che quelli stocastici (probabilistici) vengono utilizzati per un'analisi di scenario. Un modello deterministico si basa su un modello concettuale idrogeologico: è una semplificazione di un ambiente sotterraneo solitamente complesso e simula il flusso e il trasporto attraverso quell'ambiente. Un modello stocastico guarda principalmente alle variabili (input, stato e output), sviluppando vari algoritmi (attraverso il *machine learning*) per simulare i processi che le connettono. I modelli stocastici sono ampiamente utilizzati nell'idrologia delle acque superficiali grazie alla disponibilità dei dati e ai rapidi tempi di risposta del sistema. Questi vantaggi, insieme alla complessità degli ambienti idrogeologici, sono le due ragioni principali per l'utilizzo di modelli stocastici nella modellazione dei sistemi acquiferi carsici.

I modelli numerici deterministici, basati sulle proprietà fisiche e chimiche dell'ambiente, sono strumenti potenti per simulare e prevedere lo stato di un acquifero in vari scenari. Tuttavia, va sottolineato che i modelli sono una semplificazione del mondo reale, e che presentano un certo livello di incertezza, che dipende da diversi fattori, tra cui il numero e la complessità dei processi fisici e chimici simulati, l'eterogeneità del sottosuolo, la qualità e la quantità dei dati di input e la calibrazione del modello. Questa incertezza può essere significativa e dovrebbe quindi essere sempre valutata e comunicata prima di utilizzare qualsiasi output del modello. Con i progressi nelle capacità di calcolo e negli algoritmi, è possibile (e altamente raccomandato) eseguire analisi dell'incertezza, che permettono di stimare il livello di affidabilità delle previsioni del modello.

Indipendentemente dai modelli utilizzati, un'analisi di scenario richiede una buona comprensione dei fattori antropici e ambientali che incidono sui sistemi acquiferi e dei modi in cui possono evolversi. I modelli delle acque sotterranee al giorno d'oggi sono utilizzati anche come componenti in quadri di modellizzazione idroeconomica molto più complessi, in cui le analisi di scenario comprendono i risultati di vari modelli, affrontando una varietà di argomenti e problemi.

9.5 Condivisione della base di conoscenze e potenziamento delle competenze

I vantaggi dei dati e delle informazioni si moltiplicano se sono condivisi tra le comunità e le organizzazioni coinvolte, o potenzialmente coinvolte, nell'uso, nella protezione, nella valorizzazione e nella gestione delle acque sotterranee, o nel loro finanziamento. La conoscenza dello stato delle acque sotterranee è il primo requisito per una gestione efficiente e sostenibile di questa risorsa. Esiste un elevato numero di comunità e organizzazioni caratterizzate da un forte interesse per le acque sotterranee e da esigenze informative diverse, a vari livelli: dagli acquiferi locali ai sistemi acquiferi, e dai bacini idrografici ad altre unità geografiche come paesi, sottoregioni o continenti. Pertanto, è necessaria l'aggregazione di informazioni e conoscenze sulle acque sotterranee su scala regionale, nazionale e globale al fine di comprendere il ruolo e l'impatto di queste risorse nel contesto delle sfide sociali e ambientali interconnesse. Gli impatti dei cambiamenti climatici (ad esempio siccità e innalzamento del livello del mare), della produzione e del commercio di prodotti alimentari, dei conflitti e delle migrazioni sono solo alcuni esempi di processi e problemi che richiedono una politica coerente delle acque sotterranee a più livelli. Di conseguenza, le informazioni su questa risorsa devono essere adeguatamente adattate a un pubblico specifico. Come illustrato nella figura 9.5, questo può avvenire attraverso rapporti scientifici, sistemi informativi, post sui social media, opuscoli e presentazioni di conferenze, tra gli altri (Re e Missstear, 2018).



Le società private dovrebbero divulgare dati e informazioni rilevanti sui parametri relativi alle acque sotterranee che ne migliorerebbero la valutazione e la gestione

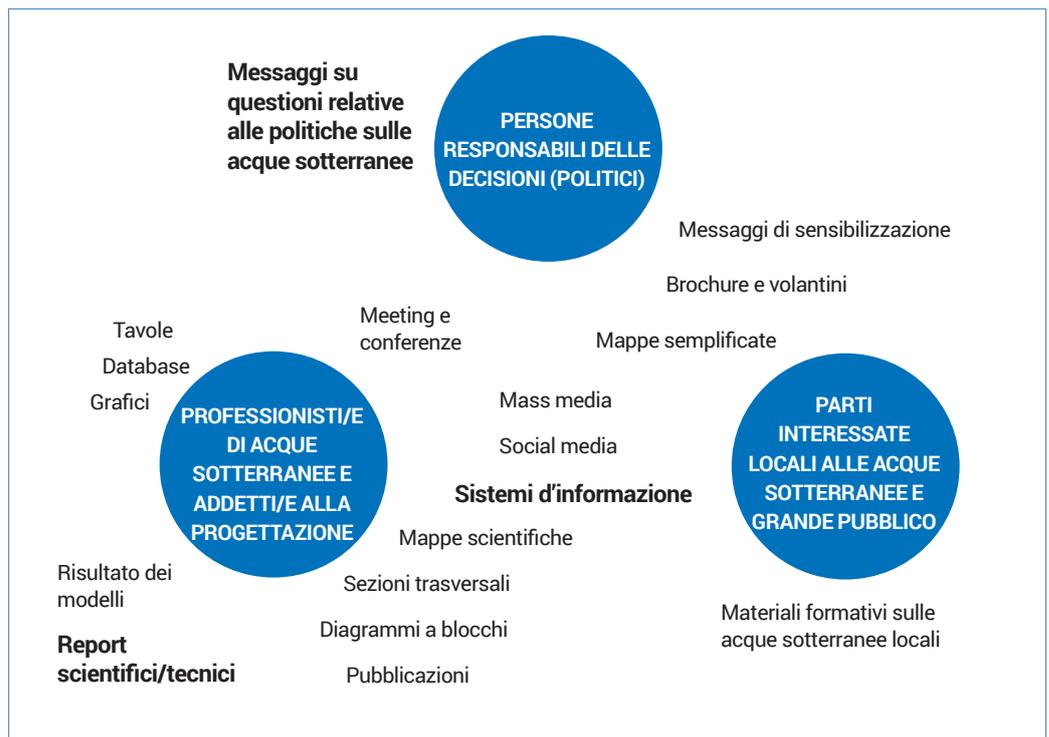
Sebbene la condivisione delle informazioni sia stata promossa da tempo (ad esempio attraverso il principio 10 della Dichiarazione di Rio, 1992), è stata riconosciuta anche l'importanza della condivisione dei dati e degli *open data* (ad esempio attraverso la Direttiva INSPIRE dell'Unione europea, 2007). Tuttavia, la condivisione di dati e informazioni è spesso carente, soprattutto nei paesi a basso reddito. I dati potrebbero essere di difficile accesso e non liberamente disponibili (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019a). Ciò è dovuto a problemi tecnici (lacune nella raccolta dei dati, database obsoleti e competenze tecnologiche limitate), ma in alcuni casi anche a una certa riluttanza a condividere dati "sensibili" o a renderli disponibili gratuitamente. I dati sulle acque sotterranee raccolti con fondi pubblici dovrebbero essere liberamente accessibili.

Inoltre, le società private dovrebbero divulgare dati e informazioni rilevanti sui parametri relativi alle acque sotterranee che ne migliorerebbero la valutazione e la gestione. Ad esempio, i dati geofisici e di trivellazione acquisiti durante l'esplorazione di petrolio e gas potrebbero migliorare la conoscenza dell'estensione e delle caratteristiche degli acquiferi. Si consideri anche che le società minerarie stanno rivelando sempre più il loro consumo di acqua (Northey et al., 2019). I grandi produttori internazionali di bevande e acqua in bottiglia rischiano una pubblicità negativa se sono associati all'esaurimento e/o all'inquinamento delle acque sotterranee in situazioni in cui non esiste chiarezza sullo stato dell'acquifero e sulle relative pressioni, impatti e tendenze. Ciò dovrebbe motivare le aziende a valutare i propri rischi, a utilizzare le acque sotterranee in modo sostenibile e basato su prove e, infine, a condividere i propri dati relativi all'acqua.

Inoltre, se vogliono crescere in modo sostenibile, le aziende devono andare oltre le attività *in loco* e contribuire a migliorare la governance dell'acqua in tutto l'acquifero. Questo è riconosciuto da alcune aziende leader ed è indicato come *stewardship* dell'acqua. Secondo l'indagine del CDP, il 64% delle società che hanno riferito i propri dati ha ridotto i prelievi idrici o li ha mantenuti immutati tra il 2019 e il 2020. Tuttavia, la partecipazione delle società è ancora bassa e il monitoraggio degli scarichi delle acque reflue è tutt'altro che sufficiente. Un numero crescente di aziende sta includendo questioni relative all'acqua nei propri obiettivi, nelle strategie e nella pianificazione finanziaria a lungo termine.

Figura 9.5

Forme selezionate di presentazione dei dati e delle informazioni sulle acque sotterranee, in relazione alle utenze previste



Fonte: Van der Gun (2018, fig. 10.4, pag. 207).

● ● ●
In molti paesi a basso e medio reddito mancano le competenze in materia di idrogeologia, anche quando le acque sotterranee costituiscono la maggior parte delle risorse idriche gestite

Nonostante ciò, gli esempi di investimenti di capitale già effettuati per ridurre l'uso di acqua potabile e i rischi di inquinamento sono molto meno numerosi. Il monitoraggio e la divulgazione regolare dell'uso delle acque sotterranee, le valutazioni approfondite del rischio ambientale e la *stewardship* attiva dell'acqua sono i parametri principali per distinguere tra *greenwashing* e gestione responsabile ed etica di un'azienda (IGRAC, 2016). Il CEO Water Mandate è stato istituito per affrontare le sfide relative alle risorse idriche a livello mondiale attraverso la gestione aziendale dell'acqua, in collaborazione con le Nazioni Unite, i governi, le organizzazioni della società civile e altre parti interessate¹.

Le campagne di sensibilizzazione sugli *open data* sono in crescita e si sta sviluppando un'infrastruttura online per supportare la condivisione di dati e informazioni sulle acque sotterranee. Inoltre, il numero di portali nazionali e internazionali con accesso a dati e informazioni su questa risorsa è in costante crescita. Alcuni esempi a livello internazionale sono: il portale di informazioni sulle acque sotterranee della Comunità di sviluppo dell'Africa meridionale (nell'acronimo inglese SADC), l'Atlante delle acque sotterranee dell'Africa e l'archivio della letteratura (sviluppato dal British Geological Survey – Servizio geologico britannico) e il Sistema informativo globale delle acque sotterranee (nell'acronimo inglese GGIS) sviluppato dall'International Groundwater Resources Assessment Center (IGRAC, figura 9.6).

La diffusione dei dati scientifici sulle acque sotterranee avviene sempre più spesso attraverso pubblicazioni ad accesso aperto, inclusi articoli su riviste, libri di testo e manuali. Un'iniziativa degna di nota è il cosiddetto "Groundwater Project"², che promuove il libero accesso ai dati disponibili sulle acque sotterranee, attraverso libri online e altro materiale didattico. È importante condividere la conoscenza scientifica con tutti, in particolare nei paesi a basso reddito dove il prezzo dei libri e gli abbonamenti alle riviste scientifiche possono costituire un ostacolo all'accesso a tali informazioni.

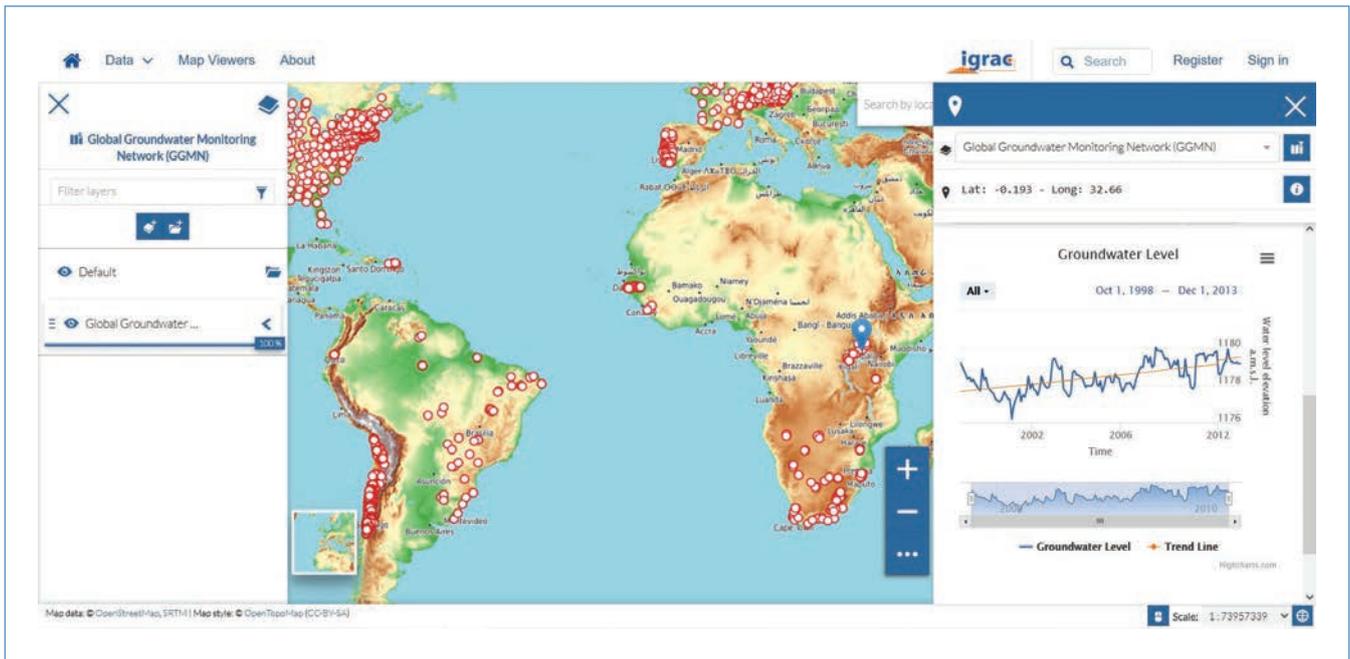
Data la crescente rilevanza delle acque sotterranee in un contesto caratterizzato dal cambiamento globale, coloro che si occupano di questa materia non dovrebbero solo ampliare la base di conoscenze, ma anche aiutare a sviluppare politiche e partecipare al processo decisionale. Tuttavia, il loro potenziale contributo spesso non viene riconosciuto (Gleeson et al., 2020b; Gorelick e Zheng, 2015). Le organizzazioni impegnate nella gestione delle acque sotterranee, come le società di distribuzione dell'acqua, quelle che forniscono servizi idrici, ingegnerico-sanitari e di igiene (nell'acronimo inglese WASH) e le organizzazioni dei bacini idrografici trarrebbero vantaggio dal coinvolgimento degli idrogeologi nello sviluppo delle loro attività.

In molti paesi a basso e medio reddito mancano le competenze in materia di idrogeologia, anche quando le acque sotterranee costituiscono la maggior parte delle risorse idriche gestite (Foster, 2020). Questa mancanza di competenze comprende spesso sia la capacità umana che quella istituzionale (Abdolvand et al., 2015; Albrecht et al., 2017). Le lacune istituzionali in materia di governance e gestione delle acque sotterranee, a loro volta, minano la sicurezza idrica (Nazioni Unite, 2018). Programmi di potenziamento delle competenze ben finanziati sono, quindi, un elemento essenziale per passare da un circolo vizioso di sfruttamento eccessivo delle acque sotterranee e di degrado ambientale a un circolo virtuoso di creazione di difensori locali delle acque sotterranee che promuoveranno pratiche di gestione sostenibili e rafforzeranno la capacità istituzionale (Ortigara et al., 2018; Jadeja et al., 2018; Taylor et al., 2012b). In linea con quanto detto, il traguardo 6a dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 definisce la cooperazione internazionale e il rafforzamento delle competenze come fattori chiave per raggiungere una gestione sostenibile delle risorse idriche.

¹ Per ulteriori informazioni sul CEO Water Mandate, consultare: <https://ceowatermandate.org>.

² Per ulteriori informazioni, consultare: gw-project.org.

Figura 9.6 Sistema informativo globale sulle acque sotterranee (GGIS)



Fonte: IGRAC (s.d.).

Al fine di garantire un impatto duraturo delle misure di rafforzamento delle competenze, le differenti attività dovrebbero essere progettate per un gruppo target, dovrebbero fornire prospettive interdisciplinari, consentire il riscontro da parte dei e delle praticanti e coinvolgere meccanismi di verifica del loro successo (Re and Misstear, 2018; Ferrero et al., 2019). Tipici esempi di promozione dello sviluppo delle capacità istituzionali sono i partenariati bilaterali che coinvolgono le comunità o gli accordi di cooperazione governativa che coinvolgono agenzie specializzate; ciò può comprendere anche la creazione di centri di eccellenza nazionali o regionali nel paese destinatario. Raggiungere il successo istituzionale attraverso il rafforzamento delle competenze in materia di idrogeologia richiede solitamente uno sforzo duraturo, che dovrebbe essere integrato con programmi di sviluppo volti a permettere ai nuovi esperti e alle nuove esperte locali in materia di acque sotterranee di mettere in campo le loro conoscenze. Su scala ridotta, la formazione delle capacità umane può essere rafforzata, ad esempio, da programmi di scambio accademico bilaterale o da opportunità di formazione post-laurea.

Capitolo 10

Politiche e pianificazione delle acque sotterranee

UNDP

Jenny Grönwall* e Marianne Kjellén

Con il contributo di Gabriel Eckstein (Texas A&M University School of Law), Kerstin Danert** e Lesha Witmer (WfWP), Rebecca Welling (IUCN), Viviana Re (IAH), Katharina Davis (UNDP) e Lulu Zhang (UNU-FLORES)

* Commissionato tramite il Water Governance Facility, ospitato dal SIWI

** Ask for Water GmbH per conto del Rural Water Supply Network



La politiche in materia di acque sotterranee determinano gli obiettivi, le ambizioni e le priorità per la gestione di questa risorsa, a beneficio della società, mentre la pianificazione traduce le politiche in programmi d'azione. Entrambe fanno spesso parte di politiche più ampie così come di un quadro di pianificazione in materia di risorse idriche; tuttavia, le sfide specifiche relative alle acque sotterranee hanno tradizionalmente ricevuto meno attenzione rispetto a quelle relative alle acque superficiali.

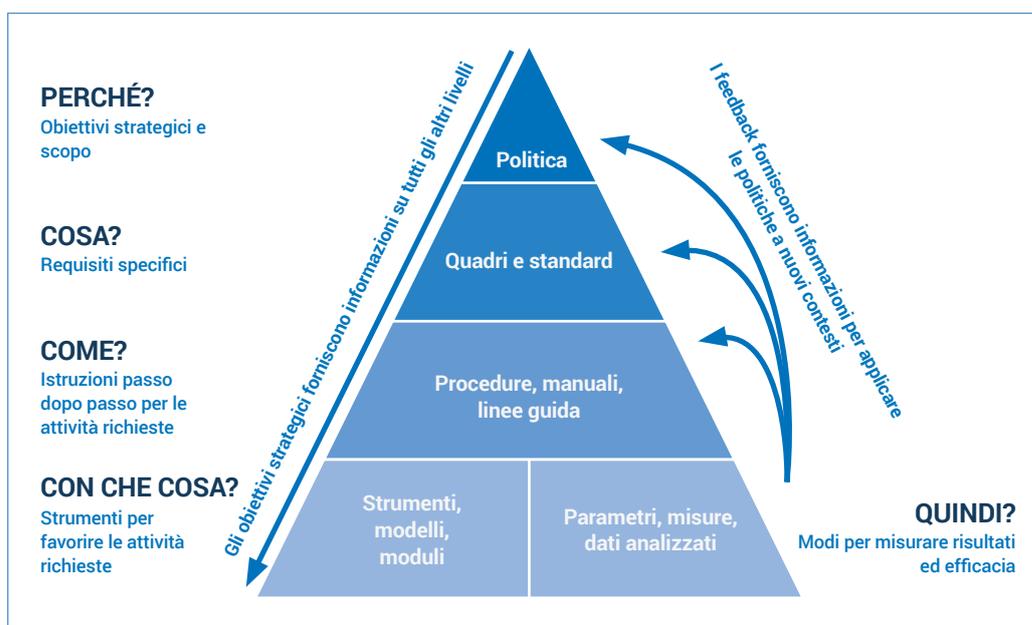
I termini "politiche", "strategia" e "piani" sono usati in modo intercambiabile in molti paesi e contesti.

10.1 Le politiche relative alle acque sotterranee

Le politiche sono volte a riflettere valori e idee ritenuti di interesse pubblico. Attraverso la formulazione di principi generali, un documento politico stabilisce obiettivi strategici, definisce perché sono importanti e determina requisiti specifici per guidare il corso d'azione delle decisioni presenti e future (Torjman, 2005; De Sousa e Berrocal Capdevila, 2019). La figura 10.1 indica in che modo la politica è correlata a requisiti specifici (cosa?); procedure, manuali e linee guida (come?); e strumenti abilitanti (con che cosa?), che illustrano come tradurre le politiche in azione (De Sousa e Berrocal Capdevila, 2019; Smith, 2003).

Figura 10.1

Che cosa sono le politiche? Un modello dello Stato del Nuovo Galles del Sud (Australia)



Fonte: De Sousa e Berrocal Capdevila (2019).

In un contesto nazionale, il "decisore politico" è normalmente un organismo eletto pubblicamente o designato con il mandato di definire le politiche e il loro campo di applicazione. Gli stati federali hanno spesso politiche sulle acque sotterranee a livello nazionale e statale. Le politiche possono essere rivolte principalmente alle autorità, alle organizzazioni, alle giurisdizioni e alle organizzazioni non governative, e riguardano il loro mandato istituzionale.

L'elaborazione delle politiche richiede la scelta dei mezzi più appropriati per il fine desiderato. I principi economici (vedere figura 13.1) possono essere utilizzati per guidare tali scelte, attribuendo valore alle acque sotterranee (Smith et al., 2016). I valori e i principi strumentali, intrinseci e relazionali, sono ugualmente essenziali, al fine di sostenere l'etica ambientale, i bisogni umani e i valori culturali e storici (vedere figura 2.1 e Nazioni Unite, 2021).

Il primo passo è definire una "visione di gestione delle acque sotterranee" a livello nazionale che sia incorporata in una visione nazionale per le risorse idriche, in accordo con un'ampia

● ● ●

Gli stati federali hanno spesso politiche sulle acque sotterranee a livello nazionale e statale

gamma di parti interessate, dagli utenti locali fino a coloro che si occupano di tecnologie, di scienza, della formulazione di politiche e di investimenti, al fine di catalizzare e gestire i cambiamenti necessari (Smith et al., 2016), come in Sudafrica per esempio (Repubblica del Sudafrica, 2010). Le politiche relative alle acque sotterranee dovrebbero essere strettamente legate alla natura e allo stato giuridico della proprietà (pubblica o privata) di queste risorse, oltre a fattori quali la tipologia di utenti, le caratteristiche delle acque superficiali correlate e l'uso del suolo nelle aree di ricarica degli acquiferi (Foster e Chilton, 2018). Tali politiche dovrebbero inoltre prevedere un processo decisionale integrato per gli acquiferi, garantendo un collegamento con altri settori e ambiti della società al di là del settore idrico, come ad esempio sviluppo socioeconomico, uguaglianza di genere e riduzione della povertà, alimentazione ed energia, ecosistemi, cambiamenti climatici e salute umana.

La figura 10.2 illustra una struttura istituzionale generica, che mostra come l'elaborazione delle politiche può consentire l'integrazione verticale e orizzontale e i collegamenti ai settori correlati. Le scelte e la struttura si collocano in un contesto politico più ampio in cui le linee guida e i trattati internazionali possono definire strutture esterne. Le raccomandazioni del Groundwater Governance Project (2016c), le regole stabilite nella Direttiva dell'Unione europea sulle acque sotterranee (Parlamento europeo/Consiglio europeo, 2006), nonché le disposizioni del modello sulle acque sotterranee transfrontaliere (UNECE, 2014) nell'ambito della Convenzione UNECE sulla protezione e l'utilizzo dei corsi d'acqua transfrontalieri e dei laghi internazionali (UNECE, 1992) e il Progetto di articoli sulla normativa degli acquiferi transfrontalieri (ILC, 2008; vedere capitolo 12), possono guidare e influenzare la definizione delle politiche.

Le politiche relative alle acque (sotterranee) comprendono standard fondamentali e principi guida di base. Sostenibilità, efficienza, equità, principio di precauzione, principio "chi inquina paga", gestione condivisa, gestione della domanda e dell'offerta, gestione della manutenzione e gestione integrata delle risorse idriche (nell'acronimo inglese IWRM) sono fondamentali per prendere decisioni future (Smith et al., 2016). Al fine di garantire che gli interessi delle comunità indigene siano presi in considerazione, ad esempio quando vengono accordate concessioni ai gestori delle acque sotterranee, è anche essenziale il principio del consenso libero, preventivo e informato, sancito come componente della Dichiarazione delle Nazioni Unite sui diritti dei popoli indigeni (Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2007). Gli elementi procedurali possono richiedere partecipazione, trasparenza, responsabilità, non discriminazione e universalità, stato di diritto, anticorruzione e sussidiarietà. L'approccio partecipativo mette in evidenza il ruolo centrale delle donne nella fornitura, gestione e salvaguardia dell'acqua, come sottolineato nei principi di Dublino (ICWE, 1992). Una serie aggiornata di principi per la valutazione dell'acqua è stata proposta dall'High-Level Panel on Water (2018); tali principi sono stati ulteriormente elaborati nel *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2021: il valore dell'acqua* (Nazioni Unite, 2021). I principi procedurali sono fondamentali anche per l'approccio basato sui diritti umani.

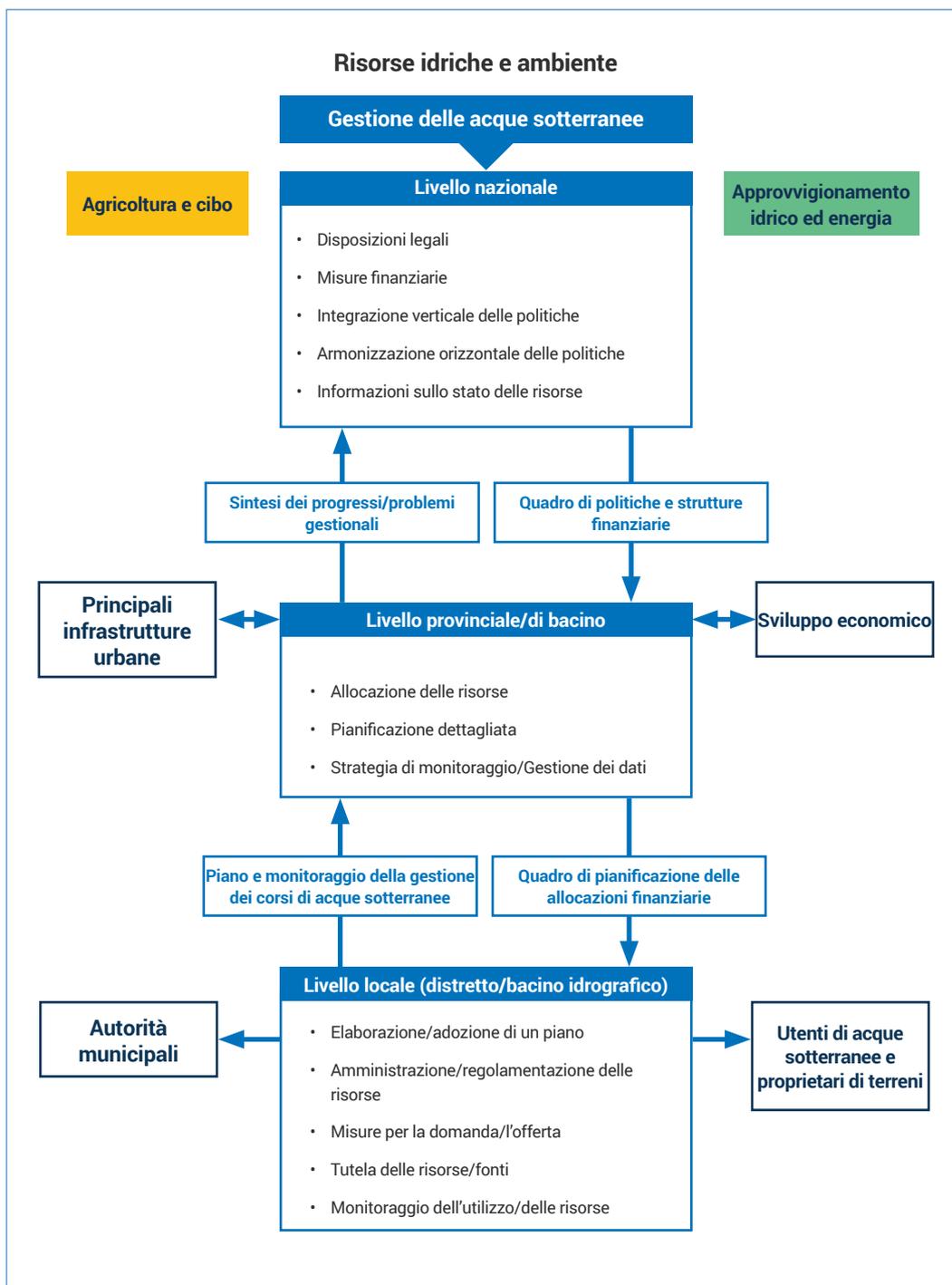
● ● ●

L'approccio partecipativo mette in evidenza il ruolo centrale delle donne nella fornitura, gestione e salvaguardia dell'acqua

Il Commento generale n. 15 sul diritto all'acqua raccomanda che la priorità nell'assegnazione dell'acqua sia data agli usi personali e domestici (CESCR, 2002). L'acqua per uso potabile ha quindi la priorità rispetto a quella destinata ad altri settori, come avviene ad esempio in Sudafrica (Repubblica del Sudafrica, 2010). Dopo l'elaborazione delle politiche, può essere utile tradurre tali politiche in legge, usando i termini dei diritti umani, elevando così l'acqua potabile da "bisogno" a "diritto" (Mechlem, 2016).

Fin troppo spesso le politiche adottate in relazione alle acque sotterranee si concentrano principalmente sull'utilizzo della risorsa dopo il prelievo. Ciò è ben lontano dalla corretta gestione dell'acquifero, che richiede attenzione all'uso del suolo, al ripristino, alla protezione e all'attuazione di misure volte a preservare i molteplici servizi e funzioni del sistema acquifero (vedere capitolo 1). Gli acquiferi, che "ospitano" le acque sotterranee, e le sorgenti stesse delle varie acque (di falda) sono distinti ma interconnessi e devono essere gestiti con misure mirate ma complementari che ne prevedano un uso condiviso (Eckstein, 2017; Puri e Villholt, 2021).

Figura 10.2
Struttura istituzionale per lo sviluppo delle politiche relative alle acque sotterranee



Fonte: Foster e Chilton (2018, fig. 4.4, pag. 87).

10.2 Esempi di politiche sulle acque sotterranee

In India, la politica idrica nazionale del 2012 afferma che le acque sotterranee «devono essere gestite come una risorsa comunitaria detenuta dallo Stato secondo la dottrina della fiducia pubblica per ottenere sicurezza alimentare, mezzi di sussistenza e sviluppo equo e sostenibile per tutti» (Ministero delle risorse idriche dell'India, 2012, pag. 4). A prescindere da ciò, l'estrazione delle acque sotterranee continua in generale ad avvenire senza una rigida regolamentazione o applicazione della stessa (Pandit e Biswas, 2019), dove potenti interessi poco colpiti dai deterrenti imposti dal governo determinano una generale riluttanza a ridurre l'uso redditizio di questa risorsa. Molti Stati e territori hanno incluso le acque sotterranee nelle loro politiche idriche; ad esempio, nel Karnataka, uno Stato che deve affrontare serie difficoltà agrarie e una grave carenza di acqua domestica, lo sfruttamento eccessivo degli acquiferi è ora ampiamente riconosciuto, così come il nesso tra acque sotterranee ed energia (Kelkar Khambete, 2020). La realizzazione delle ambizioni delle

10.3 Pianificazione della gestione delle acque sotterranee

politiche è ostacolata dalla distorsione dei dati nelle statistiche ufficiali. Ad esempio, i pozzi prosciugati portano con sé informazioni importanti sullo stress delle acque sotterranee che si perdono quando i dati vengono filtrati. Questo divario compromette gli interventi previsti dalle politiche e l'allocazione delle risorse, come notato nel vicino Stato del Tamil Nadu (Hora et al., 2019).

In Australia, dopo decenni in cui ci si era concentrati principalmente sulle acque superficiali, il governo federale, così come gli Stati, i territori e le autorità di bacino idrografico ora prestano maggiore attenzione alle acque sotterranee. Un esempio è l'ultima strategia ventennale del governo del Nuovo Galles del Sud (2021). Questo documento mostra un alto grado di integrazione orizzontale, con le acque sotterranee collegate a tutti i settori che dipendono dalla risorsa e incidono su di essa.

Un piano (di gestione) delle acque sotterranee traduce le politiche in un programma d'azione preventivato e finanziato e può fornire un modello per la sua attuazione.

La pianificazione strategica identifica e definisce le azioni che possono contribuire al raggiungimento delle ambizioni e degli obiettivi stabiliti nelle politiche, in particolare per i sistemi acquiferi principali (riquadro 10.1). Inoltre, può servire a coinvolgere le parti interessate nel processo. I piani strategici vengono sviluppati al fine di promuovere una gestione razionale, efficace ed equa dell'acqua e un processo decisionale in relazione alle risorse e agli utenti di principale interesse. La pianificazione prende in considerazione l'incertezza che caratterizza un ambiente in evoluzione affinché i problemi futuri noti e quelli difficili da prevedere possano essere affrontati. Ciò richiede un'adeguata gestione integrata delle risorse idriche e collegamenti con tutti i settori rilevanti dell'azione pubblica.

Riquadro 10.1 Sequenza concreta del processo di pianificazione degli acquiferi definiti come prioritari

L'elaborazione e l'attuazione di piani di gestione delle acque sotterranee per gli acquiferi definiti come prioritari è la prova definitiva dell'adeguatezza delle disposizioni di governance e prevede la seguente sequenza graduale di azioni in ciascun ciclo di gestione adattativa:

- Identificazione e caratterizzazione delle unità di gestione in relazione alle acque sotterranee;
- Valutazione dello stato delle risorse, delle opportunità e dei rischi;
- Raggiungimento del consenso sui servizi richiesti relativi agli acquiferi e sugli obiettivi del piano;
- Elaborazione della strategia di gestione (comprese misure specifiche, esigenze di monitoraggio e relativo finanziamento);
- Pianificazione dell'attuazione in un determinato periodo, con monitoraggio sistematico, revisione dell'efficacia e adeguamento per il ciclo successivo.

Fonte: Groundwater Governance Project (2016c, pag. 86).

La pianificazione della gestione operativa definisce gli interventi e le altre attività da svolgere sul campo, compresa la loro tempistica. Tratta argomenti quali infrastrutture di approvvigionamento idrico, progetti di riforestazione e ricarica artificiale degli acquiferi, nonché misure di natura non tecnica legate ai requisiti giuridici e politici, linee guida e questioni correlate, come quali attori coinvolgere e in quale fase. I piani operativi vanno più

● ● ●
Un piano (di gestione) delle acque sotterranee traduce le politiche in un programma d'azione preventivato e finanziato e può fornire un modello per la sua attuazione

nel dettaglio rispetto a quelli strategici e di solito coprono solo un settore delle politiche, o solo una parte di esso, ma riconoscono dove tali settori devono interagire.

Nei sistemi acquiferi caratterizzati da scarso stress legato allo sfruttamento, possono essere considerati appropriati piani privi di un meccanismo di controllo specifico per monitorare gli impatti sui suddetti sistemi. Al contrario, nelle regioni caratterizzate da un'intensa competizione circa l'utilizzo delle acque sotterranee o da carenze idriche storiche o prevedibili, i piani con dettagliate misure di controllo sono importanti al fine di prevenire e gestire i rischi di sfruttamento eccessivo (White et al., 2016).

I piani possono essere sviluppati per affrontare in modo specifico problemi come i rischi di inondazione causati dall'aumento del livello delle acque sotterranee, in genere a seguito di piogge prolungate. In alternativa, l'obiettivo potrebbe essere quello di evitare l'abbassamento dei livelli delle acque sotterranee, l'intrusione di acqua di mare e la subsidenza del suolo e/o quello di preservare gli ecosistemi vulnerabili legati alle suddette risorse. La digitalizzazione, comprese le tecnologie per il monitoraggio della qualità delle acque sotterranee e dei sistemi acquiferi in tempo reale, offre vantaggi in termini di efficienza e ottimizzazione attraverso la raccolta e l'analisi dei dati, importanti in ogni fase della pianificazione della gestione di questa risorsa (ITU, 2010). Ad esempio, nelle regioni aride, dove una metodologia unificata per la valutazione e per il processo decisionale è spesso limitata, un approccio strategico alla pianificazione della gestione degli acquiferi dovrebbe essere basato su un modello di rischio (Şen et al., 2013).

Le componenti principali dei piani comprendono: l'inventario, la diagnosi e la caratterizzazione dei sistemi acquiferi o di parti di essi (le cosiddette "unità di gestione"), la valutazione e la classificazione delle priorità relative allo sviluppo socioeconomico e agli ecosistemi, la valutazione delle pressioni sul sistema, il coinvolgimento e la consultazione delle parti interessate (Foster e Chilton, 2018). Ulteriori componenti includono la descrizione degli interventi e di altre misure di gestione, così come degli impatti previsti da tali misure. Tutte queste componenti sono fondamentali per la "gestione adattiva", necessaria al fine di affrontare le sfide congiunte del cambiamento globale e dell'incertezza scientifica relativa ad acque sotterranee e acquiferi complessi. La pianificazione finalizzata alla gestione congiunta di acque superficiali e sotterranee è fondamentale per diversificare l'approvvigionamento idrico e per aumentare la resilienza (Grönwall e Oduro-Kwarteng, 2018). Ulteriori aspetti sono mostrati nella figura 10.3.

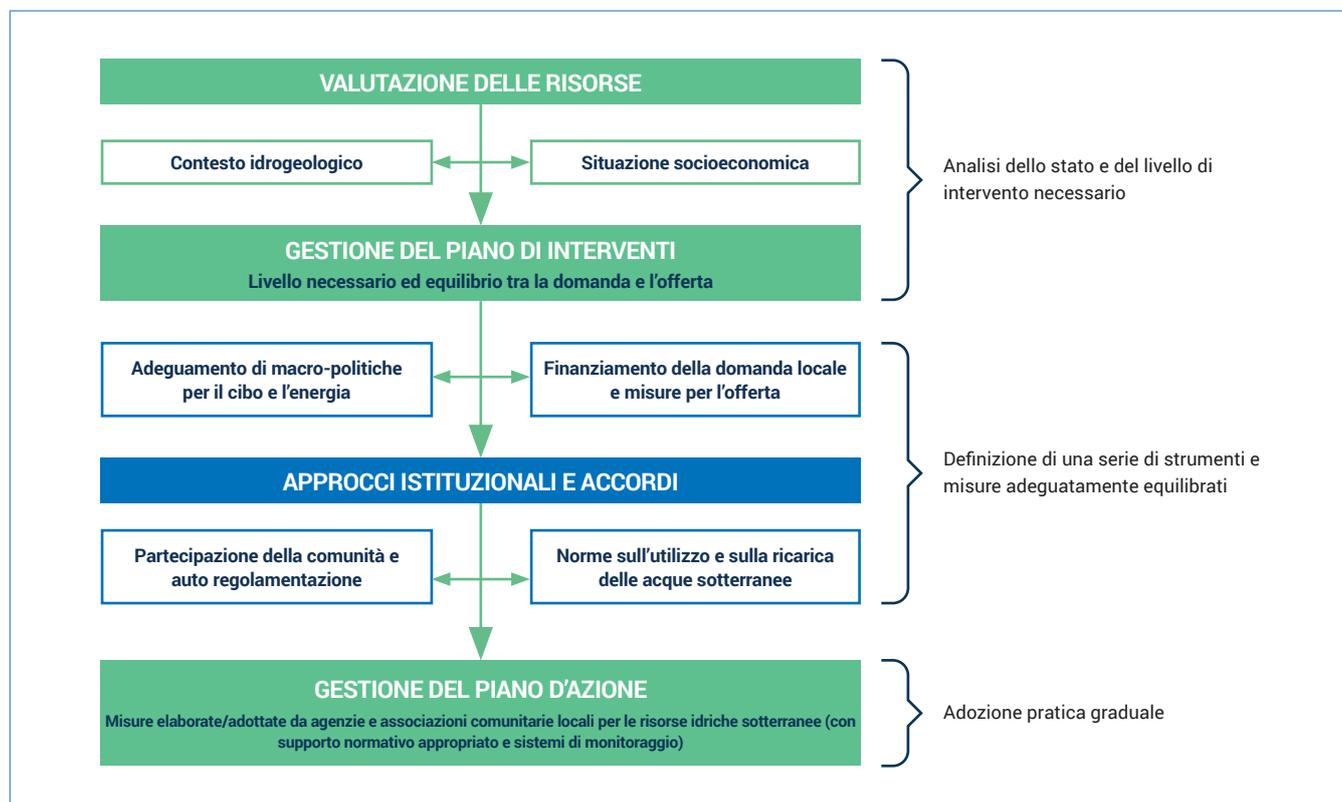
È importante sottolineare che gli Stati membri delle Nazioni Unite dovrebbero garantire i diritti umani all'acqua potabile sicura e ai servizi igienico-sanitari attraverso piani d'azione o strategie, promuovendo così attivamente la consapevolezza e la capacità in merito alla protezione delle fonti idriche sotterranee, alla necessità di trattamento prima del consumo e alla ricarica degli acquiferi (CESCR, 2002; Grönwall e Danert, 2020).

I piani possono essere preparati come uno sforzo di cooperazione tra ministeri nazionali, agenzie provinciali e locali e le parti interessate, sulla base del dialogo e del supporto tecnico inclusivo (ad esempio mappatura partecipata) per consentire la co-titolarità del processo e del risultato. Il processo produce un documento formale che può essere convalidato, con azioni e indicatori temporali che possono essere monitorati, così come impatti e risultati che possono essere valutati. Il processo include un budget, collegato ai risultati, i quali possono essere soggetti a revisione man mano che le prestazioni vengono monitorate e che le condizioni cambiano (Groundwater Governance Project, 2016c).

Processi aperti e partecipativi di pianificazione in materia di acque sotterranee possono generare un maggiore sostegno pubblico e l'accettazione del piano che ne deriva e, per estensione, della gestione operativa. Tale pianificazione coinvolge la comunità scientifica, specialisti e specialiste nella gestione delle risorse, parti interessate e decisori e dovrebbe essere accessibile ad un pubblico non specializzato, invitando gli utenti a partecipare

(Quevauviller et al., 2016). La pianificazione delle acque sotterranee spetta tanto agli enti governativi quanto agli utenti finali, collettivamente o individualmente. Su scala locale, la raccolta dei dati e l'analisi delle informazioni saranno necessariamente limitate; tuttavia, tutti i livelli possono beneficiare del rafforzamento delle competenze e della sensibilizzazione. Analogamente, per acquisire una dimensione di genere, la partecipazione delle donne alla generazione dei dati (un ambito generalmente dominato dagli uomini) nonché i dati disaggregati per sesso sono fondamentali.

Figura 10.3 Fasi e fattori nell'elaborazione di un piano di gestione delle acque sotterranee



Fonte: Foster e Shah (2012, fig. 4, pag. 10).

● ● ●
Politiche, strategie e piani dovrebbero essere adattati al contesto locale, sulla base delle priorità e delle aspirazioni della popolazione locale, e basati su solide prove scientifiche

Come un piano di gestione delle acque sotterranee e degli acquiferi potrebbe far parte di un piano nazionale di gestione integrata delle risorse idriche (GWP, 2017), così la pianificazione a livello di bacino deve considerare i sistemi nel loro insieme. Infatti, le acque superficiali e sotterranee poco profonde sono di solito strettamente interconnesse. Occorre tuttavia osservare che i confini dei bacini idrogeologici non sempre coincidono con quelli delle aree di drenaggio superficiale. Inoltre, poiché non tutti gli acquiferi sono collegati idrologicamente a fiumi o laghi, le relazioni tra monte e valle e le dinamiche di potere che influenzano l'uso delle acque superficiali e sotterranee possono essere molto diverse (Smith et al., 2016).

Gli obiettivi nazionali e gli obiettivi di sviluppo locale, le priorità, gli approcci e i livelli di attività specifici dell'area forniscono indicazioni per lo sviluppo, l'uso, la gestione e la protezione ottimali delle acque sotterranee, dell'ambiente e degli ecosistemi ad esse connessi (Groundwater Governance Project, 2016c). Politiche, strategie e piani dovrebbero essere adattati al contesto locale, sulla base delle priorità e delle aspirazioni della popolazione locale, e basati su solide prove scientifiche.

Un piano dovrebbe fissare obiettivi per la gestione delle acque sotterranee e fungere da guida per l'attuazione delle politiche e delle valutazioni diagnostiche delle risorse. Il piano di gestione dovrebbe definire le azioni necessarie per affrontare problemi o pressioni specifiche sulle acque sotterranee in determinati contesti, ad esempio come mostrato nella tabella 10.1.

Tabella 10.1 Esempi di azioni che possono essere identificate nei piani di gestione delle acque sotterranee

Tipo di misura	Scopo	Esempi
Orientata sulla fonte	Minimizzazione e prevenzione degli impatti sulla fonte; mitigazione	<ul style="list-style-type: none"> • Requisiti per il rilascio di autorizzazioni e licenze; attuazione • Standard di qualità per lo scarico di acque sotterranee; controllo di pozzi di iniezione • Requisiti per gli approcci della gestione <i>in situ</i> e del territorio al fine di controllare l'inquinamento da fonti non puntuali o diffuse • Incentivi economici per ridurre l'inquinamento • Sviluppo di tecnologie a basso o zero consumo • Applicazione di approcci "dalla sorgente al mare", "dal bacino idrografico alla costa", "dalla dorsale alla barriera corallina" per far fronte a flussi d'acqua, biota, sedimenti, inquinamento, materiali e servizi ecosistemici. • Gestione obbligatoria e volontaria della domanda per evitare prelievi eccessivi
Orientata sulla risorsa	Gestione della risorsa; mantenimento e operatività	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemi di classificazione nazionale per le acque sotterranee • Attribuzione di classi di gestione delle acque sotterranee • Definizione di obiettivi di qualità secondo le classi di gestione • Definizione di zone di protezione dell'acqua potabile • Applicazione di adeguati metodi di trattamento dell'acqua potabile • Determinazione di una riserva basata sul volume per soddisfare i bisogni umani di base e istituzione di una riserva ecologica per proteggere gli ecosistemi • Controllo della subsidenza attraverso limiti di pompaggio e ricarica gestita degli acquiferi
Risanamento	Ripristino di qualità e quantità delle acque sotterranee e/o dello stoccaggio degli acquiferi	<ul style="list-style-type: none"> • Pulizia dei siti abbandonati • Risposta d'emergenza alle perdite di acqua • Riduzione dei prelievi per ristabilire la riserva • Ricarica gestita degli acquiferi, raccolta delle acque piovane e aumento dell'infiltrazione • Sviluppo di modelli di subsidenza su base fisica per pianificare strategie di ripresa

Fonte: adattato da Smith et al. (2016, tabella 3.1, pag. 53).

10.4 Esempi di pianificazione della gestione delle acque sotterranee

La Direttiva quadro sulle acque dell'Unione europea (Parlamento europeo/Consiglio europeo, 2000) stabilisce i piani di gestione dei bacini idrografici come strumento principale per presentare lo stato delle acque e analizzare gli impatti e le risposte, e per fornire resoconti alla Commissione europea. Le parti che attuano l'accordo di Parigi ai sensi della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici evidenziano le loro azioni per il clima nei piani dei contributi determinati a livello nazionale (nell'acronimo inglese NDC). Ad oggi, le acque sotterranee sono incluse nei piani presentati da 20 paesi e sono menzionate da 8 paesi, su un totale di 75 paesi firmatari dell'accordo (UNFCCC, 2021). Questi piani includono riferimenti alla necessità di investimenti che interessino la proprietà tampone degli acquiferi al fine di aumentare le capacità di adattamento, il miglioramento della ricarica, la protezione e la gestione delle acque sotterranee e delle zone umide e la mappatura del rischio. Gli NDC menzionano la mitigazione basata sulla natura e sulla tecnologia, nonché le misure di adattamento.

A Tonga, esiste il rischio di impoverimento delle acque sotterranee data l'urgente necessità di sviluppo economico, ad esempio attraverso l'intensificazione agricola (Regno di Tonga/Banca mondiale/IFAD/UNDP, 2016). Il secondo NDC dell'isola (Regno di Tonga, 2020) identifica la salinizzazione delle acque sotterranee come un potenziale impatto dell'innalzamento del livello del mare, che minaccia di ridurre la disponibilità di risorse di acqua dolce. Mezzi per affrontare questo problema comprendono le disposizioni del Piano agricolo, il quale

suggerisce di valutare le acque sotterranee e il loro attuale sfruttamento e di identificare le potenziali aree di protezione. Il piano mostra inoltre che, in seguito ad anni di siccità, vi è un crescente interesse per l'utilizzo delle acque sotterranee per l'irrigazione.

In California (Stati Uniti), il Sustainable Groundwater Management Act del 2014 affida alle agenzie locali la regolamentazione del pompaggio in relazione alla ricarica degli acquiferi. Queste agenzie hanno il mandato di tracciare e monitorare l'estrazione e sono tenute a mappare le aree di ricarica degli acquiferi. La legge richiede la pianificazione dell'uso del suolo per raggiungere la sostenibilità attraverso la trasparenza e il coinvolgimento delle parti interessate, nonché mediante lo scambio di conoscenze tra i bacini e all'interno di essi (Kiparsky et al., 2017).

La posizione della Cina sulle politiche e sulla pianificazione in materia di acque sotterranee mostra come i due aspetti siano a volte indistinguibili. La legge sull'acqua del 1988 (Repubblica popolare cinese, 1988) inserisce la pianificazione in un capitolo indipendente per sottolinearne l'importanza e lo status giuridico. Afferma che la pianificazione integrata delle risorse idriche dovrebbe essere incentrata sui bacini idrografici piuttosto che sui confini amministrativi, con una pianificazione regionale conforme alla pianificazione relativa ai bacini idrografici e basata su studi, ricerche e valutazioni scientifiche complete ai livelli amministrativi pertinenti. Tuttavia, la segmentazione prevista nella gestione della quantità e della qualità dell'acqua ostacola inevitabilmente un'efficace integrazione (Liu e Zheng, 2016). Un piano di controllo e bonifica dell'inquinamento delle acque sotterranee e un piano nazionale per la prevenzione e il controllo sulla subsidenza del suolo hanno fornito direttive ufficiali per la gestione delle acque sotterranee fino al 2020 (Liao e Ming, 2019). Questi e altri piani si applicano parallelamente alla politica delle "Tre linee rosse" del 2012, che fissa obiettivi sull'uso totale dell'acqua, sul miglioramento della relativa efficienza e della qualità della risorsa. Un'ulteriore pianificazione scientifica dovrebbe proteggere i suoli e le acque sotterranee per soddisfare il quattordicesimo piano quinquennale. Inoltre, il piano d'azione per la prevenzione e il controllo dell'inquinamento idrico (noto anche come "Piano Water Ten") mira a controllare la qualità delle acque sotterranee (Xinhua, 2020; China Water Risk, 2015).

In Australia, al quadro strategico nazionale per le acque sotterranee è seguito un piano d'azione nazionale per questa risorsa. Nel Nuovo Galles del Sud, la pianificazione e l'allocazione delle risorse si basano sui piani di condivisione dell'acqua, mentre il piano d'azione per la riforma dell'acqua delinea come il governo realizzerà i suoi obiettivi (NSW Government, s.d.a, s.d.b). Lo Stato utilizza un regime di accesso *bulk* per determinare quanta acqua sarà disponibile per l'estrazione da parte di tutti gli utenti autorizzati nell'ambito di un piano di condivisione dell'acqua (vedere anche il riquadro 2.3). Ad esempio, il Great Artesian Basin Shallow Groundwater Sources Order del 2020 stabilisce regole in base alle quali le allocazioni di acqua devono essere adeguate, riconoscendo tra l'altro l'effetto della variabilità climatica sulla disponibilità della risorsa (Governo del Nuovo Galles del Sud, 2020).

Lezioni sulla pianificazione partecipata possono essere tratte inoltre dal Gujarat e dal Rajasthan in India. Qui, i ricercatori hanno coinvolto gli abitanti dei villaggi per responsabilizzare e incoraggiare un cambiamento dei comportamenti relativi all'uso delle acque sotterranee. Gli utenti finali hanno imparato a monitorare l'acqua piovana, a gestire stazioni meteorologiche automatiche e a inserire i dati in un'applicazione che svolge la funzione di banca dati. Ciò ha consentito di calcolare il bilancio idrico della ricarica e di valutare il volume che potrebbe essere autorizzato per l'irrigazione (Maheshwari et al., 2014).

Capitolo 11

Gestione delle acque sotterranee

UNESCO-IHP

Craig Simmons e Alice Aureli

IGRAC

Neno Kukurić

Con il contributo di Anita Milman (Università del Massachusetts), Jane Dottridge (IAH), Bruce Misstear (Trinity College di Dublino), Angelos Findikakis e Alberto Guadagnini (IAHS), Emilio Custodio (Università Tecnica della Catalogna), Virginia Newton Lewis (WaterAid), Christophe Cudennec (IAHS), Enrique Fernández Escalante (TRAGSA), Kerstin Danert (Ask for water GmbH), Cristina Copeland (CDP), Ziad Khayat (UNESCWA), Guy Fradin (IWRA), Ghislain de Marsily (Università della Sorbona e Scuola delle Miniere di Parigi), Peter Dillon (CSIRO Land and Water, Università di Flinders e National Center for Groundwater Research and Training, Australia), e Catalin Stefan (TU-Dresda)



11.1 Introduzione

La gestione delle acque sotterranee comprende le decisioni e le pratiche operative quotidiane che regolano l'estrazione di questa risorsa, nonché altre attività che hanno un'influenza su di essa e sugli acquiferi. La gestione delle acque sotterranee ha il compito di perseguire gli scopi e gli obiettivi delle politiche stabilite da leggi e procedure amministrative (vedere capitolo 10), oppure può essere avviata da enti e individui che agiscono di propria iniziativa. La conoscenza dei sistemi acquiferi locali e delle loro condizioni fornisce una base importante per la gestione, poiché inquadra ciò che deve essere gestito, quali azioni possono essere intraprese e quali possono essere gli impatti di tali azioni.

Poiché le acque sotterranee forniscono un'ampia gamma di servizi di approvvigionamento, regolazione e supporto (Bergkamp e Cross, 2007; Griebler e Avramov, 2015; vedere la figura 1.5), la loro gestione è multidimensionale e si propone di monitorare i prelievi e la qualità di questa risorsa, oltre a intervenire sugli effetti che tali prelievi hanno sugli ecosistemi, sulle acque superficiali, sulla subsidenza e altro ancora. La gestione delle acque sotterranee può anche mirare a definire un modo di distribuire l'acqua che sia in linea con le priorità e gli obiettivi stabiliti nelle politiche sulle acque sotterranee. Fondamentale per il successo di qualsiasi sforzo di gestione è la necessità di esaminare le potenziali esternalità e i molteplici effetti di qualsiasi azione di gestione, per evitare conseguenze indesiderate o inaspettate.

Questo capitolo fornisce una panoramica della gestione delle acque sotterranee. Gli argomenti discussi includono: raccolta di dati e conoscenze per la gestione delle acque sotterranee, controllo dell'estrazione di questa risorsa, protezione della qualità delle acque sotterranee e loro gestione per garantire una sostenibilità e una capacità di rispondere ai bisogni su scala più ampia. Vengono inoltre descritte le pratiche di gestione integrata delle acque sotterranee, inclusa la ricarica gestita degli acquiferi (nell'acronimo inglese MAR).

11.2 Dati e conoscenze necessari

Nel capitolo 9 vengono descritti gli strumenti e gli approcci necessari per costruire una base di conoscenza in materia di acque sotterranee e mantenerla aggiornata. Nell'ambito della gestione di tale risorsa, un modello concettuale idrogeologico, che descriva le caratteristiche strutturali, le condizioni dei margini e le proprietà idrauliche del sistema acquifero, è necessario al fine di stimare la disponibilità delle acque sotterranee e per comprendere e identificare i principali processi fisici che stanno avvenendo all'interno del sistema. Poiché gli acquiferi sono sistemi dinamici e dunque soggetti a cambiamenti, è consigliato il monitoraggio regolare di dati relativi all'estrazione delle acque sotterranee, nonché ai livelli e alla qualità dell'acqua, per fornire informazioni sullo stato del sistema acquifero e sul suo andamento nel tempo. I modelli concettuali idrogeologici, il bilancio idrico (vale a dire entità dei quantitativi di ricarica, di estrazione e differenza fra essi) e i dati di monitoraggio forniscono gli ingredienti di base per la definizione di modelli relativi alle acque sotterranee. La modellazione delle acque sotterranee può contribuire a una migliore comprensione dei flussi in tutto il sistema acquifero e può essere utilizzata per prevedere lo stato futuro del sistema (sia con che senza interventi di gestione).

11.3 Controllo dei prelievi

Probabilmente una delle componenti più importanti della gestione delle acque sotterranee è il monitoraggio dell'ubicazione e della quantità dei prelievi d'acqua dagli acquiferi. Che il posizionamento e la struttura dei pozzi (perforati o tubolari) siano adeguati è fondamentale per la gestione degli impatti idrogeologici dei prelievi, sia sugli acquiferi stessi che su altri asset di rilevanza ambientale quali fiumi, laghi, zone umide, sorgenti ed ecosistemi dipendenti dagli acquiferi. Prendere decisioni attente e ponderate in merito al posizionamento dei pozzi è importante anche per prevenire o ridurre al minimo le potenziali interazioni tra di essi. Il controllo della quantità di acqua prelevata è importante perché il pompaggio intensivo nel lungo periodo può portare all'esaurimento delle acque sotterranee.

È possibile utilizzare diversi strumenti per gestire i prelievi di acque sotterranee (tabella 11.1): la scelta dipende dall'approccio alla gestione definito dalla governance e dalle politiche in vigore. Non tutto il processo di gestione viene diretto dal governo. Le comunità e/o gli stessi utenti che utilizzano acque sotterranee possono scegliere in modo indipendente di prendere decisioni in relazione all'ubicazione dei pozzi e ai prelievi di acque sotterranee e, così facendo, utilizzare strumenti simili a quelli usati dal governo.

Tabella 11.1
Modalità di controllo
dei prelievi di acque
sotterranee

Approccio alla gestione	Strumenti per la gestione
Regolatorio: monitorare la costruzione dei pozzi e i prelievi, specificando le condizioni secondo le quali le acque sotterranee devono essere estratte	<ul style="list-style-type: none"> • Requisiti per la costruzione, perforazione, e/o il distanziamento dei pozzi • Assegnazione e attuazione dei diritti degli utenti (diritti, concessioni, licenze o permessi per il prelievo) che determinano una distribuzione volumetrica e una tempistica in relazione al prelievo • Riduzione del pompaggio nei periodi di siccità o in presenza di determinate condizioni del clima o del flusso dei corsi d'acqua • Quote o restrizioni sull'uso di energia per il prelievo di acque sotterranee
Basato sul mercato: incoraggiare o scoraggiare il prelievo di acque sotterranee e le attività correlate modificando il costo di queste azioni	<ul style="list-style-type: none"> • Tariffe/imposte applicate direttamente all'estrazione di acque sotterranee o altri componenti, come elettricità o uso del suolo • Sussidi (concessioni, prestiti, accesso a beni o servizi a prezzi scontati e assistenza tecnica) per ricompensare il risparmio idrico o facilitare l'adozione di nuove tecnologie e pratiche
Informativo: influenzare il prelievo di acque sotterranee e le attività correlate attraverso l'istruzione, la divulgazione di informazioni e linee guida	<ul style="list-style-type: none"> • Divulgazione di informazioni, linee guida o dati per incoraggiare comportamenti diversi • Campagne di sensibilizzazione e social marketing • Elaborazione di standard o certificazioni • Supporto tecnico
Informale: influenzare il prelievo di acque sotterranee e le attività correlate attraverso norme culturali e conoscenze mirate	<ul style="list-style-type: none"> • Pressione sociale, monitoraggio e introduzione di sanzioni • Azione da parte degli utenti per adattare le tempistiche e la quantità del pompaggio al fine di cambiare le condizioni degli acquiferi

● ● ●
Probabilmente una delle componenti più importanti della gestione delle acque sotterranee è il monitoraggio dell'ubicazione e della quantità dei prelievi d'acqua dagli acquiferi

L'impiego di diversi tipi di strumenti di gestione può influenzare contemporaneamente la scelta del luogo, i tempi e la quantità dei prelievi di acque sotterranee.

L'adozione di buone pratiche in relazione all'ubicazione e alla costruzione dei pozzi è spesso la prima azione in materia di gestione ad essere intrapresa. A proposito del posizionamento dei pozzi, bisogna tenere conto anche dei fattori socioeconomici e culturali. Ad esempio, nel caso dei pozzi rurali in Africa e in Asia, dove le donne sono normalmente responsabili della raccolta dell'acqua, al momento di definire l'ubicazione dei pozzi bisogna tenere conto, oltre agli impatti sugli acquiferi, della percorribilità a piedi della distanza per raggiungerli e della sicurezza personale che può essere garantita nel sito del pozzo (Misstear et al., 2017). La corretta costruzione, manutenzione e collaudo dei pozzi sono necessari per garantire un accesso duraturo alle acque sotterranee, nonché l'economicità della fruizione e la sicurezza. La diminuzione della funzionalità della pompa manuale e il guasto del pozzo a causa di pompe di scarsa qualità sono problemi comuni che interessano molti pozzi, specialmente in alcune parti dell'Africa (Andres et al., 2018; Tincani et al., 2015).



Nei luoghi in cui storicamente le acque sotterranee sono state soggette a una regolamentazione minima o nulla, gli utenti di tale risorsa possono percepire le azioni di gestione come espropriazione di proprietà privata

La messa a punto dei diversi strumenti di gestione delle acque sotterranee può avvenire solo a seguito della creazione di strutture giuridiche e istituzionali dotate dell'autorità necessaria per l'utilizzo e l'applicazione di tali strumenti. L'attuazione di qualsiasi nuovo sistema per controllare il pompaggio e l'utilizzo delle acque sotterranee non è, tuttavia, priva di criticità. In molte regioni del mondo, le leggi e le istituzioni che regolano le acque sotterranee sono ancora nella fase iniziale della loro esistenza e non sono pienamente operative. Per quanto riguarda gli approcci normativi, non esiste un metodo unico per determinare le allocazioni volumetriche e qualsiasi metodo applicato avrà i suoi punti forti e deboli. In diverse località, i governi hanno definito i diritti sull'acqua in base alle velocità di pompaggio storiche, agli usi attuali, alla superficie dell'area o ad altri metodi. Spesso i governi cercano di limitare i prelievi a una quantità stimata "sicura" o "sostenibile", sebbene tali concetti siano definiti in modo ambiguo. L'interazione tra acque sotterranee e superficiali rende difficile definire e assegnare flussi ambientali accettabili riguardo ai fiumi quando si stabiliscono i permessi di prelievo delle acque sotterranee.

Inoltre, gli utenti possono opporsi all'imposizione di ulteriori controlli sull'estrazione delle acque sotterranee. Nei luoghi in cui storicamente le acque sotterranee sono state soggette a una regolamentazione minima o nulla, gli utenti di tale risorsa possono percepire le azioni di gestione come espropriazione di proprietà privata. Consentire alcuni usi esenti, come l'uso domestico o quello per l'allevamento, o il prelievo di una quantità fissa inframarginale (cioè un volume d'acqua solitamente piccolo di cui si permette l'estrazione senza che sia soggetto a regolamenti o tariffe, di solito allo scopo di soddisfare le esigenze umane di base o in materia di agricoltura su scala domestica), possono aiutare a superare la resistenza al controllo attraverso la regolamentazione e la fissazione dei prezzi. Tuttavia, occorre prestare attenzione per garantire che gli usi esenti da regolamentazione non pregiudichino gli obiettivi di gestione (Jakeman et al., 2016; Molle e Closas, 2020). L'equità è un punto importante, poiché le azioni di gestione che influiscono in modo differenziato sulle pompe e sugli utenti possono portare a conflitti. L'applicazione di una misura è generalmente più efficace quando una combinazione di "bastone e carota" viene utilizzata per modificare il comportamento degli utenti (Molle e Closas, 2020).

Affinché un approccio al controllo dei prelievi di acque sotterranee abbia successo, è importante monitorare i tassi di estrazione di tale risorsa e le condizioni degli acquiferi, nonché garantire la conformità di tali aspetti con i permessi e i requisiti di legge. Il monitoraggio serve anche a supportare i responsabili delle decisioni in materia di politiche nel giustificare i vincoli sui prelievi (Moench, 2004). Purtroppo, a causa della natura nascosta della risorsa, la quantità di acque sotterranee estratta spesso rimane indeterminata. Gli stessi utenti potrebbero non essere a conoscenza della quantità che stanno prelevando o, qualora lo sapessero, potrebbero anche avere motivi per mantenere riservate tali informazioni. Le misurazioni forniscono informazioni preziose, ma l'installazione e la lettura dei contatori non è gratuita; inoltre, può essere percepita da chi ne detiene la proprietà come una violazione della propria *privacy*. Di conseguenza, nel caso della maggior parte dei pozzi nel mondo non vengono effettuate misurazioni di alcun tipo (Kemper, 2007). Sono in fase di sviluppo nuove tecnologie a basso costo per la misurazione delle acque sotterranee. Inoltre, le quantità di acqua estratte possono essere stimate indirettamente anche attraverso il telerilevamento, la superficie irrigata e l'uso di elettricità, per citare alcuni metodi (Giordano, 2009; Ursitti et al., 2018). Tuttavia, in molti luoghi l'opposizione sociale e politica al controllo continuo e alla divulgazione dei dati può impedire il monitoraggio e l'applicazione dei criteri normativi all'estrazione delle acque sotterranee.

Il riquadro 11.1 presenta un caso di studio sull'autorizzazione e il potenziamento dei pozzi per ridurre gli impatti sul prelievo delle acque sotterranee.

Riquadro 11.1 Prelievo delle acque sotterranee e gestione della quantità: autorizzazione e “potenziamento dei pozzi” per ridurre gli impatti (bacino idrografico del fiume South Platte, Colorado, Stati Uniti d’America)

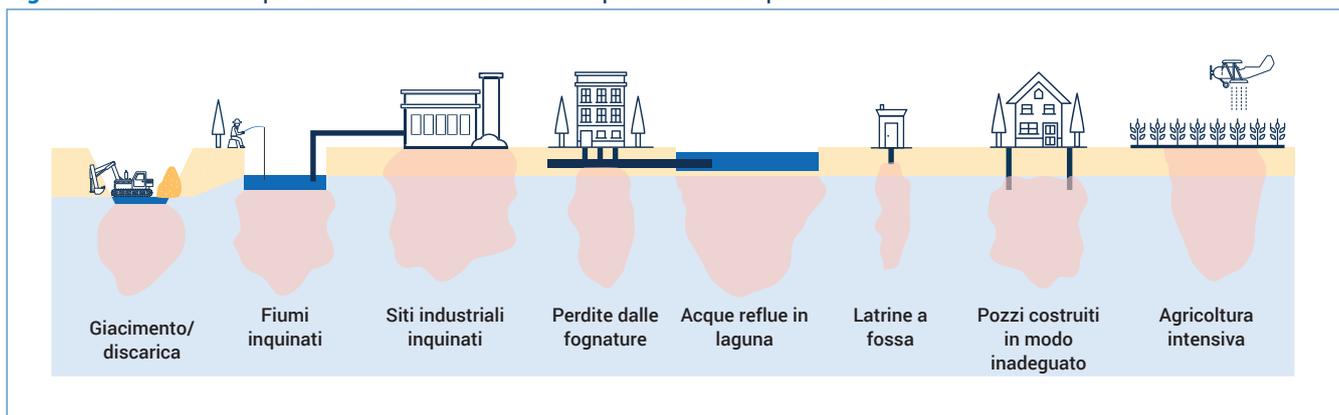
I livelli delle acque sotterranee e i flussi delle acque superficiali nel bacino idrografico del fiume South Platte, in Colorado (Stati Uniti) sono diminuiti drasticamente durante la metà e la fine del XX secolo a causa dell’aumento dei prelievi di acque sotterranee. Questi effetti hanno creato tensioni tra gli utenti delle acque superficiali e sotterranee e hanno minacciato l’habitat di diverse specie in via di estinzione stanziate a valle del fiume. Per risolvere questo problema, lo Stato del Colorado richiede a tutte le entità che hanno iniziato a pompare acqua dopo il 1997, compresi eventuali nuovi utenti, di ottenere un’autorizzazione dal Tribunale statale per l’acqua. A tal fine, i potenziali utenti devono dimostrare che i prelievi di acque sotterranee non influiranno negativamente su altri usi e utenti o, se lo faranno, i fruitori dovranno mettere in pratica ciò che lo Stato definisce “potenziamento”. Il potenziamento del pozzo comporta la compensazione o l’eliminazione di qualsiasi potenziale impatto dei prelievi di acque sotterranee sul flusso del corso d’acqua, in genere attraverso la ricarica o la sostituzione. I piani di potenziamento dei pozzi devono includere una valutazione del potenziale esaurimento del corso d’acqua e un piano per evitarlo, tenendo conto dello scarto di tempo tra il pompaggio, il potenziamento del pozzo e i flussi del fiume. In questo modo, lo Stato gestisce i prelievi di acque sotterranee per garantire che non violino i diritti esistenti sulle acque superficiali e sotterranee, proteggendo al contempo i flussi in entrata.

Per ulteriori informazioni, consultare Milman et al. (2021) e Blomquist et al. (2010).

11.4 Tutela della qualità delle acque sotterranee

Come descritto nei capitoli precedenti, la necessità di garantire la qualità delle acque sotterranee deve confrontarsi con molte minacce derivanti dall’intensificazione agricola, dall’urbanizzazione, dall’industria, dall’estrazione mineraria, dalla crescita demografica e dai cambiamenti climatici, nonché dai contaminanti naturali come l’arsenico e il fluoruro (figura 11.1). Le acque sotterranee dovrebbero essere gestite per evitare che queste minacce e criticità raggiungano livelli problematici, per prevenire l’aumento dell’inquinamento e per invertirne la tendenza, così come per ridurre l’impatto del degrado della qualità dell’acqua sulla salute umana e sull’ambiente.

Figura 11.1 Fonti di inquinamento che minacciano la qualità delle acque sotterranee



Fonte: sulla base di Villholth et al. (2011, fig. 2.6, pag. 15).

L’approccio più sostenibile ed economico per gestire la qualità delle acque sotterranee consiste nel garantirne un’adeguata protezione, evitando così la contaminazione dovuta alle attività umane. La bonifica delle acque sotterranee può essere efficace nel ridurre le concentrazioni di contaminanti, ma è una pratica costosa. La protezione delle acque sotterranee può essere conseguita attraverso: i) un intervento diretto sulla fonte di inquinamento che prevenga e riduca al minimo l’impatto dello sfruttamento delle



Le fonti di inquinamento possono essere controllate attraverso standard, protocolli di monitoraggio, pratiche di gestione in loco e permessi che definiscono le condizioni per lo scarico dei rifiuti e lo svolgimento di attività potenzialmente contaminanti

acque sotterranee sulla loro qualità, e ii) un intervento diretto su tali risorse che preveda l'introduzione di misure volte a proteggere l'acquifero e garantirne la sostenibilità e l'idoneità per un uso vantaggioso della risorsa. Per quanto riguarda i contaminanti presenti in natura, possono essere definite e introdotte non solo misure come il prelievo limitato, che determina un calo esiguo del livello della risorsa e impedisce l'ingresso di acqua di qualità diversa, ma anche requisiti operativi (ad esempio vincoli sui tempi e sulla velocità di prelievo per ridurre al minimo il rischio di deterioramento della qualità dell'acqua).

Le fonti di inquinamento possono essere controllate attraverso standard, protocolli di monitoraggio, pratiche di gestione *in loco* e permessi che definiscono le condizioni per lo scarico dei rifiuti e lo svolgimento di attività potenzialmente contaminanti. Questi strumenti di gestione generalmente determinano quali sostanze chimiche o componenti possono essere utilizzati e quando, dove e come. Specificano inoltre a quali tecnologie e procedure si dovrebbe ricorrere per evitare o ridurre la contaminazione e il rischio di incidenti o fuoriuscite. Il monitoraggio, l'applicazione e l'introduzione di sanzioni in caso di non conformità miglioreranno l'efficacia di tali attività.

La protezione dell'acquifero può essere conseguita attraverso una mappatura delle vulnerabilità, la creazione di aree di protezione delle acque sotterranee per salvaguardare l'acqua potabile (riquadro 11.2), e la pianificazione dell'uso suolo che tenga conto della protezione della qualità delle acque sotterranee. Anche le migliori pratiche di gestione, i programmi di incentivi e disincentivi per la protezione degli acquiferi e le campagne educative e di sensibilizzazione possono contribuire alla loro protezione.

Quando i pozzi non sono costruiti in modo adeguato, spesso sono essi stessi a costituire per gli inquinanti il principale canale di ingresso negli acquiferi (o consentono loro di spostarsi da un acquifero all'altro). Per aiutare a preservare la qualità delle acque sotterranee, i pozzi dovrebbero essere costruiti con adeguati sigilli sanitari e vitoni protettivi.

La gestione della qualità delle acque sotterranee richiede il monitoraggio attraverso la raccolta e l'analisi di campioni d'acqua per periodi di tempo prolungati e in modo regolare. La capacità istituzionale, tecnica e in materia di risorse economiche è necessaria per raccogliere dati di alta qualità con una frequenza sufficiente e per valutare le tendenze della qualità dell'acqua al fine di identificare i rischi e determinare l'effetto delle attività di gestione.

L'inquinamento diffuso e la natura distribuita delle potenziali fonti di contaminanti sono condizioni che rendono realmente difficile il controllo della qualità delle acque sotterranee. Questo perché ci sono molti percorsi attraverso i quali i contaminanti possono raggiungere l'acquifero, e monitorare e identificare tutti i percorsi è impossibile. La contaminazione di un acquifero viene spesso rilevata solo molto tempo dopo essersi verificata. Infatti, in molti luoghi del mondo le fonti di inquinamento non esistono più, ma le tracce di contaminazione sono ancora presenti o appena rilevabili (ad esempio nitrati, liquidi densi in fase non acquosa, DNAPL nell'acronimo inglese, ecc.).

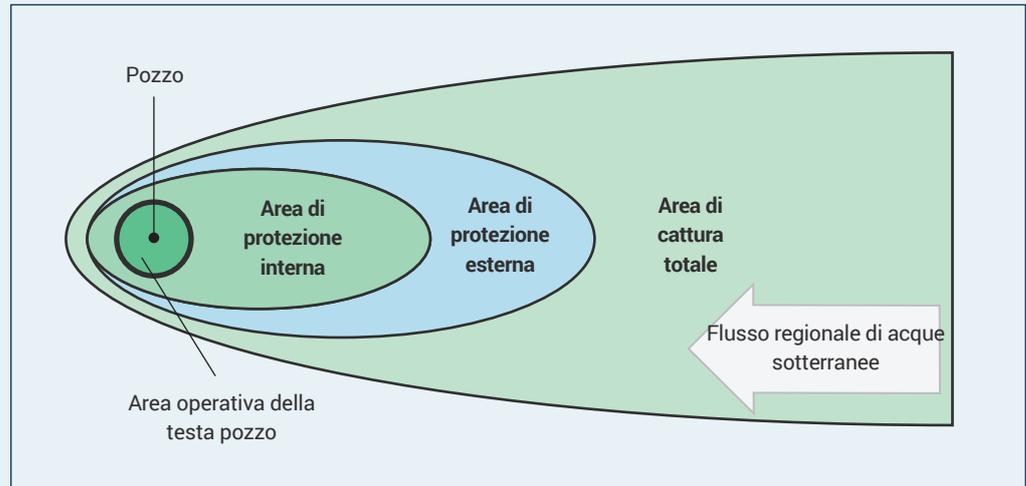
11.5 **Approcci** **di gestione** **integrata**

Non esistono acquiferi isolati: essi, infatti, sono strettamente interconnessi con le acque superficiali, la terra, il clima e gli ecosistemi. Questi collegamenti, così come le connessioni con la società, la cultura e l'economia, devono essere conosciuti bene per gestire le acque sotterranee in maniera efficace. In molti paesi, le acque sotterranee e superficiali sono gestite separatamente. Inoltre, le politiche e le attività al di fuori del settore idrico (in particolare quelle relative alla terra, all'alimentazione e all'agricoltura, all'estrazione mineraria e al settore energetico) influiscono sulla domanda di acque superficiali e sotterranee, sull'infiltrazione e sulla ricarica, e possono addirittura costituire fonti di contaminazione.

Riquadro 11.2 Aree di protezione delle risorse idriche sotterranee

Le aree di protezione delle risorse idriche sotterranee sono utilizzate per prevenire l'inquinamento delle fonti di acqua potabile e delle acque sotterranee utilizzate per scopi agricoli. Questa soluzione in genere prevede una distanza minima tra le aree di smaltimento dei rifiuti o altre aree inquinanti identificate e le aree delle riserve di acque sotterranee protette. Rischio, vulnerabilità e importanti caratteristiche idrogeologiche e idrogeochimiche condizionano la progettazione delle aree di protezione. Ci sono molti esempi di questa soluzione gestionale a livello globale, come in Australia, Canada, Europa, India e Stati Uniti.

Rappresentazione schematica delle aree di protezione intorno a una fonte di acqua



Fonte: sulla base di Nel et al. (2009) e Rajkumar e Xu (2011).

Un'attenzione particolare deve essere dedicata alla gestione congiunta di acque superficiali e sotterranee, come pure alla possibilità di sviluppare soluzioni "basate sulla natura" (Van der Gun, 2020). Comprendere le interazioni tra acque superficiali e sotterranee, quantificando i flussi di scambio, le direzioni e le interazioni relative alla qualità dell'acqua, è fondamentale per garantire che la gestione raggiunga i risultati attesi. La gestione del territorio e degli ecosistemi, coordinata con la gestione delle acque sotterranee, può migliorare lo stoccaggio e la ritenzione, proteggere la qualità dell'acqua o, al contrario, influire negativamente sugli acquiferi. Di conseguenza, diventano essenziali la coerenza delle politiche e l'attenzione da destinare all'intera gamma di utenti, usi e impatti.

A causa della natura in evoluzione della gestione delle acque sotterranee, esistono più istituzioni, politiche e strumenti di gestione che agiscono contemporaneamente e che possono dunque generare inefficienze e contraddizioni. La pianificazione della gestione delle acque sotterranee (vedere capitolo 10) fornisce un meccanismo per il coordinamento tra i numerosi attori coinvolti nella gestione di questa risorsa e per l'integrazione e la sinergia tra le molteplici politiche e strumenti utilizzati (Foster et al., 2015; Gage e Milman, 2020).

Un approccio integrato tra gestione ambientale, gestione dell'uso del suolo e gestione di spazi e risorse del sottosuolo costituisce un elemento essenziale nel quadro di una gestione integrata. La ricarica gestita degli acquiferi (nell'acronimo inglese MAR) è un esempio di approccio integrato (vedere riquadro 7.1).

● ● ●
Un approccio integrato tra gestione ambientale, gestione dell'uso del suolo e gestione di spazi e risorse del sottosuolo costituisce un elemento essenziale nel quadro di una gestione integrata

La MAR, chiamata anche ricarica artificiale, comporta l'uso di infrastrutture ingegnerizzate o naturali per aumentare le infiltrazioni in un sistema acquifero (Dillon et al., 2019). Tecnologie come la MAR sono importanti per proteggere le risorse idriche dalla siccità e dall'intrusione di acqua salata, nonché per aumentare le riserve idriche, migliorare la qualità dell'acqua, mantenere la struttura e la qualità dell'acquifero e sostenere gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee. La MAR costituisce un approccio che permette di integrare le dighe di stoccaggio con la ricarica degli acquiferi, rappresentando così un'alternativa economica in termini di costi che riduce al minimo l'evaporazione e gli impatti ambientali. La MAR può essere utilizzata anche per la conservazione di acque meteoriche urbane (riquadro 11.3) e di acque riciclate non utilizzate, che possono essere messe a disposizione per un utilizzo produttivo a seconda delle necessità. A livello di bacino idrografico, la MAR può essere utilizzata per preservare i flussi ecologici e salvaguardarne la disponibilità, regolando il deflusso idrico in un corso d'acqua (Page et al., 2018).

La ricarica artificiale è costituita da due componenti principali: i) l'intercettazione dell'acqua (solitamente di superficie) e ii) i meccanismi per consentire a questa acqua intercettata di entrare nell'acquifero. Qualsiasi forma particolare di ricarica artificiale combina entrambe le componenti; in alcuni casi, le soluzioni tecniche sono incentrate sulla prima componente (come dighe di ricarica, prese d'acqua da un fiume), in altri casi sulla seconda (come tecniche di spandimento con stagni o bacini, pozzi di iniezione), e occasionalmente su un mix fra le due (come diffusione del canale, infiltrazione dalle sponde indotta). Una corretta progettazione del sistema MAR così come un funzionamento e una manutenzione adeguati possono migliorare le prestazioni qualitative e quantitative del sistema.

Sono disponibili numerosi esempi di buone pratiche di applicazione della MAR. Il portale MAR¹, accessibile tramite il Global Groundwater Information System dell'International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC), contiene informazioni dettagliate su circa 1.200 siti MAR di circa 50 paesi in tutto il mondo, nonché mappe di idoneità MAR regionali. Dillon et al. (2019) presentano una panoramica sulla diffusione delle tecniche MAR nel mondo negli ultimi 60 anni.

11.6 Conclusioni

La gestione delle acque sotterranee presenta molte sfide e opportunità. Per una gestione efficace delle acque sotterranee, devono essere prese in considerazione le relazioni tra questa risorsa, la società (compresa la crescita della popolazione), l'ambiente e gli ecosistemi e, in ultimo, i cambiamenti climatici. Le politiche e le attività esterne al settore idrico influenzano la domanda di acque sotterranee, così come l'infiltrazione e la ricarica di queste ultime, e possono anche costituire fonti di contaminazione. La gestione delle acque sotterranee ha anche implicazioni per la società, l'ambiente e l'economia.

Storicamente, non si è quasi mai pensato a una gestione delle acque sotterranee se non quando il problema ha assunto dimensioni tali da diventare visibile. La decisione è stata quindi di tipo reattivo. Sono necessari approcci proattivi alla gestione delle acque sotterranee per prevenire il degrado e l'esaurimento della risorsa.

La gestione delle acque sotterranee deve tenere in considerazione le molteplici dimensioni dei sistemi idrici sotterranei contemporaneamente: stoccaggio, flussi, qualità e comportamento delle acque sotterranee, nonché struttura e proprietà dell'acquifero stesso.

La gestione delle acque sotterranee deve avvenire a tutti i livelli. Sebbene i governi e le loro agenzie incaricate possano assumere un ruolo guida nel coordinamento generale per quanto riguarda la gestione di questa risorsa, anche comunità, aziende idriche, industrie, agricoltori e altri individui possono avere un ruolo importante.

¹ Per ulteriori informazioni, vedere ggis.un-igrac.org/view/marportal.

Riquadro 11.3 Raccolta delle acque piovane per lo stoccaggio e il risanamento dell'acquifero: esempio di progetto MAR nell'area di Adelaide (Australia)

Ad Adelaide (Australia), il deflusso delle acque piovane viene raccolto in piccole zone umide artificiali per fini di conservazione e trattamento, favorendo la biodiversità e dando vita a un'area ricreativa. Durante i vari giorni di ritenzione nelle zone umide, gli inquinanti e gli agenti patogeni vengono rimossi. Successivamente, l'acqua viene immessa nel bacino Terziario profondo per mezzo di pozzi per l'Aquifer Storage and Recovery (ASR). L'acqua piovana raccolta tramite l'ASR contribuisce per circa il 10% all'approvvigionamento idrico di Adelaide. Nel 2017 erano operativi 58 schemi MAR, con una capacità di ricarica combinata di oltre 20 milioni di metri cubi all'anno.

I regimi MAR hanno costi bassi e riscuotono un largo consenso da parte della popolazione.

Dati e conoscenze limitati rimangono ostacoli chiave per una gestione delle acque sotterranee basata sull'evidenza. Perciò il monitoraggio, le valutazioni e le indagini sono fondamentali (vedere capitolo 9).

Capacità e competenze (sia in termini di personale che di conoscenze) sono necessarie per una gestione efficace e ben riuscita delle acque sotterranee. Educare le giovani generazioni e garantire che le loro voci siano ascoltate è vitale per un futuro successo della gestione di questa risorsa a livello globale. Sono necessari programmi di scienza e istruzione in materia di acque sotterranee con risorse adeguate per formare personale in ruoli manageriali, mentre la governance e la politica devono creare un ambiente favorevole per la gestione. Lo sviluppo e il sostegno della gestione delle acque sotterranee richiede un sostanziale apporto finanziario e politico da parte dei governi, nonché autorizzazioni adeguate per le agenzie che svolgeranno un ruolo di spicco in questo contesto.

Capitolo 12

Acquiferi transfrontalieri

UNESCO-IHP

Raya Marina Stephan, Alice Aureli e Aurélien Dumont

UNECE

Annukka Lipponen* e Sarah Tiefenauer-Linardon

Con il contributo di Christina Fraser (IGRAC), Alfonso Rivera e Shammy Puri (IAH), Stefano Burchi (AIDA), Gabriel Eckstein (Texas A&M University School of Law), Christian Brethaut (Università di Ginevra), Ziad Khayat (UNESCWA), Karen Villholth (IWMI), Lesha Witmer (WfWP), Renee Martin-Nagle (Environmental Law Intitute), Anita Milman (Università del Massachusetts), Francesco Sindico (Università di Strathclyde), e James Dalton (IUCN)

* Presso il Ministero finlandese dell'agricoltura e delle foreste al momento della pubblicazione



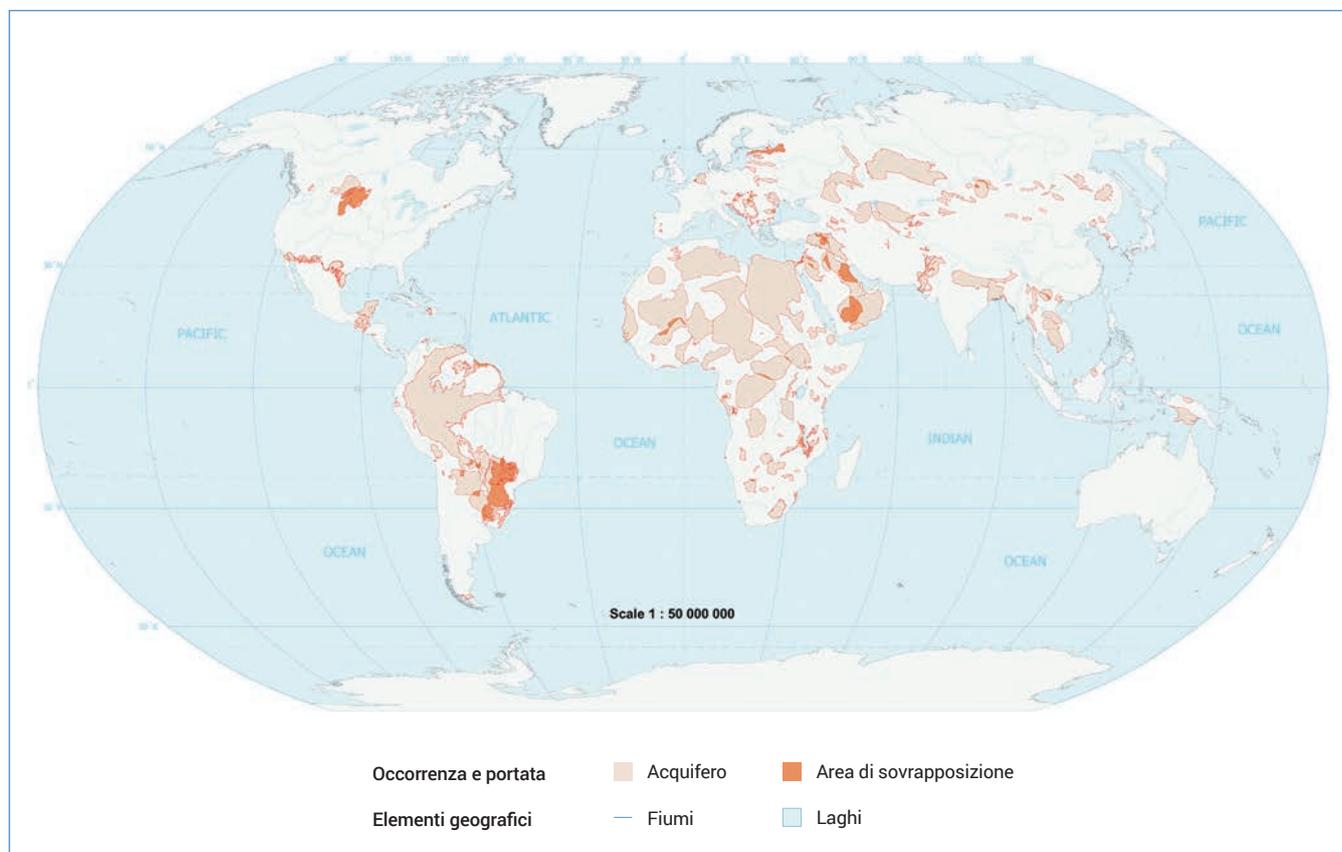
12.1 Introduzione

Questo capitolo fornisce una panoramica dello stato degli acquiferi transfrontalieri e della cooperazione in materia di acque sotterranee condivise, evidenziando la complessità della valutazione, dell'analisi e della gestione di questi sistemi. Riassume le principali sfide relative agli acquiferi transfrontalieri e la necessità di una gestione più completa e integrata, che includa aspetti tecnici, legali e organizzativi, nonché formazione e cooperazione.

12.2 Conoscenza attuale degli acquiferi transfrontalieri

Quando un acquifero o un sistema acquifero è indicato come "transfrontaliero", significa che le sue varie parti sono situate in Stati diversi (UNGA, 2009). Gli acquiferi transfrontalieri comprendono un flusso naturale di acque sotterranee che, seguendo un percorso naturale, attraversa un confine internazionale, in modo tale che l'acqua possa fluire da un lato all'altro del confine (UNESCO, 2001). Il primo inventario globale degli acquiferi transfrontalieri è stato realizzato dall'UNESCO-IHP che, nel 2000, ha lanciato l'iniziativa International Shared Aquifer Resource Management (ISARM) (riquadro 12.1). La distribuzione globale attualmente nota degli acquiferi transfrontalieri è mostrata nella figura 12.1, basata su un inventario di progetti e iniziative su scala globale e regionale¹. La prima analisi di base di 300 dei più grandi acquiferi transfrontalieri del mondo condotta a livello globale è stata avviata dal Programma di valutazione delle acque transfrontaliere (UNESCO-IHP/UNEP, 2016). Questo programma descriveva gli acquiferi transfrontalieri in termini di dipendenza umana dalla risorsa. Ha elaborato scenari basati sulle pressioni demografiche e identificato future zone calde nell'Africa subsahariana, in parte dell'Asia orientale e dell'America centrale. La delimitazione esatta di un gran numero di acquiferi transfrontalieri non è stata ancora raggiunta, in particolare a livello locale, in cui essi possono essere piccoli ma vitali per la sussistenza delle comunità (Eckstein, 2013; Fraser et al., 2020).

Figura 12.1 Gli acquiferi transfrontalieri del mondo



Fonte: IGRAC (2021). © IGRAC, dicembre 2021. Attribution Non-Commercial Share Alike (CC BY-NC-SA 4.0).

¹ Questa comprende anche la prima e la seconda valutazione UNECE degli acquiferi transfrontalieri situati nell'Europa sudorientale, nel Caucaso e nell'Asia centrale (UNECE, 2007, 2011) e l'inventario delle risorse idriche condivise dell'Asia occidentale (UNESCWA/BGR, 2013).

Riquadro 12.1 Iniziativa International Shared Aquifer Resource Management (ISARM)

Nel 2000, il Programma idrologico intergovernativo dell'UNESCO (nell'acronimo inglese UNESCO-IHP) ha lanciato l'iniziativa ISARM (Risoluzione XIV-12; UNESCO-IHP, 2000), volta a redigere un inventario globale degli acquiferi transfrontalieri, nonché a sviluppare e sostenere la cooperazione tra i paesi attraverso il miglioramento della conoscenza in relazione agli acquiferi transfrontalieri. Grazie a questa iniziativa sono stati svolti studi regionali volti a delineare gli acquiferi, nonché a valutare e analizzare aspetti idrogeologici, giuridici, socioeconomici, istituzionali e ambientali. Gli inventari regionali hanno rivelato che alcuni degli acquiferi più importanti in Africa e in America Latina sono transfrontalieri (UNESCO-IHP, 2009).

L'iniziativa ha contribuito alla costruzione di una base di conoscenze e ha fornito una guida per la cooperazione dei paesi sugli acquiferi transfrontalieri. Sostanziali progressi sono stati registrati anche per quanto riguarda la componente giuridica. L'UNESCO-IHP ha assistito la Commissione di diritto internazionale delle Nazioni Unite (nell'acronimo inglese ILC) nella preparazione di una serie di 19 bozze di articoli sul diritto in materia di acquiferi transfrontalieri che sono allegati e citati in diverse risoluzioni dell'Assemblea generale delle Nazioni Unite.

Come risultato delle attività di ISARM, sono stati avviati progetti in diverse regioni per aiutare i paesi a stabilire meccanismi di cooperazione per la gestione degli acquiferi transfrontalieri.

12.3 Sfide specifiche per gli acquiferi transfrontalieri

In generale, i fattori di stress sono gli stessi per gli acquiferi nazionali e transfrontalieri, ma i confini politici aggiungono criticità specifiche. Le misure prese in merito a detti acquiferi in un paese possono avere un impatto significativo al di là del confine. La figura 12.2 illustra un semplice esempio degli effetti che l'estrazione di acque sotterranee da un acquifero transfrontaliero può avere oltre il confine. Un'intensa attività di estrazione su un lato del confine può causare l'abbassamento della falda acquifera sull'altro lato; a volte può anche provocare l'inversione dei flussi delle acque sotterranee al di qua e al di là del confine. L'estrazione delle acque sotterranee può anche avere un impatto significativo sui sistemi collegati idraulicamente all'acquifero transfrontaliero, ad esempio riducendo i flussi dei fiumi o interessando gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee. Inoltre, la contaminazione di un acquifero su un lato del confine può espandersi oltre i confini politici, causando impatti potenzialmente gravi per gli Stati vicini e complicando gli sforzi di bonifica.

L'estensione degli acquiferi transfrontalieri può variare notevolmente, da pochi chilometri quadrati a oltre un milione, e da decine di metri di profondità a diverse migliaia. Ciò solleva la questione se la gestione e il monitoraggio congiunti debbano necessariamente comprendere l'estensione totale di un acquifero transfrontaliero, o concentrarsi piuttosto su aree specifiche, in corrispondenza dei punti in cui è più probabile che si verifichino impatti che interessano più paesi. Un possibile approccio a questo dilemma si trova nell'accordo sull'acquifero Saq-Disi (condiviso tra Giordania e Arabia Saudita), che prevede l'istituzione di aree di protezione attorno al confine.

La gestione congiunta degli acquiferi transfrontalieri può essere complessa a causa degli ostacoli che si presentano nei paesi che condividono gli acquiferi, che possono includere (AFD, 2011):

- Mancanza di percezione della natura transfrontaliera dell'acquifero tra le autorità, i gestori e le popolazioni interessate;
- Assenza di un quadro giuridico e istituzionale specifico di riferimento;
- Differenti approcci di gestione e governance e priorità diverse;
- Mancanza di volontà politica per la cooperazione e per l'adozione di un sistema di gestione a lungo termine;
- Tensioni tra paesi, ripartizione diseguale delle risorse, diminuzione della quantità e della qualità delle acque sotterranee e capacità diverse di gestione nei contesti sociali, economici e ambientali dei paesi che condividono gli acquiferi;



L'inclusione di considerazioni di genere nel quadro della cooperazione transfrontaliera può creare opportunità per il consolidamento di una gestione delle acque sotterranee transfrontaliere più equa dal punto di vista sociale

- Conoscenza frammentaria degli acquiferi;
- Dati precisi non condivisi (vedere tabella 12.1);
- Finanziamenti insufficienti;
- Mancanza di conoscenze e capacità per l'elaborazione e la messa in pratica di studi tecnico-scientifici e per la creazione di istituzioni formali;
- Lingue, orientamenti culturali o politici differenti.

Inoltre, l'inclusione di considerazioni di genere nel quadro della cooperazione transfrontaliera può creare opportunità per il consolidamento di una gestione delle acque sotterranee transfrontaliere più equa dal punto di vista sociale.

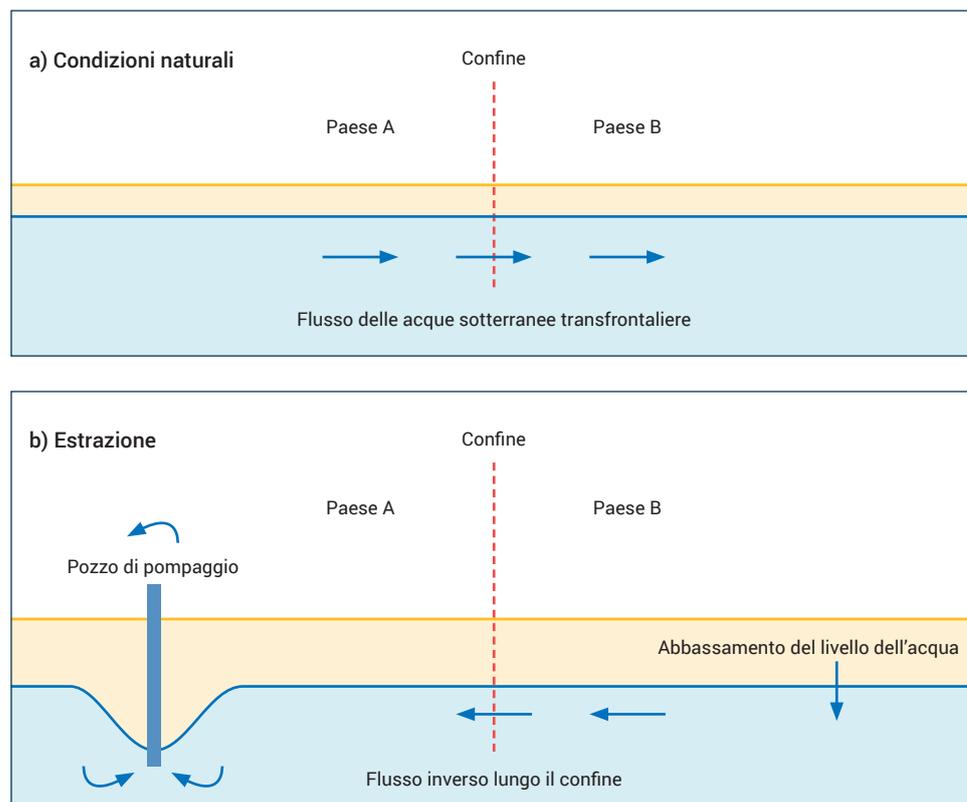
I programmi di formazione e sviluppo delle competenze sono fondamentali per consentire al personale tecnico e amministrativo di comprendere le diverse criticità da considerare nella valutazione e nella gestione degli acquiferi transfrontalieri (Nijsten et al., 2016).

La condivisione dei dati rappresenta un primo passo verso la cooperazione tra paesi limitrofi, in quanto essenziale per raggiungere un accordo al fine di definire un modello concettuale affidabile dell'acquifero, che a sua volta è un prerequisito per la formulazione dei piani di gestione.

La gestione sostenibile dei sistemi acquiferi transfrontalieri può essere ostacolata in mancanza di dati o se gli Stati non sono disposti a condividerli. La gestione degli acquiferi transfrontalieri risente spesso della mancanza di un impegno istituzionale o dell'insufficienza di risorse per raccogliere le informazioni necessarie (AFD, 2011). Sebbene i dati globali possano mettere in evidenza le tendenze generali, è necessaria una comprensione più dettagliata a livello regionale e locale per consentire un processo decisionale congiunto e la gestione transfrontaliera degli acquiferi (IGRAC/UNESCO-IHP, 2015; Fraser et al., 2018; Rivera, 2015, 2020).

Figura 12.2

Il pompaggio di acque sotterranee da un pozzo nel paese A può avere un impatto sulla parte dell'acquifero situato nel paese B



Fonte: adattato da Fraser et al. (2018, fig. 6, pag. 45).

La gestione e la condivisione dei dati relativi agli acquiferi transfrontalieri possono essere supportate sia da sistemi di gestione delle informazioni, sia da piattaforme basate sul web per la raccolta, l'archiviazione, l'elaborazione, la visualizzazione e la condivisione dei dati (IGRAC/UNESCO-IHP, 2015), come il sistema informativo globale sulle acque sotterranee (nell'acronimo inglese GGIS) (IGRAC, s.d). I progressi nel campo delle tecnologie, dalle osservazioni spaziali alla telemetria, uniti alla *citizen science*, possono alleggerire il pesante onere e il costo della raccolta dei dati (vedere capitolo 9).

I requisiti in materia di dati e informazioni suggeriti nella tabella 12.1 si applicano sia agli acquiferi nazionali che a quelli transfrontalieri, ad eccezione delle componenti giuridiche e istituzionali. I dati che sono stati raccolti e analizzati a livello nazionale, utilizzando metodi e approcci diversi, potrebbero dover essere armonizzati prima di poter essere utilizzati oltre i confini del paese.

Un elemento essenziale nella gestione degli acquiferi transfrontalieri è il monitoraggio, che dovrebbe includere l'osservazione delle serie temporali dei livelli e della qualità delle acque sotterranee (IGRAC/UNESCO-IHP, 2015). Affinché il monitoraggio sia efficace, i dati dovrebbero essere coordinati, armonizzati e condivisi tra gli Stati in cui si trova l'acquifero (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019b). Considerando la complessità della valutazione e del monitoraggio degli acquiferi transfrontalieri, sono state definite delle linee guida per assistere gli Stati coinvolti e le parti interessate nel processo (vedere Task Force UNECE sul monitoraggio e la valutazione, 2000; AFD, 2011; IGRAC/UNESCO-IHP, 2015).

Tabella 12.1
Dati e informazioni necessari per valutare e gestire un acquifero transfrontaliero

Idrogeologia, geomorfologia e clima	
Geometria degli acquiferi (confine, tipologia, profondità del livello piezometrico, spessore dell'acquifero)	Clima (temperatura, precipitazioni, evapotraspirazione)
Individuazione della ricarica e del deflusso dell'acquifero	Uso della terra
Litologia e tipo di suolo	Topografia
Porosità, permeabilità	Rete di acque superficiali (fiumi, laghi)
Trammissività e conduttività verticale	Volume delle acque sotterranee
Livelli delle acque sotterranee e direzione del flusso	Sistemi di flusso delle acque sotterranee
Ambiente	
Qualità delle acque sotterranee	Ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee
Fonti di inquinamento	Controllo dei rifiuti solidi e delle acque reflue
Dimensione socioeconomica	
Popolazione	Tassi di estrazione/densità dei pozzi
Campi di rifugiati/sfollati interni	Dipendenza degli esseri umani dalle acque sotterranee
Uso delle acque sotterranee	Utilizzo delle acque superficiali
Norme e istituzioni	
Quadro normativo transfrontaliero	Quadro normativo nazionale
Quadro istituzionale transfrontaliero	Quadro istituzionale nazionale
Proprietà delle acque sotterranee	Pianificazione e protezione delle risorse idriche
Controllo dell'estrazione delle acque sotterranee	Controllo dell'inquinamento delle acque sotterranee
Applicazione delle norme	Enti del servizio idrico

Fonti: sulla base di Rivera (2015, 2020) e IGRAC/UNESCO-IHP (2015).

12.4 Aspetti giuridici e istituzionali internazionali

Il diritto internazionale in materia di risorse idriche è stato inizialmente elaborato per le acque superficiali. Considerazioni sulle acque sotterranee si sono cominciate a formulare progressivamente, grazie alla crescente consapevolezza dell'importanza degli acquiferi transfrontalieri. La Convenzione sulla protezione e l'uso dei corsi d'acqua transfrontalieri e dei laghi internazionali² (Convenzione sulle acque; UNECE, 1992) prende in considerazione tutti i corpi idrici superficiali o sotterranei che toccano o attraversano i confini tra due o più Stati, o sono ubicati in corrispondenza di essi; inoltre, ha fornito la base per vari accordi bilaterali e multilaterali (UNECE, 2013). La Convenzione sul diritto relativo all'utilizzo dei corsi d'acqua internazionali per scopi diversi dalla navigazione (Nazioni Unite, 1997)³ considera le acque sotterranee transfrontaliere solo quando sono collegate a un sistema idrico superficiale internazionale e ne condividono la foce; non considera invece le caratteristiche specifiche delle diverse tipologie di acquiferi.

Per colmare questa lacuna, la Commissione del diritto internazionale delle Nazioni Unite (nell'acronimo inglese ILC) ha preparato uno strumento di diritto internazionale composto da 19 bozze di articoli che contemplano tutte le caratteristiche degli acquiferi (Stephan, 2011). Tali articoli sono affrontati in cinque risoluzioni non vincolanti dell'Assemblea generale delle Nazioni Unite⁴.

L'Assemblea generale delle Nazioni Unite porta la bozza degli articoli all'attenzione dei governi, come «una guida affinché possano prendere decisioni e accordi bilaterali o regionali adeguati per la gestione appropriata degli acquiferi transfrontalieri» (Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2013, 2016, 2019). Tutti i tipi di acquiferi transfrontalieri, compresi quelli non ricaricabili, rientrano nell'ambito di applicazione di queste bozze di articoli. Tali articoli considerano anche l'uso del suolo, poiché si applicano ad «altre attività che hanno o possono avere un impatto» (art. 1§b). Le bozze degli articoli hanno adattato i principi fondamentali del diritto internazionale in materia di risorse idriche alle caratteristiche degli acquiferi. Queste includono considerazioni relative agli acquiferi non ricaricabili, alla gestione e monitoraggio delle acque sotterranee, alla protezione degli ecosistemi e alle zone di ricarica e deflusso. Nel 2012, la riunione delle Parti della Convenzione sulle acque ha adottato le disposizioni modello sulle acque sotterranee transfrontaliere (UNECE, 2014), che si basano sulla bozza degli articoli, con l'obiettivo di fornire una guida per l'attuazione dei principi della Convenzione sulle acque sotterranee transfrontaliere, e migliorare la cooperazione sulla gestione integrata delle acque superficiali transfrontaliere e dei corpi idrici sotterranei.

12.5 Cooperazione in materia di acquiferi transfrontalieri

Le relazioni transfrontaliere possono essere caratterizzate da diversi gradi di cooperazione.

Esistono pochissimi accordi interstatali in materia di acquiferi transfrontalieri in vigore nel mondo (Burchi, 2018b), e riguardano: l'acquifero ginevrino (Francia, Svizzera), il sistema acquifero del Sahara settentrionale (Algeria, Libia, Tunisia), il sistema acquifero di arenaria nubiana (Ciad, Egitto, Libia, Sudan), l'acquifero guaraní (Argentina, Brasile, Paraguay, Uruguay), l'acquifero Saq-Disi (Giordania, Arabia Saudita) e l'acquifero di Calcaires Carbonifères (Belgio, Francia).

Spesso gli acquiferi transfrontalieri vengono considerati nell'ambito di accordi di cooperazione in materia di risorse idriche più ampi, elaborati per i bacini idrografici transfrontalieri. Tali accordi più ampi possono essere applicati alle acque sotterranee transfrontaliere in misura diversa; inoltre, non considerano necessariamente l'acquifero nella

² In vigore dal 1996, 44 Membri.

³ In vigore dal 2014, 37 Membri.

⁴ Tali risoluzioni sono 63/124, 66/104, 68/118, 71/150 e 74/193 (UNGA, 2009, 2012, 2013, 2016, 2019). Le bozze degli articoli sono allegate alle risoluzioni 63/124 e 68/118.

sua estensione complessiva, poiché l'estensione dei bacini idrografici superficiali spesso non corrisponde a quelle degli acquiferi sottostanti.

Esistono iniziative di cooperazione scientifica in tutto il mondo nell'ambito di progetti tecnici sugli acquiferi transfrontalieri. Tali iniziative possono avere diversi obiettivi: alcune mirano alla valutazione scientifica congiunta, mentre altre affrontano la gestione di questioni specifiche. In questi casi, il ruolo delle organizzazioni e dei donatori regionali e internazionali può essere decisivo, in particolare quando i paesi coinvolti presentano delle lacune per quanto riguarda capacità, conoscenza, informazione e fiducia reciproca. Lo studio dell'acquifero carsico dinarico, uno dei più grandi sistemi acquiferi carsici del mondo, è un esempio di collaborazione tra paesi. Il progetto ha facilitato l'instaurazione di una cooperazione tecnica che ha portato alla definizione di un impegno politico per adottare misure di gestione (riquadro.12.2).

Finora, le esperienze volte a creare e rendere operative istituzioni pienamente competenti e funzionali nell'ambito della governance degli acquiferi transfrontalieri sono rimaste limitate. Sono stati compiuti recenti progressi nella creazione di meccanismi di consultazione all'interno delle istituzioni esistenti, come per l'acquifero di Stampriet (riquadro 12.3) condiviso da Botswana, Namibia e Sudafrica. L'esperienza suggerisce che accordi istituzionali formali in favore della cooperazione transfrontaliera possono essere raggiunti quando i paesi confinanti si impegnano prima di tutto nel gettare le basi per rafforzare la fiducia reciproca attraverso l'identificazione congiunta di bisogni e interessi ed effettuando e condividendo valutazioni multidisciplinari dell'acquifero.

Attraverso l'inclusione del traguardo 6.5 degli Obiettivi di sviluppo sostenibile, l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile ha aumentato la consapevolezza della necessità di «attuare la gestione integrata delle risorse idriche [nell'acronimo inglese IWRM] a tutti i livelli, e a seconda dei casi anche attraverso la cooperazione transfrontaliera». L'indicatore 6.5.2 degli Obiettivi di sviluppo sostenibile monitora i progressi verso il conseguimento del traguardo 6.5, valutando la percentuale di area del bacino transfrontaliero (fiumi, laghi e acquiferi) coperta da un accordo operativo per la cooperazione in materia di risorse idriche. L'indicatore consente di stabilire se gli acquiferi transfrontalieri sono coperti da accordi specifici o se sono invece considerati solo nel contesto di disposizioni relative al bacino idrografico o di accordi bilaterali più ampi.

La mancanza di conoscenza delle acque sotterranee si è rivelata il limite principale nel calcolo del valore complessivo dell'indicatore 6.5.2 degli Obiettivi di sviluppo sostenibile. Nel 2020, 35 dei paesi che hanno presentato resoconti in questo senso non sono stati in grado di determinare un valore per tale indicatore in relazione ai loro acquiferi, e la mancanza di dati sulle acque sotterranee potrebbe aver dissuaso altri dal presentare relazioni nazionali in proposito. A loro volta, gli sforzi dei paesi per raccogliere informazioni e dati di base sugli acquiferi (ad esempio l'estensione degli acquiferi transfrontalieri) può essere un primo

Riquadro 12.2 Protezione e utilizzo del sistema acquifero transfrontaliero del Carso dinarico (DIKTAS)

Alcuni dei paesi che condividono il sistema acquifero transfrontaliero del Carso dinarico (Albania, Bosnia-Erzegovina, Croazia e Montenegro) hanno avviato nel 2010 una collaborazione per facilitare la gestione equa e sostenibile dell'acquifero e per proteggere gli ecosistemi unici che dipendono da esso. Il progetto ha migliorato la conoscenza degli acquiferi carsici nell'area e il coordinamento tra paesi, agenzie e altre parti interessate. Essendo il primo grande progetto a livello globale ad affrontare il tema degli acquiferi carsici transfrontalieri, è stato utilizzato come un'opportunità per introdurre nuovi principi di gestione integrata in relazione agli acquiferi carsici condivisi di tale entità. Il progetto ha individuato azioni di gestione regionale, come misure in materia di politica e legislazione, monitoraggio e gestione dei dati, formazione e sensibilizzazione, nonché gli investimenti necessari per la sua realizzazione.

Ulteriori informazioni sul progetto DIKTAS sono disponibili al seguente indirizzo: <http://diktas.iwlearn.org/>

Riquadro 12.3 Meccanismo di cooperazione multi-paese di Stampriet: il primo meccanismo congiunto in materia di acquiferi transfrontalieri inserito nell'organizzazione di un bacino idrografico

Il sistema acquifero transfrontaliero di Stampriet (nell'acronimo inglese STAS) si trova interamente all'interno del bacino del fiume Orange-Senqu, in un'area condivisa da Botswana, Namibia e Sudafrica. Nel 2017, i paesi che condividono lo STAS hanno deciso di istituire un meccanismo di cooperazione multi-paese, inserito nella struttura della Orange-Senqu River Commission (ORASECOM), che prevede la gestione congiunta delle acque superficiali e sotterranee. Il meccanismo ha posto le basi al fine di istituzionalizzare la cooperazione per la governance e la gestione congiunta dell'acquifero. L'acquifero di Stampriet è il primo esempio di istituzione di un meccanismo di coordinamento degli acquiferi transfrontalieri nella regione dell'Africa meridionale.

importante passo verso la consapevolezza e il progresso della cooperazione in materia di acquiferi transfrontalieri. Il numero di paesi che hanno fornito informazioni sugli accordi di cooperazione relativi agli acquiferi nei loro rapporti è aumentato dal 2017 al 2020 (tabella 12.2). Preparando i rapporti nazionali attraverso un processo consultivo, a livello nazionale o in collaborazione con gli Stati vicini, i paesi hanno potuto definire nuovi programmi di cooperazione come quello relativo all'acquifero condiviso da Senegal e Mauritania (riquadro 12.4).

12.6 Benefici derivanti dalla cooperazione in materia di acquiferi transfrontalieri

La cooperazione transfrontaliera sugli acquiferi ha il potenziale per generare benefici significativi. Ad esempio, nel caso dell'acquifero del Sahara settentrionale, i paesi che condividono tale acquifero perseguono benefici che includono aspetti sociali, economici e ambientali (UNECE, 2015). Un esempio in questo senso potrebbe essere la resilienza delle comunità locali, che viene accresciuta attraverso lo sviluppo di competenze e l'apprendimento reciproco al fine di risolvere le sfide comuni relative alla scarsità e alla sicurezza delle risorse naturali, alla sicurezza alimentare e ai cambiamenti climatici; un altro esempio può essere costituito dalla conservazione degli ecosistemi delle zone umide sensibili (Meccanismo di consultazione NWSAS, 2020).

La condivisione dei benefici derivanti dall'uso delle acque sotterranee rappresenta un aspetto importante dell'idrodiplomazia (Grech-Madin et al., 2018), un processo che può essere applicato in diverse fasi delle interazioni tra gli attori (dalla prevenzione delle tensioni al contributo alla risoluzione effettiva dei conflitti) e a livelli di intervento differenti (dalle dinamiche di potere locali a quelle internazionali) (Vij et al., 2020; Bréthaut et al., 2019).

Tabella 12.2 Sintesi dei risultati del monitoraggio globale dell'indicatore 6.5.2, 2017 e 2020

	2017	2020
Paesi che condividono bacini transfrontalieri (fiumi, laghi e acquiferi)	153	153
Paesi che hanno riportato dati e informazioni sullo status dei loro accordi in materia di cooperazione transfrontaliera	107	129
Paesi che hanno riferito che il 100% dei loro bacini transfrontalieri erano coperti da accordi operativi in materia di cooperazione transfrontaliera	17	24
Paesi che hanno riferito di avere messo in atto almeno un accordo operativo in materia di cooperazione relativa a un acquifero specifico	5	12
Paesi che riferiscono che almeno un acquifero è coperto da un accordo operativo relativo a un bacino idrografico o da un accordo bilaterale	36	47

Fonte: sulla base di UNECE/UNESCO (2021).

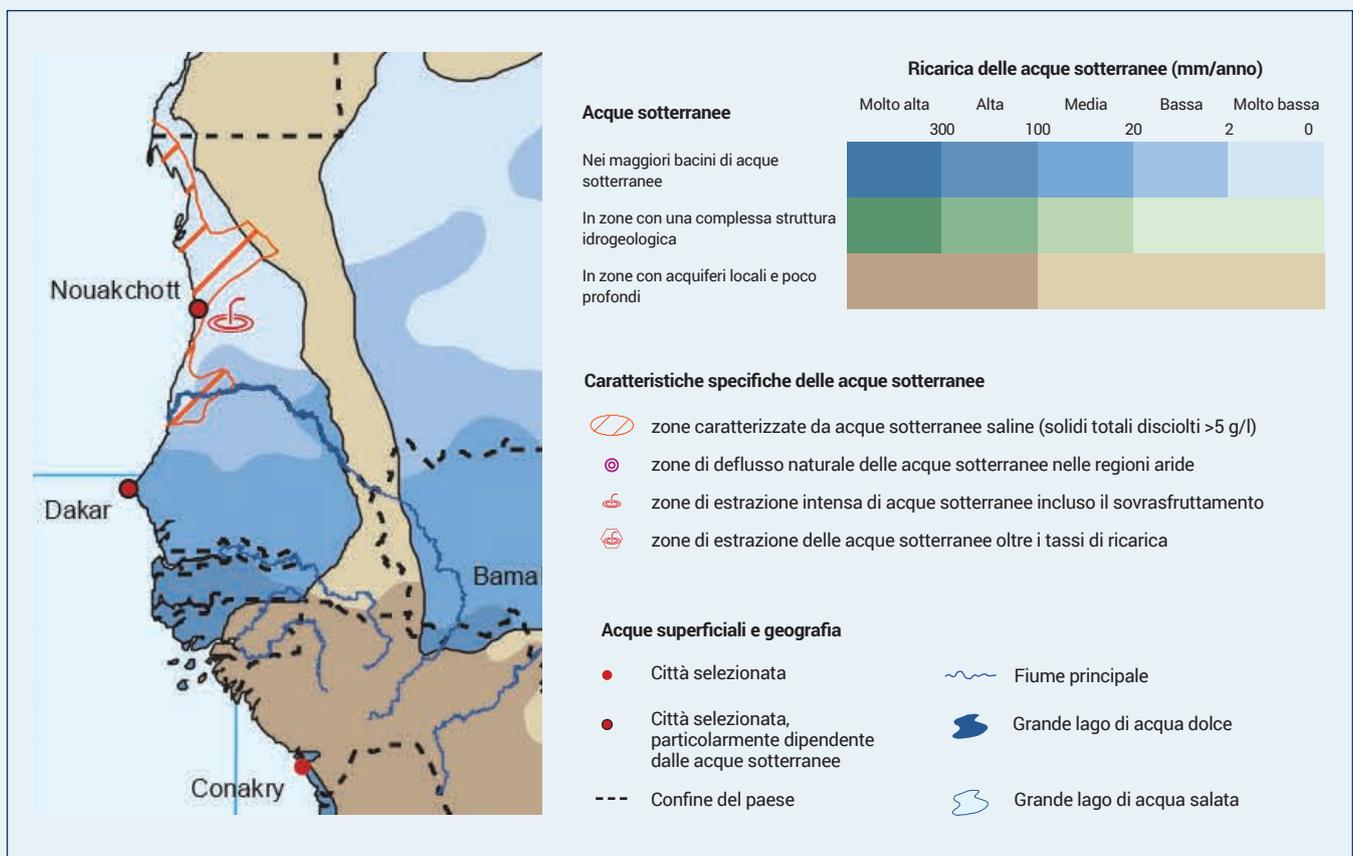
Riquadro 12.4 Verso la cooperazione nel bacino dell'acquifero senegalese-mauritano per promuovere la pace e la resilienza tra gli Stati

Il bacino dell'acquifero senegalese-mauritano (nell'acronimo inglese SMAB), condiviso tra Gambia, Guinea-Bissau, Mauritania e Senegal, si estende per circa 1.300 chilometri ed è ubicato sotto una superficie di 331.450 chilometri quadrati con una popolazione stimata di oltre 15 milioni di abitanti. La risorsa è sotto pressione a causa della crescente domanda di acqua dovuta alla crescita demografica, alla rapida urbanizzazione e allo sviluppo dell'agricoltura per l'autosufficienza alimentare.

Il primo monitoraggio sui progressi relativi all'indicatore 6.5.2 degli Obiettivi di sviluppo sostenibile ha evidenziato che questo acquifero transfrontaliero non è ancora oggetto di accordi o disposizioni bilaterali o multilaterali per la cooperazione. Gli Stati rivieraschi hanno avviato un dialogo al fine di dare inizio a una collaborazione transfrontaliera. Un gruppo di lavoro regionale per la cooperazione transfrontaliera sullo SMAB, che comprende gli Stati e le organizzazioni di bacino transfrontaliero esistenti, vale a dire l'organizzazione per lo sviluppo del fiume Gambia e l'autorità del bacino idrografico del fiume Senegal, è stata istituita nel maggio 2020. Il gruppo regionale ha lo scopo di fornire supporto e consulenza per stabilire una cooperazione transfrontaliera finalizzata a una gestione sostenibile congiunta dello SMAB. Tale gruppo regionale è impegnato nell'ideazione del progetto e nel piano d'azione per adempiere a questo obiettivo, con il supporto del Geneva Water Hub, del Segretariato della Convenzione sulla protezione e l'uso dei corsi d'acqua transfrontalieri e dei laghi internazionali istituito dalla Commissione economica delle Nazioni Unite per l'Europa (nell'acronimo inglese UNECE) e dell'International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC).

I ministri di Gambia, Guinea-Bissau, Mauritania e Senegal hanno firmato, nel settembre 2021, una dichiarazione sull'avvio di una cooperazione transfrontaliera istituzionale in relazione allo SMAB. I ministri hanno inoltre convenuto di avviare i colloqui sulla creazione di un meccanismo per garantire la gestione congiunta e sostenibile delle loro risorse idriche sotterranee condivise.

L'esperienza della cooperazione nello SMAB fornisce un esempio di come il processo di rendicontazione degli Obiettivi di sviluppo sostenibile possa aiutare a identificare le lacune nel contesto della cooperazione e portare a miglioramenti concreti.



Fonte: BGR/UNESCO (2008).

Capitolo 13

Finanziamenti per la sostenibilità

Banca mondiale

Diego Rodriguez e Anna Delgado

Con il contributo di Francois Bertone, Lucy Lytton e Stuti Sharma (Banca mondiale),
Lauren Missaire (CDP) e Alvar Closas (Dipartimento di pianificazione, industria e ambiente del
Nuovo Galles del Sud, Australia)



13.1 Finanziamenti attualmente disponibili e finanziamenti necessari



Le risorse idriche sotterranee sono essenziali per costruire la sicurezza e la prosperità socioeconomica a lungo termine, così come la resilienza dei sistemi di approvvigionamento idrico

13.1.1 L'attuale livello di investimento è insufficiente per raggiungere i traguardi dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6

Secondo le stime, gli investimenti necessari per il raggiungimento dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 variano principalmente in ragione della mancanza di dati precisi e affidabili; ciononostante, esiste un chiaro accordo (Hutton e Varughese, 2016; WWC, 2018; OCSE, 2019b) sul fatto che gli attuali livelli di investimento sono insufficienti per conseguire gli obiettivi concordati. Le proiezioni relative alla necessità di finanziamento globale in infrastrutture idrauliche che permettano di raggiungere l'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 variano da 6.700 miliardi di dollari americani entro il 2030 a 22.600 miliardi entro il 2050 (OCSE, 2018). Le stime evidenziano inoltre come governi e agenzie per lo sviluppo dispongano di fondi insufficienti per soddisfare questi requisiti (Kolker et al., 2016). Gli aiuti pubblici allo sviluppo (APS) per progetti relativi all'acqua sono pari a circa 13 miliardi di dollari all'anno, un importo di gran lunga inferiore rispetto al necessario (Nazioni Unite, 2018); inoltre, circa l'80% dei paesi che presentano rapporti alle Nazioni Unite in merito all'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 denuncia come i livelli di finanziamento siano insufficienti per soddisfare gli obiettivi nazionali in materia di risorse idriche (Nazioni Unite, 2018). È necessario migliorare l'uso delle risorse pubbliche e degli aiuti esistenti per catalizzare soluzioni di finanziamento misto e attivare forme aggiuntive e innovative di finanza nazionale e internazionale. Inoltre, è necessario esercitare la giusta pressione sul settore privato e sulle istituzioni finanziarie private mondiali per colmare il divario nei finanziamenti.

13.1.2 I dati sugli investimenti attualmente disponibili e necessari nel contesto della valorizzazione, della governance e della gestione delle acque sotterranee sono insufficienti

A differenza di quanto avviene nel contesto delle acque superficiali, dove i costi del capitale vengono di norma coperti dal settore pubblico, le infrastrutture per lo sfruttamento delle acque sotterranee vengono quasi sempre finanziate dagli utenti finali, ad esempio da imprese, famiglie, agricoltori o comunità. L'accesso alla risorsa da parte degli utenti avviene in modo diretto o decentralizzato. Ciò rende difficile monitorare i flussi di finanziamento e raccogliere dati sugli investimenti effettuati nell'ambito delle acque sotterranee. L'utente finale investe il proprio capitale privato per far fronte ai costi di accesso alle acque sotterranee; di norma si tratta di costi fissi per la costruzione di pozzi e di costi variabili per gli impianti di pompaggio (Banca mondiale, 2010; Groundwater Governance Project, 2016a). Alcuni paesi hanno introdotto un'imposta sui prelievi idrici o un onere specifico per le acque sotterranee, ma queste imposte e oneri solo raramente riflettono i costi effettivi e il valore della risorsa.

Inoltre, mentre esistono alcuni dati sui bilanci pubblici generali relativi alla gestione delle risorse idriche (OCSE, 2012b), i dati specifici sulle acque sotterranee sono molto limitati. Il *Summary Progress Update 2021: SDG 6* (Rapporto delle Nazioni Unite di sintesi sui progressi relativi all'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6) affronta il tema della carenza di dati¹ e di iniziative di monitoraggio in relazione alle acque sotterranee, sottolineando come quello del monitoraggio di tali risorse sia un "campo trascurato" (Nazioni Unite, 2018; UN-Water, 2021). Le acque sotterranee sono infatti poco considerate anche nel contesto del monitoraggio relativo al raggiungimento dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 (UN-Water, 2018). Diversi rapporti (Groundwater Governance Project, 2016a, 2016b; OCSE, 2017b) concordano sul fatto che la carenza di finanziamenti è un ostacolo per la governance e la gestione delle acque sotterranee nella maggior parte dei paesi, compresi quelli in cui dalle acque sotterranee proviene una quota significativa della fornitura idrica per uso domestico, irriguo e industriale (in particolare estrattivo).

¹ Solo 14 paesi hanno riportato dati sulla quantità di corpi idrici sotterranei e 25 paesi hanno riportato dati sulla qualità delle acque sotterranee (su 193 Stati membri ai quali è stato richiesto di fornire dati) (Nazioni Unite, 2018). Nella versione aggiornata, solo 52 paesi hanno alcune informazioni sulle acque sotterranee, il che è un problema in quanto dalle acque sotterranee proviene spesso la quota maggiore di acqua dolce di un paese (UN-Water, 2021).

13.2 Istituzione di fonti di finanziamento permanenti, strutturali e adeguate



Lo stoccaggio e il prelievo delle acque sotterranee potrebbero figurare fra le fonti di approvvigionamento idrico urbano al fine di garantire maggiore sicurezza e flessibilità in caso di variazioni stagionali delle risorse

13.3 Utilizzare al meglio i finanziamenti attualmente disponibili

13.2.1 È necessario stabilire budget governativi adeguati per l'approvvigionamento idrico, la governance e la gestione delle acque sotterranee.

Le risorse idriche sotterranee sono essenziali per costruire la sicurezza e la prosperità socioeconomica a lungo termine, così come la resilienza dei sistemi di approvvigionamento idrico. Tuttavia, nella maggior parte dei paesi, i fondi destinati al monitoraggio, alla gestione e alla conservazione di queste preziose risorse sono molto limitati. Date le caratteristiche dell'uso delle acque sotterranee e le difficoltà poste dalla misurazione e dal monitoraggio, molte iniziative incentrate sullo Stato falliscono o sono inefficaci ai fini dell'utilizzo, della governance e della gestione delle acque sotterranee (Garduño e Foster, 2010; Foster et al., 2010c; Banca mondiale, 2010, 2018a; Molle e Closas, 2019). Pertanto, è necessario che i governi valutino e si facciano carico del proprio ruolo di potenziali promotori dell'uso sostenibile delle acque sotterranee in base alle condizioni locali (Garduño e Foster, 2010; Foster et al., 2010a; Banca mondiale, 2010; Groundwater Governance Project, 2016a, 2016b; OCSE, 2017b), attingendo a risorse finanziarie limitate in modo più efficiente attraverso iniziative su misura. I bilanci pubblici dovrebbero quantomeno finanziare il monitoraggio delle acque sotterranee – qualità e quantità, e relativi costi operativi e di manutenzione – facendo leva sugli investimenti privati per finanziare l'avvio di iniziative di esplorazione e di gestione.

13.2.2 Un finanziamento adeguato richiede il riconoscimento del valore e del potenziale delle acque sotterranee.

Le risorse idriche sotterranee tendono a essere sottovalutate, soprattutto laddove il loro sfruttamento non è controllato (Garduño e Foster, 2010) e la loro qualità non è protetta. Le risorse idriche sotterranee vengono utilizzate per molteplici scopi e forniscono una serie di benefici (vedere la figura 13.1). È inoltre possibile integrare meglio l'utilizzo e la gestione sostenibile delle acque sotterranee nel quadro di altri progetti e iniziative del settore idrico. A titolo di esempio, lo stoccaggio e il prelievo delle acque sotterranee potrebbero figurare fra le fonti di approvvigionamento idrico urbano al fine di garantire maggiore sicurezza e flessibilità in caso di variazioni stagionali delle risorse (Banca mondiale, 2018a). Tutto ciò consentirebbe di ottimizzare i finanziamenti esistenti provenienti dagli APS, dalle tariffe relative a fornitura idrica e a servizi igienico-sanitari, come pure dal partenariato pubblico-privato. È inoltre necessario analizzare e comprendere meglio i costi e i benefici dell'azione (e dell'inazione²) relativa alla gestione delle acque sotterranee in termini economici, tenendo conto dei costi opportunità, delle esternalità e dei benefici sociali e ambientali. Ciò potrebbe aiutare a mettere le questioni relative alle acque sotterranee in primo piano nell'agenda politica per garantire l'impegno in questo senso e sfruttare diversi tipi di finanziamento (Groundwater Governance Project, 2016c).

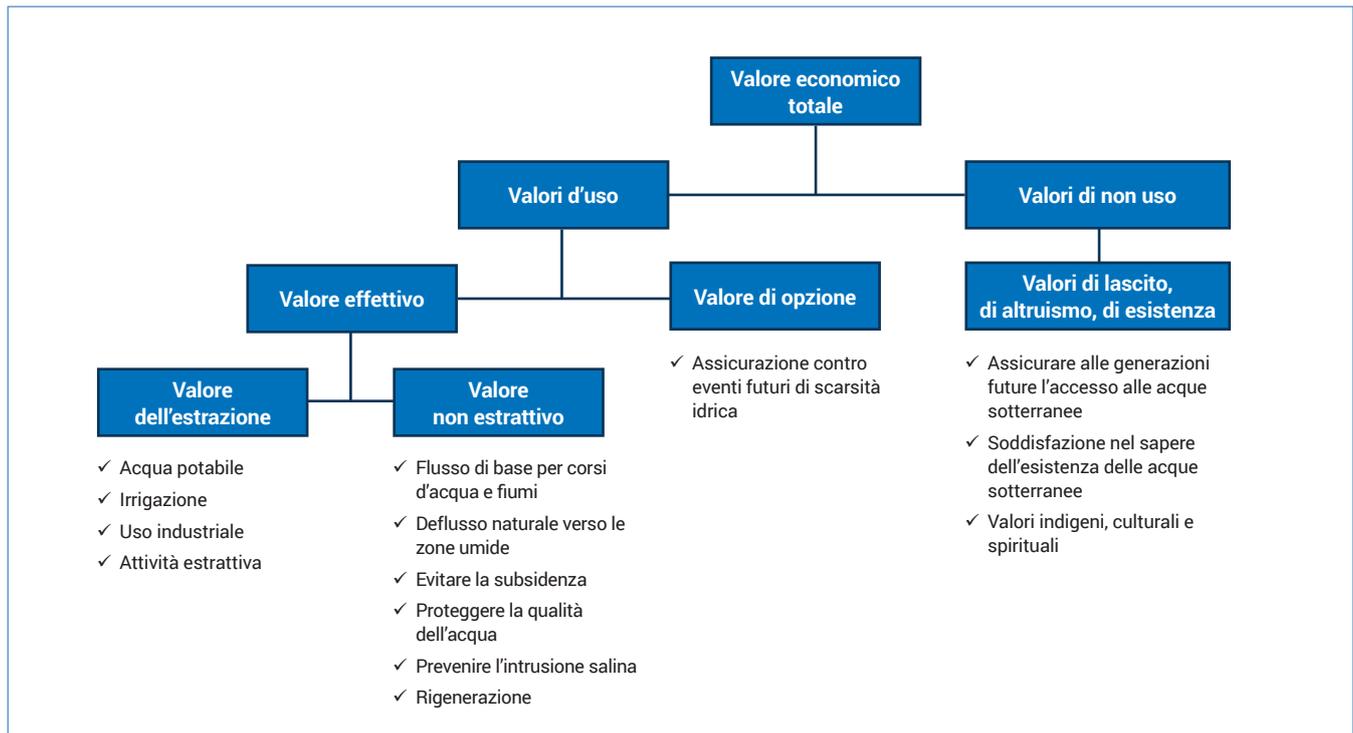
13.3.1 Verso modi più efficienti e innovativi di utilizzare le risorse finanziarie

Visto che dalle acque sotterranee proviene una quota considerevole del volume totale di acqua distribuito attraverso le infrastrutture di approvvigionamento idrico, la tariffa idrica, qualora venisse opportunamente fissata, potrebbe fornire finanziamenti per la gestione delle suddette risorse (ad esempio vedere il caso della Danimarca; OCSE, 2017b). Tuttavia, anche il recupero dei costi è complicato nella maggior parte dei paesi (Nazioni Unite, 2021), e i costi per la gestione delle risorse idriche raramente si riflettono nella bolletta dell'acqua. Pertanto, la gestione delle risorse idriche è finanziata da un mix di fonti che comprendono imposte sul prelievo, canoni o tariffe, oneri sugli scarichi e sull'inquinamento, tasse, bilanci pubblici ed APS (OCSE, 2012b, 2017b; AEA, 2013).

Le imposte e/o le tariffe per l'estrazione delle acque sotterranee possono essere riscosse su base volumetrica e devono internalizzare il valore economico e sociale di questa risorsa,

² Anche il rischio controfattuale di non finanziare le infrastrutture idrauliche dovrebbe rientrare nel processo di valutazione e decisione relativo alla "bancabilità" (WWC, 2018).

Figura 13.1 Valore economico totale delle acque sotterranee



Fonte: OCSE (2017b, fig. 1.2, pag. 20). Tutti i diritti riservati.

utilizzando i principi del “chi inquina paga”, del “paga il beneficiario”, e dell’equità e della coerenza delle politiche (OCSE, 2012b). Gli oneri possono anche essere basati su altri parametri che fungono da riferimento per il prelievo di acqua (area del terreno, capacità della pompa, ecc. – Molle e Berkoff, 2007; AEA, 2013). Le entrate raccolte dovrebbero essere destinate al finanziamento di iniziative relative alle acque sotterranee, come il monitoraggio delle infrastrutture e i relativi costi operativi e di manutenzione (riquadro 13.1). Esistono esempi di paesi con tariffe per le acque sotterranee e/o imposte sull'estrazione di queste, come alcuni Stati membri dell'Unione europea (ARCADIS, 2012; AEA, 2013), nonché Australia (Goulburn-Murray Water, 2013), Cina, Israele, Giordania, Perù (riquadro 13.1) e Stati Uniti d'America (OCSE, 2010a). Tuttavia, in molti paesi non è stato stabilito un prezzo o una tariffa per le acque sotterranee, soprattutto a fini irrigui, in parte a causa delle difficoltà di monitoraggio e applicazione e dell'importanza politica del settore agricolo (che si traduce anche nella mancanza di volontà politica). Molle e Berkoff (2007), ARCADIS (2012) e Berbel et.al. (2019) discutono ulteriormente dei prezzi dell'acqua per l'irrigazione (dando spazio anche alle acque sotterranee).

Date le sfide di cui sopra, i finanziamenti tradizionali (tariffe, tasse e canoni) devono essere utilizzati in modo più efficiente e innovativo, in combinazione con altri strumenti, disposizioni e meccanismi al fine di attrarre altre fonti di finanziamento e finanziare con successo l'utilizzo, la governance e la gestione sostenibili delle acque sotterranee. Le nuove tecnologie, come il telerilevamento, i pagamenti tramite dispositivi portatili, le carte magnetiche, il pompaggio a energia solare e i contatori prepagati (riquadro 13.2), possono aiutare a migliorare l'efficienza dell'erogazione dei servizi, regolare l'uso delle acque sotterranee, riscuotere i ricavi da tali tariffe o canoni, e raggiungere le comunità locali (Groundwater Governance Project, 2016a). Imposte e canoni in altri settori, come quello agricolo, possono anche aiutare a finanziare iniziative relative alle acque sotterranee volte a ridurre potenziali esternalità negative. Ad esempio, lo Stato del Montana (Stati Uniti) addebita tasse di registrazione di pesticidi e fertilizzanti e utilizza i proventi per finanziare iniziative di monitoraggio della qualità delle acque sotterranee (OCSE, 2010b). La finanza

Riquadro 13.1 Combinare tasse e imposte per migliorare la gestione, il monitoraggio e l'utilizzo delle acque sotterranee in Perù

L'Autorità nazionale per l'acqua (ANA nell'acronimo spagnolo) riscuote le tasse relative all'estrazione e all'inquinamento dell'acqua (per le acque superficiali e sotterranee) per finanziare la gestione delle risorse idriche. Questa tassa è uno strumento innovativo in quanto considera il rischio di scarsità nella sua struttura, si basa sul principio "chi inquina paga" e viene addebitata in base al volume utilizzato. A proposito delle acque sotterranee, gli acquiferi del Perù sono classificati in tre categorie: sottosfruttati, in equilibrio e sovrasfruttati, a seconda del rapporto fra domanda e disponibilità nel contesto di ciascun acquifero. Sebbene ci siano difficoltà con il monitoraggio e l'applicazione di tali tasse sulle acque sotterranee, ANA sta apportando miglioramenti e attualmente il 23% delle entrate totali raccolte da ANA proviene dalle imposte sulle acque sotterranee. Inoltre, nel 2018 il Perù ha introdotto una tariffa per i servizi di gestione e monitoraggio delle acque sotterranee per utenti non operanti nel settore agricolo che dispongono di pozzi propri. Questa tariffa deve essere addebitata dal servizio idrico (EPS nell'acronimo spagnolo) ed è collegata a un piano di investimenti per monitorare, ripristinare, preservare e gestire gli acquiferi.

Fonte: OCSE (2021) e SUNASS (2017).

mista (OCSE, 2019b; vedere anche riquadro 13.2), gli accordi di partenariato pubblico-privato (nell'acronimo inglese PPP) e altri meccanismi di incentivazione (riquadro 13.3) possono essere utilizzati per fare leva sul settore privato, insieme ai bilanci pubblici e agli APS al fine di finanziare iniziative relative alle acque sotterranee. Ad esempio, in base a un accordo di PPP, la città di San Luis Potosí in Messico è stata in grado di proteggere il proprio acquifero trattando e utilizzando le acque reflue anziché le acque sotterranee per usi non potabili, come quelli agricoli e industriali (Banca mondiale, 2018b). Anche i fondi di altri settori, come quelli dell'energia e del clima, possono essere utilizzati per finanziare iniziative dedicate alle acque sotterranee, come quelle che prevedono l'utilizzo di pompe a energia solare (riquadro 13.2) o di linee elettriche specifiche per sostituire i pozzi alimentati a diesel, per migliorare l'affidabilità, per ridurre i costi e per regolare maggiormente i consumi nelle aree minacciate dall'esaurimento della suddetta risorsa (Groundwater Governance Project, 2016c).

13.3.2 Individuazione, valutazione e riassegnazione dei sussidi per lo sviluppo sostenibile e la gestione delle acque sotterranee

In numerosi paesi, alcune attività oggetto di finanziamento pubblico promosse in altri settori contribuiscono all'abbassamento delle falde acquifere o all'inquinamento delle acque sotterranee (Garduño e Foster, 2010; Groundwater Governance Project, 2016a; OCSE, 2017b; Banca mondiale, 2018). Molte volte i sussidi vengono progettati ed erogati senza considerare il loro impatto sulla sostenibilità delle acque sotterranee e su coloro che dipendono da esse. A titolo di esempio, i sussidi assegnati al settore energetico che incentivano un prelievo eccessivo delle acque sotterranee riducendo il costo dell'elettricità, oppure quelli destinati alle imprese agricole che incoraggiano le colture richiedenti maggiori quantitativi di acqua, possono condurre a risultati sfavorevoli (Garduño e Foster, 2010; Groundwater Governance Project, 2016a). Inoltre, questo tipo di sussidio può essere di natura regressiva, a vantaggio degli utenti più abbienti (Venkanta, 2021; Banca mondiale, 2018a). Allo stesso modo, i sussidi per i fertilizzanti portano a un uso eccessivo delle acque sotterranee e alla loro contaminazione con nitrati. Pertanto, è necessario garantire la coerenza nelle politiche dei diversi settori. La riforma di questi sussidi potenzialmente dannosi e il loro adattamento alle politiche relative alle acque sotterranee dovrebbero costituire parte integrante del programma di finanziamento del settore idrico (Garduño e Foster, 2010; OCSE, 2018). Se sottratte a tale uso controproducente, queste risorse

● ● ●
La riforma dei sussidi potenzialmente dannosi e il loro adattamento alle politiche relative alle acque sotterranee dovrebbero costituire parte integrante del programma di finanziamento del settore idrico

Riquadro 13.2 Combinare la finanza mista con le tecnologie emergenti per fornire acqua sicura ai villaggi rurali della Tanzania

Il Governo della Tanzania, con il sostegno della Banca mondiale, sta aiutando le associazioni per l'acqua e l'approvvigionamento idrico delle comunità (nell'acronimo inglese COWSO) a sostituire le vecchie e inefficienti pompe diesel con pompe a energia solare fotovoltaica in circa 150 villaggi della Tanzania rurale. Le pompe diesel sono costose da utilizzare e mantenere, il che ha un impatto diretto sul prezzo dell'acqua, con ulteriori preoccupazioni relative all'equità e alla sostenibilità. Tuttavia, le COWSO non hanno il capitale necessario per investire in pompe a energia solare, né hanno l'affidabilità creditizia per raccogliere capitali sul mercato finanziario. La Global Partnership for Results-Based Approaches (GPRBA) della Banca mondiale fornisce il 60% del capitale come risorse di sovvenzione, mentre il resto è finanziato attraverso un prestito quadriennale della TIB Development Bank. Inoltre, le COWSO utilizzano un'innovativa piattaforma di pagamento *mobile-banking* e contatori prepagati per organizzare al meglio la riscossione dei ricavi dalla vendita di acqua e per gestire i pagamenti dei prestiti. I vantaggi di questa iniziativa sono diversi, tra cui:

- Lo sfruttamento del potere dei finanziamenti del settore privato attraverso combinazioni miste di sovvenzioni e prestiti;
- L'ottenimento di benefici ambientali ed economici dalla transizione dalle pompe diesel alle pompe a energia solare, sotto forma di minori emissioni di CO₂ e di elevati risparmi sui costi durante tutto il ciclo di vita; e
- L'inaugurazione da parte di ogni COWSO, attraverso la partecipazione al progetto e il rimborso del prestito di investimento, di una storia creditizia di 3-5 anni: un passo importante verso il merito creditizio.

Fonte: Welsien (2016).

finanziarie potrebbero essere utilizzate per proteggere e ripristinare le acque sotterranee e per sovvenzionare coloro che ne hanno più bisogno (gruppi vulnerabili e svantaggiati). Invece di sovvenzionare gli agricoltori con bassi costi energetici che causerebbero un'eccessiva estrazione di questa risorsa, i governi potrebbero finanziare programmi di efficienza idrica³ o iniziative guidate dalla comunità⁴ per monitorare e valorizzare le acque sotterranee (Banca mondiale, 2020), o sostenere il pagamento dei servizi ambientali necessari per ricaricare gli acquiferi (riquadro 13.3), assicurandosi che i gruppi più vulnerabili raccolgano i benefici di tutti questi interventi (Groundwater Governance Project, 2016a). Ad esempio, gli agricoltori poveri possono diventare i beneficiari dei pagamenti per gli ecosistemi e le iniziative guidate dalla comunità o dalle donne possono garantire che i gruppi vulnerabili siano inclusi e rappresentati.

13.3.3. Il ruolo delle istituzioni finanziarie globali

Il maggiore impatto delle istituzioni finanziarie sul settore idrico deriva dalle attività che consentono attraverso i loro prestiti, investimenti e assicurazioni (CDP, 2020). Banche, azionisti, assicuratori e le istituzioni finanziarie consentono attualmente alle imprese di intraprendere attività economiche che in molti casi sono profondamente dannose per

³ «Gli studi esistenti rivelano che le misure tecniche volte all'ammodernamento del sistema di irrigazione, seguite dall'applicazione della tariffazione volumetrica, presentano potenzialità per il risparmio idrico molto più elevate rispetto ai semplici aumenti di prezzo» (AEA, 2013, pag. 12).

⁴ Data la loro natura decentralizzata, una forte partecipazione della comunità è fondamentale per garantire lo sviluppo sostenibile, il monitoraggio e la gestione delle risorse idriche sotterranee. Il coinvolgimento delle comunità aiuta a garantire che i gruppi più vulnerabili abbiano accesso ai benefici (Garduño e Foster, 2010; Banca mondiale, 2010, 2018a).

l'ambiente. Il settore dei servizi finanziari ha un ruolo particolarmente importante da svolgere nella transizione verso un futuro sicuro in relazione alle risorse idriche (Hogeboom et al., 2018; WWF, 2019). Le istituzioni finanziarie globali possono offrire incentivi unici e sistemici affinché questo cambiamento possa avvenire, garantendo che le loro pratiche di investimento, assicurazione, prestito, rating e sottoscrizione spingano gli utenti a utilizzare l'acqua con saggezza, a non inquinarla e a promuoverne il riutilizzo (WWF, 2019; CDP, 2020).

Riquadro 13.3 Pagamento per servizi ecosistemici con finanziamento del settore privato: il caso di Kumamoto (Giappone)

Le acque sotterranee nella regione di Kumamoto forniscono il 100% dell'acqua potabile all'omonima città e costituiscono anche una fonte d'acqua essenziale per l'agricoltura e l'industria. Le risaie irrigate della zona sono la principale fonte di ricarica delle acque sotterranee. Tuttavia, una politica di restrizione dell'offerta da parte del governo limita la quantità di superficie coltivata a riso che, insieme all'urbanizzazione, ha costretto alcuni agricoltori ad abbandonare le loro risaie, diminuendo i livelli delle falde acquifere. Una consociata di Sony Semiconductors, che dipende dalla disponibilità di acque sotterranee per le sue attività, ha stipulato un accordo con gli agricoltori per prevenire l'esaurimento delle acque sotterranee e garantire le loro attività commerciali in futuro, diventando allo stesso tempo *water-neutral*. Attraverso uno schema di pagamento per i servizi ecosistemici (nell'acronimo inglese PES), l'azienda ha pagato gli agricoltori per ricaricare le acque sotterranee attraverso l'allagamento volontario delle vecchie risaie che erano state riconvertite in campi coltivati con altre colture. Il programma PES ha avuto un tale successo che alla fine il governo della città, il Consiglio per l'uso sostenibile dell'acqua in agricoltura e altre industrie si sono uniti, supportandolo e addirittura ampliandolo. Questo caso mostra come il sistema PES possa aiutare a intervenire sull'esaurimento delle acque sotterranee rovesciando la situazione, e dimostra l'importanza della coerenza tra le politiche agricole, urbane e idriche.

Fonte: OCSE (2017b).

Capitolo 14

Conclusioni

WWAP

Richard Connor, Jac van der Gun e Michela Miletto



14.1 Prospettive e sfide

● ● ●
*Le acque
sotterranee, così
come i benefici
diretti e indiretti
che offrono, sono
rimaste troppo
spesso nascoste
o ignorate; di
conseguenza,
numerosi acquiferi
non sono stati
adeguatamente
protetti*

14.1.1 Molteplici ruoli e sfaccettature delle acque sotterranee

La società umana attualmente fa molto affidamento sulle acque sotterranee per soddisfare i propri bisogni domestici, nonché per produrre cibo e sostenere le economie. Dalle acque sotterranee proviene all'incirca il 25% di tutti i prelievi di acqua dolce della Terra, ma la quota relativa al consumo di risorse idriche è di gran lunga superiore; lo stesso vale per i benefici di carattere generale che le acque sotterranee sono in grado di fornire. Queste svolgono un ruolo essenziale nel processo di adattamento e di mitigazione dei cambiamenti climatici, e contribuiscono al raggiungimento dei traguardi previsti dagli Obiettivi di sviluppo sostenibile (Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 e altri relativi all'acqua). Tuttavia, le stesse acque sotterranee, così come i benefici diretti e indiretti che offrono, sono rimaste troppo spesso nascoste o ignorate; di conseguenza, numerosi acquiferi non sono stati adeguatamente protetti.

Le acque sotterranee costituiscono la principale fonte di approvvigionamento idrico per molte grandi città del mondo, nonché per paesi e per numerose città di minori dimensioni. Questa dipendenza si intensificherà, in particolare nelle aree in rapida urbanizzazione dei paesi in via di sviluppo e delle economie emergenti. Le acque sotterranee sono anche la principale fonte di acqua per uso domestico nella maggior parte delle aree rurali.

L'agricoltura dipende sempre di più dalle acque sotterranee per l'irrigazione e l'allevamento, soprattutto nelle zone aride e semiaride. Questa risorsa costituisce una fonte d'acqua particolarmente importante per i piccoli agricoltori, e svolgerà un ruolo essenziale nel soddisfare la crescente domanda di cibo.

Le acque sotterranee supportano tutti i tipi di industrie manifatturiere, specialmente nei contesti in cui l'acqua superficiale è limitata o quando è richiesta acqua di alta qualità. Tale risorsa viene utilizzata per molteplici scopi, dall'acqua di processo alla pulizia e al raffreddamento. Le industrie con attività significative che interessano il sottosuolo, come il settore petrolifero, quello del gas e quello minerario, interagiscono intensamente con l'ambiente, gli acquiferi e le acque sotterranee, e quindi hanno una responsabilità particolare nella protezione di queste risorse.

Le relazioni tra ecosistemi e acque sotterranee sono una strada a doppio senso. L'ecologia di molti fiumi, laghi e zone umide è supportata direttamente dagli acquiferi. Questi ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (nell'acronimo inglese GDE), che includono anche una grande quantità di biomi terrestri, sono fondamentali per il mantenimento della biodiversità. Molti GDE servono a migliorare la ricarica degli acquiferi – da qui la relazione bidirezionale – in modo tale che la protezione dell'ecosistema (e in particolare delle zone umide) sia buona per le acque sotterranee e viceversa. In tutto il mondo, i GDE si stanno degradando a causa del prelievo intensivo di acque sotterranee e della mancanza di misure di protezione di questa risorsa.

Essendo i volumi di acque sotterranee particolarmente elevati (essi rappresentano infatti il 99% di tutta l'acqua allo stato liquido immagazzinata sulla Terra), gli acquiferi possono fungere da cuscinetto in tempi di scarsità idrica, consentendo alle persone di sopravvivere anche nei climi più aridi. A seconda della profondità e del contesto geologico (come le zone insature sovrastanti e gli strati confinanti), gli acquiferi risultano relativamente ben protetti dai fattori di inquinamento che interessano la superficie. Tuttavia, una volta che le acque sotterranee vengono contaminate, rimediare al problema può risultare estremamente costoso e difficoltoso.

14.1.2 Confronto tra la fornitura erogata dai servizi di pubblica utilità e l'autoapprovvigionamento

L'approvvigionamento idrico urbano è comunemente affidato ai servizi di pubblica utilità. Mentre i gestori dei servizi idrici su scala locale faticano a tenere il passo con la crescente

domanda di acqua, l'autoapprovvigionamento alimentato dalle acque sotterranee, spesso autofinanziato, fornisce una soluzione rapida nelle zone urbane dove questa opzione è tecnicamente realizzabile per coloro che possono permetterselo. Le acque sotterranee sono anche molto adatte per l'autoapprovvigionamento rurale e spesso rappresentano il modo più conveniente per fornire un approvvigionamento idrico sicuro ai villaggi.

Nel settore agricolo, le acque sotterranee sono più comunemente prelevate dagli stessi agricoltori. L'autoapprovvigionamento è anche la modalità di rifornimento predominante tra i maggiori utilizzatori di acque sotterranee per usi industriali. Tuttavia, il processo decisionale relativo a questa pratica è estremamente frammentato e dunque difficile da monitorare.

14.1.3 Acque sotterranee ed energia

In media, l'estrazione delle acque sotterranee richiede indubbiamente molta più energia rispetto alla deviazione delle acque superficiali, perché la risorsa deve essere portata in superficie. D'altra parte, di solito richiede molta meno energia per il trasporto (a causa di una minore distanza media tra il sito di prelievo e l'utente) e per il trattamento (poiché la qualità dell'acqua è generalmente molto migliore). I sistemi di irrigazione a energia solare, economicamente convenienti e adottati su larga scala per supportare le attività agricole, possono fornire una fonte di energia rinnovabile a basse emissioni di carbonio per pompare le acque sotterranee.

Le acque sotterranee vengono utilizzate anche per la produzione di energia elettrica, nonché per quella di energia primaria, come avviene nei settori del carbone, del petrolio e del gas. Dati specifici su questo tipo di utilizzo della risorsa sono facilmente disponibili solo per pochi paesi industrializzati. L'estrazione delle risorse del sottosuolo e i vari metodi utilizzati a questo scopo possono rappresentare una grave minaccia per la qualità delle acque sotterranee.

14.1.4 Cambiamenti climatici e altre sfide

Sebbene si trovino nel sottosuolo, le acque sotterranee non sono escluse dagli effetti dei cambiamenti climatici. I cambiamenti che interessano il ciclo idrologico attraverso processi di precipitazione ed evaporazione hanno i loro impatti sulla ricarica delle acque sotterranee. Gli acquiferi poco profondi o prossimi alla superficie, che sono più comunemente utilizzati come fonte di acqua dolce, sono anche i più vulnerabili. Tuttavia, questa risorsa offre anche soluzioni per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici.

In termini di mitigazione, diversamente dagli impianti solari ed eolici, le centrali geotermiche appaiono più idonee a garantire il carico di base per soddisfare la domanda di elettricità, e offrono molte opportunità di espansione. Le acque sotterranee possono essere utilizzate anche per il riscaldamento e il raffreddamento diretti. Alcuni siti geologici, compresi gli acquiferi profondi, sono idonei all'immagazzinamento di CO₂ nell'ambito dei processi di cattura e stoccaggio del carbonio. In termini di adattamento ai cambiamenti climatici, gli acquiferi offrono un'alternativa relativamente conveniente dal punto di vista economico allo stoccaggio delle acque superficiali e, soprattutto, presentano una grande capacità di arginare l'impatto delle crescenti variazioni climatiche e di facilitare il passaggio graduale a pratiche di utilizzo dell'acqua che siano compatibili con le mutate condizioni climatiche. Rendere gli approvvigionamenti idrici resilienti ai cambiamenti climatici, in molte parti del mondo, comporterà l'utilizzo delle acque sotterranee congiuntamente a fiumi, laghi e bacini idrici superficiali.

Nonostante la relativa abbondanza di acque sotterranee, molti degli acquiferi del mondo sono sovrasfruttati, compresi anche quelli che ricevono una ricarica significativa. Ciò ha comportato un costante calo dei livelli dell'acqua, in alcuni casi oltre i limiti previsti da un prelievo economicamente fattibile. Oltre a ridurre la disponibilità complessiva di acqua dolce, l'estrazione intensiva delle acque sotterranee ha portato alla subsidenza in molte aree.



Sebbene si trovino nel sottosuolo, le acque sotterranee non sono escluse dagli effetti dei cambiamenti climatici

L'estrazione e l'uso delle acque sotterranee non interessano unicamente le fonti rinnovabili; in alcuni casi, infatti, anche quelle non rinnovabili possono essere prese in considerazione a questo scopo. Alcune regioni dell'Africa, ad esempio, detengono quantità considerevoli di risorse idriche sotterranee non rinnovabili che possono essere rese disponibili durante i periodi di grave stress idrico al fine di mantenere la sicurezza idrica. Tuttavia, per fare ciò, è necessario prestare la massima attenzione; bisogna sempre tenere presenti le generazioni future e gli aspetti economici, finanziari e ambientali legati all'esaurimento delle riserve di acque sotterranee.

L'inquinamento delle acque sotterranee è un problema di grande rilevanza che interessa tutto il mondo. Molte fonti di inquinamento sono altamente diffuse negli insediamenti urbani e di altro tipo. L'esistenza di strutture igienico-sanitarie *in loco* mal costruite o mal gestite ha portato a una persistente contaminazione da parte di agenti patogeni dell'acqua estratta da pozzi poco profondi ubicati in prossimità delle suddette strutture, in particolare negli insediamenti rurali. Eppure è l'agricoltura la causa principale dell'inquinamento delle acque sotterranee nelle zone rurali. Sono assolutamente necessari maggiori sforzi di controllo dell'inquinamento, sia in contesti urbani che rurali. L'industria, compresi i settori che coinvolgono le risorse del sottosuolo, come lo sfruttamento di idrocarburi e varie forme di estrazione mineraria, producono una grande varietà di inquinanti, costituendo gravi minacce per la qualità delle acque sotterranee. La protezione della qualità delle acque sotterranee mediante una regolamentazione efficace e un'applicazione rigorosa della stessa è urgente in tutti i settori, ma le pratiche adeguate in questo senso sono ancora rare.

14.1.5 Dati, informazioni e conoscenze su acque sotterranee e acquiferi

La mancanza di informazioni e conoscenze dettagliate sulle risorse idriche sotterranee locali è una sfida importante in molti paesi. Il *Summary Progress Update 2021: SDG 6* (Rapporto delle Nazioni Unite di sintesi sui progressi relativi all'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6) affronta il tema della carenza di dati e di iniziative di monitoraggio in relazione alle acque sotterranee, sottolineando come quello del monitoraggio di tali risorse sia "un campo trascurato". Escludendo l'America settentrionale, l'Europa e i grandi paesi asiatici come l'India e la Cina, il monitoraggio regolare dei livelli o della qualità delle acque sotterranee, ovvero il primo passo verso un'adeguata gestione di questa risorsa, è limitato a pochi paesi.

14.2 **La via da seguire**

14.2.1 Le acque sotterranee meritano di essere una priorità nell'agenda

L'Assemblea generale delle Nazioni Unite e il Consiglio per i diritti umani riconoscono l'accesso equo ad acqua potabile sicura e pulita e a servizi igienico-sanitari adeguati come diritti umani distinti. Gli Stati membri delle Nazioni Unite sono tenuti a garantire i diritti umani ad acqua potabile e a impianti igienico-sanitari sicuri attraverso piani di azione e strategie, promuovendo così attivamente la consapevolezza e lo sviluppo delle competenze. Occorre prestare la dovuta attenzione, tra l'altro, all'approvvigionamento idrico sostenibile, al trattamento prima del consumo se la qualità dell'acqua è inadeguata e, poiché le acque sotterranee costituiscono una componente essenziale della fornitura di acqua e di servizi igienico-sanitari, alla protezione della risorsa e alla ricarica degli acquiferi.

Le acque sotterranee svolgono un ruolo molto importante anche in altri settori come l'agricoltura, l'industria e l'ambiente, con impatti positivi su economie, redditi, benessere ed ecosistemi. La custodia delle acque sotterranee dovrebbe essere affidata a soggetti attivi e capaci che possano garantire la sostenibilità dei servizi idrici alimentati dalle acque sotterranee.

14.2.2 Una governance e una gestione efficace delle acque sotterranee sono fondamentali

È essenziale che i paesi si impegnino nella definizione di un quadro adeguato ed efficace per la governance delle acque sotterranee. Questo richiede che i governi prendano l'iniziativa e si facciano carico della responsabilità di istituire e mantenere una struttura di governance

pienamente operativa che preveda sviluppo di competenze, capacità istituzionale, leggi, regolamenti e loro relativa applicazione, formulazione di politiche e pianificazione, partecipazione delle parti interessate e finanziamenti adeguati. Spetta inoltre agli Stati garantire che le rispettive politiche e i piani in materia di gestione delle acque sotterranee vengano pienamente attuati.

14.2.3 Dati, informazioni e conoscenze sono guide indispensabili per un utilizzo e una gestione corretti delle acque sotterranee

Le conoscenze scientifiche in materia di idrogeologia e i metodi e gli strumenti disponibili sono sufficienti per affrontare la maggior parte dei problemi di gestione delle acque sotterranee, come l'ubicazione dei pozzi, l'ottimizzazione del processo di estrazione e la previsione dei suoi effetti su scala locale e regionale così come la prevenzione della contaminazione. La sfida risiede più nella scarsità di dati affidabili specifici per area, soprattutto nei paesi a basso reddito, e nella limitata diffusione di dati, informazioni e conoscenze tra chi opera nell'ambito della ricerca, professionisti, professioniste e responsabili delle decisioni. Risposte efficaci del governo prevedono, prima di tutto, lo sviluppo e il mantenimento di una base di conoscenza relativa alle acque sotterranee.

Per quanto riguarda l'esplorazione e la valutazione degli acquiferi, l'acquisizione di dati e informazioni da parte delle agenzie che si occupano di acque sotterranee può essere integrata dal contributo del settore privato. Le industrie petrolifere e minerarie in particolare possiedono una grande quantità di dati, informazioni e conoscenze sulla struttura delle aree più profonde del sottosuolo, compresi gli acquiferi, ed è altamente auspicabile che li condividano con le professioniste e i professionisti del settore pubblico responsabili della valutazione e della gestione delle acque sotterranee. Oltre all'esplorazione e alla valutazione, sono essenziali anche le attività di monitoraggio. Tali attività devono fornire informazioni differenziate per area riguardo ai cambiamenti nel tempo dei livelli delle acque sotterranee, ai prelievi e alla qualità di tali risorse, il che è essenziale per poter prendere decisioni corrette in merito all'utilizzo e alla gestione delle stesse.

14.2.4 Istituzioni forti sono fondamentali per progredire nella gestione delle acque sotterranee

Il personale qualificato in grado di condurre studi idrogeologici e geofisici è spesso scarso. La scelta dell'ubicazione e la costruzione di pozzi ad alto rendimento necessari per l'irrigazione su larga scala o per l'approvvigionamento urbano in ambienti idrogeologici complessi richiede una notevole esperienza. Lo stesso vale per attività come la formulazione di politiche e la pianificazione, e/o per l'attuazione e l'applicazione di misure di gestione delle acque sotterranee.

Tuttavia, in molti paesi la generale mancanza di professionisti e professioniste del settore tra il personale delle istituzioni e dei governi locali e nazionali, nonché mandati, finanziamenti e supporto insufficienti ai dipartimenti o alle agenzie che si occupano di acque sotterranee, ostacolano una valutazione, un monitoraggio, una pianificazione, un utilizzo e una gestione efficaci di tale risorsa. Competenze umane e capacità istituzionali possono essere rafforzate, ad esempio, da progetti di cooperazione bilaterale a lungo termine, programmi di scambio accademico o opportunità di formazione post-laurea all'estero. Cruciale, tuttavia, è l'impegno dei governi a costruire, sostenere e mantenere la capacità istituzionale relativa alle acque sotterranee.

14.2.5 Le parti interessate hanno diversi punti di vista e non dovrebbero essere ignorate

La governance e la gestione delle acque sotterranee possono presentare delle difficoltà a causa della natura di bene comune di tali risorse, nonché delle lacune informative e della diversità delle parti interessate e dei loro punti di vista. Poiché è possibile accedere alle acque sotterranee in vaste aree geografiche, è spesso difficile per i governi quantificare, allocare



I governi devono assumere il proprio ruolo di custodi delle risorse, essendo le acque sotterranee un bene comune, garantire che l'accesso alle acque sotterranee e i benefici derivanti da esse vengano equamente distribuiti, e che la risorsa rimanga disponibile anche per le generazioni future

e regolare i prelievi, in particolare se le loro risorse sono limitate. Il corollario è che, quasi ovunque, la governance e la gestione delle acque sotterranee devono tenere conto degli interessi delle parti interessate nel settore pubblico e in quello privato, nonché di quelli delle comunità locali. I governi devono assumere il proprio ruolo di custodi delle risorse, essendo le acque sotterranee un bene comune, garantire che l'accesso alle acque sotterranee e i benefici derivanti da esse vengano equamente distribuiti, e che la risorsa rimanga disponibile anche per le generazioni future. Ove possibile, è vantaggioso coinvolgere le parti interessate nei percorsi di valutazione, monitoraggio, pianificazione e processo decisionale.

14.2.6 Le disposizioni di natura giuridica chiariscono i diritti e le regole del gioco in relazione alle acque sotterranee

Leggi e regolamenti che prevedano obiettivi sociali e politici, e che stabiliscano un quadro normativo e abilitante per il raggiungimento di tali obiettivi, sono componenti fondamentali della governance e della gestione delle acque sotterranee. Quadri giuridici stabili consentono inoltre ai governi e agli utenti di pianificare una gestione delle risorse a lungo termine e di affrontare interessi contrastanti, compresi quelli relativi all'ambiente e alle generazioni future. Il diritto internazionale in materia di risorse idriche definisce i diritti e gli obblighi degli Stati sovrani in relazione a fiumi, laghi, bacini e acquiferi che sono attraversati da un confine internazionale, oppure nel caso in cui formino tale confine o si trovino al di sotto di esso (come nel caso delle acque sotterranee). Recentemente il diritto internazionale ha iniziato ad occuparsi in modo specifico degli acquiferi e delle acque sotterranee, e sono stati conclusi con successo alcuni accordi da parte di paesi che condividono acquiferi e acque sotterranee transfrontaliere.

Tra gli strumenti giuridici di controllo dell'estrazione di questa risorsa figurano l'autorizzazione obbligatoria per la costruzione di pozzi e per il prelievo di acque sotterranee, nonché l'obbligo di pagare degli oneri per i volumi di acqua prelevati e delle tasse come parte del prezzo dell'acqua fornita.

Le misure di prevenzione della contaminazione degli acquiferi comprendono: divieto o limitazione di determinate attività inquinanti e di utilizzo dell'acqua, riduzione dell'uso di pesticidi, erbicidi e fertilizzanti, limitazione di alcuni modelli di coltivazione, riduzione dell'intensità del pascolo degli animali, bonifica di terreni agricoli e gestione del drenaggio. L'emissione e lo scarico illegali di sostanze nei corpi idrici o nel suolo, o il trattamento illecito delle acque reflue, possono essere considerati crimini o reati. La maggior parte di queste misure richiede regolamenti basati sulla legislazione. Gli sforzi per contrastare l'inquinamento e il perseguimento di chi ne è responsabile, tuttavia, sono spesso difficili da mettere in atto a causa della natura invisibile delle acque sotterranee.

14.2.7 Gli acquiferi transfrontalieri richiedono cooperazione

Gli acquiferi transfrontalieri (cioè quelli che si estendono fra due o più paesi) richiedono un'attenzione particolare, perché l'inquinamento delle acque sotterranee e le variazioni dei livelli e della pressione possono avere origine in un paese vicino. Ciò aggiunge una dimensione distinta e internazionale alla governance e alla gestione della risorsa, rendendola più complessa. L'importanza di tali acquiferi è stata compresa solo di recente dalla comunità internazionale; un fatto che ha determinato ulteriori opportunità per promuovere la cooperazione transfrontaliera attraverso nuove e specifiche risorse finanziarie. I principali risultati ottenuti finora includono inventari globali e regionali, il progetto di articoli relativi alla legge sugli acquiferi transfrontalieri (accolto positivamente da diverse risoluzioni dell'Assemblea generale delle Nazioni Unite) e accordi formali di cooperazione interstatale in vigore per sei acquiferi transfrontalieri. Tuttavia, ci sono centinaia di grandi acquiferi transfrontalieri nel mondo, che nel complesso formano una quota considerevole delle risorse idriche sotterranee globali; inoltre, molti di essi sono collegati a preziosi ecosistemi di acqua dolce. Occorre pertanto rafforzare gli sforzi volti a stabilire una cooperazione in materia di acquiferi transfrontalieri.



Processi di pianificazione aperti e partecipativi in relazione alle acque sotterranee possono generare un sostegno pubblico più ampio e una maggiore accettazione del piano risultante e, per estensione, della gestione operativa

14.2.8 Le politiche e la pianificazione in materia di acque sotterranee forniscono la guida per un'azione congiunta

Occorre prestare la dovuta attenzione alle politiche e alla pianificazione, al fine di fornire una guida per la governance delle acque sotterranee e per attività di gestione coerenti e congiunte, che vadano a beneficio dell'intera società. Le politiche relative alle acque sotterranee dovrebbero essere subordinate allo stato giuridico e alla natura della proprietà (pubblica o privata) di questa risorsa da parte di chi ne usufruisce, alle caratteristiche interconnesse delle acque superficiali e all'uso del suolo nelle aree di ricarica degli acquiferi. Tali politiche dovrebbero inoltre prevedere un processo decisionale integrato sulle risorse idriche sotterranee e sugli acquiferi e collegarsi ad altri settori e ambiti della società al di là del settore idrico, come sviluppo socioeconomico, uguaglianza di genere e riduzione della povertà, alimentazione ed energia, ecosistemi, cambiamenti climatici e salute umana.

Processi di pianificazione aperti e partecipativi in relazione alle acque sotterranee possono generare un sostegno pubblico più ampio e una maggiore accettazione del piano risultante e, per estensione, della gestione operativa. Tale pianificazione coinvolge la comunità scientifica, persone specializzate nella gestione delle risorse, parti interessate e responsabili delle decisioni; inoltre, essa dovrebbe essere accessibile anche a chi non è specialista in questo campo, invitando gli utenti a partecipare. La pianificazione relativa alle risorse idriche sotterranee spetta tanto agli enti governativi quanto agli utenti finali, collettivamente o individualmente. Su scala locale, la raccolta dei dati e l'analisi delle informazioni sono necessariamente limitate; tuttavia, tutti i livelli possono trarre vantaggio dallo sviluppo delle competenze e dalla sensibilizzazione. Allo stesso modo, i dati disaggregati per sesso e la garanzia della partecipazione delle donne alla raccolta dei dati e al processo decisionale (ambiti solitamente dominati dagli uomini) sono fattori fondamentali per l'acquisizione di una dimensione di genere.

I piani di gestione delle acque sotterranee traducono le politiche in un programma d'azione, fornendo un modello per la loro attuazione. È possibile utilizzare vari strumenti per gestire i prelievi di acque sotterranee; tali strumenti dipenderanno dall'approccio alla gestione definito dalla governance e dai regimi politici in essere. Non tutte le procedure di gestione sono a carico dei governi; ad esempio, le comunità e/o gli stessi utenti potrebbero scegliere in modo indipendente la collocazione dei pozzi e i prelievi. Laddove queste sono state storicamente soggette a una regolamentazione minima o nulla, gli utenti possono percepire le azioni di gestione come espropriazioni di proprietà privata. Consentendo alcuni usi esenti, come l'uso domestico o quello per l'allevamento, o il prelievo di una quantità fissa inframarginale (cioè un volume d'acqua solitamente piccolo di cui si permette l'estrazione senza che sia soggetto a regolamenti o tariffe, di solito allo scopo di soddisfare le esigenze umane di base o in materia di agricoltura su scala domestica), possono aiutare a superare la resistenza al controllo attraverso la regolamentazione e la fissazione dei prezzi. Tuttavia, occorre prestare attenzione per garantire che gli usi esenti da regolamentazione non pregiudichino gli obiettivi di gestione. L'equità è una considerazione importante, poiché le azioni di gestione che influiscono in modo differenziato sulle pompe e sugli utenti delle acque sotterranee possono portare a conflitti.

Le interrelazioni tra gli acquiferi e le acque superficiali, l'uso del suolo, gli ecosistemi e l'uso dello spazio e delle risorse del sottosuolo implicano che le politiche relative alle acque sotterranee e alla pianificazione in questo ambito devono essere integrate in un contesto politico più ampio (a questo proposito si parla di integrazione orizzontale), poiché ciascuno di questi fattori è direttamente collegato alla disponibilità e alla qualità delle acque sotterranee. Approcci come la ricarica gestita degli acquiferi (nell'acronimo inglese MAR) e la gestione congiunta delle risorse idriche considerano queste interrelazioni. Anche le potenzialità e la fattibilità dello sfruttamento di risorse idriche sotterranee non convenzionali (ad esempio acque sotterranee salmastre, acque sotterranee dolci *offshore* o salmastre) meritano di essere esplorate.

14.2.9 I finanziamenti: il carburante per l'azione

La governance e la gestione delle acque sotterranee richiedono ingenti finanziamenti strutturali. Tuttavia, i meccanismi per l'allocazione di fondi pubblici o per la raccolta di fondi da fonti private sono in molti casi scarsamente sviluppati. In molti paesi non esiste un prezzo o una tariffa per l'acqua proveniente dalle riserve sotterranee, soprattutto per l'irrigazione, in parte a causa delle difficoltà di monitoraggio e applicazione e dell'importanza politica del settore agricolo (che si traduce anche nella mancanza di volontà politica).

Visto che dalle acque sotterranee proviene una quota considerevole del volume totale di acqua distribuito attraverso le infrastrutture di approvvigionamento idrico, la tariffa dell'acqua, qualora venisse opportunamente impostata, potrebbe fornire finanziamenti per la gestione della risorsa in questione. Tuttavia, anche il recupero dei costi risulta difficile nella maggior parte dei paesi, e i costi per la gestione delle risorse idriche si riflettono raramente nella bolletta dell'acqua. Pertanto, la gestione delle risorse idriche è finanziata da un mix di fonti che comprendono imposte sul prelievo, canoni o tariffe, ulteriori oneri per gli scarichi e l'inquinamento, tasse, bilanci pubblici e aiuti pubblici allo sviluppo. Inoltre, ci sono opportunità per integrare maggiormente lo sviluppo e la gestione sostenibili delle acque sotterranee all'interno di progetti e iniziative promossi dal settore idrico. Ad esempio, i progetti MAR possono essere considerati nel contesto dell'approvvigionamento idrico urbano per garantire maggiore sicurezza e flessibilità in caso di variazione stagionale delle risorse. Inoltre, vale la pena analizzare e comprendere meglio i costi e i benefici dell'azione (e dell'inazione) relativa alla gestione delle acque sotterranee in termini economici, considerando i costi opportunità, le esternalità e i benefici sociali e ambientali. Ciò potrebbe aiutare a mettere le questioni concernenti le acque sotterranee in primo piano nell'agenda politica al fine di garantire l'impegno in questo senso e sfruttare diversi tipi di finanziamento.

14.3 Epilogo

L'insieme delle acque sotterranee disponibili sulla Terra costituisce un enorme patrimonio di acqua dolce. In un mondo in cui la domanda di acqua aumenta costantemente, dove le risorse idriche superficiali sono spesso scarse e sottoposte a uno stress sempre maggiore, il valore delle acque sotterranee come risorsa che consente lo sviluppo delle società umane ormai da millenni verrà riconosciuto universalmente.

Nonostante l'abbondanza generale, le acque sotterranee sono comunque vulnerabili al sovrasfruttamento e all'inquinamento, con potenziali effetti devastanti su tale risorsa e sulla sua disponibilità. Per liberare tutto il potenziale delle acque sotterranee saranno necessari sforzi notevoli e concertati nella loro gestione e nel loro utilizzo sostenibile. Il primo passo in questo senso è rendere visibile questa risorsa invisibile.

- Abd-El-Mooty, M., Kansoh, R. and Abdulhadi, A. 2016. Challenges of water resources in Iraq. *Hydrology Current Research*, Vol. 07, No. 4. doi.org/10.4172/2157-7587.1000260.
- Abdolvand, B., Mez, L., Winter, K., Mirsaedi-Gloßner, S., Schütt, B., Rost, K. T. e Bar, J. 2015. The dimension of water in Central Asia: Security concerns and the long road of capacity building. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 73, No. 2, pagg. 897-912. doi.org/10.1007/s12665-014-3579-9.
- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y. E. e Deguchi, T. 2011. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, Vol. 59, Article 1753. doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9.
- Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J., Arkin, P. e Nelkin, E. 2003. The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 4, pagg. 1147-1167. doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2.
- AEA (Agenzia europea dell'ambiente). 2013. *Assessment of Cost Recovery through Water Pricing*. EEA Technical Report No. 16/2013. Lussemburgo, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea. www.eea.europa.eu/publications/assessment-of-full-cost-recovery.
- _____. 2018a. *Groundwater Quantitative and Chemical Status*. Dashboard (Tableau). Sito web AEA. www.eea.europa.eu/themes/water/european-waters/water-quality-and-water-assessment/water-assessments/groundwater-quantitative-and-chemical-status.
- _____. 2018b. *European Waters: Assessment of Status and Pressures 2018*. EEA Report No. 7/2018. Lussemburgo, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea. doi.org/10.2800/303664.
- _____. 2019. *The European Environment – State and Outlook 2020. Knowledge for Transition to a Sustainable Europe*. Lussemburgo, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea. doi.org/10.2800/96749.
- AFD (Agence française de développement). 2011. *Toward a Joint Management of Transboundary Aquifer Systems Methodological Guidebook*. À Savoir. Parigi, AFD. www.afd.fr/en/ressources/toward-joint-management-transboundary-aquifer-systems.
- Aguilar-Barajas, I., Mahlknecht, J., Kaledin, J., Kjellén, M. e Mejía-Betancourt, A. (eds.). 2015. *Water and Cities in Latin America: Challenges for Sustainable Development*. Abingdon, Regno Unito, Routledge.
- AGW-Net/BGR/IWMI/CapNet/ANBO/IGRAC (Africa Groundwater Network/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe/International Water Management Institute/CapNet/African Network of Basin Organisations/International Groundwater Resources Assessment Centre). 2015. *Integration of Groundwater Management into Transboundary Basin Organizations in Africa – a Training Manual by AGW-Net, BGR, IWMI, CapNet, ANBO, & IGRAC*. www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Politikberatung_GW/Downloads/Module_8.pdf;jsessionid=90B6565898E0E86B50FB53B57B2DE9E6.1_cid284?__blob=publicationFile&v=5.
- Ahmed, K. M., Islam, R., Hasan, M. A., Sultana, S., Groen, K., Tuinhof, A., Winkle, T., Onabolu, B., Akhter, N., Mahmud, M. N. e Rahman, M. S. 2018. *A nature-based, innovative and low-cost solution for disaster-resilient drinking water supply in coastal Bangladesh: Using managed aquifer recharge (MAR) to buffer water storage and shield against saltwater ingress*. Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice (GRIPP), Groundwater-Based Natural Infrastructure. gripp.iwmi.org/natural-infrastructure/water-quality-2/a-nature-based-innovative-and-low-cost-solution-for-disaster-resilient-drinking-water-supply-in-coastal-bangladesh/.
- Alam, M. F. e Foster, S. 2019. Policy priorities for the boom in urban private wells. *The Source*, November 2019, pagg. 54-57. www.thesourcemagazine.org/policy-priorities-for-the-boom-in-urban-private-wells/.
- Albrecht, T. R., Varady, R. G., Zuniga-Teran, A. A., Gerlak, A. K. e Staddon, C. 2017. Governing a shared hidden resource: A review of governance mechanisms for transboundary groundwater security. *Water Security*, Vol. 2, pagg. 43-56. doi.org/10.1016/j.wasec.2017.11.002.
- Allan, J. A. 1998. Virtual water: A strategic resource: Global solutions to regional deficits. *Groundwater*, Vol. 36, No. 4, pagg. 545-546.
- _____. 2003. Virtual water – the water, food and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? *Water International*, Vol. 28, No. 1, pagg. 106-113. doi.org/10.1080/02508060.2003.9724812.
- Allan, R. P., Soden, B. J., John, V. O., Ingram, W. e Good, P. 2010. Current changes in tropical precipitation. *Environmental Research Letters*, Vol. 5, No. 2, Article 025205. doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025205.
- Allen, D. M., Whitfield, P. H. e Werner, A. 2010. Groundwater level responses in temperate mountainous terrain: Regime classification, and linkages to climate and streamflow. *Hydrological Processes*, Vol. 24, No. 23, pagg. 3392-3412. doi.org/10.1002/hyp.7757.

- Al-Muraikhi, A. A. e Shamruk, M. 2017. *Historical Overview of Enhanced Recharge of Groundwater in Qatar*. International Association of Hydrogeologists (IAH). recharge.iah.org/files/2017/11/Qatar-MAR-history-short-paper-29nov17.pdf.
- Al-Rukaibi, D. 2010. *The Role of Aquifer Storage and Recovery (ASR) Technique in Sustainability: A Case Study for Kuwait*. University of Texas at Austin. Master's Thesis. Austin, Tex., University of Texas at Austin. repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10898/CRWR%20online%20report%2010-10.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
- Altchenko, Y. e Villholth, K. G. 2015. Mapping irrigation potential from renewable groundwater in Africa – a quantitative hydrological approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 2, pagg. 1055-1067. doi.org/10.5194/hess-19-1055-2015.
- Al-Zubari, W. 2014. *Regional Diagnostic Report: Arab States Region*. Synthesis Report. ar.unesco.org/sites/default/files/gwg_arab_region_regionaldiagnosis_report.pdf.
- Al-Zubari, W. e Alajjawi, S. 2020. *Promoting an EU-GCC Climate Change Agenda: Water Security Priorities*. Bussola Institute. www.bussolainstitute.org/research/promoting-an-eu-gcc-climate-change-agenda-water-security-priorities.
- Al-Zubari, W., Al-Turbak, A., Zahid, W., Al-Ruwis, K., Al-Tkhais, A., Al-Muataz, I., Abdelwahab, A., Murad, A., Al-Harbi, M. e Al-Sulaymani, Z. 2017. An overview of the GCC unified water strategy (2016–2035). *Desalination and Water Treatment*, Vol. 81, pagg. 1-18. doi.org/10.5004/dwt.2017.20864.
- Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., Oyebamiji, A. e Ochege, F. U. 2020. Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, Vol. 589, Article 125163. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163.
- Andres, L., Chellaraj, G., Das Gupta, B., Grabinsky, J. e Joseph, G. 2018. *Why Are So Many Water Points in Nigeria Non-Functional?: An Empirical Analysis of Contributing Factors*. Policy Research Working Paper No. 8388. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29568. Licenza: CC BY 3.0 IGO.
- Aquastat. s.d. *Aquastat: FAO's Global Information System on Water and Agriculture*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). www.fao.org/aquastat/en/. (Consultato tra aprile e settembre 2021)
- ARCADIS. 2012. *The Role of Water Pricing and Water Allocation in Agriculture in Delivering Sustainable Water Use in Europe*. Final Report. Commissione europea. ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/agriculture_report.pdf.
- Arlosoroff, S., Tschannerl, G., Grey, D., Journey, W., Karp, A., Langenegger, O. e Roche, R. 1987. *Community Water-Supply: The Hand-Pump Option*. Washington, DC, Banca mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/299321468765272889/Community-water-supply-the-handpump-option.
- Arroyo, V., Ballester, M. e Mejía, A. 2015. Inseguridad económica del agua en Latinoamérica: De la abundancia a la inseguridad [Insicurezza economica relativa all'acqua in America Latina: dall'abbondanza all'insicurezza]. Caracas, Banca di sviluppo dell'America Latina (CAF). scioteca.caf.com/handle/123456789/787. (In spagnolo).
- Arthington, A. H., Bhaduri, A., Bunn, S. E., Jackson, S. E., Tharme, R. E., Tickner, D., Young, B., Acreman, M., Baker, N., Capon, S., Horne, A. C., Kendy, E., McClain, M. E., LeRoy Poff, N., Richter, B. D. e Ward, S. 2018. The Brisbane declaration and global action agenda on environmental flows. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 6, Article 45, pagg. 1-15. doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045.
- Ashfaq, M., Shi, Y., Tung, W., Trapp, R. J., Gao, X., Pal, J. S. e Duffenbaugh, N. S. 2009. Suppression of south Asian summer monsoon precipitation in the 21st century. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, No. 1, Article L01704. doi.org/10.1029/2008GL036500.
- Asoka, A., Gleeson, T., Wada, Y. e Mishra, V. 2017. Relative contribution of monsoon precipitation and pumping to changes in groundwater storage in India. *Nature Geoscience*, Vol. 10, No. 2, pagg. 109-117. doi.org/10.1038/ngeo2869.
- Assemblea generale delle Nazioni Unite. 2007. *United Nations Declaration on the Rights of Indigenous Peoples*. Resolution adopted by the General Assembly on 13 September 2007. Sixty-first session. A/RES/61/295. undocs.org/A/RES/61/295.
- _____. 2009. *The Law of Transboundary Aquifers*. Resolution adopted by the General Assembly on 11 December 2008. Sixty-third session. A/RES/63/124. undocs.org/en/A/RES/63/124.
- _____. 2010. *The Human Right to Water and Sanitation*. Resolution adopted by the General Assembly on 28 July 2010. Sixty-fourth session. A/RES/64/292. undocs.org/A/RES/64/292.
- _____. 2012. *The Law of the Transboundary Aquifers*. Resolution adopted by the General Assembly on 9 December 2011. Sixty-sixth session. A/RES/66/104. undocs.org/A/RES/66/104.
- _____. 2013. *The Law of Transboundary Aquifers*. Resolution adopted by the General Assembly on 16 December 2013. Sixty-eighth session. A/RES/68/118. undocs.org/A/RES/68/118.
- _____. 2016. *The Law of Transboundary Aquifers*. Resolution adopted by the General Assembly on 13 December 2016. Seventy-first session. A/RES/71/150. undocs.org/A/RES/71/150.
- _____. 2019. *The Law of Transboundary Aquifers*. Resolution adopted by the General Assembly on 18 December 2019. Seventy-fourth session. A/RES/74/193. undocs.org/A/RES/74/193.

- Autorità per l'energia elettrica e l'acqua di Sharjah. 2015. *First Operational Aquifer Storage and Recovery System (ASR) Nizwa Site Sharjah Emirates U.A.E.* www.slideshare.net/NathanLopez2/asrsharjah20091214presentation.
- AWS (Alliance for Water Stewardship). 2019. *The AWS International Water Stewardship Standard, Version 2.0.* aws.org/the-aws-standard-2-0/.
- Baalbaki, R., Ahmad, S. H., Kays, W., Talhouk, S. N., Saliba, N. A. e Al-Hindi, M. 2019. Citizen science in Lebanon – a case study for groundwater quality monitoring. *Royal Society Open Science*, Vol. 6, No. 2, Article 181871. doi.org/10.1098/rsos.181871.
- Bachu, S. 2015. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 40, pagg. 188-202. doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.01.007.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N. P. e Mathiassen, O.M. 2007. CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 1, No. 4, pagg. 430-443. doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00086-2.
- Bahn, G-S. e An, B-C. 2020. Analysis of environmental purification effect of riparian forest with poplar trees for ecological watershed management: A case study in the floodplain of the Dam Reservoir in Korea. *Sustainability*, Vol. 12, No. 17, Article 6871. doi.org/10.3390/su12176871.
- Bakbakh, M. 2006. Nubian Sandstone Aquifer System. S. Foster and D. P. Loucks (eds.), *Non-Renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-Sustainable Management for Water-Policy Makers*. Parigi, UNESCO, pagg. 75-81. <http://en.unesco.org/non-renewable-groundwater-resources-a-guidebook-on-socially-sustainable-management-for>.
- Banca mondiale. 2010. *Deep Wells and Prudence: Towards Pragmatic Action for Addressing Groundwater Overexploitation in India*. Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2835. Licenza: CC BY 3.0 IGO.
- _____. 2018a. *Assessment of Groundwater Challenges and Opportunities in Support of Sustainable Development in Sub-Saharan Africa*. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30266.
- _____. 2018b. *Wastewater: From Waste to Resource – The Case of San Luis Potosi, Mexico*. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29491.
- _____. 2019. *Kiribati – Third Phase of Kiribati Adaptation Program Project*. Washington, DC, Banca mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/100741561139747493/Kiribati-Third-Phase-of-Kiribati-Adaptation-Program-Project.
- _____. 2020. *World Bank Signs Agreement to Improve Groundwater Management in Select States of India*. Press release. www.worldbank.org/en/news/press-release/2020/02/17/improving-groundwater-management-india.
- Banerjee, S., Wodon, Q., Diallo, A., Pushak, T., Uddin, H., Tsimpo, C. e Foster, V. 2008. *Access, Affordability and Alternatives: Modern Infrastructure Services in Africa*. Africa Infrastructure Country Diagnostic (AICD) Background Paper No. 2. Washington, DC, Banca mondiale. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12558>.
- Banks, D. 2012. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Second edition. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Ltd.
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I. J. M., Miralles, D. G., De Jeu, R. A. M., Bruijnzeel, L. A., McVicar, T. R. e Schellekens, J. 2013. Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments. *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 12, pagg. 7843-7863. doi.org/10.1002/2013WR013918.
- Berbel, J., Mar Borrego-Marin, M., Exposito, A., Giannoccaro, G., Montilla-Lopez, N. M. e Roseta-Palma, C. 2019. Analysis of irrigation water tariffs and taxes in Europe. *Water Policy*, Vol. 21, No. 4, pagg. 806-825. doi.org/10.2166/wp.2019.197.
- Bergkamp, G. e Cross, K. 2007. Groundwater and ecosystem services: Towards their sustainable use. S. Ragone, A. de la Hera, G. Bergkamp, N. Hernández-Mora e J. McKay, *The Global Importance of Groundwater in the 21st Century: Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability, January 24–27 2006, Alicante Spain*. Westerville, Ohio, NGWA Press.
- Bernat, R. F. A., Megdal, S. B. e Eden, S. 2020. Long-term storage credits: Analyzing market-based transactions to achieve Arizona water policy objectives. *Water*, Vol. 12, No. 2, Article 568. doi.org/10.3390/w12020568.
- Beven, K. and Germann, P. 2013. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 6, pagg. 3071-3092. doi.org/10.1002/wrcr.20156.
- Bexfield, L. M., Toccalino, P. L., Belitz, K., Foreman, W. T. e Furlong, E. T. 2019. Hormones and pharmaceuticals in groundwater used as a source of drinking water across the United States. *Environmental Science and Technology*, Vol. 53, No. 6, pagg. 2950-2960. doi.org/10.1021/acs.est.8b05592.
- BGR/UNESCO (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura). 2008. *WHYMAP. Groundwater Resources of the World*. Map at scale 1: 25 000 000. Hannover/Parigi, BGR/UNESCO. www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/maps_data_node_en.html?jsessionid=66DD893882B11D6409B9BA3C76B2F141.2_cid292.
- Bhutta, M. N. e Smedema, L. K. 2007. One hundred years of waterlogging and salinity control in the Indus valley, Pakistan: A historical review. *Irrigation and Drainage*, Vol. 56, No. S1, pagg. S81-S90. doi.org/10.1002/ird.333.

- Bierkens, M. F. P. 2015. Global hydrology 2015: State, trends, and directions. *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 7, pagg. 4923-4947. doi.org/10.1002/2015WR017173.
- Bierkens, M. F. P. e Wada, Y. 2019. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: A review. *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 6, Article 063002. doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f.
- Bierkens, M. F. P., Reinhard, S., De Bruijn, J. A., Veninga, W. e Wada, Y. 2019. The shadow price of irrigation water in major groundwater depleting countries. *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 5, pagg. 4266-4287. doi.org/10.1029/2018WR023086.
- Blomquist, W., Schlager, E. e Heikkila, T. 2010. *Common Waters, Diverging Streams: Linking Institutions and Water Management in Arizona, California, and Colorado*. Routledge.
- Boisson, A., Baisset, M., Alazard, M., Perrin, J., Villesseche, D., Dewandel, B., Kloppmann, W., Chandra, S., Picot-Colbeaux, G., Sarah, S., Ahmed, S. e Maréchal, J. C. 2014. Comparison of surface and groundwater balance approaches in the evaluation of managed aquifer recharge structures: Case of a percolation tank in a crystalline aquifer in India. *Journal of Hydrology*, Vol. 519, Part B, pagg. 1620-1633. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.022.
- Bonada, N., Cañedo-Argüelles, M., Gallart, F., Von Schiller, D., Fortuño, P., Latron, J., Llorens, P., Múrria, C., Soria, M., Vinyoles, D. e Cid, N. 2020. Conservation and management of isolated pools in temporary rivers. *Water*, Vol. 12, No. 10, Article 2870. doi.org/10.3390/w12102870.
- Boretti, A. e Rosa, L. 2019. Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, Vol. 2, No. 15. doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9.
- Bouchet, L., Thoms, M. C. e Parsons, M. 2019. Groundwater as a social-ecological system: A framework for managing groundwater in Pacific Small Island Developing States. *Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 8, pagg. 579-589. doi.org/10.1016/j.gsd.2019.02.008.
- Boulton, A. J. e Hancock, P. J. 2006. Rivers as groundwater-dependent ecosystems: A review of degrees of dependency, riverine processes and management implications. *Australian Journal of Botany*, Vol. 54, No. 2, pagg. 133-144. doi.org/10.1071/BT05074.
- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N. P. e Mathiassen, O. M. 2007. CO₂ storage capacity estimation: Issues and development of standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 1, No. 1, pagg. 62-68. doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00027-8.
- Brauer, M., Zhao, J. T., Bennitt, F. B. e Stanaway, J. D. 2020. Global access to handwashing: Implications for COVID-19 control in low-income countries. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 128, No. 5. doi.org/10.1289/EHP7200.
- Bréthaut, C., Gallagher, L., Dalton, J. e Allouche, J. 2019. Power dynamics and integration in the water-energy-food nexus: Learning lessons for transdisciplinary research in Cambodia. *Environmental Science & Policy*, Vol. 94, pagg. 153-162. doi.org/10.1016/j.envsci.2019.01.010.
- Bretzler, A. e Johnson, C. A. 2015. The Geogenic Contamination Handbook: Addressing arsenic and fluoride in drinking water. *Applied Geochemistry*, Vol. 63, pagg. 642-646. doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.08.016.
- Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M. e Fedrizzi, R. 2019. 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 104, pagg. 504-522. doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059.
- Burchi, S. 1999. National regulations for groundwater: Options, issues and best practices. S. Salman (ed.), *Groundwater: Legal and Policy Perspectives*. World Bank Technical Paper No. 456. Washington, DC, Banca mondiale. <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/0-8213-4613-X>.
- _____. 2012. A comparative review of contemporary water resources legislation: Trends, developments and an agenda for reform. *Water International*, Vol. 37, No. 6, pagg. 613-627. doi.org/10.1080/02508060.2012.694800.
- _____. 2018a. Legal principles and legal frameworks related to groundwater. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido e J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Paesi Bassi, CRC Press/Balkema, pp. 119-136.
- _____. 2018b. Legal frameworks for the governance of international transboundary aquifers: Pre- and post-ISARM experience. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 20, pagg. 15-20. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.007.
- Burchi, S. e Nanni, M. 2003. How groundwater ownership and rights influence groundwater intensive use management. M. R. Llamas and E. Custodio (eds.), *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. Lisse, Paesi Bassi, Balkema Publishers, pagg. 227-240.
- Butterworth, J., Sutton, S. e Mekonta, L. 2013. Self-supply as a complementary water services delivery model in Ethiopia. *Water Alternatives*, Vol. 6, No. 3, pagg. 405-423.
- Byrne, M. P. e O'Gorman, P. A. 2015. The response of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: Why the "Wet-get-wetter, dry-get-drier" scaling does not hold over land. *Journal of Climate*, Vol. 28, No. 20, pagg. 8078-8092. doi.org/10.1175/jcli-d-15-0369.1.
- California Department of Water Resources. 2014. *Sustainable Groundwater Management Act*. Consisting of a three-bill legislative package, including AB 1739 (Dickinson), SB 1168 (Pavley), and SB 1319 (Pavley), and subsequent statewide Regulations. As effective 1 January 2019. www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/gmp/docs/sgma/sgma_20190101.pdf.

- Campbell, C. G., Borglin, S. E., Green, F. B., Grayson, A., Wozel, E. e Stringfellow, W.T. 2006. Biologically directed environmental monitoring, fate, and transport of estrogenic endocrine disrupting compounds in water: A review. *Chemosphere*, Vol. 65, No. 8, pagg. 1265-1280. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.003.
- Campuzano, C., Hansen, A. M., De Stefano, L., Martinez-Santos, P., Torrente, D. e Wilaarts, B. A. 2014. Water resources assessment. B. A. Willaarts, A. Garrido, e M. R. Llamas (eds.), *Water for Food and Wellbeing in Latin America and the Caribbean: Social and Environmental Implications for a Globalized Economy*. Oxon, Md./New York, Routledge, pagg. 27-53.
- Cantonati, M., Stevens, L. E., Segadelli, S., Springer, A. E., Goldscheider, N., Celico, F., Filippini, M., Ogata, K. e Gargini, A. 2020. Ecohydrogeology: The interdisciplinary convergence needed to improve the study and stewardship of springs and other groundwater-dependent habitats, biota, and ecosystems. *Ecological Indicators*, Vol. 110, Article 105803. doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105803.
- Carstens, A. J. 2013. *Evaluation of Microbiological and Physico-Chemical Quality of Water from Aquifers in the North West Province, South Africa*. Master's Thesis. Potchefstroom, Sudafrica, North-West University. repository.nwu.ac.za/handle/10394/8999.
- Cashman, A. 2014. Water security and services in the Caribbean. *Water*, Vol. 6, No. 5, pagg. 1187-1203. doi.org/10.3390/w6051187.
- CBC (Canadian Broadcasting Corporation). 2016. *Why Nestlé's Aberfoyle Well Matters so much to Guelph, Ont., Residents*. www.cbc.ca/news/canada/kitchener-waterloo/nestle-guelph-rally-nestle-water-aberfoyle-1.3779649.
- CDC (Centers for Disease Control and Prevention). s.d. *Industrial Water: Uses in Manufacturing and Industry*. U.S. Department of Health & Human Services. www.cdc.gov/healthywater/other/industrial/index.html#:~:text=According%20to%20the%20United%20States,%2C%20food%2C%20and%20paper%20products.
- CDP (ex Carbon Disclosure Project). 2018. *Treading Water: Corporate Responses to Rising Water Challenges*. CDP Global Water Report 2018. Londra, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/global-water-report-2018.
- _____. 2020. *The Time to Green Finance*. CDP Financial Services Disclosure Report 2020. Londra, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/financial-services-disclosure-report-2020.
- _____. 2021. *A Wave of Change: The Role of Companies in Building a Water-Secure World*. CDP Global Water Report 2020. Londra, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/global-water-report-2020.
- _____. Inedito. Dati del 2021 comunicati da Cate Lamb (CDP Global Director, Water Security, CDP e UNFCC COP26 High Level Climate Action Champions Lead – Water) e da Laureen Missaire (CDP, Senior Project Officer, Water Security).
- Celia, M. A. 2017. Geological storage of captured carbon dioxide as a large-scale carbon mitigation option. *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 5, pagg. 3527-3533. doi.org/10.1002/2017WR020841.
- CESCR (Committee on Economic, Social and Cultural Rights). 2002. *General Comment No. 15: The Right to Water (Arts. 11 and 12 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights)*. Ventinovesima sessione, Ginevra, 11-29 novembre 2002. digitallibrary.un.org/record/486454.
- CGIAR WLE (CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems). 2015. *Groundwater and Ecosystem Services: A Framework for Managing Smallholder Groundwater-Dependent Agrarian Socio-Ecologies – Applying an Ecosystem Services and Resilience Approach*. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). doi.org/10.5337/2015.208.
- Chadwick, R. A., Williams, G. A., Williams, J. D. O. e Noy, D. J. 2012. Measuring pressure performance of a large saline aquifer during industrial-scale CO₂ injection: The Utsira Sand, Norwegian North Sea. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 10, pagg. 374-388. doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.022.
- Chaves, E. 2019. *Report on the Groundwater Conditions of Grand Bahama after Hurricane Dorian and Proposed Mitigation Measures*.
- Chen, J., Tang, C., Sakura, Y., Yu, J. e Fukushima, Y. 2005. Nitrate pollution from agriculture in different hydrogeological zones of the regional groundwater flow system in the North China Plain. *Hydrogeology Journal*, Vol. 13, No. 3, pagg. 481-492. doi.org/10.1007/s10040-004-0321-9.
- China Water Risk. 2015. *New 'Water Ten Plan' to Safeguard China's Waters*. 16 aprile 2015. www.chinawaterrisk.org/notices/new-water-ten-plan-to-safeguard-chinas-waters/.
- Clarke C. J., George, R. J., Bell, R. W. e Hatton, T. J. 2002. Dryland salinity in south-western Australia: Its origins, remedies, and future research directions. *Soil Research*, Vol. 40, No. 1, pagg. 93-113. doi.org/10.1071/SR01028.
- Cleaver, C., Franks, T., Boesten, J. e Kiire, A. 2005. *Water Governance and Poverty: What Works for the Poor*. Bradford, Regno Unito, Bradford Centre for International Development.
- Closas, A. e Molle, F. 2016. *Groundwater Governance in Europe*. IWMI Project Report No. 3. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). gw-mena.iwmi.org/wp-content/uploads/sites/3/2017/04/Rep.3-Groundwater-governance-in-Europe_final_cover.pdf.
- Closas, A. e Rap, E. 2017. Solar-based groundwater pumping for irrigation: Sustainability, policies and limitations. *Energy Policy*, Vol. 104, pagg. 33-37. doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.035.
- Closas, A. e Villholth, K. G. 2016. *Aquifer Contracts: A Means to Solving Groundwater Over-Exploitation in Morocco?* GRIPP Case Profile Series No. 1. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). gripp.iwmi.org/gripp/publications/case-profile-series/issue-01.pdf.

- Cobbing, J. 2020. Groundwater and the discourse of shortage in Sub-Saharan Africa. *Hydrogeology Journal*, Vol. 28, pagg. 1143-1154. doi.org/10.1007/s10040-020-02147-5.
- Cobbing, J. e Hiller, B. 2019. Waking a sleeping giant: Realizing the potential of groundwater in Sub-Saharan Africa. *World Development*, Vol. 122, pagg. 597-613. doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.06.024.
- Commissione europea. 2008. *Protezione delle acque sotterranee in Europa. La nuova direttiva acque sotterranee – Consolidare il quadro normativo della UE*. Lussemburgo, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4f3c68f2-464d-4502-9086-6fcd1be8ab01>.
- _____. 2011. *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Technical Report on Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems*. Technical Report No. 6. Unione europea.
- _____. 2014a. *Water Framework Directive (2000/60/EC). Technical Report on Methodologies Used for Assessing Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems*. Technical Report No. 8. Unione europea. https://circabc.europa.eu/sd/a/1448ec4b-a1e0-4627-856e-d21e5dbbb4db/Technical_report_No8_methodologies_used_assessing_GWDTEs.pdf.
- _____. 2014b. Direttiva 2014/80/UE della Commissione del 20 giugno 2014 che modifica l'allegato II della direttiva 2006/118/CE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, L. 182/52. data.europa.eu/eli/dir/2014/80/oj.
- _____. 2015. *Technical Report on Groundwater Associated Aquatic Ecosystems*. Technical Report No. 9. Unione europea. https://circabc.europa.eu/sd/a/9e261309-369a-405f-8713-082a128b503b/GWAAE_final_Published_Report.pdf.
- CoCT (City of Cape Town). 2019. *Our Shared Water Future: Cape Town's Water Strategy*. City of Cape Town. <https://resource.capetown.gov.za/documentcentre/Documents/City%20strategies,%20plans%20and%20frameworks/Cape%20Town%20Water%20Strategy.pdf>.
- Coulibaly, L., Jakus, P. M. e Keith, J. E. 2014. Modeling water demand when households have multiple sources of water. *Water Resources Research*, Vol. 50, No. 7, pagg. 6002-6014. doi.org/10.1002/2013WR015090.
- Coyte, R. M., Jain, R. C., Srivastava, S. K., Sharma, K. C., Khalil, A., Ma, L. e Vengosh, A. 2018. Large-scale uranium contamination of groundwater resources in India. *Environmental Science & Technology Letters*, Vol. 5, No. 6, pagg. 341-347. doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00215.
- Coyte, R. M., Singh, A., Furst, K. E., Mitch, W. A. e Vengosh, A. 2019. Co-occurrence of geogenic and anthropogenic contaminants in groundwater from Rajasthan, India. *Science of The Total Environment*, Vol. 688, pagg. 1216-1227. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.334.
- Crosbie, R. S., McCallum, J. L., Walker, G. R. e Chiew, F. H. S. 2012. Episodic recharge and climate change in the Murray-Darling Basin, Australia. *Hydrogeology Journal*, Vol. 20, pagg. 245-261. doi.org/10.1007/s10040-011-0804-4.
- Cuthbert, M. O., Ackworth, R. I., Andersen, M. S., Larsen, J. R., McCallum, A. M., Rau, G. C. e Tellam, J. H. 2016. Understanding and quantifying focused, indirect groundwater recharge from ephemeral streams using water table fluctuations. *Water Resources Research*, Vol. 52, No. 2, pagg. 827-840. doi.org/10.1002/2015WR017503.
- Cuthbert, M. O., Taylor, R. G., Favreau, G., Todd, M. C., Shamsudduha, M., Villholth, K. G., MacDonald, A. M., Scanlon, B. R., Kotchoni, D. O. V., Vouillamoz, J.-M., Lawson, F. M. A., Adjomayi, P. A., Kashaigili, J., Seddon, D., Sorensen, J. P. R., Ebrahim, G. Y., Owor, M., Nyenje, P. M., Nazoumou, Y., Goni, I., Ousmane, B. I., Sibanda, T., Ascott, M. J., Macdonald, D. M. J., Agyekum, W., Koussoubé, Y., Wanke, H., Kim, H., Wada, Y., Lo, M.-H., Oki, T. e Kukuric, N. 2019a. Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa. *Nature*, Vol. 572, pagg. 230-234. doi.org/10.1038/s41586-019-1441-7.
- Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K. M., Schneider, A., Hartmann, J. e Lehner, B. 2019b. Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. *Nature Climate Change*, Vol. 9, pagg. 137-141. doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4.
- D** Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T. e Puma, M. J. 2017. Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, Vol 543, pagg. 700-704. doi.org/10.1038/nature21403.
- Danert, K. e Healy, A. 2021. Monitoring groundwater use as a domestic water source by urban households: Analysis of data from Lagos State, Nigeria and Sub-Saharan Africa with implications for policy and practice. *Water*, Vol. 13, No. 4, Article 568. doi.org/10.3390/w13040568.
- Danert, K., Adekile, D. e Gesti Canuto, J. 2020. Striving for borehole drilling professionalism in Africa: A review of a 16-year initiative through the rural water supply network from 2004 to 2020. *Water*, Vol. 12, No. 12, Article 3305. doi.org/10.3390/w12123305.
- Dangendorf, S., Marcos, M., Wöppelmann, G., Conrad, C. P., Frederikse, T. e Riva, R. 2017. Reassessment of 20th century global mean sea level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 114, No. 23, pagg. 5946-5951. doi.org/10.1073/pnas.1616007114.
- Danielopol, D. L., Griebler, C., Gunatilaka, A. e Notenboom, J. 2003. Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation*, Vol. 30, No. 2, pagg. 104-130. doi.org/10.1017/S0376892903000109.
- Dashora, Y., Dillon, P., Maheshwari, B., Soni, P., Dashora, R., Davande, S., Purohit, R. C. e Mittal, H. K. 2018. A simple method using farmers' measurements applied to estimate check dam recharge in Rajasthan, India. *Sustainable Water Resources Management*, Vol. 4, No. 2, pagg. 301-316. doi.org/10.1007/s40899-017-0185-5.

- Dawoud, M. A. 2019. *Sustainable Brackish Groundwater Policy in the Arab Region*. Policy Brief, Arab Water Council e UNESCO/Cairo Office.
- Deb Roy, A. e Shah, T. 2003. Socio-ecology of groundwater irrigation in India. R. Llamas and E. Custodio (eds.), *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. Lisse, Paesi Bassi, Swets & Zeitlinger Publishers, pagg. 307-336.
- De Graaf, I. E. M., Gleeson, T., (Rens) van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H. e Bierkens, M. F. P. 2019. Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, Vol. 574, pagg. 90-94. doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4.
- De Magny, G. C., Thiaw, W., Kumar, V., Manga, N. M., Diop, B. M., Gueye, L., Kamara, M., Roche, B., Murtugudde, R. e Colwell, R. R. 2012. Cholera outbreak in Senegal in 2005: Was climate a factor? *PLoS One*, Vol. 7, No. 8, e44577. doi.org/10.1371/journal.pone.0044577.
- De Sousa, T. e Berrocal Capdevila, E. 2019. *What's in a Name? Deconstructing and Defining Public Policy*. Stato del Nuovo Galles del Sud, Australia, 17 aprile 2019. www.digital.nsw.gov.au/transformation/policy-lab/what-policy.
- Dickens, C., Rebelo, L. -M. e Nhamo, L. 2017. *Guidelines and Indicators for Target 6.6 of the SDGs: Change in the Extent of Water-Related Ecosystems over Time*. Report by the International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). www.iwmi.cgiar.org/Publications/wle/reports/guideline_and_indicators_for_target_6-6_of_the_sdgs-5.pdf.
- Dierauer, J. R., Whitfield, P. H. e Allen, D. M. 2018. Climate controls on runoff and low flows in mountain catchments of Western North America. *Water Resources Research*, Vol. 54, No. 10, pagg. 7495-7510. doi.org/10.1029/2018WR023087.
- Dieter, C. A., Maupin, M. A., Caldwell, R. R., Harris, M. A., Ivahnenko, T. I., Lovelace, J. K., Barber, N. L. e Linsey, K. S. 2018. *Estimated Use of Water in the United States in 2015*. U.S. Geological Survey Circular 1441. Reston, Va., U.S. Geological Survey (USGS). doi.org/10.3133/cir144.
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lloria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., Van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., Shamrukh, M., Pavelic, P., Murray, E., Ross, A., Bonilla Valverde, J. P., Palma Nava, A., Ansems, N., Posavec, K., Ha, K., Martin, R. e Sapiano, M. 2019. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pagg. 1-30. doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z.
- Dixon-Jain, P., Norman, R., Stewart, G., Fontaine, K., Walker, K., Sundaram, B., Flannery, E., Riddell, A. e Wallace, L. 2014. *Pacific Island Groundwater and Future Climates: First-Pass Regional Vulnerability Assessment*. Record 2014/043. Canberra, Geoscience Australia. doi.org/10.11636/Record.2014.043.
- Dodds, W. K., Bouska, W. W., Eitzmann, J. L., Pilger, T. J., Pitts, K. L., Riley, A. J., Schloesser, J. T. e Thornbrugh, D. J. 2009. Eutrophication of U.S. Freshwaters: Analysis of potential economic damages. *Environmental Science and Technology*, Vol. 43, No. 1, pagg. 12-19. doi.org/10.1021/es801217q.
- Döll, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F. T., Siebert, S., Eicker, A., Rodell, M., Strassberg, G. e Scanlon, B. R. 2012. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics*, Vol. 59–60, pagg. 143-156. doi.org/10.1016/j.jog.2011.05.001.
- Döll, P., Schmied, H. M., Schuh, C., Portmann, F. T. e Eicker, A. 2014. Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research*, Vol. 50, No. 7, pagg. 5698-5720. doi.org/10.1002/2014WR015595.
- Doody, T. M., Barron, O. V., Dowsley, K., Emelyanova, I., Fawcett, J., Overton, I. C., Pritchard, J. L., Van Dijk, A. I. J. M. e Warren, G. 2017. Continental mapping of groundwater dependent ecosystems: A methodological framework to integrate diverse data and expert opinion. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 10, pagg. 61-81. doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.01.003.
- Driscoll, J. P. e Middlemis, H. 2011. *Geothermal Water Use: Requirements and Potential Effects*. Australian Geothermal Energy Conference 2011, pagg. 63-67.
- Duker, A., Cambaza, C., Saveca, P., Ponguane, S., Mawoyo, T. A., Hulshof, M., Nkomo, L., Hussey, S., Van den Pol, B., Vuik, R., Stigter, T. e Van der Zaag, P. 2020. Using nature-based water storage for smallholder irrigated agriculture in African drylands: Lessons from frugal innovation pilots in Mozambique and Zimbabwe. *Environmental Science and Policy*, Vol. 107, pagg. 1-6. doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.010.
- Dutch ATEs. 2016. *Dutch Policy on ATEs Systems*. dutch-ates.com/wp-content/uploads/2016/09/DutchPolicyOnATEsSystems092016.pdf.
- Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R., Cleverly, J. e Huete, A. 2015. Groundwater-dependent ecosystems: Recent insights from satellite and field-based studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 10, pagg. 4229-4256. doi.org/10.5194/hess-19-4229-2015.
- Eckstein, G. 2013. Rethinking transboundary ground water resources management: A local approach along the Mexico-U.S. Border. *The Georgetown International Environmental Law*, Vol 25, No. 1, pagg. 95-128.
- _____. 2017. *The International Law of Transboundary Groundwater Resources*. Londra, Routledge.
- Efficiency for Access. 2019. *Solar Water Pump Outlook 2019: Global Trends and Market Opportunities*. Report prepared by CLASP/Energy Saving Trust/Dalberg. efficiencyforaccess.org/publications/solar-water-pump-outlook-2019-global-trends-and-market-opportunities.
- EIP (Environmental Integrity Project). 2019. *Coal's Poisonous Legacy: Groundwater Contaminated by Coal Ash across the U.S.* environmentalintegrity.org/reports/coal-poisonous-legacy/.

- Ellis, E. C. e Ramankutty, N. 2008. Putting people in the map: Anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol. 6, No. 8, pagg. 439-447. doi.org/10.1890/070062.
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., Van Noordwijk, M., Creed, I. F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D. V., Bargaúes Tobella, A., Ilstedt, U., Teuling, A. J., Gebreyohannis Gebrehiwot, S., Sands, D. C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y. e Sullivan, C. A. 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, Vol. 43, pagg. 51-61. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002.
- English, P. W. 1968. The origin and spread of qanats in the Old World. *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol 112, No. 3, pagg. 170-181.
- Erwin, K. L. 2009. Wetlands and global climate change: The role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, Vol. 17, pagg. 71-84. doi.org/10.1007/s11273-008-9119-1.
- Espindola, I. B., Telarolli Almeida de Leite, M. L. e Ribeiro, W. C. 2020. South-American transboundary waters: The management of the Guarani aquifer system and the La Plata basin towards the future. R. C. Brears (ed.), *The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies*. Cham, Svizzera, Palgrave Macmillan, pagg. 1-35. doi.org/10.1007/978-3-030-32811-5_51-1.
- Eurostat. s.d. Banca dati online della Commissione europea. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>. (Consultato tra aprile e ottobre 2021)
- EUWI+ (European Union Water Initiative Plus for Eastern Partnership Countries). 2020. *Development of Draft River Basin Management Plan for Alazani-Iori River Basin in Georgia*. EUWI+ Report ENI/2016/372-403. Version 1.1; March 2020. Vienna/Parigi, Umweltbundesamt GmbH/Office International de l'Eau (OIEau). www.eiec.gov.ge/getattachment/b4585a39-30e5-4ac4-9fb7-1fcc204052f4/Thematic_Summary_Alazani-Iori-river-basin_ENG.pdf.aspx.
- Evans, R. S. e Dillon, P. 2018. Linking groundwater and surface water: Conjunctive water management. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido e J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Paesi Bassi, CRC Press, Taylor & Francis Group/Balkema, pagg. 329-351.
- F** Facts & Factors. 2020. *Bottled Water Market By Type (Still Bottled Water, Carbonated Bottled Water, Flavoured Bottled Water, and Functional Bottled Water) and By End-Use (Packaging, Consumer Goods, and Agriculture): Global Industry Outlook, Market Size, Business Intelligence, Consumer Preferences, Statistical Surveys, Comprehensive Analysis, Historical Developments, Current Trends, and Forecasts, 2020–2026*. www.fnfresearch.com/bottled-water-market-by-type-still-bottled-water-713.
- Famiglietti, J. S. 2014. The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, Vol. 4, pagg. 945-948. doi.org/10.1038/nclimate2425.
- Fan, Y., Li, H. e Miguez-Macho, G. 2013. Global patterns of groundwater table depth. *Science*, Vol. 339, No. 6122, pagg. 940-943. doi.org/10.1126/science.1229881.
- Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B. e Otero-Casal, C. 2017. Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 114, No. 40, pagg. 10572-10577. doi.org/10.1073/pnas.1712381114.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations – Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura). 2012. *Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests in the Context of National Food Security*. Roma, FAO. www.fao.org/nr/tenure/voluntary-guidelines/en/.
- _____. 2013. *Guidelines to Control Water Pollution from Agriculture in China: Decoupling Water Pollution from Agricultural Production*. FAO Water Reports No. 40. Roma, FAO. www.fao.org/3/i3536e/i3536e.pdf.
- _____. 2017. *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. Roma, FAO. www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf.
- _____. 2018a. *More People, More Food, Worse Water? A Global Review of Water Pollution from Agriculture*. Roma/Colombo, FAO/International Water Management Institute (IWMI). www.fao.org/3/CA0146EN/ca0146en.pdf.
- _____. 2018b. *The Benefits and Risks of Solar-Powered Irrigation – A Global Overview*. Roma, FAO. www.fao.org/3/I9047EN/i9047en.pdf.
- _____. 2019. *Incorporating Environmental Flows into “Water Stress” Indicator 6.4.2: Guidelines for a Minimum Standard Method for Global Reporting*. Roma, FAO. www.fao.org/documents/card/en/c/ca3097en/.
- _____. 2020. *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming Water Challenges in Agriculture*. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cb1447en.
- _____. 2021. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Systems at Breaking Point*. Synthesis Report 2021. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cb7654en.
- Faostat. s.d. *Food and Agriculture Data*. Rome, FAO. www.fao.org/faostat/en/#home. (Consultato il 5 ottobre 2021).
- Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N. e Leduc, C. 2009. Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 7, Article W00A16. doi.org/10.1029/2007WR006785.
- Ferguson, G. e Gleeson, T. 2012. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, Vol. 2, pagg. 342-345. doi.org/10.1038/nclimate1413.

- Ferguson, G., Cuthbert, M. O., Befus, K., Gleeson, T. e McIntosh, J. C. 2020. Rethinking groundwater age. *Nature Geoscience*, Vol. 13, No. 9, pagg. 592-594. doi.org/10.1038/s41561-020-0629-7.
- Ferguson, G., McIntosh, J. C., Warr, O., Sherwood Lollar, B., Ballentine, C. J., Famiglietti, J. S., Kim, J-H., Michalski, J. R., Mustard, J. F., Tarnasad, J. e MacDonnell, J. J. 2021. Crustal groundwater volumes greater than previously thought. *Geophysical Research Letters*, Vol. 48, No. 16, Article e2021GL093549. doi.org/10.1029/2021GL093549.
- Ferrero, G., Setty, K., Rickert, B., George, S., Rinehold, A., DeFrance, J. e Bartram, J. 2019. Capacity building and training approaches for water safety plans: A comprehensive literature review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 222, No. 4, pagg. 615-627. doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.01.011.
- Finley, R. J. 2014. An overview of the Illinois Basin – Decatur Project. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, Vol. 4, No. 5, pagg. 571-579. doi.org/10.1002/ghg.1433.
- Foster, S. 2020. Global policy overview of groundwater in urban development – A tale of 10 cities! *Water*, Vol. 12, No. 2, Article 456. doi.org/10.3390/w12020456.
- Foster, S. e Chilton, J. 2003. Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 358, No. 1440, pp. 1957–1972. doi.org/10.1098/rstb.2003.1380.
- _____. 2018. Groundwater management: Policy principles & planning practices. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido e J. van der Gun (eds.), *Advances in groundwater governance*. Leiden, Paesi Bassi, CRC Press/Balkema, pagg. 73-95.
- Foster, S. e Garduño, H. 2009. Gestión apropiada del recurso hídrico subterráneo en América Latina. Lecciones de experiencias internacionales [Appropriate Groundwater Management for Latin America. Lessons from International Experience]. *Revista Aqua-LAC*, Vol. 1, No. 1. doi.org/10.29104/phi-aqualac/2009-v1-1-01.
- Foster, S. e Hirata, R. 2012. Groundwater use for urban development: Enhancing benefits and reducing risks. *On the Water Front*, Vol. 3, pagg. 21-29.
- Foster, S. e Loucks, D. P. (eds.). 2006. *Non-Renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-Sustainable Management for Water-Policy Makers*. Parigi, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000146997?posInSet=1&queryId=4b3dd499-0696-45d2-9f10-9feda13c7d4f.
- Foster, S. e Shah, T. 2012. *Groundwater Resources and Irrigated Agriculture – Making a Beneficial Relation more Sustainable*. GWP Perspectives Paper. Stoccolma, Global Water Partnership (GWP). www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/04-groundwater-resources-and-irrigated-agriculture-2012.pdf.
- Foster, S., Koundouri, P., Tuinhof, A., Kemper, K., Nanni, M. e Garduño, H. 2006. *Groundwater Dependent Ecosystems: The Challenge of Balanced Assessment and Adequate Conservation*. GW-MATE Briefing Note Series No. 15. Washington, DC, Banca mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/717061468155365572/Groundwater-dependent-ecosystems-the-challenge-of-balanced-assessment-and-adequate-conservation.
- Foster, S., Chilton, J., Moench, M., Cardy, F. e Schiffler, M. 2008. *Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability*. Water P-Notes No. 19. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11749.
- Foster, S., Van Steenberg, F., Zuleta, J. e Garduño, H. 2010a. *Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water: From Spontaneous Coping Strategy to Adaptive Resource Management*. GW-MATE Strategic Overview Series No. 2. Washington, DC, Banca mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/874731468315319173/Conjunctive-use-of-groundwater-and-surface-water-from-spontaneous-coping-strategy-to-adaptive-resource-management.
- Foster, S., Hirata, R. e Garduño, H. 2010b. *Urban Groundwater Use Policy – Balancing the Benefits and Risks in Developing Nations*. GW-MATE Strategic Overview Series No. 3. Washington, DC, Banca mondiale.
- Foster, S., Garduño, H., Tuinhof, A. e Tovey, C. 2010c. *Groundwater Governance: Conceptual Framework for Assessment of Provisions and Needs*. GW-MATE Strategic Overview Series No. 1. Washington, DC, Banca mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/603871468323116801/Groundwater-governance-conceptual-framework-for-assessment-of-provisions-and-needs.
- Foster, S., Tuinhof, A. e Van Steenberg, F. 2012. Managed groundwater development for water-supply security in Sub-Saharan Africa: Investment priorities. *Water SA*, Vol. 38, No. 3, pagg. 359-366. doi.org/10.4314/wsa.v38i3.1.
- Foster, S., Evans, R. e Escolero, O. 2015. The groundwater management plan: In praise of a neglected 'tool of our trade'. *Hydrogeology Journal*, Vol. 23, No. 5, pagg. 847-850. doi.org/10.1007/s10040-015-1261-2.
- Foster, S., Bousquet, A. e Furey, S. 2018. Urban groundwater use in tropical Africa – a key factor in enhancing water security? *Water Policy*. Vol. 20, No. 5, pagg. 982-994. doi.org/10.2166/wp.2018.056.
- Foster, S., Gathu, J., Eichholz, M. e Hirata, R. 2020a. Climate change: The utility groundwater role in supply security. *The Source*, April 2020, pagg. 50-54. www.thesourcemagazine.org/climate-change-the-utility-groundwater-role-in-supply-security/.
- Foster, S., Mielby, S., Hirata, R., Tubic, A. e Gathu, J. 2020b. Groundwater quality management for urban supply security. *The Source*, July 2020, pagg. 45-49. www.thesourcemagazine.org/groundwater-quality-management-for-urban-supply-security/.

- Foster, S., Eichholz, M., Nlend, B. e Gathu, J. 2020c. Securing the critical role of groundwater for the resilient water-supply of urban Africa. *Water Policy*, Vol. 22, No. 1, pagg. 121-132. doi.org/10.2166/wp.2020.177.
- Fraser, C. M., Kalin, R. M., Rivett, M. O., Nkhata, M. e Kanjaye, M. 2018. A national approach to systematic transboundary aquifer assessment and conceptualisation at relevant scales: A Malawi case study. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 20, pagg. 35-48. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.001.
- Fraser, C. M., Kalin, R. M., Kanjaye, M. e Uka, Z. 2020. A national border-based assessment of Malawi's transboundary aquifer units: Towards achieving Sustainable Development Goal 6.5.2. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 31, Article 100726. doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100726.
- Frątczak, W., Michalska-Hejduk, D., Zalewski, M. e Izydorczyk, K. 2019. Effective phosphorous reduction by a riparian plant buffer zone enhanced with a limestone-based barrier. *Ecological Engineering*, Vol. 130, pagg. 94-100. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.015.
- Freeze, R. A. e Cherry, J. A. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall Inc.
- Fridleifsson, I. B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J. W., Ragnarsson, A. e Rybach, L. 2008. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. *Proceedings of the IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*. Presentato all'IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Lübeck, Germania, pagg. 59-80. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/proc-renewables-lubeck.pdf.
- GAA (Guarani Aquifer Agreement – Accordo relativo all'acquifero guarani). 2020. *Guarani Aquifer Agreement*. www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Guarani_Aquifer_Agreement-English.pdf.
- Gage, A. e Milman, A. 2020. Groundwater plans in the United States: Regulatory frameworks and management goals. *Groundwater*, Vol. 59, No. 2, pagg. 175-189. doi.org/10.1111/gwat.13050.
- García, G. D. H. 2015. *Sub componente II.3, Aguas subterráneas para el ADT: Caracterización y diagnóstico transfronterizo relacionado a las aguas subterráneas de la cuenca del Plata* [Sottocomponente II.3, Acque sotterranee per una analisi transfrontaliera: caratterizzazione e relazione diagnostica relativa alle acque sotterranee del bacino idrografico del Rio della Plata]. https://cicplata.org/wp-content/uploads/2019/08/Agua-subterr%C3%A1nea_Garc%C3%ADa-Segredo.pdf. (In spagnolo)
- Garduño, H. e Foster, S. 2010. *Sustainable Groundwater Irrigation: Approaches to Reconciling Demand with Resources*. GW-MATE Strategic Overview Series No. 4. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27818.
- Gaye, C. B. e Tindimugaya, C. 2019. Review: Challenges and opportunities for sustainable groundwater management in Africa. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pagg. 1099-1110. doi.org/10.1007/s10040-018-1892-1.
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y. e Van der Meer, Th. H. 2008. *Water Footprint of Bio-Energy and Other Primary Energy Carriers*. Value of Water Research Report Series No. 29. Delft, Paesi Bassi, UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Gerlak, A. K., Medgal, S. B., Varady, R. G. e Richards, H. 2013. *Groundwater Governance in the U.S.: Summary of Initial Survey Results*. Maggio 2013. Università dell'Arizona. wrrc.arizona.edu/sites/wrrc.arizona.edu/files/pdfs/GroundwaterGovernanceReport-FINALMay2013.pdf.
- Gerland, P., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B. K., Chunn, J., Lalic, N., Bay, G., Buettner, T., Heilig, G. K. e Wilmoth, J. 2014. World population stabilization unlikely this century. *Science*, Vol. 346, No. 6206, pagg. 234-237. doi.org/10.1126/science.1257469.
- Gilbrich, W. H. e Struckmeier, W. F. 2014. *50 Years of Hydro(geo)logical Mapping Activities*. Parigi, UNESCO.
- Giménez, R., Mercau, J., Noretto, M., Páez, R. e Jobbágy, E. 2016. The ecohydrological imprint of deforestation in the semiarid Chaco: Insights from the last forest remnants of a highly cultivated landscape. *Hydrological Processes*, Vol. 30, No. 15, pagg. 2603-2616. doi.org/10.1002/hyp.10901.
- Giordano, M. 2006. Agricultural groundwater use and rural livelihoods in Sub-Saharan Africa: A first-cut assessment. *Hydrogeology Journal*, Vol. 14, No. 3, pagg. 310-318. doi.org/10.1007/s10040-005-0479-9.
- _____. 2009. Global groundwater? Issues and solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 34, No. 1, pagg. 153-178. doi.org/10.1146/annurev.enviro.030308.100251.
- Glazema, R. 2003. *Windenergie. Cursus Duurzame Energie in Ontwikkelingslanden* [Energia eolica. Percorso delle energie sostenibili nei paesi in via di sviluppo]. Enschede, Paesi Bassi, Università di Twente. https://www.wot.utwente.nl/publications/cde/windenergie.pdf. (In neerlandese).
- Gleeson, T. e Richter, B. 2017. How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers. *River Research and Applications*, Vol. 34, No. 1, pagg. 83-92. doi.org/10.1002/rra.3185.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P. e Van Beek, L. P. H. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, Vol. 488, No. 7410, pagg. 197-200. doi.org/10.1038/nature11295.
- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E. e Cardenas, M. B. 2016. The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, Vol. 9, pagg. 161-167. doi.org/10.1038/ngeo2590.

- Gleeson, T., Wang-Erlandsson, L., Putkka, M., Zipper, S. C., Jaramillo, F., Gerten, D., Fetzer, I., Cornell, S. E., Piemontese, L., Gordon, L. J., Rockström, J., Oki, T., Sivapalan, M., Wada, Y., Brauman, K. A., Flörke, M., Bierkens, M. F. P., Lehner, B., Keys, P., Kumm, M., Wagener, T., Dadson, S., Troy, T. J., Steffen, W., Falkenmark, M. e Famiglietti, J. S. 2020a. Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. *Water Resources Research*, Vol. 56, No. 4. doi.org/10.1029/2019WR024957.
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G. e Perrone, D. 2020b. Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 48, pagg. 431-463. doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251.
- Goldscheider, N. e Drew, D. (eds.). 2007. *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*. CRC Press.
- Gomes, N. 2006. *Access to Water, Pastoral Resource Management and Pastoralists' Livelihoods: Lessons Learned from Water Development in Selected Areas of Eastern Africa (Kenya, Ethiopia, Somalia)*. LSP Working Paper No. 26. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). www.fao.org/documents/card/en/c/2ef1b69b-d980-5860-bd4e-dbf613b8e487/.
- Gong, H., Pan, Y., Zheng, L., Li, X., Zhu, L., Zhang, C., Huang, Z., Li, Z., Wang, H. e Zhou, C. 2018. Long-term groundwater storage changes and land subsidence development in the North China Plain (1971-2015). *Hydrogeology Journal*, Vol. 26, pagg. 1417-1427. doi.org/10.1007/s10040-018-1768-4.
- Goodman, A., Sanguinito, S. e Levine, J. S. 2016. Prospective CO₂ saline resource estimation methodology: Refinement of existing US-DOE-NETL methods based on data availability. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 54, No. 1, pagg. 242-249. doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.09.009.
- Gorelick, S. M. e Zheng, C. 2015. Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 5, pagg. 3031-3051. doi.org/10.1002/2014WR016825.
- Goulburn-Murray Water. 2013. *Diversers' Tariff Strategy*. www.g-mwater.com.au/downloads/gmw/currentProjects/Diversers_Tariff_Strategy_Nov13_WEB.pdf.
- Government of Alberta. 2019. *Quest Carbon Capture and Storage Project. Annual Summary Report 2019*. https://open.alberta.ca/publications/quest-carbon-capture-and-storage-project-annual-report-2019.
- Governo del Canada. 2013. *Water Sources: Groundwater*. www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/water-overview/sources/groundwater.html#sub5.
- Governo del Kazakhstan. 2018. *Ob utverždenii Strategičeskogo plana razvitija Respubliki Kazakhstan do 2025 goda i priznanii utrativšimi silu nekotorych ukazov Prezidenta Respubliki Kazakhstan. Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 15 fevralja 2018 goda № 636*. [Approvazione del Piano strategico di sviluppo delle Repubblica del Kazakhstan fino al 2025 con modifica di alcuni decreti del Presidente della Repubblica del Kazakhstan. Decreto del Presidente della Repubblica del Kazakhstan, in data 15 febbraio 2018 N. 636]. www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC191496/.
- Gowing, J., Walker, D., Parkin, G., Forsythe, N., Haile, A. T. e Ayenew, D. A. 2020. Can shallow groundwater sustain small-scale irrigated agriculture in sub-Saharan Africa? Evidence from N-W Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 10, Article 100290. doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100290.
- GRACE 2.0. s.d. *GRACE 2.0 App*. tethys2.byu.edu/apps/newgrace/. (Consulato 17 marzo 2021).
- Graham, G., Allen, D. M. e Finkbeiner, B. 2015. Climate controls on nitrate concentration variability in the Abbotsford-Sumas aquifer, British Columbia. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 73, No. 6, pagg. 2895-2907. doi.org/10.1007/s12665-014-3072-5.
- Grech-Madin, C., Döring, S., Kim, K. e Swain, A. 2018. Negotiating water across levels: A peace and conflict "Toolbox" for water diplomacy. *Journal of Hydrology*, Vol. 559, pagg. 100-109. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.008.
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Treidel, H. e Aureli, A. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, Vol. 405, No. 3-4, pagg. 532-560. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002.
- Grey, D. e Sadoff, C. W. 2007. Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, Vol. 9, No. 6, pagg. 545-571. doi.org/10.2166/wp.2007.021.
- Griebler, C. e Avramov, M. 2015. Groundwater ecosystem services: A review. *Freshwater Science*, Vol. 34, No. 1, pagg. 355-367. doi.org/10.1086/679903.
- Grönwall, J. 2011. Groundwater dependence among poor urban people: Out of sight is out of mind? *International Journal Urban Sustainable Development*, Vol. 3, No. 1, pagg. 26-39. doi.org/10.1080/19463138.2010.547042.
- _____. 2016. Self-supply and accountability: To govern or not to govern groundwater for the (peri-) urban poor in Accra, Ghana. *Environmental Earth Science*, Vol. 75, Article 1163. doi.org/10.1007/s12665-016-5978-6.
- Grönwall, J. e Danert, K. 2020. Regarding groundwater and drinking water access through a human rights lens: Self-supply as a norm. *Water*, Vol. 12, No. 2, Article 419. doi.org/10.3390/w12020419.
- Grönwall, J. e Jonsson, A. C. 2017a. Regulating effluents from India's textile sector: New commands and compliance monitoring for Zero Liquid Discharge. *Law, Environment and Development Journal*, Vol. 13, No. 1.

- _____. 2017b. The Impact of 'zero' coming into fashion: Zero Liquid Discharge uptake and socio-technical transitions in Tirupur. *Water Alternatives*, Vol. 10, No. 2, pagg. 602-624. www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol10/v10issue2/372-a10-2-22/file.
- Grönwall, J. e Oduro-Kwarteng, S. 2018. Groundwater as a strategic resource for improved resilience: A case study from peri-urban Accra. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 77, Article 6. doi.org/10.1007/s12665-017-7181-9.
- Grönwall, J., Mulenga, M. e McGranahan, G. 2010. *Groundwater, Self-Supply and Poor Urban Dwellers: A Review with Case Studies of Bangalore and Lusaka*. Human Settlements Working Paper Series – Water and Sanitation No. 26. Londra, International Institute for Environment and Development (IIED). pubs.iied.org/10584iied.
- Groundwater Governance Project. 2016a. *Global Diagnostic on Groundwater Governance*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). www.fao.org/3/i5706e/i5706e.pdf.
- _____. 2016b. *Shared Global Vision for Groundwater Governance 2030 and a Call-for-Action*. Revised edition. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). www.fao.org/3/a-i5508e.pdf.
- _____. 2016c. *Global Framework for Action to Achieve the Vision on Groundwater Governance*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). www.fao.org/3/a-i5705e.pdf.
- Güntner, A., Schmidt, R. e Döll, P. 2007. Supporting large-scale hydrogeological monitoring and modelling by time-variable gravity data. *Hydrogeology Journal*, Vol. 15, No. 1, pagg. 167-170. doi.org/10.1007/s10040-006-0089-1.
- Guppy, L., Uyttendaele, P., Villholth, K. G. e Smakhtin, V. 2018. *Groundwater and Sustainable Development Goals: Analysis of Interlinkages*. UNU-INWEH Report Series No. 4. Hamilton, Ont., United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH). <https://inweh.unu.edu/groundwater-and-sustainable-development-goals-analysis-of-interlinkages/>.
- Gurdak, J. J., Hanson, R. T., McMahon, P. B., Bruce, B. W., McCray, J. E., Thyne, G. D. e Reedy, R. C. 2007. Climate variability controls on unsaturated water and chemical movement, High Plains aquifer, USA. *Vadose Zone Journal*, Vol. 6, No. 3, pagg. 533-547. doi.org/10.2136/vzj2006.0087.
- Guzy, A. e Malinowska, A. A. 2020. State of the art and recent advancements in modelling of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Water*, Vol. 12, No. 7, Article 2051. doi.org/10.3390/w12072051.
- GWP (Global Water Partnership). 2017. *Groundwater Management Plans (C4.03)*. GWP. www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments/Planning_for_IWRM/Groundwater_management_plans/. (Consultato il 24 maggio 2021)
- Haacker, E. M. K., Kendall, A. D. e Hyndman, D. W. 2016. Water level declines in the High Plains aquifer: Predevelopment to resource senescence. *Groundwater*, Vol. 54, No. 2, pagg. 231-242. doi.org/10.1111/gwat.12350.
- Han, Z. e Cheng, M. 2013. History of hydrogeology in China. N. Howden and J. Mather (eds.), *History of Hydrogeology. IAH International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 28, Boca Raton, Fla./Londra/New York/Leiden, Paesi Bassi, CRC Press/Balkema, pagg. 4-46.
- Haque, S., Nahar, N. e Sayem, S. 2021. Industrial water management and sustainability: Development of SIWP tool for textile industries of Bangladesh. *Water Resources and Industry*, Vol. 25, Article 100145. doi.org/10.1016/j.wri.2021.100145.
- Hara, K. 2006. Groundwater contamination and quality management policy in Asia. *International Review for Environmental Strategies*, Vol. 6, No. 2, pagg. 291-306.
- Harlan, R. L., Kolm, K. E. e Gutentag, E. D. 1989. *Water-Well Design and Construction. Developments in Geotechnical Engineering*. Amsterdam/Oxford, Regno Unito/New York/Tokyo, Elsevier.
- Harpold, A. A. e Kohler, M. 2017. Potential for changing extreme snowmelt and rainfall events in the mountains of western United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 122, No. 24, pagg. 13219-13228. doi.org/10.1002/2017JD027704.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. e Lister, D. H. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – The CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, Vol. 34, No. 3, pagg. 623-642. doi.org/10.1002/joc.3711.
- Harris, M. 2015. China's sponge cities: Soaking up water to reduce flood risks. *The Guardian*, 1 ottobre 2015.
- Hayashi, M. 2013. The cold vadose zone: Hydrological and ecological significance of frozen-soil processes. *Vadose Zone Journal*, Vol. 12, No. 4, pagg. 1-8. doi.org/10.2136/vzj2013.03.0064.
- Healy, A., Allan, S., Bristow, G., Capstick, S., Danert, K., Goni, I., MacDonald, A. M., Tijani, M., Upton, K. e Whitmarsh, L. 2017. *Individual Water Sourcing: Understanding Risks and Resilience of Groundwater Resource Abstraction in Nigeria*. 40th WEDC International Conference, Loughborough, Regno Unito.
- Healy, A., Upton, K., Capstick, S., Bristow, G., Tijani, M., MacDonald, A. M., Goni, I., Bukar, Y., Whitmarsh, L., Theis, S., Danert, K. e Allan, S. 2020. Domestic groundwater abstraction in Lagos, Nigeria: A disjuncture in the science-policy-practice interface? *Environmental Research Letters*, Vol. 15, No. 4, Article 045006. doi.org/10.1088/1748-9326/ab7463.
- Healy, R. W. 2010. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge, Regno Unito, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/CBO9780511780745.

- Heinke, J., Lannerstad, M., Gerten, D., Havlík, P., Herrero, M., Notenbaert, A. M. O., Hoff, H. e Müller, C. 2020. Water use in global livestock production – Opportunities and constraints for increasing water productivity. *Water Resources Research*, Vol. 56, No. 12, e2019WR026995. doi.org/10.1029/2019WR026995.
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W-C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H. e Ye, S. 2020. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, Vol. 371, No. 6524, pagg. 34-36. doi.org/10.1126/science.abb8549.
- Hinsby, K., Condeso de Melo, M. T. e Dahl, M. 2008. European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Science of the Total Environment*, Vol. 401, No. 1-3, pagg. 1-20. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.018.
- Hirji, R. F., Mandal, S. e Pangare, G. 2017. *South Asia Groundwater Forum: Regional Challenges and Opportunities for Building Drought and Climate Resilience for Farmers, Cities, and Villages*. Washington, DC, Banca mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/917111513695938541/South-Asia-groundwater-forum-regional-challenges-and-opportunities-for-building-drought-and-climate-resilience-for-farmers-cities-and-villages.
- Hiscock, K., Sparkes, R. e Hodgson, A. 2011. Evaluation of future climate change impacts on European groundwater resources. H. Treidel, J. L. Martin-Bordes e J. J. Gurdak (eds.), *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*. London, CRC Press, pagg. 351-365. doi.org/10.1201/b11611.
- HLPW (High-Level Panel on Water). 2018. *Making Every Drop Count: An Agenda for Water Action*. HLPW Outcome Report. New York, Nazioni Unite/Banca mondiale. sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17825HLPW_Outcome.pdf.
- Hodgson, S. 2016. *Exploring the Concept of Water Tenure*. Land and Water Discussion Paper No. 10. Roma, FAO. www.fao.org/publications/card/en/c/f5d1fc87-ac13-438d-8957-4f7214b0ea55/.
- Hoekstra, A. Y. 2018. Global food and trade dimensions of groundwater governance. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido e J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Paesi Bassi, CRC Press/Balkema, pagg. 353-366.
- Hofmann, J., Venohr, M., Behrendt, H. e Opitz, D. 2010. Integrated water resources management in central Asia: Nutrient and heavy metal emissions and their relevance for the Kharaa River Basin, Mongolia. *Water Science and Technology*, Vol. 62, No. 2, pagg. 353-363. doi.org/10.2166/wst.2010.262.
- Hofmann, J., Watson, V. e Scharaw, B. 2015. Groundwater quality under stress: Contaminants in the Kharaa River basin (Mongolia). *Environmental Earth Sciences*, Vol. 73, pagg. 629-648. doi.org/10.1007/s12665-014-3148-2.
- Hogeboom, R. J., Kamphuis, I. e Hoekstra, A. Y. 2018. Water sustainability of investors: Development and application of an assessment framework. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 202, pagg. 642-648. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.142.
- Holding, S. e Allen, D. M. 2015. From days to decades: Numerical modeling of freshwater lens response to climate change stressors on small islands. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, pagg. 933-949. doi.org/10.5194/hess-19-933-2015.
- Holding, S., Allen, D. M., Foster, S., Hsieh, A., Larocque, I., Klassen, J. e Van Pelt, S. C. 2016. Groundwater vulnerability on small islands. *Nature Climate Change*, Vol. 6, pagg. 1100-1103. doi.org/10.1038/nclimate3128.
- Holmgren, J. M. e Werner, M. J. 2021. Raspberry shake instruments provide initial ground-motion assessment of the induced seismicity at the United Downs deep geothermal power project in Cornwall, United Kingdom. *The Seismic Record*, Vol. 1, No. 1, pagg. 27-34. doi.org/10.1785/0320210010.
- Hoogeveen, J., Faurès, J-M., Peiser, L., Burke, J. e Van de Giesen, N. 2015. GlobWat – A global water balance model to assess water use in irrigated agriculture. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 9, pagg. 3829-3844. doi.org/10.5194/hess-19-3829-2015.
- Hora, T., Srinivasan, V. e Basu, N. B. 2019. The groundwater recovery paradox in South India. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 16, pagg. 9602-9611. doi.org/10.1029/2019GL083525.
- Hosono, T., Ono, M., Burnett, W. C., Tokunaga, T., Taniguchi, M. e Akimichi, T. 2012. Spatial distribution of submarine groundwater discharge and associated nutrients within a local coastal area. *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, No. 10, pagg. 5319-5326. doi.org/10.1021/es2043867.
- Houéménou, H., Tweed, S., Dobigny, G., Mama, D., Alassane, A., Silmer, R., Babic, M., Ruy, S., Chaigneau, A., Gauthier, P., Socohou, A., Dossou, H. -J., Badou, S. e Leblanc, M. 2020. Degradation of groundwater quality in expanding cities in West Africa. A case study of the unregulated shallow aquifer in Cotonou. *Journal of Hydrology*, Vol. 582, Article 124438. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124438.
- Howard, J. e Merrifield, M. 2010. Mapping groundwater dependent ecosystems in California. *PLoS One*, Vol. 5, No. 6, e11249. doi.org/10.1371/journal.pone.0011249.
- Hu, K., Awange, J., Khandu, K., Forootan, E., Mikosz Goncalves, R. e Fleming, K. 2017. Hydrogeological characterisation of groundwater over Brazil using remotely sensed and model products. *Science of The Total Environment*, Vol. 599-600, pagg. 372-386. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.188.
- Hughes, D. A., Kingston, D. G. e Todd, M. C. 2011. Uncertainty in water resources availability in the Okavango River basin as a result of climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 3, pagg. 931-941. doi.org/10.5194/hess-15-931-2011.

- Humphreys, W. F. 2006. Aquifers: the ultimate groundwater-dependent ecosystems. *Australian Journal of Botany*, Vol. 54, No. 2, pagg. 115-132. doi.org/10.1071/BT04151.
- Huss, M. e Hock, R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, Vol. 8, pagg. 135-140. doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x.
- Hutton, G. e Varughese, M. 2016. *The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene*. Water and Sanitation Program Technical Paper. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23681.
- Huttrer, G. W. 2021. Geothermal power generation in the world 2015-2020 update report. *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, aprile-ottobre 2021.
- Hynds, P., Regan, S., Andrade, L., Mooney, S., O'Malley, K., DiPelino, S. e O'Dwyer, J. 2018. Muddy waters: Refining the way forward for the "sustainability science" of socio-hydrogeology. *Water*, Vol. 10, No. 9, Article 1111. doi.org/10.3390/w10091111.
- IAH (International Association of Hydrogeologists – Associazione internazionale degli idrogeologi). 2005. *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in Semi-Arid Areas*. Parigi, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf000014381971=null&queryId=876e1340-864a-48fd-9bbd-1b672f0de516.
- _____. 2015. *Resilient Cities & Groundwater*. IAH Strategic Overview Series. iah.org/wp-content/uploads/2015/12/IAH-Resilient-Cities-Groundwater-Dec-2015.pdf.
- _____. 2017. *The UN-SDGs for 2030: Essential Indicators for Groundwater*. IAH. https://iah.org/wp-content/uploads/2017/04/IAH-Groundwater-SDG-6-Mar-2017.pdf.
- _____. 2018. *Mining Enterprises & Groundwater*. IAH Strategic Overview Series. iah.org/wp-content/uploads/2018/12/IAH_SOS_MiningEnterprisesGroundwater.pdf.
- ICMM (International Council on Mining & Metals). 2012. *Water Management in Mining: A Selection of Case Studies*. Londra, ICMM. icmm.uat.byng.uk.net/en-gb/publications/water/water-management-in-mining-a-selection-of-case-studies.
- ICTA-UAB (Instituto de ciencia y tecnología ambiental, Universidad Autónoma de Barcelona). s.d. *Environmental Justice Atlas*. ejatlas.org/commodity/water. (Consultato il 21 giugno 2021).
- ICWE (International Conference on Water and the Environment – Conferenza internazionale sull'acqua e l'ambiente). 1992. *The Dublin Statement on Water and Sustainable Development*. Dublino, 31 gennaio 1992, ICWE. www.un-documents.net/h2o-dub.htm.
- Idowu, T. E. e Lasisi, K. H. 2020. Seawater intrusion in the coastal aquifers of East and Horn of Africa: A review from a regional perspective. *Scientific African*, Vol. 8, e00402. doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00402.
- IEA (International Energy Agency – Agenzia internazionale dell'energia). 2016a. *Water-Energy Nexus, Excerpt from the World Energy Outlook 2016*. Parigi, OCSE/IEA. www.iea.org/reports/water-energy-nexus.
- _____. 2016b. *Key World Energy Statistics 2016*. Parigi, IEA. doi.org/10.1787/key_energ_stat-2016-en.
- _____. 2019a. *Africa Energy Outlook 2019. Excerpt from the World Energy Outlook Special Report 2019*. Parigi, IEA. www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019.
- _____. 2019b. *Renewables 2019: Analysis and Forecast to 2024*. Parigi, IEA. doi.org/10.1787/b3911209-en.
- IFC (International Finance Corporation). 2014. *Water, Mining and Communities: Creating Shared Value through Sustainable Water Management*. Draft for Discussion. commdev.org/publications/water-mining-and-communities/.
- IGB (Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries). 2020. *IGB Position regarding the Tesla Building Project in Grünheide*. www.igb-berlin.de/en/news/igb-position-regarding-tesla-building-project-grunheide
- IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Centre). 2014. *Groundwater Monitoring in Latin America*. Summary report of information shared during the Regional Workshop on Groundwater Monitoring. IGRAC. www.un-igrac.org/resource/groundwater-monitoring-latin-america.
- _____. 2016. *Investor Risk Analysis: Why Groundwater Matters? The Value of Groundwater*. Delft, Paesi Bassi, IGRAC. www.un-igrac.org/resource/investor-risk-analysis-why-groundwater-matters.
- _____. 2020. *National Groundwater Monitoring Programmes: A Global Overview of Quantitative Groundwater Monitoring Networks*. Delft, Paesi Bassi, IGRAC. www.un-igrac.org/stories/national-groundwater-monitoring-programmes.
- _____. 2021. *Transboundary Aquifers of the World [map]*. Edition 2021. Scale 1 : 50 000 000. Delft, The Netherlands, IGRAC. www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/2021TBAMap_UNESCO%20Version.pdf; unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380193..
- _____. s.d. *The Global Groundwater Information System (GGIS)*. https://ggis.un-igrac.org.
- IGRAC/UNESCO-IHP (International Groundwater Resources Assessment Centre/UNESCO Intergovernmental Hydrological Programme – Programma idrologico intergovernativo). 2015. *Guidelines for Multidisciplinary Assessment of Transboundary Aquifers*. Draft version. Settembre

2015. Delft, Paesi Bassi, IGRAC. www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Guidelines%20for%20TBA%20Assessment%2020150901.pdf.
- ILC (International Law Commission – Commissione del diritto internazionale). 2008. *Draft Articles on the Law of Transboundary Aquifers*. Nazioni Unite. legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/draft_articles/8_5_2008.pdf.
- IOM (International Organization for Migration – Organizzazione internazionale per le migrazioni). 2019. *Skyscraper-Depth Well brings Clean Water to Rohingya Refugees*. News and press release, 17 maggio 2019. reliefweb.int/report/bangladesh/skyscraper-depth-well-brings-clean-water-rohingya-refugees.
- Ionescu, D., Siebert, C., Polerecky, L., Munwes, Y. Y., Lott, C., Häusler, S., Bižić-Ionescu, M., Quast, C., Peplies, J., Glockner, F. O., Ramette, A., Rödiger, T., Dittmar, T., Oren, A., Geyer, S., Stärk, H.-J., Sauter, M., Licha, T., Laronne, J. B. e De Beer, D. 2012. Microbial and chemical characterization of underwater fresh water springs in the Dead Sea. *PLoS One*, Vol. 7, No. 6, e38319. doi.org/10.1371/journal.pone.0038319.
- IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – Piattaforma intergovernativa scienza-politica sulla biodiversità e i servizi ecosistemici). 2019. *The Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondizio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis e C. N. Zayas (eds.). Bonn, Germania, IPBES Secretariat. doi.org/10.5281/zenodo.3553579
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change – Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico). 2014a. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Regno Unito, Cambridge University Press, pagg. 1029-1136. doi.org/10.1017/CBO9781107415324.024.
- _____. 2014b. *Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press. <https://climateanalytics.org/publications/2014/climate-change-2014-mitigation-of-climate-change-ipcc-working-group-iii-contribution-ar5/>.
- IPES-Food (International Panel of Experts on Sustainable Food Systems). 2018. *Breaking Away from Industrial Food and Farming Systems: Seven Case Studies of Agroecological Transition*. www.ipes-food.org/_img/upload/files/CS2_web.pdf.
- ITU (International Telecommunication Union – Unione internazionale delle telecomunicazioni). 2010. *ICT as an Enabler for Smart Water Management*. ITU-T Technology Watch Report. Ginevra, ITU. www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000100003PDFE.pdf.
- Izydorczyk, K., Frątczak, W., Drobnińska, A., Cichowicz, E., Michalska-Hejduk, D., Gross, R. e Zalewski, M. 2013. A biogeochemical barrier to enhance a buffer zone for reducing diffuse phosphorus pollution – Preliminary results. *Ecology & Hydrobiology*, Vol. 13, No. 2, pagg. 104-112. doi.org/10.1016/j.ecohyd.2013.06.003.
- Jacobsen, M., Webster, M. e Vairavamoorthy, K. (eds.). 2013. *The Future of Water in African Cities: Why Waste Water?* Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11964. Licenza: CC BY 3.0 IGO.
- Jadeja, Y., Maheshwari, B., Packham, R., Bohra, H., Purohit, R., Thaker, B., Dillon, P., Oza, S., Dave, S., Soni, P., Dashora, Y., Dashora, R., Shah, T., Gorsiya, J., Katara, P., Ward, J., Kookana, R., Singh, P. K., Chinnasamy, P., Goradiya, V., Prathapar, S., Varua, M. e Chew, M. 2018. Managing aquifer recharge and sustaining groundwater use: Developing a capacity building program for creating local groundwater champions. *Sustainable Water Resources Management*, Vol. 4, pagg. 317-329. doi.org/10.1007/s40899-018-0228-6.
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J.-D. e Ross, A. 2016. *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Springer Open.
- Jamali Jaghdani, T. e Kvartiuk, V. 2021. The energy-water nexus in Iran: The political economy of energy subsidies for groundwater pumping. S. Hülsmann e M. Jampani (eds.), *A Nexus Approach for Sustainable Development*. Cham, Svizzera, Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-57530-4_8.
- Jamil, A., Riaz, S., Ashraf, M. e Foolad, M. R. 2011. Gene expression profiling of plants under salt stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, Vol. 30, No. 5, pagg. 435-458. doi.org/10.1080/07352689.2011.605739.
- Jarraya-Horriche, F., Benabdallah, S. e Ayadi, M. 2020. Groundwater monitoring for assessing artificial recharge in the Mediterranean coastal aquifer of Korba (Northeastern Tunisia). *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 192, No. 7, Article 422. doi.org/10.1007/s10661-020-08408-w.
- Jasechko, S. e Taylor, R. G. 2015. Intensive rainfall recharges tropical groundwaters. *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 12, Article 124015. doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124015.
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y. e Kirchner, J. W. 2021. Widespread potential loss of streamflow into underlying aquifers across the USA. *Nature*, Vol. 591, pagg. 391-395. doi.org/10.1038/s41586-021-03311-x.
- Jia, X., O'Connor, D., Hou, D., Jin, Y., Li, G., Zheng, C., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W. e Luo, J. 2019. Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China. *Science of The Total Environment*, Vol. 672, pagg. 551-562. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.457.

- Kadhem, G. M. e Zubari, W. K. 2020. Identifying optimal locations for artificial groundwater recharge by rainfall in the Kingdom of Bahrain. *Earth Systems and Environment*, Vol. 4, pagg. 551-566. doi.org/10.1007/s41748-020-00178-2.
- Kalbus, E., Reinstorf, F. e Schirmer, M. 2006. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: A review. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10, No. 6, pagg. 873-887. doi.org/10.5194/hess-10-873-2006.
- Kataoka, Y. e Shivakoti, B. R. 2013. *Groundwater Governance Regional Diagnosis: Asia and the Pacific Region*. IGES (Institute for Global Environmental Studies).
- Kelkar Khambete, A. 2020. *The Karnataka State Water Policy 2019*. India Water Portal, 20 gennaio 2020. www.indiawaterportal.org/articles/karnataka-state-water-policy-2019.
- Kemper, K. E. 2007. Instruments and institutions for groundwater management. M. Giordano and K. G. Villholth, *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development*. Wallingford, Regno Unito, CABI. pagg. 153-172.
- Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B. e Simmons, C. T. 2016. Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *Journal of Hydrology*, Vol. 535, pagg. 235-255. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.083.
- Kidmose, J., Refsgaard, J. C., Trolborg, L., Seaby, L. P. e Escrivà, M. M. 2013. Climate change impact on groundwater levels: Ensemble modelling of extreme values. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, pagg. 1619-1634. doi.org/10.5194/hess-17-1619-2013.
- Kim, S. G. e Kim, G-B. 2019. Are groundwater monitoring networks economical? Cost-benefit analysis on the long-term groundwater supply project of South Korea. *Water*, Vol. 11, No. 4, Article 753. doi.org/10.3390/w11040753.
- Kiparsky, M., Milman, A., Owen, D. e Fisher, A. T. 2017. The importance of institutional design for distributed local-level governance of groundwater. The case of California's Sustainable Groundwater Management Act. *Water*, Vol. 9, No. 10, Art. 755. doi.org/10.3390/w9100755.
- Kiran, S. e Rao, V. 2019. Zero Liquid Discharge implementation in textile industry – Challenges and way forward. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10, No. 9, pagg. 205-208.
- Kiron, M. I. 2014. *Water Consumption in Textile Processing Industry*. Textile Learner, 27 aprile 2014. www.textilelearner.net/water-consumption-in-textile-processing-industry/.
- Klausmeyer, K., Howard, J., Keeler-Wolf, T., Davis-Fadtke, K., Hull, R. e Lyons, A. 2018. *Mapping Indicators of Groundwater Dependent Ecosystems in California: Methods Report*. San Francisco, Calif. groundwaterresourcehub.org/public/uploads/pdfs/iGDE_data_paper_20180423.pdf.
- Klausmeyer, K., Howard, J., Rohde, M. M. e Stanley, C. s.d. *Natural Communities Commonly Associated with Groundwater Version 2.0 (NCCAG 2.0)*. The Nature Conservancy database. www.scienceforconservation.org/products/natural-communities-groundwater-v2. (Consultato il 9 maggio 2021).
- Kløve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., Ilmonen, J., Karakaya, N., Kupfersberger, H., Kværner, J., Lundberg, A., Mileusnić, M., Moszczynska, A., Muotka, T., Preda, E., Rossi, P., Siergieiev, D., Šimek, J., Wachniew, P., Angheluta, V. e Widerlund, A. 2011. Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends. *Environmental Science & Policy*, Vol. 14, No. 7, pagg. 770-781. doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.002.
- Kløve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Bertacchi Uvo, C., Velasco, E. e Pulido-Velazquez, M. 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, Vol. 518, Part B, pagg. 250-266. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037.
- Knobeloch, L., Salna, B., Hogan, A., Postle, J. e Anderson, H. 2000. Blue babies and nitrate-contaminated well water. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 108, No. 7, pagg. 675-678. doi.org/10.1289/ehp.00108675.
- Kolker, J. E., Kingdom, B., Trémolet, S., Winpenny, J. e Cardone, R. 2016. *Financing Options for the 2030 Water Agenda*. Water Global Practice Knowledge Brief. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25495.
- Kolusu, S. R., Shamsudduha, M., Todd, M. C., Taylor, R. G., Seddon, D., Kashaigili, J. J., Ebrahim, G. Y., Cuthbert, M. O., Sorensen, J. P. R., Villholth, K. G., MacDonald, A. M. e MacLeod, D. A., 2019. The El Niño event of 2015–2016: Climate anomalies and their impact on groundwater resources in East and Southern Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, pagg. 1751-1762. doi.org/10.5194/hess-23-1751-2019.
- Konikow, L. F. 2011. Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No. 17, L17401, doi.org/10.1029/2011GL048604.
- _____. 2013. Overestimated water storage. *Nature Geoscience*, Vol. 6, p. 3. doi.org/10.1038/ngeo1659.
- Korzun, V. (ed.). 1974. *Mirovoj vodnyj balans i vodnye resursy Zemli* [Bilancio idrico mondiale e risorse idriche della Terra]. Leningrado, URSS, Hidrometeoizdat. (In russo).
- Kotwicki, V. 2009. Water balance of Earth. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 54, No. 5, pagg. 829-840. doi.org/10.1623/hysj.54.5.829.
- Kowalczyk, A., Witkowski, A., Rozkowski, A., Szczepanski, A., Rogoz, M., Przybyłek, J. e Stasko, S. 2010. What Polish mining owes to Polish hydrogeology. *Przegląd Geologiczny*, Vol. 58, No. 9, pagg. 776-788.

- Kramers, L., Van Wees, J-D., Pluymaekers, M. P. D., Kronimus, A. e Boxem, T. 2012. Direct heat resource assessment and subsurface information systems for geothermal aquifers; The Dutch perspective. *Netherlands Journal of Geosciences*, Vol. 91, No. 4, pagg. 637-649. doi.org/10.1017/S001677460000421.
- Kreamer, D. K. e Springer, A. E. 2008. The hydrology of desert springs in North America. L. E. Stevens e V. J. Meretsky (eds.), *Aridland Springs in North America, Ecology and Conservation*. Tucson, Ariz., University of Arizona Press.
- Kreamer, D. K., Stevens, L. E. e Ledbetter, J. D. 2015. Groundwater dependent ecosystems – Science, challenges, and policy directions. S. Adelana (ed.), *Groundwater: Hydrogeochemistry, Environmental Impacts and Management Practices*. Hauppauge, NY, Nova Science Publishers, pagg. 205-230.
- Kuhn, O. 2004. Ancient Chinese drilling. *CSEG Recorder*, Vol. 29, No. 6. csegrecorder.com/articles/view/ancient-chinese-drilling.
- Kulongoski, J. T. e McMahon, P. B. 2019. Methane emissions from groundwater pumping in the USA. *npj Climate and Atmospheric Science*, Vol. 2, Article 11. doi.org/10.1038/s41612-019-0068-6.
- Lall, U., Josset, L. e Russo, T. 2020. A snapshot of the world's groundwater challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 45, No. 1, pagg. 171-194. doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800.
- Lamontagne-Hallé, P., McKenzie, J. M., Kurylyk, B. L. e Zipper, S. C. 2018. Changing groundwater discharge dynamics in permafrost regions. *Environmental Research Letters*, Vol. 13, No. 8, Article 084017. doi.org/10.1088/1748-9326/aad404.
- Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M. E. e Ward, R. S. 2012. Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*, Vol. 163, pagg. 287-303. doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034.
- Lapworth, D. J., Das, P., Shaw, A., Mukherjee, A., Civil, W., Petersen, J. O., Goody, D. C., Wakefield, O., Finlayson, A., Krishan, G., Sengupta, P. e MacDonald, A. M. 2018. Deep urban groundwater vulnerability in India revealed through the use of emerging organic contaminants and residence time tracers. *Environmental Pollution*, Vol. 240, pagg. 938-949. doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.053.
- Lapworth, D. J., MacDonald, A. M., Kebede, S., Owor, M., Chavula, G., Fallas, H., Wilson, P., Ward, J. S. T., Lark, M., Okullo, J., Mwachungu, E., Banda, S., Gwengweya, G., Nedaw, D., Jumbo, S., Banks, E., Cook, P. and Casey, V. 2020. Drinking water quality from rural handpump-boreholes in Africa. *Environmental Research Letters*, Vol. 15, No. 6. doi.org/10.1088/1748-9326/ab8031.
- Lapworth, D. J., Nkhuwa, D. C. W., Okotto-Okotto, J., Pedley, S., Stuart, M. E., Tijani, M. N. and Wright, J. 2017. Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: Current status and implications for water security and public health. *Hydrogeology Journal*, Vol. 25, pp. 1093–1116. doi.org/10.1007/s10040-016-1516-6.
- Larned, S. T., Datry, T., Arscott, D. B. e Tockner, K. 2010. Emerging concepts in temporary river ecology. *Freshwater Biology*, Vol. 55, No. 4, pagg. 717-738. doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02322.x.
- Leblanc, M. J., Tregoning, P., Ramillien, G., Tweed, S. O. e Fakes, A. 2009. Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia. *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 4, W04408. doi.org/10.1029/2008WR007333.
- Lecher, A. L. e Mackey, K. R. M. 2018. Synthesizing the effects of submarine groundwater discharge on marine biota. *Hydrology*, Vol. 5, No. 4, Article 60. doi.org/10.3390/hydrology5040060.
- Lee, S-Y., Swager, L., Pekot, L., Piercey, M., Will, R. e Zaluski, W. 2018a. Study of operational dynamic data in Aquistore project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 76, pagg. 62-77. doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.008.
- Lee, E., Jayakumar, R., Shrestha, S. e Han, Z. 2018b. Assessment of transboundary aquifer resources in Asia: Status and progress towards sustainable groundwater management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 20, pagg. 103-115. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.01.004.
- Le Luu, T. 2019. Remarks on the current quality of groundwater in Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, pagg. 1163-1169. doi.org/10.1007/s11356-017-9631-z.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R. H. e Zhang, T. 2007. Observations: Changes in snow, ice and frozen ground. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor e H. L. Miller (eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Regno Unito, Cambridge University Press, pagg. 337-383. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter4-1.pdf.
- Li, X., Atwill, E. R., Antaki, E., Applegate, O., Bergamaschi, B., Bond, R. F., Chase, J., Ransom, K. M., Samuels, W. e Watanabe, N. 2015. Fecal indicator and pathogenic bacteria and their antibiotic resistance in alluvial groundwater of an irrigated agricultural region with dairies. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 44, No. 5, pagg. 1435-1447. doi.org/10.2134/jeq2015.03.0139.
- Liao, X. e Ming, J. 2019. Pressures imposed by energy production on compliance with China's 'Three Red Lines' water policy in water-scarce provinces. *Water Policy*, Vol. 21, No. 1, pagg. 38-48. doi.org/10.2166/wp.2018.211.
- Liljedahl, A. K., Gädeke, A., O'Neel, S., Gatesman, T. A. e Douglas, T. A. 2017. Glacierized headwater streams as aquifer recharge corridors, subarctic Alaska. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, No. 13, pagg. 6876-6885. doi.org/10.1002/2017GL073834.
- Linton, J. e Brooks, D. 2011. Governance of transboundary aquifers: New challenges and new opportunities. *Water International*, Vol. 36, No. 5. doi.org/10.1080/02508060.2011.599312.

- Lipponen, A. e Chilton, J. 2018. Development of cooperation on managing transboundary groundwaters in the pan-European region: The role of international frameworks and joint assessments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 20, pagg. 1451-1457. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.05.001.
- Liu, C. M., Yu, J. J. e Kendy, E. 2010. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain. *Water International*, Vol. 26, No. 2, pagg. 265-272. doi.org/10.1080/02508060108686913.
- Liu, T., Bruins, R. J. F. e Heberling, M. T. 2018. Factors influencing farmers' adoption of best management practices: A review and synthesis. *Sustainability*, Vol. 10, No. 2, Article 432. doi.org/10.3390/su10020432.
- Liu, J. e Zheng, C. 2016. Towards integrated groundwater management in China. A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J-D. Rinaudo e A. Ross (eds.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Cham, Switzerland, Springer International Publishing, pagg. 455-475. doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_18.
- Lowenberg DeBoer, J. e Erickson, B. 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, Vol. 111, No. 4, pagg. 1552-1569. doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779.
- Lund, J. W. e Tóth, A. N. 2020. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, Vol. 90, Article 101915. doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915.
- Lundgren, E. J., Ramp, D., Stromberg, J. C., Wu, J., Nieto, N. C., Sluk, M., Moeller, K. T. e Wallach, A. D. 2021. Equids engineer desert water availability. *Science*, Vol. 372, No. 6541, pagg. 491-495. doi.org/10.1126/science.abd6775.
- Luijendijk, E., Gleeson, T. e Moosdorf, N. 2020. Fresh groundwater discharge insignificant for the world's oceans but important for coastal ecosystems. *Nature Communications*, Vol. 11, No. 1, Article 1260. doi.org/10.1038/s41467-020-15064-8.
- Lytton, L., Ali, A., Garthwaite, B., Punthakey, J. F. e Saeed, B. 2021. *Groundwater in Pakistan's Indus Basin: Present and Future Prospects*. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35065.
- Lyuta, N., Sanina, I., Biarozka, O., Vasniova, O., Scheidleder, A. e Humer, F. 2021. *Transboundary Subparts of Groundwater Bodies (GWB) and Transboundary Monitoring Network of the Republic of Belarus and the Ukraine – Developed under the European Water Initiative Plus for Eastern Partnership Countries (EUWI+)*. EGU General Assembly 2021, abstract 4599. www.euwipluseast.eu/en/component/k2/item/1788-ukraine-belarus-abstract-for-the-egu21-conference-on-transboundary-groundwater-bodies-2021-eng.
- MacAllister, D. J., MacDonald, A. M., Kebede, S., Godfrey, S. e Calow, R. 2020. Comparative performance of rural water supplies during drought. *Nature Communications*, Vol. 11, Article 1099. doi.org/10.1038/s41467-020-14839-3.
- MacDonald, A. M. e Calow, R. C. 2009. Developing groundwater for secure rural water supplies in Africa. *Desalination*, Vol. 248, No. 1–3, pagg. 546-556. doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.100.
- MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. É. Ó. e Taylor, R. G. 2012. Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environmental Research Letters*, Vol. 7, No. 2, Article 024009. doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024009.
- MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Ahmed, K. M., Burgess, W. G., Basharat, M., Calow, R. C., Dixit, A., Foster, S. S. D., Gopal, K., Lapworth, D. J., Lark, R. M., Moench, M., Mukherjee, A., Rao, M. S., Shamsudduha, M., Smith, L., Taylor, R. G., Tucker, J., Van Steenberg, F. e Yadav, S. K. 2016. Groundwater quality and depletion in the Indo-Gangetic Basin mapped from in situ observations. *Nature Geoscience*, Vol. 9, No. 10, pagg. 762-766. doi.org/10.1038/ngeo2791.
- MacDonald, A. M., Bell, R. A., Kebede, S., Azagegn, T., Yehualaeshet, T., Pichon, F., Young, M., McKenzie, A. A., Lapworth, D. J., Black, E. e Calow, R. C. 2019. Groundwater and resilience to drought in the Ethiopian highlands. *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 9, Article 095003. doi.org/10.1088/1748-9326/ab282f.
- MacDonald, A. M., Lark, R. M., Taylor, R. G., Abiye, T., Fallas, H. C., Favreau, G., Goni, I. B., Kebede, S., Scanlon, B., Sorensen, J. P. R., Tijani, M., Upton, K. A. e West, C. 2021. Mapping groundwater recharge in Africa from ground observations and implications for water security. *Environmental Research Letters*, Vol. 16, No. 3, Article 034012. doi.org/10.1088/1748-9326/abd661.
- Macdonald, D. M. J., Bloomfield, J. P., Hughes, A. G., MacDonald, A. M., Adams, B. e McKenzie, A. A. 2008. Improving the understanding of the risk from groundwater flooding in the UK. *FLOODrisk 2008, European Conference on Flood Risk Management*. Oxford, Regno Unito, 30 settembre-2 ottobre 2008. Paesi Bassi, CRC Press.
- Macdonald, D. M. J., Dixon, A., Newell, A. e Hallways, A. 2012. Groundwater flooding within an urbanised flood plain. *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 5, No. 1, pagg. 68-80. doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01127.x.
- Maheshwari, B., Varua, M., Ward, J., Packham, R., Chinnasamy, P., Dashora, Y., Dave, S., Soni, P., Dillon, P., Purohit, R., Hakimuddin, Shah, T., Oza, S., Singh, P., Prathapar, S., Patel, A., Jadeja, Y., Thaker, B., Kookana, R., Grewal, H., Yadav, K., Mittal, H., Chew, M. e Rao, P. 2014. The role of transdisciplinary approach and community participation in village scale groundwater management: Insights from Gujarat and Rajasthan, India. *Water*, Vol. 6, No. 11, pagg. 3386-3408. doi.org/10.3390/w6113386.
- Majumdar, D. 2003. The Blue Baby Syndrome: Nitrate poisoning in humans. *Resonance*, Vol. 8, pagg. 20-30. doi.org/10.1007/BF02840703.
- Manyi-Loh, C., Mamphweli, S., Meyer, E. e Okoh, A. 2018. Antibiotic use in agriculture and its consequential resistance in environmental sources: Potential public health implications. *Molecules*, Vol. 23, No. 4, Article 795. doi.org/10.3390/molecules23040795.

- Manzano, M. e Lambán, L. J. 2011. Evaluación de los servicios de los ecosistemas de las aguas subterráneas en España [Valutazione dei servizi ecosistemici relativi alle acque sotterranee negli acquiferi in Spagna]. *Ecosistemas y biodiversidad para el bienestar humano. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España* [Ecosistemi e biodiversità per il benessere umano. Valutazione del millennio relativa agli ecosistemi per la Spagna]. Madrid, Fundación Biodiversidad, Ministerio dell'ambiente e delle aree marine e rurali della Spagna. www.ecomilenio.es/informe-de-resultados-eme/1760. (In spagnolo)
- Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A. e Palma, T. 2019. Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. *Science of the Total Environment*, Vol. 651, Part 1, pagg. 668-683. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.190.
- Marchesini, V. A., Fernández, R. J. e Jobbágy, E. G. 2013. Salt leaching leads to drier soils in disturbed semiarid woodlands of central Argentina. *Oecologia*, Vol. 171, pagg. 1003-1012. doi.org/10.1007/s00442-012-2457-y.
- Margat, J. e Van der Gun, J. 2013. *Groundwater around the World: A Geographical Synopsis*. Boca Raton, Fla., CRC Press.
- Maron, D. F., Smith, T. J. e Nachman, K. E. 2013. Restrictions on antimicrobial use in food animal production: An international regulatory and economic survey. *Globalization and Health*, Vol. 9, No. 48. doi.org/10.1186/1744-8603-9-48.
- Mas-Pla, J. e Menció, A. 2019. Groundwater nitrate pollution and climate change: Learnings from a water balance-based analysis of several aquifers in a western Mediterranean region (Catalonia). *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, pagg. 2184-2202. doi.org/10.1007/s11356-018-1859-8.
- Mateo-Sagasta, J. e Burke, J. 2010. *Agriculture and Water Quality Interactions: A Global Overview*. SOLAW Background Thematic Report – TR08. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). www.fao.org/3/bl092e/bl092e.pdf.
- Matheswaran, K., Khadka, A., Dhaubanjhar, S., Bharati, L., Kumar, S. e Shrestha, S. 2019. Delineation of spring recharge zones using environmental isotopes to support climate-resilient interventions in two mountainous catchments in Far-Western Nepal. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pagg. 2181-2197. doi.org/10.1007/s10040-019-01973-6.
- Maven's Notebook. 2015. *Groundwater Problems and Prospects, Part 1: An Overview of Groundwater*, 12 marzo 2015. mavensnotebook.com/2015/03/12/groundwater-problems-and-prospects-part-1-an-overview-of-groundwater/.
- McDonough, L. K., Santos, I. R., Andersen, M. S., O'Carroll, D. M., Rutledge, H., Meredith, K., Oudone, P., Bridgeman, J., Goody, D. C., Sorensen, J. P. R., Lapworth, D. J., MacDonald, A. M., Ward, J. e Baker, A. 2020. Changes in global groundwater organic carbon driven by climate change and urbanization. *Nature Communications*, Vol. 11, Article 1279. doi.org/10.1038/s41467-020-14946-1.
- McGill, B. M., Altchenko, Y., Hamilton, S. K., Kenabatho, P. K., Sylvester, S. R. e Villholth, K. G. 2019. Complex interactions between climate change, sanitation, and groundwater quality: A case study from Ramotswa, Botswana. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pagg. 997-1015. doi.org/10.1007/s10040-018-1901-4.
- McManamay, R. A., Griffiths, N. A., DeRolph, C. R. e Pracheil, B. M. 2017. A synopsis of global mapping of freshwater habitats and biodiversity: Implications for conservation. L. Hufnagel (ed.), *Pure and Applied Biogeography*, IntechOpen. doi.org/10.5772/intechopen.70296.
- McPhaden, M. J., Santoso, A. e Cai, W. (eds.). 2020. *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*. American Geophysical Union. doi.org/10.1002/9781119548164.
- McStraw, T. C. 2020. *An Open-Source Web-Application for Regional Analysis of GRACE Groundwater Data and Engaging Stakeholders in Groundwater Management*. Master thesis, Brigham Young University. scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9144&context=etd.
- Mechlem, K. 2016. Groundwater governance: The role of legal frameworks at the local and national level – Established practice and emerging trends. *Water*, Vol. 8, No. 8, Article 347. doi.org/10.3390/w8080347.
- Megdal, S. B., Gerlak, A. K., Varady, R. G. e Ling-Yee, H. 2014. Groundwater governance in the United States: Common priorities and challenges. *Groundwater*, Vol. 53, No. 5, pagg. 677-684. doi.org/10.1111/gwat.12294.
- Meglioli, P. A., Aranibar, J. N., Villagra, P. E., Alvarez, J. A. e Jobbágy, E. G. 2013. Livestock stations as foci of groundwater recharge and nitrate leaching in a sandy desert of the Central Monte, Argentina. *Ecohydrology*, Vol. 7, No. 2, pagg. 600-611. doi.org/10.1002/eco.1381.
- Meinzen-Dick, R. e Nkonya, L. 2007. Understanding legal pluralism in water and land rights: Lessons from Africa and Asia. B. van Koppen, M. Giordano and J. Butterworth (eds.), *Community-Based Water Law and Water Resource Management Reform in Developing Countries*. Wallingford, Regno Unito, CABI.
- Mekonnen, M. M. e Gerbens-Leenes, W. 2020. The water footprint of global food production. *Water*, Vol. 12, No. 10, Article 2696. doi.org/10.3390/w12102696.
- Mekonnen, M. M. e Hoekstra, A. Y. 2012. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, Vol. 15, No. 3, pagg. 401-415. doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8.
- _____. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, Vol. 2, No. 2, e1500323. doi.org/10.1126/sciadv.1500323.
- Michael, H. A., Russoniello, C. J. e Byron, L. A. 2013. Global assessment of vulnerability to sea-level rise in topography-limited and recharge-limited coastal groundwater systems. *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 4, pagg. 2228-2240. doi.org/10.1002/wrcr.20213.

- Milman, A., Bylo, K., Gage, A. e Blomquist, W. 2021. Groundwater recharge to support wildlife and water users: The Heyborne ponds project, Sedgwick county, Colorado. *Case Studies in the Environment*, Vol. 5, No. 1, Article 1235924. doi.org/10.1525/cse.2021.1235924.
- Ministero dell'ambiente del Giappone/IGES (Institute for Global Environmental Strategies). 2018. *WEPA Outlook on Water Environmental Management in Asia 2018*. Tokyo, Ministero dell'ambiente. wepa-db.net/en/publication/2018_outlook/wepa_outlook_report_2018_en.pdf.
- Ministero delle municipalit  regionali, dell'ambiente e delle risorse idriche del Sultanato dell'Oman. 2006. *Aflaj Irrigation System of Oman*. Nomination to the UNESCO World Heritage List. whc.unesco.org/document/168885.
- Ministero delle risorse idriche dell'India. 2012. National Water Policy (2012). Governo della Repubblica dell'India, Ministero delle risorse idriche. http://jalshakti-dowr.gov.in/sites/default/files/NWP2012Eng6495132651_1.pdf.
- _____. 2017. 5th Census of Minor Irrigation Schemes Report. Governo della Repubblica dell'India, Ministero delle risorse idriche, River Development and Ganga Rejuvenation. http://jalshakti-dowr.gov.in/sites/default/files/5th-MICensusReport_0.pdf.
- Misstear, B., Banks, D. e Clark, L. 2017. *Water Wells and Boreholes*. Second edition. Chichester, Regno Unito, J. Wiley & Sons.
- Moench, M. 2004. Groundwater: The challenge of monitoring and management. P. Gleick (ed.), *The World's Water 2004-2005: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Washington, DC, Island Press.
- Mohan, C., Western, A. W., Wei, Y. e Saft, M. 2018. Predicting groundwater recharge for varying land cover and climate conditions – A global meta-study. *Hydrology Earth System Sciences*, Vol. 22, No. 5, pagg. 2689-2703. doi.org/10.5194/hess-22-2689-2018.
- Molle, F. e Berkoff, J. 2007. *Irrigation Water Pricing Policy: The Gap Between Theory and Practice*. Cambridge, Mass., CABI North American Office. doi.org/10.1079/9781845932923.0000.
- _____. 2009. Cities vs. agriculture: A review of intersectoral water re-allocation. *Natural Resources Forum*, Vol. 33, No. 1, pagg. 6-18. doi.org/10.1111/j.1477-8947.2009.01204.x.
- Molle, F. e Closas, A. 2019. Why is state-centered groundwater governance largely ineffective? A review. *WIREs Water*, Vol. 7, No. 1, e1395. doi.org/10.1002/wat2.1395.
- _____. 2020. Groundwater licensing and its challenges. *Hydrogeology Journal*, Vol. 28, No. 6, pagg. 1961-1974. doi.org/10.1007/s10040-020-02179-x.
- Mostafaepour, A. 2010. Historical background, productivity and technical issues of qanats. *Water History*, Vol. 2, pagg. 61-80. doi.org/10.1007/s12685-010-0018-z.
- Mukherjee, A. 2018. Groundwater of South Asia. A. Mukherjee (ed.), *Springer Hydrogeology*. Springer Singapore. doi.org/10.1007/978-981-10-3889-1.
- Mukherji, A. 2017. Managing energy-irrigation nexus: Insights from Karnataka and Punjab states in India. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido e J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Paesi Bassi, CRC Press/Balkema, pagg. 289-305.
- Mukherji, A. 2020. Sustainable groundwater management in India needs a water energy food nexus approach. *Applied Economic Perspectives and Policy*. doi.org/10.1002/aep.13123.
- Mukherji, A., Das, B., Majumdar, N., Nayak, N. C., Sethi, R. R. e Sharma, B. R. 2009. Metering of agricultural power supply in West Bengal, India: Who gains and who loses? *Energy Policy*, Vol. 37, No. 12, pagg. 5530-5539. doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.051.
- Müller Schmied, H., C ceres, D., Eisner, S., Flörke, M., Herbert, C., Niemann, C., Peiris, T.A., Popat, E., Portmann, F. T., Reinecke, R., Schumacher, M., Shadkam, S., Telteu, C-E., Trautmann, T. e Döll, P. 2021. The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: Model description and evaluation. *Geoscientific Model Development*, Vol. 14, pagg. 1037-1079. doi.org/10.5194/gmd-14-1037-2021.
- Murray, B. R., Zeppel, M. J. B., Hose, G. C. e Eamus, D. 2003. Groundwater-dependent ecosystems in Australia: It's more than just water for rivers. *Ecological Management & Restoration*, Vol. 4, No. 2, pagg. 110-113. doi.org/10.1046/j.1442-8903.2003.00144.x.
- Murray, R., Louw, D., Van der Merwe, B. e Peters, I. 2018. Windhoek, Namibia: from conceptualising to operating and expanding a MAR scheme in a fractured quartzite aquifer for the city's water security. *Sustainable Water Resources Management*, Vol. 4, pagg. 217-223. doi.org/10.1007/s40899-018-0213-0.
- Myhre, G., Alterskj er, K., Stjern, C. W., Hodnebrog,  ., Marelle, L., Samset, B. H., Sillmann, J., Schaller, N., Fischer, E., Schulz, M. e Stohl, A. 2019. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, Vol. 9, Article 16063. doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4.
- NASA/NDMC (US National Aeronautics and Space Administration/National Drought Mitigation Center). 2021. *GRACE-based Shallow Groundwater Drought Indicator for 7 June 2021*. NDMC, University of Nebraska-Lincoln. nasagrace.unl.edu.
- Nazioni Unite. 1997. *Convention on the Law of the Non-Navigational Uses of International Watercourses*. Nazioni Unite. legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/conventions/8_3_1997.pdf.
- _____. 2018. *Sustainable Development Goal 6. Synthesis Report on Water and Sanitation 2018*. New York, Nazioni Unite. www.unwater.org/publications/highlights-sdg-6-synthesis-report-2018-on-water-and-sanitation-2/.

- _____. 2021. *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche: il valore dell'acqua*. Parigi, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724.
- Nel, J., Xu, Y., Batelaan, O. e Brendonck, L. 2009. Benefit and implementation of groundwater protection zoning in South Africa. *Water Resources Management*, Vol. 23, No. 14, Article 2895. doi.org/10.1007/s11269-009-9415-4.
- Nelson, R. e Quevauviller, P. 2016. Groundwater law: Concepts, approaches and challenges. A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J.-D. Rinaudo e A. Ross (eds.), *Integrated Groundwater Management: Concept, Approaches and Challenges*. Cham, Svizzera, Springer International Publishing, pagg. 173-196.
- Ngowi, A. V. F., Wesseling, C. e London, L. 2012. Developing countries: Pesticide health impacts. S. E. Jorgensen (ed.), *Encyclopedia of Environmental Management*. Boca Raton, Fla., CRC Press, pagg. 573-577.
- Nicholls, R. J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A. T., Meysignac, B., Hanson, S. E., Merkens, J.-L. e Fang, J. 2021. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change*, Vol. 11, pagg. 338-342. doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z.
- Nijsten, G.-J., Ansems, N., Kukurić, N. e Aureli, A. 2016. *A Multi-Disciplinary Approach and Tools for Comparative and In-Depth Assessments of Transboundary Aquifers*. Paper Presented at the Vietnam Water Cooperation Initiative 2016 (WACI 2016), Hanoi, 3-4 ottobre, 2016. www.unigrac.org/sites/default/files/resources/files/Nijsten%20et.al_TBA%20assessment%20and%20IIMS_VACI2016.pdf.
- Northey, S. A., Mudd, G. M., Werner, T. T., Haque, N. e Yellishetty, M. 2019. Sustainable water management and corporate reporting in mining. *Water Resources and Industry*, Vol. 21, Article 100104. doi.org/10.1016/j.wri.2018.100104.
- NSW Government (New South Wales – Nuovo Galles del Sud). 2020. *Water Sharing Plan for the NSW Great Artesian Basin Shallow Groundwater Sources Order 2020*. legislation.nsw.gov.au/view/pdf/asmade/sl-2020-347
- _____. 2021. *NSW Water Strategy*. Sydney, Department of Planning, Industry and Environment. https://dpi.nsw.gov.au/water/plans-and-programs/nsw-water-strategy
- _____. s.d.a. *How Water is Managed*. Water in New South Wales. NSW Government website. www.industry.nsw.gov.au/water/what-we-do/how-water-is-managed.
- _____. s.d.b. *Water Reform Action Plan*. Water in New South Wales. NSW Government website. www.industry.nsw.gov.au/water/environmental-water-hub/water-reform-action-plan.
- NWSAS Consultation Mechanism (North-Western Sahara Aquifer System – Sistema acquifero del Sahara settentrionale). 2020. *The Benefits of Transboundary Water Cooperation in the North Western Sahara Aquifer System Basin*. Policy Brief. www.unece.org/fileadmin/DAM/env/water/activities/Benefits_cooperation/ENG_NWSAS_Brief_BenefitsTransbWatCoop_2020_Web.pdf.
- OAS (Organization of American States – Organizzazione degli Stati americani). 2009. *Aquífero Guarani: programa estratégico de ação = Acuífero Guarani: programa estratégico de acción* [Guarani Aquifer: Strategic Action Plan]. OAS. (In portoghese and spagnolo)
- Ochieng, G. M., Seanego, E. S. e Nkwonta, O. I. 2010. Impacts of mining on water resources in South Africa: A review. *Scientific Research and Essays*, Vol. 5, No. 22, pagg. 3351-3357.
- OCSE (Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico). 2008. *Prestazione Ambientale dell'Agricoltura nell'OECD dal 1990*. Parigi, OECD Publishing. www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/44254899.pdf.
- _____. 2010a. *Agricultural Water Pricing: EU and Mexico*. Parigi, OCSE. www.oecd.org/eu/45015101.pdf.
- _____. 2010b. *OECD Horizontal Water Programme – Financing Water Resources Management. Background Notes on Financing Water Resources Management*. www.oecd.org/env/resources/46228672.pdf.
- _____. 2011. *Environmental Taxation. A Guide for Policy Makers*. www.oecd.org/env/tools-evaluation/48164926.pdf.
- _____. 2012a. *Water Quality and Agriculture: Meeting the Policy Challenge*. OECD Studies on Water. Parigi, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264168060-en.
- _____. 2012b. *A Framework for Financing Water Resources Management*. OECD Studies on Water. Parigi, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264179820-en.
- _____. 2016. *Tackling the Challenges of Agricultural Groundwater Use*. Maggio 2016. www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/Challenges%20of%20groundwater%20use.pdf.
- _____. 2017a. *Diffuse Pollution, Degraded Waters: Emerging Policy Solutions*. OECD Studies on Water. Parigi, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264269064-en.
- _____. 2017b. *Groundwater Allocation: Managing Growing Pressures on Quantity and Quality*. OECD Studies on Water. Parigi, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264281554-en.
- _____. 2018. *Financing Water: Investing in Sustainable Growth*. OECD Environment Policy Papers No. 11. Parigi, OECD Publishing. doi.org/10.1787/bf67ec4e-en.

- _____. 2019a. *Pharmaceutical Residues in Freshwater: Hazards and Policy Responses*. OECD Studies on Water. Parigi, OECD Publishing. doi.org/10.1787/c936f42d-en.
- _____. 2019b. *Making Blended Finance Work for Water and Sanitation: Unlocking Commercial Finance for SDG 6*. OECD Studies on Water. Parigi, OECD Publishing. doi.org/10.1787/5efc8950-en.
- _____. 2021. *Water Governance in Peru*. OECD Studies on Water. Parigi, OECD Publishing. doi.org/10.1787/568847b5-en.
- _____. s.d. *Pollutant Release and Transfer Register*. Sito web dell'OCSE. www.oecd.org/chemicalsafety/pollutant-release-transfer-register/.
- Oiro, S., Comte, J-C., Soulsby, C., MacDonald, A. M. e Mwakamba, C. 2020. Depletion of groundwater resources under rapid urbanisation in Africa: Recent and future trends in the Nairobi Aquifer System, Kenya. *Hydrogeology Journal*, Vol. 28, pagg. 2635-2656. doi.org/10.1007/s10040-020-02236-5.
- Olago, D., Marshall, M., Wandiga, S. O., Opondo, M., Yanda, P. Z., Kangalawe, R., Githeko, A., Downs, T., Opere, A., Kabumbuli, R., Kirumira, E., Ogallo, L., Mugambi, P., Apindi, E., Githui, F., Kathuri, J., Olaka, L., Sigalla, R., Nanyunja, R., Baguma, T. e Achola, P. 2007. Climatic, socio-economic, and health factors affecting human vulnerability to cholera in the Lake Victoria basin, East Africa. *Ambio*, Vol. 36, No. 4, pagg. 350-358. doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[350:csahfa]2.0.co;2.
- Olivier, D. W. e Xu, Y. 2019. Making effective use of groundwater to avoid another water-supply crisis in Cape Town, South Africa. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pagg. 823-826. doi.org/10.1007/s10040-018-1893-0.
- Olson, D. M. e Dinerstein, E. 2002. The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, Vol. 89, No. 2, pagg. 199-224. doi.org/10.2307/3298564.
- Oluwasanya, G., Smith, J. e Carter, R. 2011. Self-supply systems: Urban dug wells in Abeokuta, Nigeria. *Water Supply*, Vol. 11, No. 2, pagg. 172-178. doi.org/10.2166/ws.2011.026.
- OMS (Organizzazione mondiale della sanità). 2018. *Chemical Releases caused by Natural Hazard Events and Disasters: Information for Public Health Authorities*. Ginevra, OMS. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. www.who.int/publications/i/item/9789241513395.
- _____. 2019. *Discussion Paper: Climate, Sanitation and Health*. Draft July 2019. OMS. www.who.int/water_sanitation_health/sanitation-waste/sanitation/sanitation-and-climate-change20190813.pdf.
- OMS/UNICEF (Organizzazione mondiale della sanità/Fondo delle Nazioni Unite per l'infanzia). 2017. *Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines*. Ginevra, OMS/UNICEF. https://data.unicef.org/resources/progress-drinking-water-sanitation-higiene-2017-update-sdg-baselines/#.
- _____. 2021. *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene, 2000–2020: Five Years into the SDGs*. Ginevra, OMS/UNICEF. data.unicef.org/resources/progress-on-household-drinking-water-sanitation-and-higiene-2000-2020/.
- Opie, S., Taylor, R. G., Brierley, C. M., Shamsudduha, M. e Cuthbert, M. O. 2020. Climate-groundwater dynamics inferred from GRACE and the role of hydraulic memory. *Earth System Dynamics*, Vol. 11, pagg. 775-791. doi.org/10.5194/esd-11-775-2020.
- Ortigara, A. R. C., Kay, M. e Uhlenbrook, S. 2018. A review of the SDG 6 synthesis report 2018 from an education, training, and research perspective. *Water*, Vol. 10, No. 10, Article 1353. doi.org/10.3390/w10101353.
- OTCA (Organización del Tratado de Cooperación Amazónica). 2018. *Programa de Acciones Estratégicas: Estrategia Regional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Amazónica* [Programma di azione strategica: strategia regionale per le gestione integrata delle risorse idriche nel bacino idrografico del Rio delle Amazzoni]. Brasilia, OTCA. otca.org/wp-content/uploads/2021/02/Programa-de-Acciones-Estrategicas-PAE.pdf. (In spagnolo).
- Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S. e De Louw, P. G. B. 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modelling study in The Netherlands. *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 10, W00F04. doi.org/10.1029/2009WR008719.
- Page, D., Bekele, E., Vanderzalm, J. e Sidhu, J. 2018. Managed Aquifer Recharge (MAR) in Sustainable urban water management. *Water*, Vol. 10, No. 3, Article 239. doi.org/10.3390/w10030239.
- Pandit, C. e Biswas, A. K. 2019. India's National Water Policy: 'Feel good' document, nothing more. *International Journal of Water Resources Development*, Vol. 35, No. 6, pagg. 1015-1028. doi.org/10.1080/07900627.2019.1576509.
- Parlamento europeo/Consiglio europeo. 2000. Direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2000 che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque. *Gazzetta Ufficiale delle Comunità europee*, L. 327/1. eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj.
- _____. 2006. Direttiva 2006/118/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 12 dicembre 2006 sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, L. 372/19. eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/118/oj.
- Pascolini-Campbell, M., Reager, J. T., Chandanpurkar, H. A. e Rodell, M. 2021. A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. *Nature*, Vol. 593, pagg. 543-547. doi.org/10.1038/s41586-021-03503-5.
- Pavelic, P., Giordano, M., Keraita, B., Ramesh, V. e Rao, T. (eds.). 2012. *Groundwater Availability and Use in Sub-Saharan Africa: A Review of 15 Countries*. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). doi.org/10.5337/2012.213.

- Pavelic, P., Villholth, K. G., Shu, Y., Rebelo, L. -M. e Smakhtin, V. 2013. Smallholder groundwater irrigation in Sub-Saharan Africa: Country-level estimates of development potential. *Water International*, Vol. 38, No. 4, pagg. 392-407. doi.org/10.1080/02508060.2013.819601.
- Peal, A., Evans, B., Ahilan, S., Ban, R., Blackett, I., Hawkins, P., Schoebitz, L., Scott, R., Sleight, A., Strande, L. e Veses, O. 2020. Estimating safely-managed sanitation in urban areas: Lessons learned for a global implementation of excreta-flow diagrams. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 8, No.1. doi.org/10.3389/fenvs.2020.00001.
- Petersen-Perlman, J. D., Megdal, S. B., Gerlak, A. K., Wireman, M., Zuniga-Teran, A. A. and Varady, R. G. 2018. Critical issues affecting groundwater quality governance and management in the United States. *Water*, Vol. 10, No. 6, Article 735. doi.org/10.3390/w10060735.
- Pimentel, D. 2005. Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 7, pagg. 229-252. doi.org/10.1007/s10668-005-7314-2.
- Plummer, J. 2012. *Diagnosing Corruption in Ethiopia: Perceptions, Realities, and the Way Forward for Key Sectors*. Directions in Development – Public Sector Governance. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/13091.
- Polemio, M. e Walraevens, K. 2019. Recent research results on groundwater resources and saltwater intrusion in a changing environment. *Water*, Vol. 11, No. 6, Article 1118. doi.org/10.3390/w11061118.
- Post, V. E. A., Groen, J., Kooi, H., Person, M., Ge, S. e Edmunds, W. M. 2013. Offshore fresh groundwater reserves as a global phenomenon. *Nature*, Vol. 504, pagg. 71-78. doi.org/10.1038/nature12858.
- Powell, O. e Fensham, R. 2016. The history and fate of the Nubian Sandstone Aquifer springs in the oasis depressions of the Western Desert, Egypt. *Hydrogeology Journal*, Vol. 24, pagg. 395-406. doi.org/10.1007/s10040-015-1335-1.
- Prestinaci, F., Pezzotti, P. e Pantosti, A. 2015. Antimicrobial resistance: A global multifaceted phenomenon. *Pathogens and Global Health*, Vol. 109, No. 7, pagg. 309-318. doi.org/10.1179/2047773215Y.0000000030.
- Prinet, C., Thibeau, S., Lescanne, M. e Monne, J. 2013. Lacq-Rousse CO₂ capture and storage demonstration pilot: Lessons learnt from two and a half years monitoring. *Energy Procedia*, Vol. 37, pagg. 3610-3620. doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.254.
- Prosser, I., Wolf, L. e Littleboy, A. 2011. Water in mining and industry. I. Prosser (ed.), *Water: Science and Solutions for Australia*. Collingwood, Australia, CSIRO Publishing. www.publish.csiro.au/book/6557.
- Puri, S. e Villholth, K. G. 2018. Governance and management of transboundary aquifers. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido e J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Paesi Bassi, CRC Press/Balkema, pagg. 367-388.
- _____. 2021. I say 'aquifer' and she says 'groundwater' ... Let's call the whole thing off... (with apologies to Ella Fitzgerald & Satchmo). *Water Alternatives Forum*, 15 maggio 2021. www.water-alternatives.org/index.php/blog/aquifer.
- Qadir, M., Quillérou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., Drechsel, P. e Noble, A. D. 2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum*, Vol. 38, No. 4, pagg. 282-295. doi.org/10.1111/1477-8947.12054.
- Quevauviller, P., Batelaan, O. e Hunt, R. 2016. Groundwater regulation and integrated water planning. A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J-D. Rinaudo e A. Ross (eds.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Cham, Svizzera, Springer International Publishing.
- Qureshi, A. S. 2020. Groundwater governance in Pakistan: From colossal development to neglected management. *Water*, Vol. 12, No. 11, Article 3017. doi.org/10.3390/w12113017.
- Rajan, A., Ghosh, K. e Shah, A. 2020. Carbon footprint of India's groundwater irrigation. *Carbon Management*, Vol. 11, No. 3, pagg. 265–280. doi.org/10.1080/17583004.2020.1750265.
- Rajkumar, Y. e Xu, Y. 2011. Protection of borehole water quality in Sub-Saharan Africa using minimum safe distances and zonal protection. *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 13, pagg. 3413-3425. doi.org/10.1007/s11269-011-9862-6.
- Rathay, S. Y., Allen, D. M. e Kirste, D. 2018. Response of a fractured bedrock aquifer to recharge from heavy rainfall events. *Journal of Hydrology*, Vol. 561, pagg. 1048-1062. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.042.
- Ray, C. (ed.). 2020. *Sacred Waters: A Cross-Cultural Compendium of Hallowed Springs and Holy Wells*. Oxon, Regno Unito, Routledge.
- Re, V. 2015. Incorporating the social dimension into hydrogeochemical investigations for rural development: the Bir Al-Nas approach for socio-hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, Vol. 23, pagg. 1293-1304. doi.org/10.1007/s10040-015-1284-8.
- Re, V. e Misstear, B. 2018. Education and capacity development for groundwater resources management. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido e J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Paesi Bassi, CRC Press/Taylor & Francis, pagg. 212-230.
- Regno di Tonga. 2020. Tonga's Second Nationally Determined Contribution (NDC). Submission under the Paris Agreement, December 2020. www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Tonga%20Second/Tonga%27s%20Second%20NDC.pdf.
- Regno di Tonga/Banca mondiale/IFAD (International Fund for Agricultural Development – Fondo internazionale per lo sviluppo agricolo)/UNDP (United Nations Development Programme – Programme delle Nazioni Unite per lo sviluppo). 2016. Tonga Agriculture Sector Plan 2016–2020. www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC168836/.

- Reinecke, R., Müller Schmied, H., Trautmann, T., Andersen, L. S., Burek, P., Flörke, M., Gosling, S. N., Grillakis, M., Hanasaki, N., Koutroulis, A., Pokhrel, Y., Thiery, W., Wada, Y., Yusuke, S. e Döll, P. 2021. Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels: A global-scale multi-model ensemble study. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 25, pagg. 787-810. doi.org/10.5194/hess-25-787-2021.
- Repubblica popolare cinese. 1988. *Decree of the President of the People's Republic of China Order No. 61: "Water Law of the People's Republic of China"*. extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/chn1317E.pdf.
- Repubblica del Sudafrica. 2010. *Groundwater Strategy 2010*. Department of Water Affairs, Republic of South Africa. www.dwa.gov.za/Groundwater/Documents/GSDocument%20FINAL%202010_MedRes.pdf.
- Reynolds, E. R. C. e Thompson, F. B. (eds.). 1988. *Forests, Climate, and Hydrology: Regional Impacts*. Tokyo, The United Nations University (UNU). https://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80635e/80635E00.htm.
- Rhodes, S. L. e Wheeler, S. E. 1996. Rural electrification and irrigation in the U.S. High Plains. *Journal of Rural Studies*, Vol. 12, No. 3, pagg. 311-317. doi.org/10.1016/0743-0167(96)00005-8.
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M-H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S. e Rodell, M. 2015. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 7, pagg. 5217-5238. doi.org/10.1002/2015WR017349.
- Riedel T. 2019. Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*, Vol. 572, pagg. 206-212. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059.
- Ringrose, P. S. 2018. The CCS hub in Norway: Some insights from 22 years of saline aquifer storage. *Energy Procedia*, Vol. 146, pagg. 166-172. doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.021.
- Ritchie, H. e Roser, M. 2017. *Water Use and Stress*. OurWorldInData.org. ourworldindata.org/water-use-stress. (Consultato a marzo 2021).
- Rivera, A. (ed.). 2014. *Canada's Groundwater Resources*. Markham, Ont., Fitzhenry & Whiteside.
- _____. 2015. Transboundary aquifers along the Canada–USA border: Science, policy and social issues. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 4, Part B, pagg. 623-643. doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.09.006.
- _____. 2020. *The State of Knowledge and Shared Management of Transboundary Aquifers at the Global Scale*. Keynote lecture at the National Ground Water Association Summit, 8 dicembre 2020.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W. e Lo, M-H. 2018. Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, Vol. 557, pagg. 651-659. doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1.
- Rohde, M. M., Froend, R. e Howard, J. 2017. A global synthesis of managing groundwater dependent ecosystems under sustainable groundwater policy. *Groundwater*, Vol. 55, No. 3, pagg. 293-301. doi.org/10.1111/gwat.12511.
- Ross, A. 2016. Groundwater governance in Australia, the European Union and the Western USA. A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J-D. Rinaudo e A. Ross (eds.), *Integrated Groundwater Management: Concept, Approaches and Challenges*. Cham, Svizzera, Springer International Publishing, pagg. 145-171.
- RSIS (Ramsar Sites information Service). s.d. Sito web RSIS. rsis.ramsar.org/ (Consultato il 15 maggio 2021)
- Ruz, C., Samaniego, L. e Rangel Medina, M. 2020. Estado actual del monitoreo de agua subterránea en América Latina e introducción al programa GGMN [Current state of groundwater monitoring in Latin American and introduction to the Global Groundwater Monitoring Network]. *Revista Agua-LAC*, Vol. 12, No. 1. www.un-igrac.org/es/resource/estado-actual-del-monitoreo-de-agua-subterranea-en-america-latina-e-introduccion-al. (In spagnolo).
- RVO. 2015. *Regeling nationale EZ subsidies - Risico's dekken voor Aardwarmte. Handleiding: Garantierogeling tegen het risico van misboring* [Regolamentazione dei i sussidi economici nazionali – Copertura dei rischi dovuti al calore geotermico. Manuale: schema di garanzia contro i rischi dovuti a errori di trivellazione]. Roermond, Paesi Bassi, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (In neerlandese). https://www.rvo.nl/sites/default/files/Handleiding_SEI%20RNES%20risico%20aardwarmte%2014_09_2015.pdf.
- S** SADC-GMI/IGRAC/IGS (Southern African Development Community-Groundwater Management Institute/International Groundwater Resources Assessment Centre/Institute for Groundwater Studies). 2019a. *State of Groundwater Data Collection and Data Management in SADC Member States*. sadc-gmi.org/wp-content/uploads/2020/03/State-of-GW-data-in-SADC_2019.pdf.
- _____. 2019b. *SADC Framework for Groundwater Data Collection and Management*. Bloemfontein, SADC-GMI. www.un-igrac.org/resource/sadc-framework-groundwater-data-collection-and-management.
- Salman, S. M. A. e Bradlow, D. 2006. *Regulatory Frameworks for Water Resources Management: A Comparative Study*. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7054.
- Santos, I. R., Chen, X., Lecher, A. L., Sawyer, A. H., Moosdorf, N., Rodellas, V., Tamborski, J., Cho, H-M., Dimova, N., Sugimoto, R., Bonaglia, S., Li, H., Hajati, M-C. e Li, L. 2021. Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry. *Nature Reviews Earth & Environment*, Vol. 2, pagg. 307-323. doi.org/10.1038/s43017-021-00152-0.

- Scanlon, B. R., Healy, R. W. e Cook, P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, pagg. 18-39. doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2.
- Scanlon, B. R., Levitt, D. G., Reedy, R. C., Keese, K. E. e Sully, M. J. 2005. Ecological controls on water-cycle response to climate variability in deserts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 102, No. 17, pagg. 6033-6038. doi.org/10.1073/pnas.0408571102.
- Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Gaye, C. B., Edmunds, W. M. e Simmers, I. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, Vol. 20, No. 15, pagg. 3335-3370. doi.org/10.1002/hyp.6335.
- Scanlon, B. R., Faunt, C.C., Longuevergne, L., Reedy, R. C., Alley, W. M., McGuire, V. L. e McMahon, P. B. 2012a. Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *PNAS*, Vol. 109, No. 24, pagg. 9320-9325. doi.org/10.1073/pnas.1200311109.
- Scanlon, B. R., Longuevergne, L. e Long, D. 2012b. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 4, W04520. doi.org/10.1029/2011WR011312.
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Faunt, C. C., Pool, D. e Uhlman, K. 2016. Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona. *Environmental Research Letters*, Vol. 11, No. 3, pagg. 1-15. doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035013.
- Schneider, P. e Asch, F. 2020. Rice production and food security in Asian Mega deltas – A review on characteristics, vulnerabilities and agricultural adaptation options to cope with climate change. *Journal of Agronomy and Crop Sciences*, Vol. 206, No. 4, pagg. 491-503. doi.org/10.1111/jac.12415.
- Schoengold, K. e Zilberman, D. 2007. The economics of water, irrigation, and development. *Handbook of Agricultural Economics*, Vol. 3, pagg. 2933-2977. doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03058-1.
- Schreinemachers, P. e Tipraqsa, P. 2012. Agricultural pesticides and land use intensification in high, middle and low income countries. *Food Policy*, Vol. 37, No. 6, pagg. 616-626. doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.06.003.
- Schulze-Makuch, D. 2005. Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. *Groundwater*, Vol. 43, No. 3, pagg. 443-456. doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.0051.x.
- Scott, C. A. 2013. Electricity for groundwater use: Constraints and opportunities for adaptive response to climate change. *Environmental Research Letters*, Vol. 8, No. 3, Article 035005. doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035005.
- Scott, C. A. e Sharma, B. 2010. Energy supply and the expansion of groundwater irrigation in the Indus Ganges Basin. *International Journal of River Basin Management*, Vol. 7, No. 2, pagg. 119-124. doi.org/10.1080/15715124.2009.9635374.
- Seddon, D., Kashaigili, J. J., Taylor, R. G., Cuthbert, M. O., Mwiumbo, C. e MacDonald, A. M. 2021. Focused groundwater recharge in a tropical dryland: Empirical evidence from central, semi-arid Tanzania. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 37, Article 100919. doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100919.
- Segretariato della Convenzione di Ramsar. 2010. *Managing Groundwater: Guidelines for the Management of Groundwater to Maintain Wetland Ecological Character*. Ramsar handbooks for the wise use of wetlands. Fourth Edition, Vol. 11. Gland, Svizzera, Segretariato della Convenzione di Ramsar. www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-11.pdf.
- _____. 2013. *The Ramsar Convention Manual: A Guide to the Convention on Wetlands (Ramsar, Iran, 1971)*. Sixth Edition. Gland, Svizzera, Segretariato della Convenzione di Ramsar. www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-e.pdf.
- _____. 2018. *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People 2018*. Gland, Svizzera, Segretariato della Convenzione di Ramsar. https://medwet.org/publications/ramsar-global-wetland-outlook-2018/.
- Şen, Z., Al Sefry, S., Al Ghamdi, S., Ashi, W. e Bardi, W. 2013. Strategic groundwater resources planning in arid regions. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 6, pagg. 4363-4375. doi.org/10.1007/s12517-012-0701-8.
- Shah, T. 2007. The groundwater economy of South Asia: An assessment of size, significance and socio-ecological impacts. M. Giordano e K. G. Villholth (eds.), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development*. Wallingford, Regno Unito, CABI. pagg. 7-36. cgspace.cgiar.org/handle/10568/36474.
- Shah, T. 2009. *Taming the Anarchy: Groundwater Governance in South Asia*. New Delhi, Routledge.
- Shah, T., Bhatt, S., Shah, R. K. e Talati, J. 2008. Groundwater governance through electricity supply management: Assessing an innovative intervention in Gujarat, Western India. *Agricultural Water Management*, Vol. 95, No. 11, pagg. 1233-1242. doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.006.
- Shah, T., Burke, J., Villholth, K. G., Angelica, M., Custodio, E., Daibes, F., Hoogesteger, J., Giordano, M., Girman, J., Van der Gun, J., Kendy, E., Kijne, J., Llamas, R., Masiyandima, M., Margat, J., Marin, L., Peck, J., Rozelle, S., Sharma, B. R., Vincent, L. e Wang, J. 2007. Groundwater. A global assessment of scale and significance. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. D. Molden (ed.), *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Londra/Colombo, Earthscan/International Water Management Institute (IWMI). pagg. 395-423.

- Shah, T., Darghouth, S. e Dinar, A. 2006. *Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water*. Agricultural and Rural Development Notes, No. 6. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9641.
- Shah, T., Giordano, M. e Mukherji, A. 2012. Political economy of the energy-groundwater nexus in India: Exploring issues and assessing policy options. *Hydrogeology Journal*, Vol. 20, No. 5, pagg. 995-1006. doi.org/10.1007/s10040-011-0816-0.
- Shah, T., Rajan, A., Rai, G. P., Verma, S. e Durga, N. 2018. Solar pumps and South Asia's energy-groundwater nexus: Exploring implications and reimagining its future. *Environmental Research Letters*, Vol. 13, No. 11, Article 115003. doi.org/10.1088/1748-9326/aae53f.
- Shah, T., Roy, A. D., Qureshi, A. S. e Wang, J. 2003. Sustaining Asia's groundwater boom: An overview of issues and evidence. *Natural Resources Forum*, Vol. 27, No. 2, pagg. 130-141. doi.org/10.1111/1477-8947.00048.
- Shahid, S. A., Zaman, M. e Heng, L. 2018. Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. M. Zaman, S. A. Shahid e L. Heng, *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Cham, Svizzera, Springer Open, pagg. 43-53. doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2.
- Shamsudduha, M. e Taylor, R. G. 2020. Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: Uncertainty and role of extreme precipitation. *Earth System Dynamics*, Vol. 11, No. 3, pagg. 755-774. doi.org/10.5194/esd-11-755-2020.
- Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Jones, D., Longuevergne, L., Owor, M. e Tindimugaya, C. 2017. Recent changes in terrestrial water storage in the Upper Nile Basin: An evaluation of commonly used gridded GRACE products. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 21, No. 9, pagg. 4533-4549. doi.org/10.5194/hess-21-4533-2017.
- Shamsudduha, M., Joseph, G., Haque, S. S., Khan, M. R., Zahid, A. e Ahmed, K. M. U. 2020. Multi-hazard groundwater risks to water supply from shallow depths: Challenges to achieving the Sustainable Development Goals in Bangladesh. *Exposure and Health*, Vol. 12, pagg. 657-667. doi.org/10.1007/s12403-019-00325-9.
- Shao, W., Zhou, J., Liu, J., Zhang, H., Wang, J., Xiang, C., Yang, G. e Tang, Y. 2017. An effect analysis of comprehensive treatment of groundwater over-exploitation in Cheng'an County, Hebei Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 14, No. 1, Article 41. doi.org/10.3390/ijerph14010041.
- Sharaky, A. M., El Abd, E. S. A. e Shanab, E. A. 2018. Groundwater assessment for agricultural irrigation in Toshka area, Western Desert, Egypt. A. M. Negm (ed.), *Conventional Water Resources and Agriculture in Egypt*. The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 74. Cham, Svizzera, Springer International Publishing, pagg. 347-388. doi.org/10.1007/698_2017_124.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Singh Sidhu, G. P., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., Parihar, R. D., Dar, O. I., Singh, K., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R. e Thukral, A. K. 2019. Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, Vol. 1, Article 1446. doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1.
- Shi, X., Qin, T., Nie, H., Weng, B. e He, S. 2019. Changes in major global river discharges directed into the ocean. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16, No. 8, Article 1469. doi.org/10.3390/ijerph16081469.
- Shiklomanov, I. A. e Rodda, J. 2003. *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. Cambridge, Regno Unito, Cambridge University Press.
- Sidhu, B. S., Kandlikar, M. e Ramankutty, N. 2020. Power tariffs for groundwater irrigation in India: A comparative analysis of the environmental, equity, and economic tradeoffs. *World Development*, Vol. 128, Article 104836. doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104836.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P. e Portmann, F. T. 2010. Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 14, No. 10, pagg. 1863-1880. doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010.
- Siebert, S., Henrich, V., Frenken, K. e Burke, J. 2013. *Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas (GMIA) to Version 5*. Bonn, Germania, Institute of Crop Science and Resource Conservation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität. www.fao.org/3/i9261en/i9261en.pdf.
- Sindico, F., Hirata, R. e Manganelli, A. 2018. The Guarani Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 20, pagg. 49-59. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008.
- Singh, A. 2021. Soil salinization management for sustainable development: A review. *Journal of Environmental Management*, Vol. 277, Article 111383. doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111383.
- Small, E. E. 2005. Climatic controls on diffuse groundwater recharge in semiarid environments of the southwestern United States. *Water Resources Research*, Vol. 41, W04012.
- Smilovic, M., Gleeson, T. e Siebert, S. 2015. The limits of increasing food production with irrigation in India. *Food Security*, Vol. 7, pagg. 835-856. doi.org/10.1007/s12571-015-0477-2.
- Smith, B. L. 2003. *Public Policy and Public Participation: Engaging Citizens and Community in the Development of Public Policy*. Produced for the Population and Public Health Branch, Atlantic Regional Office, Health Canada, Halifax. https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/3139/Smith_Public_Policy_and_Public_Participation_Engaging_Citizens_and_Community_in_the_Development_of_Public_Policy_complete.pdf?sequence=24&isAllowed=y.
- Smith, M., Cross, K., Paden, M. e Laban, P. (eds.). 2016. *Spring: Managing Groundwater Sustainably*. Gland, Svizzera, International Union for Conservation of Nature (IUCN). doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.WANI.8.en.

- Smith, M. G. e Urpelainen, J. 2016. Rural electrification and groundwater pumps in India: Evidence from the 1982–1999 period. *Resource and Energy Economics*, Vol. 45, pagg. 31-45. doi.org/10.1016/j.reseneeco.2016.05.004.
- Smolders, A. J. P., Lucassen, E. C. H. E. T., Bobbink, R., Roelofs, J. G. M. e Lamers, L. P. M. 2010. How nitrate leaching from agricultural lands provokes phosphate eutrophication in groundwater fed wetlands: The sulphur bridge. *Biogeochemistry*, Vol. 98, pagg. 1-7. doi.org/10.1007/s10533-009-9387-8.
- Snapp, S., Kebede, Y., Wollenberg, E., Dittmer, K. M., Brickman, S., Egler, C. e Shelton, S. 2021. *Agroecology and Climate Change Rapid Evidence Review: Performance of Agroecological Approaches in Low- and Middle- Income Countries*. Wageningen, Paesi Bassi, CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). https://hdl.handle.net/10568/113487.
- Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G.-H. C., Wickert, A. D., Yarleque, C., Baraër, M. e Silva, Y. 2019. Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed – but not forever. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 22, pagg. 13016-13026. doi.org/10.1029/2019GL084730.
- Sorensen, J. P., Lapworth, D. J., Nkhuwa, D. C. W., Stuart, M. E., Goody, D. C., Bell, R. A., Chirwa, M., Kabika, J., Liemisa, M., Chibesa, M. e Pedley, S. 2015. Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa. *Water Research*, Vol. 72, pagg. 51-63. doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.002.
- SpotView. 2018. Water Efficiency in the Pulp & Paper Industry Situation and new Challenges. www.spire2030.eu/sites/default/files/users/user500/05_Water%20efficiency%20Pulp%20and%20Paper_Fourest_Andres.pdf.
- Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F. e Hannappel, S. 2017. Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: Historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeology Journal*, Vol. 25, pagg. 1909-1922. doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8.
- Stanton, J. S. e Dennehy, K. F. 2017. *Brackish Groundwater and its Potential to Augment Freshwater Supplies*. USGS Factsheet 2017–3054. doi.org/10.3133/fs20173054.
- Statistics Canada. s.d. *Table 38-10-0070-01. Water intake in mineral extraction and thermal-electric power generation industries, by source, by region and by industry (x 1,000,000)*. doi.org/10.25318/3810007001-eng.
- Stephan, R. M. 2011. The Draft Articles on the Law of Transboundary Aquifers, The process at the UN ILC. *International Community Law Review*, Vol. 13, No. 3, pagg. 223-235. doi.org/10.1163/187197311X582287.
- Steyl, G. e Dennis, I. 2010. Review of coastal-area aquifers in Africa. *Hydrogeology Journal*, Vol. 18, pagg. 217-225. doi.org/10.1007/s10040-009-0545-9.
- Stigter, T. Y., Nunes, J. P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R., Li, Y., Tomé, S., Ribeiro, L., Samper, J., Oliveira, R., Monteiro, J. P., Silva, A., Tavares, P. C. F., Shapouri, M., Cancela da Fonseca, L. e El Himer, H. 2014. Comparative assessment of climate change and its impacts on three coastal aquifers in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, Vol. 14, pagg. 41-56. doi.org/10.1007/s10113-012-0377-3.
- Stuyfzand, P. J., Smidt, E., Zuurbier, K. G., Hartog, N. e Dawoud, M. A. 2017. Observations and prediction of recovered quality of desalinated seawater in the strategic ASR project in Liwa, Abu Dhabi. *Water*, Vol. 9, No. 3. Article 177. doi.org/10.3390/w9030177.
- Sui, Q., Cao, X., Lu, S., Zhao, W., Qiu, Z. e Yu, G. 2015. Occurrence, sources and fate of pharmaceuticals and personal care products in the groundwater: A review. *Emerging Contaminants*, Vol. 1, No. 1, pagg. 14-24. doi.org/10.1016/j.emcon.2015.07.001.
- Sultana, S., Ahmed, K. M., Mahtab-Ul-Alam, S. M., Hasan, M., Tuinhof, A., Ghosh, S. K., Rahman, M. S., Ravenscroft, P. e Zheng, Y. 2015. Low-cost aquifer storage and recovery: Implications for improving drinking water access for rural communities in coastal Bangladesh. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 20, No. 3, B5014007. doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001100.
- SUNASS (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento). 2017. *Nuevo régimen especial de monitoreo y gestión de uso de aguas subterráneas a cargo de las EPS: Metodología, criterios técnico-económicos y procedimiento para determinar la tarifa* [New special groundwater monitoring and use management scheme under the responsibility of the sanitation services providers: Methodology, technical-economic criteria and method to determine tariffs]. Lima, SUNASS. hdl.handle.net/20.500.12543/4679. (In spagnolo)
- Sutton, S. 2017. Trends in Sub-Saharan rural water supply and the essential inclusion of self-supply to achieve 2030 SDG targets. *Waterlines*, Vol. 36, No. 4, pagg. 339-357. www.jstor.org/stable/26600804.
- Sutton, S. e Butterworth, J. 2021. *Self-Supply: Filling the Gaps in Public Water-Supply Provision*. Rugby, Regno Unito, Practical Action Publishing. doi.org/10.3362/9781780448190.
- Swanson, R. K., Springer, A. E., Kreamer, D. K., Tobin, B. W. e Perry, D. M. 2021. Quantifying the base flow of the Colorado River: Its importance in sustaining perennial flow in northern Arizona and southern Utah (USA). *Hydrogeology Journal*, Vol. 29, pagg. 723-736. doi.org/10.1007/s10040-020-02260-5.
- Talbot, C. J., Bennett, E. M., Cassell, K., Hanes, D. M., Minor, E. C., Pearl, H., Raymond, P. A., Vargas, R., Vidon, P. G., Wollheim, W. e Xenopoulos, M. A. 2018. The impact of flooding on aquatic ecosystem services. *Biogeochemistry*, Vol. 141, pagg. 439-461. doi.org/10.1007/s10533-018-0449-7.
- Tang, F. H. M., Lenzen, M., McBratney, A. e Maggi, F. 2021. Risk of pesticide pollution at the global scale. *Nature Geoscience*, Vol. 14, pagg. 206-210. doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5.

- Tang, H. P.-O. 2013. Recent development in analysis of persistent organic pollutants under the Stockholm Convention. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 45, pagg. 48-66. doi.org/10.1016/j.trac.2013.01.005.
- Taniguchi, M., Burnett, W. C., Cable, J. E. e Turner, J. V. 2002. Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrological Process*, Vol. 16, No. 11, pagg. 2115-2129. doi.org/10.1002/hyp.1145.
- Taniguchi, M., Uemura, T. e Jago-on, K. 2007. Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature. *Vadose Zone Journal*, Vol. 6, No. 3, pagg. 591-596. doi.org/10.2136/vzj2006.0094.
- Tarlock, A. D. e Robinson, J. 2019. *Law of Water Rights and Resources*. Eagan, Minn., Clark Boardman Callaghan.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. e Meehl, G. A. 2012a. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 93, No. 4, pagg. 485-498. doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Taylor, A., Cocklin, C. e Brown, R. 2012b. Fostering environmental champions: A process to build their capacity to drive change. *Journal of Environmental Management*, Vol. 98, pagg. 84-97. doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.001.
- Taylor, R. G., Miret-Gaspa, M., Tumwine, J., Mileham, L., Flynn, R., Howard, G. and Kulabako, R. 2009. Increased risk of diarrhoeal diseases from climate change: Evidence from communities supplied by groundwater in Uganda. R. Taylor, C. Tindimugaya, M. Owor and M. Shamsudduha (eds.), *Groundwater and Climate in Africa*. IAHS Publication No. 334. Wallingford, UK, IAHS Press, pagg. 15-19.
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A. M., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P. J.-F., Holman, I. e Treidel, H. 2013a. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, Vol. 3, pagg. 322-329. doi.org/10.1038/nclimate1744.
- Taylor, R. G., Todd, M. C., Kongola, L., Maurice, L., Nahozya, E. Sanga, H. and MacDonald, A. M. 2013b. Evidence of the dependence of groundwater resources on extreme rainfall in East Africa. *Nature Climate Change*, Vol. 3, pagg. 374-378. doi.org/10.1038/nclimate1731.
- Tekle-Haimanot, R., Melaku, Z., Kloos, H., Reimann, C., Fantaye, W., Zerihun, L. e Bjorvatn, K. 2006. The geographic distribution of fluoride in surface and groundwater in Ethiopia with an emphasis on the Rift Valley. *Science of the Total Environment*, Vol. 367, No. 1, pagg. 182-190. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.003.
- The Nature Conservancy. 2019. *Edwards Aquifer Protection*. The Nature Conservancy website. www.nature.org/en-us/about-us/where-we-work/united-states/texas/stories-in-texas/edwards-aquifer-protection/.
- _____. s.d. Bird Returns program. The Nature Conservancy website. www.scienceforconservation.org/science-in-action/birdreturns.
- Thorslund, J. e Van Vliet, M. T. H. 2020. A global dataset of surface water and groundwater salinity measurements from 1980–2019. *Scientific Data*, Vol. 7, Article 231. doi.org/10.1038/s41597-020-0562-z.
- Tincani, L., Ross, I., Uz Zaman, R., Burr, P., Mujica-Pereira, A. V., Ensink, J. e Evans, B. 2015. *Regional Assessment of the Operational Sustainability of Water and Sanitation Services in Sub-Saharan Africa*. Improving Value for Money and Sustainability in WASH Programmes (VFM-WASH). Oxford Policy Management. www.researchgate.net/publication/303621168_Regional_assessment_of_the_operational_sustainability_of_water_and_sanitation_services_in_Sub-Saharan_Africa.
- Tione, M. L., Bedano, J. C. e Blarasin, M. 2016. Relationships among invertebrate communities and groundwater properties in an unconfined aquifer in Argentina. *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 73, No. 5, pagg. 760-777. doi.org/10.1080/00207233.2016.1160650.
- Torjman, S. 2005. *What is Policy?* Ottawa, Caledon Institute of Social Policy.
- Tóth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 16, pagg. 4795-4812. doi.org/10.1029/JZ068i016p04795.
- Trupp, M., Ryan, S., Barranco, I., Leon, D. e Scoby-Smith, L. 2021. Developing the world's largest CO₂ Injection System – a history of the Gorgon Carbon Dioxide Injection System (March 16, 2021). *Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference, 15–18 March 2021*. doi.org/10.2139/ssrn.3815492.
- Tuinhof, A., Foster, S., Van Steenberg, F., Talbi, A. e Wishart, M. 2011. *Appropriate Groundwater Management Policy for Sub-Saharan Africa: In Face of Demographic Pressure and Climatic Variability*. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27363.
- UBA (Umweltbundesamt, Austrian Ministry of Environment). Inedito. Comunicazione personale (2021) da parte di Andreas Scheidleder (UBA, Groundwater Expert) all'autore, sulla base dell'esperienza EUWI+ (European Union Water Initiative Plus).
- UNDESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs – Dipartimento degli affari economici e sociali delle Nazioni Unite). 2020. *Population Dynamics: World Population Prospects 2019*. population.un.org/wpp/.
- _____. s.d. *The 17 Goals*. UNDESA Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals>.
- UNDP (United Nations Development Programme – Programma delle Nazioni Unite per lo sviluppo/Ministero dell'energia e dell'acqua del Libano). 2014. *Assessment of Groundwater Resources of Lebanon*. www.lb.undp.org/content/lebanon/en/home/library/environment_energy/assessment-of-groundwater-resources-of-lebanon.html.

- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe – Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite). 1992. *Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes*. Helsinki, 17 marzo 1992, UNECE. unece.org/environment-policy/water/about-the-convention/introduction.
- _____. 2007. *Our Waters: Joining Hands across Borders. First Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters*. New York/Ginevra, Nazioni Unite. unece.org/DAM/env/water/blanks/assessment/assessmentweb_full.pdf.
- _____. 2011. *Second Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters*. New York/Ginevra, Nazioni Unite. unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/English/ECE_Second_Assessment_En.pdf.
- _____. 2013. *Guide to Implementing the Water Convention*. New York/Ginevra, Nazioni Unite. unece.org/environment-policy/publications/guide-implementing-water-convention.
- _____. 2014. *Model Provisions on Transboundary Groundwaters*. New York/Ginevra, Nazioni Unite. unece.org/DAM/env/water/publications/WAT_model_provisions/ece_mp.wat_40_eng.pdf.
- _____. 2015. *Policy Guidance Note on the Benefits of Transboundary Water Cooperation: Identification, Assessment and Communication*. New York/Ginevra, Nazioni Unite. unece.org/DAM/env/water/publications/WAT_47_Benefits/ECE_MP.WAT_47_PolicyGuidanceNote_BenefitsCooperation_1522750_E_pdf_web.pdf.
- UNECE Task Force on Monitoring and Assessment. 2000. *Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Groundwaters*. Lelystad, Paesi Bassi. unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/guidelinesgroundwater.pdf.
- UNECE/UNESCO. 2021. *Progress on Transboundary Water Cooperation: Global Status of SDG Indicator 6.5.2 and Acceleration Needs 2021*. Parigi, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378914?posInSet=1&queryId=957ce00a-0462-4bab-8d10-8c5307999dee.
- UNECE/OMS. 2019. *Regional Report on the Status of Implementation of the Protocol. Meeting of the Parties to the Protocol on Water and Health*. ECE/MPWH/2019/4-EUPCR/1814149/1.2/2019/MOP-5/10. unece.org/environment-policy/water/areas-work-protocol/improving-governance-water-and-health/fourth-reporting-exercise-under-protocol-water-and-health.
- UNEP (United Nations Environmental Programme – Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2019. *Global Environment Outlook Geo 6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781108627146.
- _____. 2020. *SDG Indicator 6.3.2 Technical Guidance Document No. 3: Monitoring and Reporting for Groundwater*. https://communities.unep.org/download/attachments/32407814/CDC_GEMI2_TechDoc3_Groundwaters_20200402.pdf?version=3&modificationDate=1595432885358&api=v2.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura). 2001. *Internationally Shared (Transboundary) Aquifer Resources Management: Their Significance and Sustainable Management*. Framework document. UNESCO-IHP-VI, Series on Groundwater No. 1, 2001. Parigi, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000124386?posInSet=1&queryId=0b2f0491-ddd6-4668-85dd-e43b1d249129.
- _____. 2007. *Sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas: Evaluación preliminar* [Sistemi acquiferi transfrontalieri nelle Americhe: analisi preliminare]. Serie ISARM Américas, No. 1. Montevideo/Washington, DC, UNESCO/OEA. [www.oas.org/dsd/waterresources/projects/ISARM/Publications/ISARMAmericasLibro1\(spa\).pdf](http://www.oas.org/dsd/waterresources/projects/ISARM/Publications/ISARMAmericasLibro1(spa).pdf). (In spagnolo)
- _____. 2016. *Trifinio – Estudio de las aguas subterráneas* [Trifinio – Studio sulle acque sotterranee]. Informe técnico. Proyecto GGRETA – Fase 1 2013-2015. UNESCO. http://ihp-wins.unesco.org/documents/309/metadata_detail. (In spagnolo).
- _____. s.d. *Okavango Delta*. Sito web della UNESCO World Heritage Convention. whc.unesco.org/en/list/1432/.
- UNESCO/OAS (United Nations Educational, Cultural and Scientific Organization/Organization of American States). 2010. *Aspectos socioeconómicos, ambientales y climáticos de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas* [Aspetti socioeconomici, ambientali e climatici dei sistemi acquiferi transfrontalieri delle Americhe]. Serie ISARM Américas, No. 3. Montevideo/Washington, DC, UNESCO/OAS. <http://isarm-americas.org/wp-content/uploads/2019/06/Libro-3.pdf>. (In spagnolo)
- UNESCO-IHP (UNESCO Intergovernmental Hydrological Programme – Programma idrologico intergovernativo dell'UNESCO). 2000. *Fourteenth Session of the Intergovernmental Council*, Paris, 5–10 June 2000. Final Report. Parigi, UNESCO.
- _____. 2009. *Atlas of Transboundary Aquifers: Global Maps, Regional Cooperation and Local Inventories*. Parigi, UNESCO. <https://isarm.org/sites/default/files/resources/files/2%20Atlas%20of%20TBA.pdf>.
- UNESCO-IHP/UNEP (UNESCO Intergovernmental Hydrological Programme – Programma idrologico intergovernativo dell'UNESCO/United Nations Environment Programme – Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2016. *Transboundary Aquifers and Groundwater Systems of Small Island Developing States: Status and Trends. Summary for Policy Makers*. Nairobi, UNEP. www.un-igrac.org/resource/twap-summary-policy-makers-transboundary-aquifers-and-groundwater-systems-small-island.
- UNESCWA (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia – Commissione economica e sociale delle Nazioni Unite per l'Asia occidentale). 2015. *Water Development Report 6: The Water, Energy and Food Security Nexus in the Arab Region*. Beirut, Nazioni Unite. www.unescwa.org/publications/escwa-water-development-report-6-water-energy-and-food-security-nexus-arab-region.
- _____. 2019. *Moving towards Water Security in the Arab Region*. Beirut, Nazioni Unite. <https://archive.unescwa.org/publications/moving-towards-achieving-water-security-arab-region>.

_____. Prossima pubblicazione. *Water Development Report 9: Groundwater in the Arab Region*.

UNESCWA/BGR (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). 2013. *Inventory of Shared Water Resources in Western Asia*. Beirut, Nazioni Unite. waterinventory.org/.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change – Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici). 2021. NDC Registry (interim). www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx.

UNHRC (United Nations Human Rights Council). 2010. *Human Rights and Access to Safe Drinking Water and Sanitation*. Resolution adopted by the Human Rights Council. A/HRC/RES/15/9. ap.ohchr.org/documents/dpage_e.aspx?si=A/HRC/RES/15/9.

_____. 2021. The human right to a safe, clean, healthy and sustainable environment. Resolution adopted by the Human Rights Council. A/HRC/48/L.23. ap.ohchr.org/documents/dpage_e.aspx?si=A/HRC/48/L.23/Rev.1.

UNICEF/OMS (Fondo delle Nazioni Unite per l'infanzia/Organizzazione mondiale della sanità). 2019. *Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000-2017*. New York, UNICEF/OMS. www.unicef.org/reports/progress-on-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2019.

UNIDO (United Nations Industrial Development Organization – Organizzazione delle Nazioni Unite per lo sviluppo industriale). Inedito. Informazione fornita da Christian Susan (UNIDO, Industrial Development Officer) nel 2021.

UNIDO/Banca mondiale/GIZ (United Nations Industrial Development Organization/Banca mondiale/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH). 2021. *An International Framework for Eco-Industrial Parks, Version 2.0*. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35110.

UN-Water. 2018. *SDG 6 Public Dialogue Report*. www.unwater.org/publications/sdg-6-public-dialogue-report/.

_____. 2021. *Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – water and sanitation for all*. Version: July 2021. Ginevra, Svizzera. www.unwater.org/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021a.pdf.

Ursitti, A., Giannoccaro, G., Prosperi, M., De Meo, E. e De Gennaro, B. C. 2018. The magnitude and cost of groundwater metering and control in agriculture. *Water*, Vol. 10, No. 3, Article 344. doi.org/10.3390/w10030344.

US Department of Energy. 2016. *Potential Vulnerability of US Petroleum Refineries to Increasing Water Temperature and/or Reduced Water Availability*. Executive Summary of Final Report. www.energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/US%20DOE%20Refinery%20Water%20Study.pdf.

US EPA (United State Environmental Protection Agency). 1996. *Manual: Best Management Practices for Pollution Prevention in the Textile Industry*. Cincinnati, Ohio, US EPA. www.epa.gov/eg/best-management-practices-pollution-prevention-textile-industry-manual.

USGS (United States Geological Survey). s.d. *Groundwater Use in the United States*. www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/groundwater-use-united-states?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.

V

Van der Gun, J. 2018. Data, information, knowledge and diagnostics on groundwater. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido e J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Paesi Bassi, CRC Press/Balkema, pagg. 193-213.

_____. 2019. The global groundwater revolution. *Oxford Research Encyclopedia, Environmental Science*. Oxford University Press. doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.632.

_____. 2020. *Conjunctive Water Management. A Powerful Contribution to Achieving the Sustainable Development Goals*. Parigi, UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375026.locale=en>.

Van der Gun, J., Merla, A., Jones, M. e Burke, J. 2012. Governance of the subsurface space and groundwater frontiers. FAO/Groundwater Governance. *Thematic Papers on Groundwater*, pagg. 507-573. www.fao.org/3/i6040e/i6040e.pdf.

Van Koppen, B. 1998. *More Jobs per Drop: Targeting Irrigation to Poor Women and Men*. Wageningen/Amsterdam, Paesi Bassi, Wageningen Agricultural University/Royal Tropical Institute.

Van Koppen, B., Parthasarathy, R. e Saffliou, C. 2002. *Poverty Dimensions of Irrigation Management Transfer in Large-scale Canal Irrigation in Andhra Pradesh and Gujarat, India*. IWMI Research Report No. 61. Colombo, International Water Management Institute (IWMI).

Van Weert, F., Van der Gun, J. e Reckman, J. 2009. *Global Overview of Saline Groundwater Occurrence and Genesis*. Utrecht, Paesi Bassi, International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC). www.un-igrac.org/resource/global-overview-saline-groundwater-occurrence-and-genesis-report.

Velis, M., Conti, K. I. e Biermann, F. 2017. Groundwater and human development: Synergies and trade-offs within the context of the sustainable development goals. *Sustainability Science*, Vol. 12, pagg. 1007-1017. doi.org/10.1007/s11625-017-0490-9.

Venkanta, M. K. 2021. Scarcity for whom? Tracing the history of groundwater use and inequality in Gujarat, India. *Water Science Policy*, 27 marzo 2021. watersciencepolicy.com/article/scarcity-for-whom-tracing-the-history-of-groundwater-use-and-inequality-in-gujarat-india-931dd9c94fac?language=English.

Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. O. e Demollin, E. 2014. Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling. *Energy Procedia*, Vol. 46, pagg. 58-67. doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158.

- Verma, S. e Shah, M. 2019. *Drought-Proofing through Groundwater Recharge: Lessons from Chief Ministers' Initiatives in Four Indian States*. Washington, DC, Banca mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33240.
- Vij, S., Warner, J. e Barua, A. 2020. Power in water diplomacy. *Water International*, Vol. 45, No. 4, pagg. 249-253. doi.org/10.1080/02508060.2020.1778833.
- Villar, P. C. e Costa Ribeiro, W. 2011. The agreement on the Guarani Aquifer: A new paradigm for transboundary groundwater management? *Water International*, Vol. 36, No. 5, pagg. 646-660. doi.org/10.1080/02508060.2011.603671.
- Villholth, K. G. 2013a. Groundwater irrigation for smallholders in Sub-Saharan Africa – a synthesis of current knowledge to guide sustainable outcomes. *Water International*, Vol. 38, No. 4, pagg. 369-391. doi.org/10.1080/02508060.2013.821644.
- _____. 2013b. Integrated groundwater use and management in vulnerable coastal zones of Asia-Pacific. C. Wetzelhuetter (ed.), *Groundwater in the coastal zones of Asia-Pacific*. Dordrecht, Paesi Bassi, Springer, pagg. 317-342.
- Villholth, K. G. e Ross, A. s.d.. *Overview on Groundwater-Based Natural Infrastructure*. Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice (GRIPP). gripp.iwmi.org/natural-infrastructure/overview-on-groundwater-based-natural-infrastructure/. (Consultato l'8 giugno 2021)
- Villholth, K. G., Tøttrup, C., Stendel, M., Maherry, A. e Claassen, M. 2011. *SADC Regional Groundwater Drought Vulnerability Mapping*. Final Report. Southern African Development Community (SADC). [www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/SADC Regional Groundwater Drought Risk Mapping.pdf](http://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/SADC%20Regional%20Groundwater%20Drought%20Risk%20Mapping.pdf).
- Vishwakarma, B. D., Bates, P., Sneeuw, N., Westaway, R. M. e Bamber, J. L. 2021. Re-assessing global water storage trends from GRACE time series. *Environmental Research Letters*, Vol. 16, No. 3, Article 034005. doi.org/10.1088/1748-9326/abd4a9.
- Vrba, J. e Verhagen, B. (eds.). 2011. *Groundwater for Emergency Situations: A Methodological Guide*. UNESCO-IHP-VII, Series on Groundwater No. 3. Paris, UNESCO.
- Wada, Y. 2016. Modeling groundwater depletion at regional and global scales: Present state and future prospects. *Surveys in Geophysics*, Vol. 37, pagg. 419-451. doi.org/10.1007/s10712-015-9347-x.
- Wada, Y., Lo, M-H., Yeh, P. J-F., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Wu, R-J. e Tseng, Y-H. 2016. Fate of water pumped from underground and contributions to sea-level rise. *Nature Climate Change*, Vol. 6, pagg. 777-780. doi.org/10.1038/NCLIMATE3001.
- Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S. e Bierkens, M. F. P. 2010. Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, No. 20, L20402. doi.org/10.1029/2010GL044571.
- Wahome, C. N. 2013. *Contamination Levels of Groundwater, Antimicrobial Resistance Patterns, Plasmid Profiles and Chlorination Efficacy in Ongata Rongai, Kajjado North County, Kenya*. Master's Thesis. Nairobi, Kenyatta University. <https://ir-library.ku.ac.ke/handle/123456789/8960>.
- Walker, D., Parkin, G., Schmitter, P., Gowing, J., Tilahun, S. A., Haile, A. T. e Yimam, A. Y. 2019. Insights from a multi method recharge estimation comparison study. *Groundwater*, Vol. 57, No. 2, pagg. 245-258. doi.org/10.1111/gwat.12801.
- Walvoord, M. A. e Kurylyk, B. L. 2016. Hydrologic impacts of thawing permafrost – A review. *Vadose Zone Journal*, Vol. 15, No. 6, pagg. 1-20. doi.org/10.2136/vzj2016.01.0010.
- Wang, J., Rothausen, S. G. S. A., Conway, D., Zhang, L., Xiong, W., Holman, I. P. e Li, Y. 2012. China's water–energy nexus: Greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture. *Environmental Research Letters*, Vol. 7, No. 1, Article 014035. doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014035.
- Watts, R., Walton, D. e Knox, D. 2021. *Blueprint: Financing a Future of Safe Water, Sanitation and Hygiene for All*. washmatters.wateraid.org/publications/blueprint-financing-a-future-of-safe-water-sanitation-and-hygiene-for-all.
- Welsien, K. 2016. *Project Information Document (Concept Stage) – Accelerating Solar Water Pumping via Innovative Financing – P161757*. Washington, DC, Banca mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/797711478099764040/Project-Information-Document-Concept-Stage-Accelerating-Solar-Water-Pumping-via-Innovative-Financing-P161757.
- Wentworth, A., Pavelic, P., Kongmany, S., Sotoukee, T., Sengphaxaiyalath, K., Phomkeona, K., Deevanhxay, P., Chounlamany, V. e Manivong, V. 2021. *Environmental Risks from Pesticide Use: The Case of Commercial Banana Farming in Northern Lao PDR*. IWMI Research Report No. 177. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). doi.org/10.5337/2021.207.
- Werner, A. D., Sharp, H. K., Galvis, S. C., Post, V. E. A. e Sinclair P. 2017. Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs. *Journal of Hydrology*, Vol. 551, pagg. 819-844. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.047.
- White, E. K., Peterson, T. J., Costelloe, J., Western, A.W. e Carrara, E. 2016. Can we manage groundwater? A method to determine the quantitative testability of groundwater management plans. *Water Resources Research*, Vol. 52, No. 6, pagg. 4863-4882. doi.org/10.1002/2015WR018474.
- WHYMAP. 2008. *Groundwater Resources of the World: Large Aquifer Systems*. WHYMAP database. Hannover, Germania/Parigi, BGR/UNESCO. ihp-wins.unesco.org/layers/geonode:world_aquifer_systems. (Consultato il 5 agosto 2020).
- Wiese, B. U. e Nitz, M. 2019. Energy balance of the carbon dioxide injection facility in Ketzin, Germany. *Applied Energy*, Vol. 239, pagg. 626-634. doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.223.

WRI (World Resources Institute). 2019. WRI Aqueduct website. www.wri.org/aqueduct.

Wu, G. C., Deshmukh, R., Ndhlukula, K., Radojicic, T., Reilly-Moman, J., Phadke, A., Kammen, D. M. e Callaway, D. S. 2017. Strategic siting and regional grid interconnections key to low-carbon futures in African countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 114, No. 5, pagg. E3004-E3012. doi.org/10.1073/pnas.1611845114.

Wurtsbaugh, W.A., Miller, C., Null, S. E., DeRose, R. J., Wilcock, P., Hahnenberger, M., Howe, F. e Moore, J. 2017. Decline of the world's saline lakes. *Nature Geoscience*, Vol. 10, pagg. 816-821. doi.org/10.1038/NGEO3052.

WWAP (World Water Assessment Programme – Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche). 2015. *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Parigi, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231823_eng.

_____. 2109. *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2019: nessuno sia lasciato indietro*. Parigi, UNESCO. <https://en.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2019>.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme – Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche)/UN-Water. 2018. *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based solutions for water*. Parigi, UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>

WWC (World Water Council – Consiglio mondiale dell'acqua). 2018. *Ten Actions for Financing Water Infrastructure*. World Water Council Report. Marsiglia, Francia, WWC. www.worldwatercouncil.org/en/publications/ten-actions-financing-water-infrastructure.

WWF (World Wide Fund for Nature). 2019. *Freshwater Risks & Opportunities: An Overview and Call to Action for the Financial Sector*. Berlino, WWF Germany. wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwf_water_risk_financial_value_part4_keypiece_web.pdf.

WWQA (World Water Quality Alliance). 2021. *Assessing Groundwater Quality: A Global Perspective: Importance, Methods and Potential Data Sources*. A report by the Friends of Groundwater in the WWQA, Nairobi.

X

Xiao, K-Q., Li, B., Ma, L., Bao, P., Zhou, X., Zhang, T. e Zhu, Y-G. 2016. Metagenomic profiles of antibiotic resistance genes in paddy soils from South China. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 92, No. 3, fiw023. doi.org/10.1093/femsec/fiw023.

Xie, H., Ringler, C. e Hossain Mondal, A. 2021. Solar or diesel: A comparison of costs for groundwater-fed irrigation in sub-Saharan Africa under two energy solutions. *Earth's Future*, Vol. 9, No. 4. doi.org/10.1029/2020EF001611.

Xinhua. 2020. China launches planning for soil environment protection for next five years. China Daily, 25 maggio 2020. www.chinadaily.com.cn/a/202005/25/WS5ecb5365a310a8b241158349.html.

Xu, T., Yan, D., Weng, B., Bi, W., Do, P., Liu, F., Wang, Y. e Ma, J. 2018. The effect evaluation of comprehensive treatment for groundwater overdraft in Quzhou County, China. *Water*, Vol. 10, No. 7, Article 874. doi.org/10.3390/w10070874.

Yannopoulos, S. I., Lyberatos, G., Theodossiou, N., Li, W., Valipour, M., Tamburrino, A. e Angelakis, A. N. 2015. Evolution of water lifting devices (pumps) over the centuries worldwide. *Water*, Vol. 7, No. 9, pagg. 5031-5060. doi.org/10.3390/w7095031.

Yechieli, Y. e Wood, W. W. 2002. Hydrogeologic processes in saline systems: Playas, sabkhas, and saline lakes. *Earth-Science Reviews*, Vol. 58, No. 3-4, pagg. 343-365. doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00067-3.

Z

Zeeberg, J. 2009. *Flood Control in the Netherlands: A Strategy for Dike Reinforcement and Climate Adaptation*. Leiden, Paesi Bassi, Rijnland Water Control Board. doi.org/10.13140/RG.2.1.5127.9445.

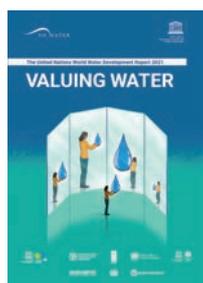
Zhang, T., Barry, R. G., Knowles, K., Ling, F. e Armstrong, R. L. 2003. Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. L. U. Arenson, M. Phillips and S. M. Springman (eds.), *Permafrost: Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland*. Rotterdam, Paesi Bassi, A.A. Balkema, pagg. 1289-1294.

Zhao, Y., Wang, L., Li, H., Zhu, Y., Wang, Q., Jiang, S., Zhai, J. e Hu, P. 2020. Evaluation of groundwater overdraft governance measures in hengshui city, China. *Sustainability*, Vol. 12, No. 9, Article 3564. doi.org/10.3390/su12093564.

Zhou, Y., Sawyer, A. H., David, C. H. e Famiglietti, J. S. 2019. Fresh submarine groundwater discharge to the near-global coast. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 11, pagg. 5855-5863. doi.org/10.1029/2019GL082749.

Abbreviazioni e acronimi

ANA	Autoridad Nacional del Agua – Autorità nazionale dell'acqua (Perù)	ILC	International Law Commission – Commissione del diritto internazionale
APS	Aiuto pubblico allo sviluppo	MOEF	Ministry of Environment and Forestry (Indonesia) – Ministero dell'ambiente e delle foreste (Indonesia)
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage – Stoccaggio di energia termica nell'acquifero	NDCs	National Determined Contributions – Contributi determinati a livello nazionale
ASR	Aquifer Storage and Recovery	P	Precipitazioni
CDP	Carbon Disclosure Project	PES	Payment for Ecosystem Services – Pagamento per i servizi ecosistemici
CMIP5	Coupled-Modelled Inter-Comparison Project Phase 5	PPP	Public-Private Partnership – Partenariato pubblico-privato
COWSO	Community Water and Supply Organizations – Associazioni per l'acqua e l'approvvigionamento idrico delle comunità	RECP	Resource Efficient and Cleaner Production – Produzione efficiente e pulita
DBP	Disinfection By-Products – Sottoprodotti di disinfezione	SAAB	Amazon Aquifer System in Brazil – Sistema acquifero amazzonico
DDT	Dichlorodiphenyltrichloroethane – Para-diclorodifeniltricloroetano	SADC	Southern African Development Community – Comunità di sviluppo dell'Africa meridionale
EGS	Enhanced Geothermal System – Sistema geotermico avanzato	SIDS	Small Island Developing States – Piccoli Stati insulari in via di sviluppo
EIPs	Eco-Industrial Parks – Parchi eco-industriali	SLR	Sea Level Rise – Aumento del livello del mare
ENSO	El Niño Southern Oscillation – El Niño-Oscillazione meridionale	SMAB	Senegalo-Mauritanian Aquifer Basin – Bacino dell'acquifero senegalese-mauritano
ET	Evapotranspiration – Evapotraspirazione	SPIS	Solar-Powered Irrigation Systems – Sistema di irrigazione a energia solare
EUWI+	European Union's Water Initiative Plus	TSF	Tailings Storage Facility – Impianto di stoccaggio degli sterili
GAA	Guarani Aquifer Agreement – Accordo relativo all'acquifero guarani	TWS	Total Water Storage – Stoccaggio totale di acqua
GAS	Guarani Aquifer System – Sistema acquifero guarani	UE	Unione europea
GDE	Groundwater-Dependent Ecosystem – Ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee	UN	United Nations – Nazioni Unite
GEF	Global Environment Facility	UNECE	United Nations Economic Commission for Europe – Commissione economica delle Nazioni Unite per l'Europa
GGIS	Global Groundwater Information System – Sistemi informativi globali sulle acque sotterranee	UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura
GGRETA	Governance of Groundwater in Transboundary Aquifers	UNIDO	United Nations Industrial Development Organization – Organizzazione delle Nazioni Unite per lo sviluppo industriale
GPCP	Global Precipitation Climatology Project	UNICEF	United Nations Children's Fund – Fondo delle Nazioni Unite per l'infanzia
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment	WASH	Water, Sanitation and Hygiene – Acqua, servizi igienico-sanitari e igiene
GSHP	Ground Source Heat Pumps – Pompa di calore geotermica	WHYMAP	World-Wide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme
HDPE	High-density polyethylene – Polietilene ad alta densità	WFD	Water Framework Directive – Direttiva quadro sulle acque
IEA	International Energy Agency – Agenzia internazionale dell'energia	WWDR	World Water Development Report – Rapporto mondiale sullo sviluppo delle risorse idriche
IGRAC	International Groundwater Resources Assessment Centre	ZLD	Zero Liquid Discharge – Scarico liquido zero
IHP	Intergovernmental Hydrological Programme – Programma idrologico intergovernativo		
ISARM	Internationally Shared Aquifer Resources Management initiative		
IWRM	Integrated Water Resources Management – Gestione integrata delle risorse idriche		
JMP	Joint Monitoring Programme – Programma di monitoraggio congiunto		
LULC	Land Use and Land Cover – Uso e copertura del suolo		



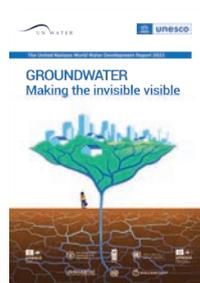
ISBN 978-92-3-100434-6

© UNESCO 2021

208 pages

Prezzo: EUR 55.00

WWDR 2021 A colori, con riquadri, figure, mappe, tabelle, note, fotografie, riferimenti ed elenco di abbreviazioni e acronimi, nonché le prefazioni della direttrice generale dell'UNESCO Audrey Azoulay e del presidente di UN-Water e IFAD Gilbert F. Hounbo



ISBN 978-92-3-100507-7

© UNESCO 2022

248 pagine

Prezzo: EUR 55.00

WWDR 2022 A colori, con riquadri, figure, mappe, tabelle, note, fotografie, riferimenti, e lista di abbreviazioni e acronimi, così come le prefazioni della direttrice generale dell'UNESCO Audrey Azoulay e del presidente di UN-Water e IFAD Gilbert F. Hounbo

Per scaricare il formato PDF del rapporto e le pubblicazioni associate, le edizioni precedenti del WWDR e il materiale mediatico, visita il sito: <https://en.unesco.org/wwap>

PUBBLICAZIONI ASSOCIATE



*Sintesi del
WWDR 2021*

12 pagine

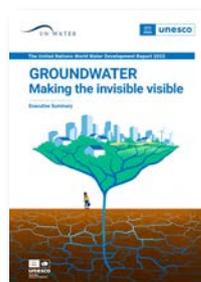
Disponibile nelle seguenti lingue: arabo, cinese, coreano, francese, hindi, inglese, italiano, portoghese, russo, spagnolo e tedesco



*Fatti e cifre del
WWDR 2021*

12 pagine

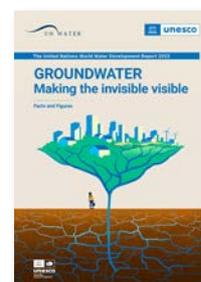
Disponibile nelle seguenti lingue: francese, inglese, italiano, portoghese e spagnolo



*Sintesi del
WWDR 2022*

12 pagine

Disponibile nelle seguenti lingue: arabo, cinese, coreano, francese, hindi, inglese, italiano, portoghese, russo, spagnolo e tedesco



*Fatti e cifre del
WWDR 2022*

8 pagine

Disponibile nelle seguenti lingue: francese, inglese, italiano, portoghese e spagnolo

Per scaricare questi documenti, visita il sito: <https://en.unesco.org/wwap>

UN-Water coordina l'impegno delle Nazioni Unite e delle organizzazioni internazionali che lavorano su questioni relative all'acqua e ai servizi igienico-sanitari. In tal modo, UN-Water cerca di aumentare l'efficacia del sostegno fornito agli Stati membri nei loro sforzi per la realizzazione di accordi internazionali in materia di acqua e servizi igienico-sanitari. Le pubblicazioni di UN-Water attingono all'esperienza e alla competenza dei membri e dei partner.

SDG 6 Progress Update 2021 – Rapporto di sintesi

Questo rapporto fornisce un aggiornamento sui progressi verso tutti i traguardi dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 e identifica gli ambiti prioritari per gli interventi da accelerare. Il rapporto, prodotto dall'iniziativa di monitoraggio integrato di UN-Water per l'Obiettivo 6, presenta nuovi dati a livello nazionale, regionale e globale su tutti gli indicatori di questo Obiettivo.

SDG 6 Progress Update 2021 – Otto rapporti, uno per indicatore globale dell'Obiettivo 6

Questa serie di rapporti fornisce un aggiornamento approfondito e un'analisi dei progressi verso i diversi traguardi dell'Obiettivo 6 e identifica gli ambiti prioritari per gli interventi da accelerare: progressi in materia di acqua potabile, servizi igienico-sanitari e igiene (OMS e UNICEF); progressi nel trattamento delle acque reflue (OMS e UN-Habitat); progressi sulla qualità dell'acqua nell'ambiente (UNEP); progressi sull'efficienza nell'uso dell'acqua (FAO); progressi sul livello di stress idrico (FAO); progressi nella gestione integrata delle risorse idriche (UNEP); progressi nella cooperazione transfrontaliera in materia di acque (UNECE e UNESCO); progressi sugli ecosistemi legati all'acqua (UNEP). I rapporti, prodotti dalle agenzie incaricate, presentano i nuovi dati nazionali, regionali e globali sugli indicatori dell'Obiettivo 6.

Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche

Il Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche è uno dei rapporti fondamentali di UN-Water sulle questioni legate all'acqua e ai servizi igienico-sanitari, incentrato su un tema diverso ogni anno. Il rapporto è pubblicato dall'UNESCO, per conto di UN-Water, e la sua produzione è coordinata dal Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO. Il rapporto fornisce informazioni sulle principali tendenze riguardanti lo stato, l'uso e la gestione dell'acqua dolce e dei servizi igienico-sanitari, sulla base del lavoro svolto dai membri e dai partner di UN-Water. Pubblicato in occasione della Giornata mondiale dell'acqua, il rapporto fornisce ai decisori conoscenze e strumenti per formulare e attuare politiche idriche sostenibili. Offre inoltre esempi di buone pratiche e analisi approfondite per stimolare idee e azioni volte ad una migliore gestione nel settore idrico e in altri settori correlati.

UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS)

Il GLAAS è prodotto dall'Organizzazione mondiale della sanità per conto di UN-Water. Fornisce un aggiornamento globale sul quadro delle politiche, degli accordi istituzionali, delle risorse umane e dei flussi finanziari internazionali e nazionali a sostegno dell'acqua e dei servizi igienico-sanitari. È un contributo sostanziale all'attività *Sanitation and Water for All* (SWA), nonché alla rendicontazione sullo stato di avanzamento dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 (vedere sopra).

Le relazioni sullo stato di avanzamento prodotte dal Programma di monitoraggio congiunto di OMS e UNICEF per l'approvvigionamento idrico, per i servizi igienico-sanitari e per l'igiene (JMP)

Il Programma di monitoraggio congiunto è affiliato a UN-Water ed è responsabile del monitoraggio globale dei progressi verso i traguardi dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 sull'accesso universale ad acqua potabile sicura e conveniente e servizi igienico-sanitari adeguati ed equi. Ogni due anni il Programma pubblica stime aggiornate e rapporti sui progressi relativi ai servizi WASH nelle famiglie, nelle scuole e nelle strutture sanitarie.

Policy e Analytical Brief

I *policy brief* di UN-Water forniscono una guida breve e informativa sulle politiche relative alle questioni più urgenti in materia di acqua dolce, attingendo all'esperienza combinata del sistema delle Nazioni Unite. Gli *analytical brief* forniscono un'analisi delle questioni emergenti e possono offrire una base per ulteriori ricerche, riflessioni e orientamenti politici futuri.

PUBBLICAZIONI DI UN-WATER IN PROGRAMMA

- *Policy Brief* di UN-Water su genere e acqua
- Aggiornamento del *Policy Brief* di UN-Water sulla cooperazione transfrontaliera in materia di acque
- *Analytical Brief* di UN-Water sull'efficienza idrica
- Studi di caso di implementazione per paese

LA GIORNATA MONDIALE DELL'ACQUA E IL RAPPORTO MONDIALE DELLE NAZIONI UNITE SULLO SVILUPPO DELLE RISORSE IDRICHE

Le Nazioni Unite deputano giornate, settimane, anni e decenni specifici come occasioni per celebrare eventi e valorizzare temi particolari al fine di promuovere, attraverso la consapevolezza e l'azione, gli obiettivi dell'Organizzazione.



Le ricorrenze internazionali sono occasioni per educare il grande pubblico su questioni di interesse, per mobilitare la volontà politica e le risorse al fine di affrontare problemi globali, e per celebrare e rafforzare le conquiste dell'umanità.

La maggior parte delle ricorrenze sono state stabilite da risoluzioni dell'Assemblea generale delle Nazioni Unite. La Giornata mondiale dell'acqua (22 marzo) risale alla Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente e lo sviluppo del 1992, durante la quale fu raccomandato un maggior rispetto delle risorse idriche mondiali.

L'Assemblea generale delle Nazioni Unite ha risposto stabilendo il 22 marzo 1993 come prima Giornata mondiale dell'acqua. Da allora si tiene ogni anno ed è una delle giornate internazionali più popolari insieme alla Giornata internazionale della donna (8 marzo), alla Giornata internazionale della pace (21 settembre) e alla Giornata dei diritti umani (10 dicembre).

Ogni anno, UN-Water, il meccanismo di coordinamento delle Nazioni Unite per l'acqua e i servizi igienico-sanitari, stabilisce un tema per la Giornata mondiale dell'acqua corrispondente a una sfida attuale o futura legata a questo bene così prezioso. Tale tema definisce anche il *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* che viene presentato nella Giornata mondiale dell'acqua. Questa pubblicazione è il rapporto principale di UN-Water e fornisce ai decisori politici gli strumenti per formulare e attuare politiche idriche sostenibili. Il rapporto offre informazioni utili sulle principali tendenze tra cui lo stato, l'uso e la gestione dell'acqua dolce e dei servizi igienico-sanitari, sulla base del lavoro dei membri e dei partner di UN-Water.

Il rapporto è pubblicato dall'UNESCO, per conto di UN-Water, e la sua produzione è coordinata dal Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO.

Volume tradotto e pubblicato grazie al contributo di:



Le acque sotterranee, rappresentando le maggiori riserve di acqua dolce allo stato liquido sulla Terra, possono offrire alle società enormi vantaggi e opportunità sul piano sociale, economico e ambientale. Questa preziosa risorsa è fondamentale per la lotta alla povertà, per la sicurezza alimentare e idrica, per la creazione di posti di lavoro dignitosi, per lo sviluppo socioeconomico e per la resilienza delle società e delle economie ai cambiamenti climatici.

Tuttavia, questa risorsa naturale è spesso poco conosciuta e, di conseguenza, sottovalutata, mal gestita e persino sovrasfruttata. Nonostante la loro abbondanza, le acque sotterranee rimangono vulnerabili allo sfruttamento eccessivo e all'inquinamento, entrambi fattori che possono avere effetti devastanti su questa risorsa e sulla sua disponibilità. Non è più possibile trascurare le potenzialità delle acque sotterranee e la necessità di gestire questa risorsa in modo sostenibile, soprattutto alla luce della crescente scarsità idrica in molte parti del mondo.

L'edizione 2022 del Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche, *Acque sotterranee: rendere visibile la risorsa invisibile*, descrive le sfide e le opportunità associate all'utilizzo, alla gestione e alla governance delle acque sotterranee in tutto il mondo. Il rapporto affronta le questioni relative a questa risorsa nel contesto dei tre principali settori di utilizzo dell'acqua (agricoltura, insediamenti umani e industria), nonché le sue interazioni con gli ecosistemi e la sua relazione con i cambiamenti climatici. Pone in evidenza diverse prospettive regionali e presenta una serie di opzioni di risposta riguardanti dati e informazioni, politiche e pianificazione, gestione e governance, e finanziamenti.

Il Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche è il rapporto principale di UN-Water sulle questioni legate all'acqua e ai servizi igienico-sanitari e affronta un tema diverso ogni anno. È pubblicato dall'UNESCO per conto di UN-Water e la sua produzione è coordinata dal Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO. Il rapporto fornisce informazioni sulle principali tendenze riguardanti lo stato, l'uso e la gestione dell'acqua dolce e dei servizi igienico-sanitari, sulla base del lavoro svolto dai membri e dai partner di UN-Water. Pubblicato in occasione della Giornata mondiale dell'acqua, il rapporto fornisce ai decisori conoscenze e strumenti per formulare e attuare politiche idriche sostenibili. Inoltre, offre esempi di buone pratiche e analisi approfondite per stimolare idee e azioni per una migliore gestione nel settore idrico e in altri settori correlati.

Questa pubblicazione è finanziata dal
Governo italiano e dalla Regione Umbria.



Regione Umbria

