

Siccità, scarsità e crisi idriche

Il contributo della ricerca
a supporto della definizione
del bilancio idrico

A cura di
Emanuele Romano
Ivan Portoghese



HABITAT SIGNA

Studi e ricerche su sistema terra e ambiente

collana del
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente

diretta da
Francesco Petracchini

comitato scientifico a cura del consiglio scientifico di dipartimento
Andrea Billi, Claudio Faccenna, Gian Luigi Liberti, Andrea Rinaldo, Sabrina Speich

comitato editoriale
Sara Di Marcello, Maria Elena Martinotti

ideazione del nome e design della collana
Lucia Caraffa

Siccità, scarsità e crisi idriche

Volume 1 della collana HABITAT SIGNA

editing
Sara Di Marcello, Ivan Portoghese, Emanuele Romano, Angelica Zonta

impaginazione e copertina
Lucia Caraffa

graphical abstract
Matteo Tucci
www.luminescentia.com

crediti fotografici

Copertina e pag. 4 - Greg Montani, Pixabay.com; pagg. 20, 27, 562 - Carolyn, Pexels.com; pag. 238 - George Becker, Pexels.com; pagg. 477 e 512 - Frank Cone, Pexels.com; pag. 482 - FOX, Pexels.com; pag. 495 - Teono123, Pexels.com
Freepik.com: pagg. 30, 47, 50, 56, 68, 70,75, 86, 89, 96, 99, 104, 118, 121, 202, 212, 258, 268, 278, 284, 301, 303, 304, 311,325, 328, 339, 347, 350, 357, 366, 369, 384, 388, 391, 397, 406, 401, 402, 432, 426, 438, 440, 461, 480, 513, 514, 517, 518, 523, 541.
L'Editore è a disposizione degli aventi diritto per eventuali inesattezze nella citazione delle fonti.

© Cnr Edizioni, 2024

P.le Aldo Moro 7
00185 Roma
www.edizioni.cnr.it

ISSN 3035-2290

ISBN (ed. stampa) 978 88 8080 673 8

ISBN (ed. digitale) 978 88 8080 674 5

DOI <https://doi.org/10.69115/habitatsigna-2024-1>



This work is licensed under CC BY-SA 4.0



Siccità, scarsità e crisi idriche

Il contributo della ricerca
a supporto della definizione
del bilancio idrico

A cura di
Emanuele Romano
Ivan Portoghese



Indice

[5](#)
[21](#)

Prefazioni
Introduzione

[29](#)

1

Il bilancio idrologico, la disponibilità di risorsa idrica e il bilancio idrico

a cura di **Stefano Mariani**
Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA)

[49](#)

2

La governance dell'acqua in Italia

a cura di **Gerardo Sansone**
Presidenza del Consiglio dei ministri

[73](#)

3

Previsione, prevenzione e contrasto delle crisi idriche: il valore aggiunto della conoscenza tecnico-scientifica nelle attività di protezione civile

a cura di **Andrea Duro**
Dipartimento della protezione civile

[103](#)

4

Il regime meteo-climatico

a cura di **Stefano Federico**
CNR - Istituto di scienze dell'atmosfera e del clima (ISAC)

[145](#)

5

La criosfera

a cura di **Fabrizio de Blasi**
CNR - Istituto di scienze polari (ISP)

[201](#)

6

Il suolo e la zona insatura

a cura di **Marco Berardi**
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[237](#)

7

Acque superficiali e invasi

a cura di **Luca Brocca**
CNR - Istituto di ricerca per la protezione idrogeologica (IRPI)

[267](#)

8

Acque sotterranee

a cura di **Cristina di Salvo**
CNR - Istituto di geologia ambientale e geoingegneria (IGAG)
Matia Menichini
CNR - Istituto di geoscienze e georisorse (IGG)

[327](#)

9

Interazione acque continentali - acque marine

a cura di **Christian Ferrarin**
CNR - Istituto di scienze marine (ISMAR)

[349](#)

10

Le risorse idriche non convenzionali

a cura di **Domenica Mosca Angelucci**
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[386](#)

11

Gli utilizzi idrici e la gestione sostenibile delle risorse

a cura di **Marco Lauteri**
CNR - Istituto di ricerca sugli ecosistemi terrestri (IRET)
Emanuele Romano e **Ivan Portoghese**
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[475](#)

12

Siccità ed ecosistemi

a cura di **Fabrizio Stefani**
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[513](#)

13

Siccità e Land Degradation

a cura di **Vito Imbrenda**
CNR - Istituto di metodologie per l'analisi ambientale (IMAA)

[554](#)

Conclusioni



Keywords
river-sea continuum
saltwater intrusion
Coastal aquifers
Delta and estuaries

Parole-chiave
Continuum fiume-mare
intrusione salina
acquiferi costieri
delta ed estuari

Curatore
Christian Ferrarin
CNR
Istituto di scienze marine

Con contributi di
CNR
Istituto di metodologie
per l'analisi ambientale
Valeria Giampaolo

CNR
Istituto di ricerca sulle acque
Rita Masciale
Giuseppe Passarella

CNR
Istituto di scienze marine
Debora Bellafiore

Interazione acque continentali - acque marine

9.1	Introduzione	329
9.2	Monitoraggio	330
9.3	Regime progressivo e stato attuale	333
9.4	Impatti del cambiamento climatico sull'interazione acque continentali - acque marine	335
9.5	Strumenti modellistici di analisi e previsionali	337
9.6	Le domande di ricerca	341
9.7	Referenze bibliografiche	342

L'intrusione salina nelle acque superficiali e sotterranee (*saltwater intrusion* - SWI) è un fenomeno naturale, tipico di aree costiere, regolato dalle dinamiche di equilibrio acqua dolce acqua salata che hanno luogo all'interfaccia tra acque interne e acque marine. Questo fenomeno, che si manifesta con l'ingressione di acque saline nell'area continentale, è molto spesso amplificato dalle pressioni antropiche che interferiscono sugli equilibri naturali, come ad esempio la crescente urbanizzazione e l'impermeabilizzazione dei suoli, il sovrasfruttamento dei corpi idrici sotterranei, le modificazioni dei regimi naturali di deflusso dei corsi d'acqua superficiali e la bonifica delle paludi (Frollini et al., 2022).

Nelle zone costiere i processi naturali (subsidenza, maree, mareggiate) e i cambiamenti climatici (principalmente la riduzione delle precipitazioni e l'innalzamento del livello del mare) si combinano con le attività umane aggravando gli impatti negativi dell'intrusione salina (Befus et al., 2020; Bellafiore et al., 2021). Inoltre, l'aumento in termini di frequenza e intensità degli eventi estremi può ridurre il trasferimento

di acque di scorrimento superficiale verso i sistemi acquiferi (Menichini e Doveri, 2020). Essendo questa una componente di alimentazione preponderante in contesti costieri, la sua riduzione può determinare significative perdite di potenziale idraulico favorendo il processo di SWI.

Innalzando il contenuto di sali sia nelle acque superficiali sia in quelle sotterranee, l'SWI produce un deterioramento qualitativo dell'acqua dolce riducendone drasticamente la disponibilità. L'eccesso di salinità nelle acque può limitarne l'uso in agricoltura a causa dei danni indotti dal sale sui raccolti (Maas e Hoffman, 1977; Zaccaria et al., 2016) fino alla perdita di fertilità del suolo, ma, più in generale, può minacciare intere comunità costiere che dipendono da fonti di approvvigionamento locali per il loro sostentamento idrico (He e MacGregor, 2011), con ripercussioni non solo sul tessuto economico ma anche sulla salute umana. In particolare, in aree deltizie l'SWI può anche avere un impatto negativo sulle attività di acquacoltura e sui servizi ecosistemici, con effetti sulla vegetazione e sulle specie di acqua dolce (Hou et al., 2022).

Il monitoraggio dell'intrusione salina è di grande importanza per la gestione ordinaria della risorsa e la pianificazione di interventi mirati alla sua protezione, recupero e conservazione, in una cornice di particolare vulnerabilità, data la combinazione di pressioni naturali e antropiche che subisce. La scarsità di dati rappresenta spesso una sfida per il monitoraggio della SWI e la gestione sostenibile delle risorse idriche costiere. In particolare, la rete di monitoraggio deve essere progettata e realizzata in modo ottimizzato con riferimento alla disposizione dei punti di misura e campionamento per rappresentare efficacemente nello spazio e nel tempo l'evoluzione del fenomeno.

Il monitoraggio dell'estensione e persistenza del cuneo salino nelle acque superficiali richiede la raccolta, ripetuta, di profili di salinità lungo l'asta fluviale. In Ita-

lia, tali misure sono solitamente eseguite periodicamente o in occasione di eventi siccitosi significativi da enti territoriali quali consorzi di bonifica, autorità di distretto e agenzie regionali. L'effetto di forzanti ad alta frequenza temporale (ad esempio la marea) sull'intrusione salina richiederebbe l'utilizzo di misure di salinità in continuo e con stazioni multiple lungo l'asta fluviale, condizioni che solitamente sono disponibili solo nei corsi principali (ad esempio, Delta del Po). Tutto questo fa sì che se risulta possibile identificare l'occorrenza della SWI non sempre è possibile caratterizzarne l'estensione e la persistenza.

Le acque sotterranee rappresentano la più importante riserva di acqua dolce del pianeta e in ambiente mediterraneo spesso rappresentano l'unica fonte di approvvigionamento laddove i corsi d'acqua superficiali sono mancanti o caratterizzati

da regimi temporanei o effimeri (Alfarrah e Walraevens, 2018). Il monitoraggio delle acque sotterranee, mirato alla conoscenza del loro stato di salinizzazione, richiede strumenti e tecniche differenti da quelle generalmente utilizzate nel monitoraggio ordinario (di sorveglianza e operativo) delle risorse idriche sotterranee al fine della valutazione dello stato ambientale della risorsa (direttive europee 2000/60/CE e 2006/118/CE recepite nell'ordinamento nazionale italiano tramite il D.Lgs. 152/2006 ed il D.Lgs. 30/2009).

Considerata la particolarità del fenomeno intrusivo, che fondamentalmente è governato dalla crescente densità dell'acqua con la profondità, ogni singolo punto di monitoraggio deve essere realizzato fino a profondità sufficienti (nell'ordine di alcune centinaia di metri) a garantire l'attestarsi nelle acque marine di invasione continentale. L'allestimento dei pozzi deve essere accuratamente progettato e realizzato al fine di evitare contaminazioni dirette della colonna d'acqua dall'esterno e garantire il deflusso naturale attraverso la parte saturata. Dal punto di vista delle misure è necessario prevedere frequenti (almeno stagionali) misure dei profili termo-salini lungo la colonna idrica, generalmente realizzati con sonde multi-parametriche, al fine di individuare dinamiche della zona di transizione dovute ad eventuali cambiamenti delle condizioni al contorno (Melloul e Goldenberg, 1997). Ad integrazione dei profili termo-salini, è necessario effettuare campionamenti di porzioni di acqua a diverse profondità per analizzare le sue principali caratteristiche fisico-chimiche in laboratorio (Telahigue et al., 2020).

Affinché le procedure di campionamento non inficino le fasi successive di analisi dei campioni, queste devono essere effettuate in modo statico, quindi utilizzando campionatori di profondità (es.: bottiglia Nansen o Niskin, Hydrasleeve) dotati di appositi si-

stemi di apertura e chiusura tali da garantire il prelievo unicamente alla profondità desiderata. L'uso del campionatore dovrebbe essere affidato a personale esperto capace di evitare il disturbo della colonna d'acqua nelle fasi di discesa e recupero dello stesso. Un importante approfondimento conoscitivo sul contenuto salino dei campioni d'acqua raccolti consiste nel misurare, in laboratorio, i rapporti isotopici della molecola dell'acqua e di alcuni elementi chimici utilizzabili come indicatori di origine delle sorgenti di salinizzazione (Argamasilla et al., 2017; Boumaiza et al., 2020; Butteri et al., 2010; Doveri et al., 2009; Nisi et al., 2022). Tra questi, sono menzionati in letteratura gli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno, oltre che quelli del boro, dello stronzio, del cloro e del litio.

Di grande ausilio nella valutazione dell'estensione e della persistenza della SWI nelle acque sotterranee sono le indagini geofisiche del sottosuolo in aree costiere basate su metodi elettromagnetici, e più spesso su metodi geoelettrici nei quali la misura della resistività elettrica è utilizzata come indicatore della salinità delle acque sotterranee. La resistività elettrica viene comunemente mappata in applicazioni bidimensionali o tridimensionali, in modalità *time-lapse*, utilizzando comunemente elettrodi installati sul terreno (Costal et al., 2018; Tarallo et al., 2023) o interrati in trincee poco profonde (Ogilvy et al., 2009). In applicazioni meno convenzionali, i dispositivi elettrodi possono essere trascinati da piccole imbarcazioni lungo aste fluviali o laghi costieri (Kiflai et al., 2022). Lavori recenti si sono occupati inoltre dello sviluppo di sistemi di monitoraggio geoelettrico con elettrodi in uno o più pozzi, anche accoppiati a elettrodi installati in superficie (Palacios et al., 2020; Rizzo e Giampaolo, 2022). Questo approccio fornisce immagini del sottosuolo con una risoluzione maggiore rispetto ai metodi geofisici basati su

Figura 9.1
Po di Goro, Delta del Po.



misure solo dalla superficie in quanto gli elettrodi sono installati direttamente nel sottosuolo con la possibilità di coprire l'intera zona di transizione tra acqua dolce e acqua salata.

I dati telerilevati possono rappresentare un modo economicamente vantaggioso per raccogliere informazioni sia sulle acque superficiali che sotterranee, coprendo una vasta area in un breve periodo. Ad esempio, i metodi geofisici elettromagnetici aerotrasportati sono particolarmente utili per rilevare la salinità delle acque sotterranee che influisce sulla conduttività delle acque sotterranee (Delsman et al., 2018). Indagini geofisiche elettromagnetiche possono essere inoltre condotte lungo le aste fluviali utilizzando sistemi trasportati da piccole imbarcazioni al fine di valutare l'estensione del cuneo salino nell'entroterra (Barrett et al., 2005). Tali sistemi possono essere inoltre utilizzati anche per analizzare i cambiamenti spaziali e temporali della salinità delle acque superficiali e sotterranee in laghi costieri poco profondi (Kiflai et al., 2022).

L'utilizzo dei metodi geofisici deve essere valutato con attenzione in base agli obiettivi, preferibilmente sulla base di una combinazione di esperienza e conoscenza preliminare del sottosuolo. In generale, tutte le tecniche geofisiche qui descritte rappresentano un metodo rapido ed economico con cui mappare e monitorare il fenomeno dell'intrusione salina a diverse scale spaziali e temporali. A seconda del metodo geofisico utilizzato la risoluzione spaziale va da pochi decimetri ad alcune centinaia di metri mentre quella temporale varia da poche ore a stagionale. Il monitoraggio geofisico viene generalmente affiancato al monitoraggio tradizionale con il vantaggio di fornire informazioni spaziali più estese rispetto al limitato numero di punti di campionamento di acque superficiali e sotterranee. I metodi geofisici sono inoltre in grado di fornire preziose informazioni aggiuntive sul sottosuolo, fino a profondità di alcune centinaia di metri, supportando l'individuazione di quel-

le aree maggiormente vulnerabili al fenomeno dell'intrusione salina a causa di particolari condizioni geolitologiche.

Per convertire i dati di resistività elettrica o conducibilità elettrica in salinità delle acque è necessario utilizzare relazioni empiriche che mettano in relazione la conducibilità elettrica misurata, la salinità e la temperatura dell'acqua, la presenza di particolato solido in sospensione nei corsi d'acqua, le caratteristiche litologiche e idrologiche del sottosuolo. Nello specifico, per convertire i dati elettromagnetici aerei in conducibilità elettrica e, in ultima analisi, salinità delle acque sotterranee, viene effettuata un processo di inversione. King et al. (2018) hanno utilizzato i dati elettromagnetici aerei e terrestri dei Paesi Bassi per quantificare le differenze tra gli algoritmi di inversione 1-D comunemente utilizzati. Dal punto di vista qualitativo, le inversioni sono risultate coerenti; tuttavia, un'analisi quantitativa dei volumi di salinità delle acque sotterranee risultanti in 3-D evidenzia differenze significative sui risultati della mappatura. Su un volume totale di 2.8 miliardi di m³, la stima del volume delle acque dolci sotterranee differisce fino al 6.5%, a seconda del metodo di inversione utilizzato; il principale fattore di controllo dei risultati è stato individuato nel tipo di modello di partenza scelto. Per quanto riguarda i metodi geoelettrici, è stato dimostrato che l'utilizzo di elettrodi posti in superficie può causare la sottostima della conducibilità elettrica dell'acqua e, di conseguenza, della salinità a causa di una minore risoluzione del metodo in profondità (Beaujean et al., 2014; Huizer et al., 2017). Al contrario, il confronto dei dati geoelettrici ottenuti utilizzando elettrodi in pozzo e i profili di salinità ricavati dai log di pozzo è risultata eccellente e convalida la metodologia (Palacios et al., 2020). Si suggerisce pertanto l'uso congiunto di elettrodi di superficie e in pozzo al fine di migliorare la risoluzione in profondità.

Regime pregresso e stato attuale

Su un periodo di 30 anni, dal 1992 al 2021, sono stati pubblicati 179 studi peer-review incentrati sulla salinizzazione delle risorse idriche, sia superficiali sia sotterranee, lungo le coste italiane (Mastrocicco, 2021). L'ultimo decennio ha visto la pubblicazione del 71% degli studi, che hanno affrontato per la prima volta la quantificazione dell'impatto della salinizzazione, la stima delle proiezioni future e la ricerca di possibili soluzioni al problema. Per quanto riguarda la distribuzione geografica degli studi, il 43% è stata condotta nel delta del Po, il 12% in Sicilia e Sardegna, l'11% nell'Alto Tirreno e il 10% nelle Murge-Salento (Puglia). Gli studi che coprono piccole aree (< 10 km²) sono piuttosto comuni (32%) e sono principalmente situati nel delta del Po, in particolare nella regione dell'Emilia-Romagna, dove sono stati individuati punti critici di salinizzazione e dove gli studi sono stati spesso condotti al fine di trovare soluzioni per proteggere o ripristinare siti specifici. Gli studi regionali che si estendono per più di 1000 km² sono solo il 10% e sono quasi interamente situati nella regione delle Murge-Salento, dove la salinizzazione delle risorse idriche sotterranee è un problema urgente (De Filippis et al., 2016). Infine, considerando il tipo di acquifero indagato, l'81% degli studi è stato effettuato su acquiferi porosi e solo il 19% su acquiferi fratturati. Per gli acquiferi porosi, il maggior numero di studi riguarda i principali delta della penisola italiana (47%).

L'estensione dell'intrusione interna delle acque salate lungo i corsi fluviali è controllata dalle forze che agiscono sia nel dominio fluviale che in quello marino: la di-

spersione avvertiva associata al flusso del fiume, la dispersione associata allo scambio estuarino e l'azione delle maree (Lerczak et al., 2006). L'equilibrio tra queste forze è regolato principalmente dall'azione combinata della portata del fiume e delle oscillazioni del livello del mare (Bellafiore et al., 2021). Pertanto, sebbene siano più evidenti in condizioni di siccità (ad esempio, la siccità estesa nel 2022 nella pianura Padana; Bonaldo et al., 2023), i processi che regolano l'intrusione salina non possono essere attribuiti a un solo fattore. Inoltre, questi processi naturali possono agire sia su scale temporali brevi, come fluttuazioni delle maree e mareggiate, sia su scale temporali lunghe, come fluttuazioni inter-annuali, subsidenza e aumento del livello del mare. Il bilancio tra l'azione del fiume e quella del mare, identificato nella posizione del fronte di mescolamento di acqua dolce e salata, è modulato dall'altezza del mare con un progressivo spostamento a monte del fronte all'aumentare del livello medio del mare. Nel fiume Po l'intrusione marina si estende per decine di chilometri dalla foce verso monte con valori massimi di anche 40 km durante la siccità nel 2022. Essendo i processi che determinano la risalita del cuneo salino fortemente influenzati dalla marea, c'è un'alta variabilità dell'estensione massima dell'intrusione salina (diversi chilometri) nell'arco della giornata (Bellafiore et al., 2021). In generale, la variazione dell'intrusione salina nelle acque superficiali non influisce solo sull'estensione dell'area interessata, ma può portare alla predominanza di alcuni processi idrodinamici, come lo spostamento da una dinamica fluviale diffusiva a una dominata da avvezione.

Analogamente nei sistemi idrici sotterranei costieri il fenomeno dell'intrusione marina viene governato dall'equilibrio dinamico tra la colonna d'acqua dolce, che tende naturalmente a defluire verso il mare secondo il campo di moto che ne regola il deflusso, e il sottostante cono di intrusione dell'acqua di mare nel sottosuolo. Nel caso delle acque sotterranee, il fattore determinante che regola l'intrusione marina è quindi l'altezza della colonna d'acqua dolce. Purtroppo, nelle aree costiere, generalmente sovrappopolate, il consumo pro-capite di acqua dolce induce, soprattutto in aree caratterizzate da climi aridi e semiaridi e da corsi d'acqua superficiali effimeri o mancanti, un sovrasfruttamento della risorsa idrica sotterranea con una conseguente riduzione del suo spessore (Passarella et al., 2017; Telahigue et al., 2020). La conseguente alterazione dell'equilibrio tra acqua dolce/acqua di mare facilita l'avanzamento del cuneo salino e il sollevamento dell'acqua salata sotto i pozzi di estrazione (*up-coning*) (Werner et al., 2013). Il fenomeno dell'intrusione salina negli acquiferi costieri caratterizza quasi tutte le falde acquifere costiere del mondo a diversi livelli (Pacheco-Castro et al., 2021) comprese quelle dell'area mediterranea (Rachid et al., 2021) e dell'Italia in particolare, causando il deterioramento della qualità delle acque sotterranee con effetti dannosi sugli ecosistemi connessi e riducendo la disponibilità della risorsa dolce. Ad aggravare la situazione relativa alle acque sotterranee vi è la caratteristica, naturale lentezza con cui queste ultime tornano allo stato iniziale nell'ipotesi che il sovrasfruttamento cessi o venga ridotto a mezzo di interventi tecnici o gestionali di controllo del fenomeno (Kura et al., 2014).

Accanto al sovrasfruttamento, esistono altre cause minori che contribuiscono all'intrusione marina, come, ad esempio, la eventuale riduzione della ricarica naturale dovuta a possibili cambiamenti nei regimi

di precipitazione ed evapotraspirazione (Meixner et al., 2016; Menichini e Doveri, 2020) o a fenomeni di innalzamento del livello del mare (Masciopinto e Liso, 2016) dovuti a cambiamenti climatici.

Negli ultimi decenni sono state adottate numerose misure di prevenzione e adattamento per limitare le inondazioni costiere e l'ingressione delle acque salate lungo i canali fluviali e le falde acquifere in Europa. Gli interventi dell'uomo possono contenere gli effetti della SWI sulle aree colpite sia attraverso un aumento del flusso verso valle dell'acqua dolce (deviazione del fiume, ottimizzazione dei prelievi e delle consegne di acqua dolce) che attraverso azioni che impediscano il trasporto a monte dell'acqua salina. La strategia ingegneristica più adottata per impedire l'intrusione di cunei di sale negli estuari e nei delta è l'installazione di barriere meccaniche, spesso sommerse (cancelli, dighe, argini) vicino alla foce del fiume che bloccano fisicamente il flusso verso monte dell'acqua salina (White e Kaplan, 2017). Tuttavia, le barriere saline vengono regolarmente danneggiate durante le inondazioni e non sono efficaci durante i periodi di siccità estrema, quando lo strato salino occupa la porzione più grande della colonna d'acqua.

Per quanto riguarda le acque sotterranee, le barriere sotterranee (come palancole, trincee di argilla e iniezione di sostanze chimiche) sono considerate uno dei metodi più efficaci per limitare l'intrusione salina (Armanuos et al., 2020). Anche la ricarica in condizioni controllate delle falde acquifere (nota con il nome di Managed Aquifer Recharge - MAR, si veda anche il Capitolo 8) è una metodologia utilizzata per mitigare la salinizzazione delle acque sotterranee nella zona costiera (Dillon et al., 2019; Kloppmann et al., 2012; Masciopinto, 2013). In particolare, si fa qui riferimento alle trincee e pozzi disperdenti che, se realizzati in prossimità della costa, possono creare una vera e propria barriera dinamica all'intrusione salina.

Impatti del cambiamento climatico sull'interazione acque continentali - acque marine

In Europa, diversi sistemi costieri soffrono del progressivo aumento dell'intrusione salina nelle acque superficiali o sotterranee (Zamsky et al., 2024). Questo processo avviene sia in ambienti micro che macro-mareali con diversi valori di salinità del mare. Il cambiamento climatico induce effetti a diversa scala che possono esacerbare l'estensione e la persistenza dell'intrusione salina. I fattori climatici principali sono l'aumento del livello medio relativo del mare e, a scala più locale, di subsidenza indotta dal sovrasfruttamento delle falde idriche sotterranee, così come la progressiva riduzione delle portate nei fiumi e dei livelli idrici nelle falde dovuta a cambiamenti nei regimi di precipitazione ed evapotraspirazione. Ad esempio, lungo la costa atlantica del Portogallo, l'innalzamento del livello medio del mare è identificato come il fattore dominante per l'aumento dell'intrusione di acqua salata, rispetto alla futura riduzione della portata dei fiumi (Pereira et al., 2022). D'altra parte, la quantificazione dell'effetto relativo dell'innalzamento del livello del mare e della riduzione della portata fluviale nei futuri scenari di cambiamento climatico porta a conclusioni opposte in un sistema microtidale mediterraneo, come il delta del fiume Po. In questo sistema, la riduzione della portata del fiume influisce più sul SWI che sull'aumento del livello del mare (Bellafiore et al., 2021). Si prevede che la salinizzazione indotta dall'innalzamento del livello medio del mare e dai

cambiamenti climatici peggiorerà anche in diverse località costiere del Mare del Nord (Bertels e Willems, 2022).

Riguardo agli effetti dell'aumento del livello medio relativo del mare sull'intrusione marina negli acquiferi costieri, Masciopinto e Liso (2016) riportano un interessante studio di previsione a lungo termine del possibile impatto di questo fenomeno sulle portate di deflusso del complesso sistema acquifero di Murgia e Salento, in Puglia. Queste aree costiere sono caratterizzate da un clima semiarido (Mediterraneo) tendente all'arido (Passarella et al. 2020) con tassi medi di precipitazione minori di 600 mm/anno, come gran parte della regione del Mediterraneo (Grecia, Cipro, Libano, Egitto, Tunisia e Spagna). La ricerca riporta che i cambiamenti climatici (ondate di calore, eventi temporaleschi estremi e cambiamenti nei regimi pluviometrici ed evapotraspirativi), previsti per i prossimi decenni (Clini et al., 2007), combinati con lo stress antropico derivante dallo sfruttamento delle risorse naturali renderanno Murgia e Salento una delle aree più vulnerabili d'Europa all'intrusione salina. Rispetto a valori stimati di deflusso idrico sotterraneo verso il mare, riportati in uno studio di Masciale (2010) e pari a 780 Mm³ e 195 Mm³ all'anno, rispettivamente per gli acquiferi di Salento e Murgia, Masciopinto e Liso (2016) prevedono una riduzione totale del deflusso variabile localmente

da 2 a 10 Mm³ all'anno in base a scenari ipotizzati di innalzamento del livello medio relativo del mare.

Anche l'aumento dei flussi di calore all'interfaccia aria-mare (evaporazione) e il conseguente aumento della salinità del mare possono contribuire all'aumento dell'intrusione salina nelle zone costiere. Inoltre, le variazioni di salinità negli ambienti di transizione modificano l'estensione delle aree eu-, poli-, meso- e oligo-aline. In tutti i sistemi deltizi ed estuarini, la valutazione dell'evoluzione dell'intrusione salina e dei suoi forzanti dovrebbe essere effettuata considerando possibili ulteriori modifiche a lungo termine dell'ambiente morfologico, come la subsidenza.

In aggiunta a questi fattori naturali e

spesso agendo in combinazione con essi, diverse attività antropiche possono esacerbare l'intrusione salina riducendo la disponibilità di acqua dolce. Esempi sono i cambiamenti nell'uso del territorio e nel drenaggio dei terreni, nell'irrigazione, la produzione di energia idroelettrica e lo sfruttamento eccessivo delle falde acquifere costiere. Questa situazione sarà ulteriormente aggravata dalla crescente diminuzione della disponibilità di acqua dolce prevista per l'immediato futuro (Eurisipes, 2023) legata ai cambiamenti climatici, all'aumento di eventi inquinanti, al perdurare dello stato di inefficienza delle infrastrutture idriche con alte percentuali di perdita di acqua nelle reti e di utilizzi poco accorti della risorsa.

Strumenti modellistici di analisi e previsionali

I modelli numerici sono stati ampiamente utilizzati per studiare l'intrusione salina nelle acque superficiali di delta ed estuari (Aristizabal e Chant, 2013; Bellafiore et al., 2021; Rodrigues et al., 2019). In generale, i domini numerici di questi modelli si estendono dalla porzione a valle del bacino idrografico, dove viene raccolta naturalmente la maggior parte del flusso fluviale, fino alla regione costiera. Secondo questa definizione, tutti i corpi idrici di un delta o di un estuario all'interno dei rami fluviali e della costa rappresentano un unico continuum fiume-mare. I processi in sistemi così complessi alla transizione terra-mare sono dinamici e interconnessi. È quindi necessario adottare un approccio olistico, che consideri tutte le entità idrologiche, come i rami fluviali, zone umide (laghi costieri, lagune, paludi) e mare costiero come parti integranti nella definizione dell'intero dominio di calcolo. Inoltre, a causa della complessa geometria e morfologia di questi sistemi, i modelli numerici devono essere in grado di rappresentare l'idrodinamica con adeguata risoluzione, sul piano orizzontale, verticale e temporale. Rispetto ai requisiti sopra riportati, i modelli non strutturati realizzano una transizione senza soluzione di continuità tra diverse scale spaziali, dal fiume alla zona costiera, adottando una risoluzione variabile degli elementi della griglia di calcolo (Ferrarin et al., 2019; Shen et al., 2018; Rodrigues et al., 2019).

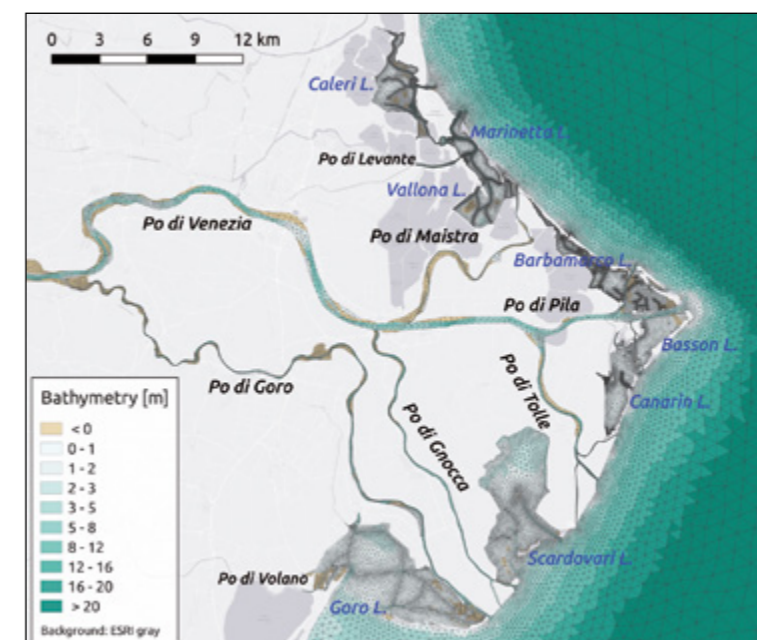
Il modello idrodinamico non strutturato del Delta del Po (Bellafiore et al., 2021; Fig. 9.2) è attualmente in uso presso l'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna (Arpa) per la previsione delle condizioni marine lungo

la costa della regione e dell'intrusione salina nel Delta del Po. I risultati di tale strumento previsionale verranno integrati nella piattaforma DEWS (*Drought Early Warning System*, si veda anche il paragrafo 11.7.3) gestita dall'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po (ADBPo) al fine di supportare la gestione delle risorse idriche e le attività di allertamento in diverse condizioni di regime idrico e meteo-marine.

L'influenza dell'innalzamento del livello del mare sui sistemi idrici sotterranei costieri è stata studiata con strumenti modellistici fin dagli anni '90 (Oude Essink, 1996; Sherif e Singh, 1999). Contributi più recenti riguardano analisi concettuali (globali) basate su confronti analitici di interfacce acqua salina-acqua dolce (Werner e Simmons, 2009), applicazione di modelli 2D (Ketabchi e Jahangir, 2021; Zamrsky et al., 2024) e modelli 3D (Befus et al., 2020).

Figura 9.2

Griglia di calcolo non strutturata del modello idrodinamico del delta del Po rappresentante tutti i rami fluviali, le lagune costiere e parte del mare costiero.



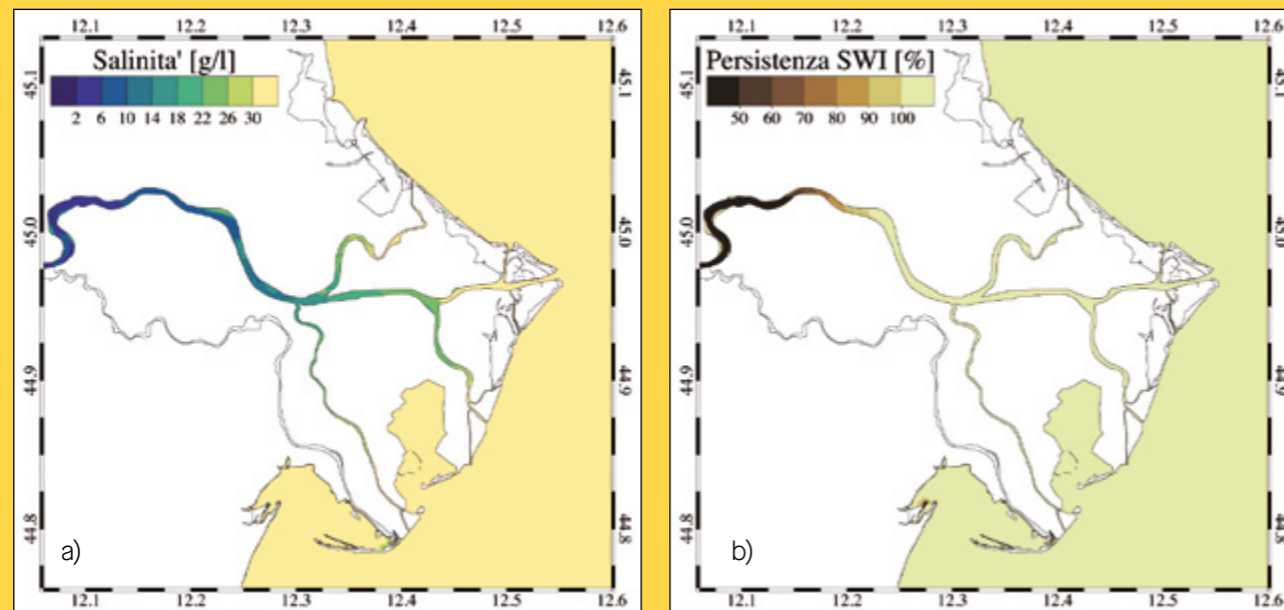
La siccità del 2022-2023 nel bacino del fiume Po. Intrusione salina nel Delta

La grave siccità che ha colpito vaste aree dell'Europa nella primavera e nell'estate 2022 ha determinato una profonda crisi idrica nel bacino del fiume Po con conseguenti portate di deflusso alla sezione di chiusura di Pontelagoscuro inferiori a $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Tali portate sono molto al di sotto del valore di $450 \text{ m}^3/\text{s}$, considerato come il valore di portata minima per contrastare la risalita del cuneo salino. Questa situazione ha favorito l'ingresso di acqua marina nel delta con valori record di intrusione salina (determinata da valori di salinità superiori a 2 g/l , che corrisponde al limite per l'irrigazione della concentrazione massima di sali) nelle acque super-

ficiali e sotterranee. I risultati del sistema modellistico TIRESIAS (Ferrarin et al., 2019) per il mese di luglio 2022 riportano valori di salinità sopra soglia fino a distanze superiori a 40 km dal mare lungo il ramo principale del Po di Pila (Fig. 9.3a). Di significativo interesse e impatto è stata anche l'elevata persistenza (definita come % di tempo nel mese di luglio 2022) della presenza di acque salate nei rami del delta (Fig. 9.3b). Le conseguenze sono state drammatiche per la produzione agricola e si sono manifestate come perdita di vegetazione, deterioramento della fertilità del suolo e desertificazione di ampie porzioni di campi (Tarolli et al., 2023).

Figura 9.3

(a) Salinità massima e (b) persistenza di SWI per il mese di luglio 2022 nei rami principali del Delta del Po.



Nella moderna concezione dei sistemi idrici naturali (superficiale e sotterraneo), questi non sono più visti in modo comparimentato ma come un insieme integrato, le cui dinamiche non devono essere separate nella gestione ordinaria e straordinaria delle risorse. Tuttavia, storicamente, lo studio dell'intrusione marina nei sistemi acquiferi costieri ha comunemente fatto riferimento alle simulazioni numeriche come strumento conoscitivo a supporto della gestione della risorsa idrica sotterranea (Bear, 2012; Bear et al., 2013). Con riferimento specifico alla problematica dell'intrusione marina, tra gli approcci di modellazione disponibili, i modelli di flusso delle acque sotterranee a densità variabile possono essere suddivisi in modelli di interfaccia e modelli dispersivi di trasporto dei soluti. Nei modelli di interfaccia, l'acqua dolce e l'acqua di mare sono separate da un'interfaccia netta (Masciopinto, 2006, Mehdizadeh et al., 2015), mentre nei più complessi modelli di trasporto, dispersione e diffusione (SUTRA, FEFLOW, SEAWAT, MODFLOW), la densità del fluido varia in modo continuo da cella a cella del dominio di simulazione (Bakker et al., 2013; Diersch, 2014; Guo e Langevin, 2002; Voss e Provost, 2002).

La prima tipologia di modello, piuttosto semplice nella concezione teorica e nel calcolo, fa riferimento a modelli concettuali monodimensionali e basati su ipotesi molto semplificate; la seconda tipologia, invece, consente di definire sistemi complessi di simulazione (in genere bidimensionali ma, all'occorrenza anche tridimensionali) rappresentativi di condizioni al contorno, iniziali e di deflusso piuttosto vicine al sistema reale. In quest'ultimo caso, la attuale disponibilità di potenti strumenti di calcolo consente di studiare con grande dettaglio i sistemi idrogeologici. Occorre, tuttavia, sottolineare che modelli 3D di intrusione marina non sono sempre di facile applicazione in quanto la complessità dei processi fisici coinvolti e della geometria del bacino, la

scarsità di dati idrogeologici e l'eterogeneità delle caratteristiche idrogeologiche dei sistemi spesso conducono alla progressiva semplificazione del sistema stesso con un conseguente abbassamento della affidabilità del risultato (Dentoni et al., 2015).

Infine, val la pena di citare l'uso, sempre più frequente, di modelli stocastici (geostatistica) di spazializzazione dei dati di monitoraggio raccolti a diverse profondità, su supporto puntuale, finalizzato alla rappresentazione bi- o tridimensionale delle concentrazioni dei parametri di salinità nelle acque sotterranee. Aspetto positivo di quest'ultimo approccio è che la configurazione spaziale dei campionamenti non richiede di affrontare la complicata problematica della parametrizzazione idrogeologica del sistema simulato. Al contrario, un aspetto negativo di questo approccio risiede nel fatto che, come tutte le tecniche statistiche e stocastiche richiede una mole di informazioni spazio-temporali particolarmente significativa (Panagiotou et al., 2022; Pereira et al., 2024).

Per analisi di maggiore dettaglio, i modelli numerici possono sfruttare la disponibilità di dati geofisici spazialmente e temporalmente densi. Lo scopo principale di questo approccio detto idrogeofisico è quello di estrarre dai dati spazio-temporali derivati geofisicamente le informazioni riguardanti il comportamento idraulico del sistema in termini di geometria e distribuzione spaziale dei parametri di un modello idrologico (Cassiani et al., 2022). Si va dagli approcci più semplici di calibrazione/validazione dei modelli (Masciopinto et al., 2017) a quelli più sofisticati di assimilazione completa dei dati (Bouzaglou et al., 2018). In generale gli approcci più semplici e quelli più sofisticati non sono alternativi l'uno all'altro, ma possono essere utilizzati con successo in sequenza per una stima più efficace dei parametri idraulici e della struttura del sistema.

La descrizione e la comprensione dei processi che regolano le interazioni tra acque continentali e marine necessitano in generale di studi integrati che considerino l'interazione tra le acque sotterranee e quelle superficiali per valutare il trasporto di acque saline tra i diversi corpi idrici. A questo scopo andranno pianificate campagne di misura sinottiche nelle acque sotterranee e quelle superficiali (anche attraverso l'integrazione di dati multi-sensore e l'utilizzo di algoritmi di Machine Learning su serie temporali) e sviluppati modelli matematici accoppiati catchment-surface-groundwater. Tali strumenti modellistici sono molto importanti per valutare l'impatto di infrastrutture di mitigazione dell'intrusione salina (e.g., barriere antisale lungo l'asta fluviale, barriere sub-superficiali), anche in relazione a scenari di cambiamento climatico che tengano conto dell'effetto combinato dell'evoluzione del bilancio idrologico e dello stato del mare.

Al fine di gestire al meglio la riserva di acqua dolce disponibile e limitare l'intrusione marina aumentando il carico di acque dolci all'interfaccia acque conti-

entali-marine è necessario sviluppare metodi e strumenti per la ricarica artificiale (Managed Aquifer Recharge) dei sistemi idrici sotterranei costieri in diversi contesti climatici e di uso della risorsa. Tra questi si cita anche la necessità di sviluppare sistemi condivisi di riuso dei volumi idrici derivanti dal trattamento di reflui civili o industriali.

Concludendo, per creare un sistema di valutazione e gestione della risorsa idrica che consideri anche il contenuto di sale nelle zone di foce è necessario integrare strumenti osservativi, modellistici e socioeconomici dei comparti atmosferico, idrologico e marino-costiero. Questo framework multidisciplinare si sta sviluppando per il Delta del Po nell'ambito dell'infrastruttura di ricerca europea DANUBIUS - The International Centre for Advanced Studies on River-Sea Systems (<https://www.danubius-ri.eu/>). DANUBIUS supporterà l'avanzamento della ricerca scientifica e lo sviluppo di servizi science-based a favore degli enti e soggetti incaricati della gestione della risorsa idrica e dell'ambiente costiero.

- Alfarrah, N., Walraevens, K., 2018. Groundwater Overexploitation and Seawater Intrusion in Coastal Areas of Arid and Semi-Arid Regions. *Water* 10, 143. <https://doi.org/10.3390/w10020143>
- Argamasilla, M., Barberá, J.A., Andreo, B., 2017. Factors controlling groundwater salinization and hydrogeochemical processes in coastal aquifers from southern Spain. *Sci. Total Environ.* 580, 50–68. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.173>
- Aristizábal, M., Chant, R., 2013. A Numerical Study of Salt Fluxes in Delaware Bay Estuary. *J. Phys. Oceanogr.* 43, 1572–1588. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0124.1>
- Armanuos, A.M., Al-Ansari, N., Yaseen, Z.M., 2020. Underground Barrier Wall Evaluation for Controlling Saltwater Intrusion in Sloping Unconfined Coastal Aquifers. *Water* 12, 2403. <https://doi.org/10.3390/w12092403>
- Bakker, M., Schaars, F., Hughes, J.D., Langevin, C.D., Dausman, A.M., 2013. Documentation of the seawater intrusion (SWI2) package for MODFLOW (No. 6-A46). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm6A46>
- Barrett, B., Heinson, G., Hatch, M., Telfer, A., 2005. River sediment salt-load detection using a water-borne transient electromagnetic system. *J. Appl. Geophys.* 58, 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.03.002>
- Bear, J., 2012. *Hydraulics of Groundwater*. Courier Corporation.
- Bear, J., Cheng, A., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I., 2013. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods and Practices*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-2969-7>
- Beaujean, J., Nguyen, F., Kemna, A., Antonsson, A., Engesgaard, P., 2014. Calibration of seawater intrusion models: Inverse parameter estimation using surface electrical resistivity tomography and borehole data. *Water Resour. Res.* 50, 6828–6849. <https://doi.org/10.1002/2013WR014020>
- Befus, K.M., Barnard, P.L., Hoover, D.J., Finzi Hart, J.A., Voss, C.I., 2020. Increasing threat of coastal groundwater hazards from sea-level rise in California. *Nat. Clim. Chang.* 10, 946952. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0874-1>
- Bellafiore, D., Ferrarin, C., Maicu, F., Manfredi, G., Lorenzetti, G., Umgiesser, G., Zaggia, L., Levinson, A.V., 2021. Saltwater intrusion in a Mediterranean delta under a changing climate. *J. Geophys. Res.: Oceans* 126. <https://doi.org/10.1029/2020JC016437>
- Bertels, D., Willems, P., 2022. Climate change impact on salinization of drinking water inlets along the Campine Canals, Belgium. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 42, 101129. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101129>
- Bonaldo, D., Bellafiore, D., Ferrarin, C., Ferreretti, R., Ricchi, A., Sangelantoni, L., Vitellotti, M.L., 2023. The summer 2022 drought: a taste of future climate for the Po valley (Italy)? *Regional Environ. Change* 23, 1. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-02004-z>
- Boumaiza, L., Chesnaux, R., Drias, T., Walter, J., Huneau, F., Garel, E., Knoeller, K., Stummpp, C., 2020. Identifying groundwater degradation sources in a Mediterranean coastal area experiencing significant multi-origin stresses. *Sci. Total Environ.* 746, 141203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141203>
- Bouzaglou, V., Crestani, E., Salandin, P., Gloaguen, E., Camporese, M., 2018. Ensemble Kalman Filter Assimilation of ERT Data for Numerical Modeling of Seawater Intrusion in a Laboratory Experiment. *Water* 10, 397. <https://doi.org/10.3390/w10040397>
- Butteri, M., Doveri, M., Giannecchini, R., Gattai, P., 2010. Hydrogeologic-hydrogeochemical multidisciplinary study of the confined gravelly aquifer in the coastal Pisan Plain between the Arno River and Scolmatore Canal (Tuscany). In *ISPR: Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, 2010. Proceedings of the Second National Workshop Multidisciplinary approach for porous aquifer characterization, 90, pp. 51-66.
- Cassiani, G., Censini, M., Barone, I., Perri, M.T., Boaga, J., Deiana, R., 2022. Hydrogeophysical Methods for Water Resources Protection and Management. In: Di Mauro, A., Scozzari, A., Soldovieri, F. (eds) *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*. Springer Water. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_22
- Clini, C., Contaldi, M., Perrella, G., Angeloni, M., Caminiti, N. M., 2007. Fourth national communication under the UN framework convention on climate change.
- Costall, A., Harris, B. Pigois, J.P. 2018. Electrical Resistivity Imaging and the Saline Water Interface in High-Quality Coastal Aquifers. *Surv Geophys* 39, 753–816). <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9468-0>
- De Filippis, G., Foglia, L., Giudici, M., Mehl, S., Margiotta, S., Negri, S.L., 2016. Seawater intrusion in karstic, coastal aquifers: Current challenges and future scenarios in the Taranto area (southern Italy). *Sci. Total Environ.* 573, 1340–1351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.005>
- Delsman, J.R., van Baaren, E.S., Siemon, B., Dabekaussen, W., Karaoulis, M.C., Pauw, P.S., Vermaas, T., Bootsma, H., de Louw, P.G.B., Gunnink, J.L., Wim Dubelaar, C., Menkovic, A., Steuer, A., Meyer, U., Revil, A., Oude Essink, G.H., 2018. Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. *Environ. Res. Lett.* 13, 084011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad19e>
- Dentoni, M., Deidda, R., Paniconi, C., Gahman, K., Lecca, G., 2015. A simulation/optimization study to assess seawater intrusion management strategies for the Gaza Strip coastal aquifer (Palestine). *Hydrogeol. J.* 23, 249–264. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1214-1>
- Diersch, H.-J.G. 2014, FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
- 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., Pette-nati, 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., Sapiano, M., 2019. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeol. J.* 27, 1–30. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>
- Doveri, M., Giannecchini, R., Giusti, G., Butteri, M., 2009. Studio idrogeologico-geochemico dell'acquifero freatico nella zona compresa tra il Canale Burlamacca ed il Fosso della Bufalina (Viareggio, Toscana). *Eng. Hydro. Env. Geology (Giornale di Geologia Applicata)*, 12, 101-117.
- Eurispes, 2023. Un sistema che fa acqua: lo stato delle acque in Italia. Report. https://eurispes.eu/wp-content/uploads/2023/09/eurispes-un-sistema-che-fa-acqua_2023.pdf
- Ferrarin, C., Davolio, S., Bellafiore, D., Ghezzi, M., Maicu, F., Mc Kiver, W., Drofa, O., Umgiesser, G., Bajo, M., De Pascalis, F., Malguzzi, P., Zaggia, L., Lorenzetti, G., Manfredi, G., 2019. Cross-scale operational oceanography in the Adriatic Sea. *J. Oper. Oceanogr.* 12, 86–103. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2019.1576275>
- Frollini, E., Parrone, D., Ghergo, S., Masciale, R., Passarella, G., Pennisi, M., Salvadori, M., Preziosi, E., 2022. An Integrated Approach for Investigating the Salinity Evolution in a Mediterranean Coastal Karst Aquifer. *Water* 14, 1725. <https://doi.org/10.3390/w14111725>
- Guo, W., Langevin, C.D., 2002. User's guide to SEAWAT; a computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow. US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/twri06A7>
- He, F.J., MacGregor, G.A., 2011. Salt reduction lowers cardiovascular risk: meta-analysis of outcome trials. *Lancet* 378, 380–382. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61174-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61174-4)
- Hou, Y., Yang, J., Russoniello, C.J., Zheng, T., Wu, M.-L., Yu, X., 2022. Impacts of coastal shrimp ponds on saltwater intrusion and submarine groundwater discharge. *Water Resour. Res.* 58. <https://doi.org/10.1029/2021WR031866>
- Huizer, S., Karaoulis, M.C., Oude Essink, G.H.P., Bierkens, M.F.P., 2017. Monitoring and simulation of salinity changes in response to tide and storm surges in a sandy coastal aquifer system. *Water Resour. Res.* 53, 6487–6509. <https://doi.org/10.1002/2016WR020339>

- Ketabchi, H., Jahangir, M.S., 2021. Influence of aquifer heterogeneity on sea level rise-induced seawater intrusion: A probabilistic approach. *J. Contam. Hydrol.* 236, 103753. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103753>
- Kiflai, M.E., Whitman, D., Price, R.M., Franckovich, T.A., Madden, C.J., 2022. Geophysical Characterization in the Shallow Water Estuarine Lakes of the Southern Everglades, Florida. *NATO Adv. Sci. Inst. Ser. E Appl. Sci.* 12, 1154. <https://doi.org/10.3390/app12031154>
- King, J., Essink, G.O., Karaolis, M., Siemon, B., Bierkens, M.F.P., 2018. Quantifying Geophysical Inversion Uncertainty Using Airborne Frequency Domain Electromagnetic Data - Applied at the Province of Zeeland, the Netherlands. *Water Resour. Res.* 54, 8420–8441. <https://doi.org/10.1029/2018WR023165>
- Kloppmann, W., Aharoni, A., Chikurel, H., Dillon, P., Gaus, I., Guttman, J., Kraitzer, T., Kremer, S., Masciopinto, C., Miotlinsky, K., Pavellik, P., Pettenati, M., Picot-Colbeaux, G., 2012. Use of groundwater models for prediction and optimisation of the behaviour of MAR sites, in: Kazner, C., Wintgens, T., Dillon, P. (Eds.) *Water reclamation technologies for safe managed aquifer recharge*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780400648>
- Kura, N.U., Ramli, M.F., Ibrahim, S., Sulaiman, W.N.A., Zaudi, M.A., Aris, A.Z., 2014. A preliminary appraisal of the effect of pumping on seawater intrusion and upconing in a small tropical island using 2D resistivity technique. *Scientific World Journal.* 796425. <https://doi.org/10.1155/2014/796425>
- Lerczak, J.A., Rockwell Geyer, W., Chant, R.J., 2006. Mechanisms Driving the Time-Dependent Salt Flux in a Partially Stratified Estuary. *J. Phys. Oceanogr.* 36, 2296–2311. <https://doi.org/10.1175/JPO2959.1>
- Maas E.V., Hoffman G.J., 1977. Crop Salt Tolerance—Current Assessment. *J. Irr. Drain. Div.* 103, 115–134. <https://doi.org/10.1061/JR-CEA4.0001137>
- Masciale R., 2010. Aggiornamento del Bilancio Idrogeologico dei Corpi Idrici Sotterranei della Regione Puglia. All. 4.5 alla Relazione finale “Caratteristiche della circolazione idrica negli acquiferi carbonatici pugliesi: deflussi a mare e scambi idrici tra idrostrutture confinanti”. Regione Puglia, Convenzione tra l’Autorità di Bacino della Puglia e l’IRSA-CNR.
- Masciopinto, C., 2006. Simulation of coastal groundwater remediation: the case of Nardò fractured aquifer in Southern Italy. *Environ. Model. Softw.* 21, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.028>
- Masciopinto, C., 2013. Management of aquifer recharge in Lebanon by removing seawater intrusion from coastal aquifers. *J. Environ. Manage.* 130, 306–321. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.021>
- Masciopinto, C., Liso, I.S., 2016. Assessment of the impact of sea-level rise due to climate change on coastal groundwater discharge. *Sci. Total Environ.* 569–570, 672–680. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.183>
- Masciopinto, C., Liso, I.S., Caputo, M.C., De Carlo, L., 2017. An Integrated Approach Based on Numerical Modelling and Geophysical Survey to Map Groundwater Salinity in Fractured Coastal Aquifers. *Water* 9, 875. <https://doi.org/10.3390/w9110875>
- Mastrocicco, M., 2021. Studies on water resources salinization along the Italian coast: 30 years of work. *AS-ITJGW* 10, 7–13. <https://doi.org/10.7343/as-2021-537>
- Mehdizadeh, S.S., Vafaie, F., Abolghasemi, H., 2015. Assessment of sharp-interface approach for saltwater intrusion prediction in an unconfined coastal aquifer exposed to pumping. *Environ. Earth Sci.* 73, 8345–8355. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3996-9>
- Meixner, T., Manning, A.H., Stonestrom, D.A., Allen, D.M., Ajami, H., Blasch, K.W., Brookfield, A.E., Castro, C.L., Clark, J.F., Gochis, D.J., Flint, A.L., Neff, K.L., Niraula, R., Rodell, M., Scanlon, B.R., Singha, K., Walvoord, M.A., 2016. Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States. *J. Hydrol.* 534, 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.027>
- Melloul, A.J., Goldenberg, L.C., 1997. Monitoring of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Basics and Local Concerns. *J. Environ. Manage.* 51, 73–86. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0136>
- Menichini, M., Doveri, M., 2020. Modelling tools for quantitative evaluations on the Versilia coastal aquifer system (Tuscany, Italy) in terms of groundwater components and possible effects of climate extreme events. *AS-ITJGW* 9. <https://doi.org/10.7343/as-2020-475>
- Nisi, B., Vaselli, O., Taussi, M., Doveri, M., Menichini, M., Cabassi, J., Raco, B., Botteghi, S., Mussi, M., Masetti, G., 2022. Hydrogeochemical surveys of shallow coastal aquifers: A conceptual model to set-up a monitoring network and increase the resilience of a strategic groundwater system to climate change and anthropogenic pressure. *Appl. Geochem.* 142, 105350. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105350>
- Ogilvy, R.D., Meldrum, P.I., Kuras, O., Wilkinson, P.B., Chambers, J.E., Sen, M., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J., Jorreto, S., Frances, I., Tsourlos, P., 2009. Automated monitoring of coastal aquifers with electrical resistivity tomography. *Near Surf. Geophys.* 7, 367–376. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2009027>
- Oude Essink, G.H., 1996. Impact of Sea Level Rise on Groundwater Flow Regimes: A Sensitivity Analysis for the Netherlands. Delft University Press.
- Pacheco-Castro, R., Salles, P., Canul-Macario, C., Paladio-Hernandez, A., 2021. On the Understanding of the Hydrodynamics and the Causes of Saltwater Intrusion on Lagoon Tidal Springs. *Water* 13, 3431. <https://doi.org/10.3390/w13233431>
- Palacios, A., Ledo, J.J., Linde, N., Luquot, L., Bellmunt, F., Folch, A., Marcuello, A., Queralt, P., Pezard, P.A., Martinez, L., del Val, L., Bosch, D., Carrera, J., 2020. Time-lapse cross-hole electrical resistivity tomography (CHERT) for monitoring seawater intrusion dynamics in a Mediterranean aquifer. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24, 2121–2139. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2121-2020>
- Panagiotou, C.F., Kyriakidis, P., Tziritis, E., 2022. Application of geostatistical methods to groundwater salinization problems: A review. *J. Hydrol.* 615, 128566. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128566>
- Passarella, G., Bruno, D., Lay-Ekuakille, A., Maggi, S., Masciale, R., Zaccaria, D., 2020. Spatial and temporal classification of coastal regions using bioclimatic indices in a Mediterranean environment. *Sci. Total Environ.* 700, 134415. <https://doi.org/10.3390/w13070958>
- Pereira, H., Sousa, M. C., Vieira, L. R., Morgado, F., Dias, J. M., 2022. Modelling Salt Intrusion and Estuarine Plumes under Climate Change Scenarios in Two Transitional Ecosystems from the NW Atlantic Coast. *J. Mar. Sci. Eng.* 10(2), 262. <https://doi.org/10.3390/jmse10020262>
- Pereira, L. J., Varouchakis, E. A., Karatzas, G. P., Azevedo, L., 2024. Uncertainty Quantification in Geostatistical Modelling of Saltwater Intrusion at a Coastal Aquifer System. *Math. Geosci.* 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11004-023-10120-7>
- Rachid, G., Alameddine, I., El-Fadel, M., 2021. SWOT risk analysis towards sustainable aquifer management along the Eastern Mediterranean. *J. Environ. Manage.* 279, 111760. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111760>
- Rizzo, E., Giampaolo, V., 2022. Direct Current Electrical Methods for Hydrogeological Purposes, in: Di Mauro, A., Scozzari, A., Soldovieri, F. (Eds.), *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 387–416. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_16
- Rodrigues, M., Fortunato, A.B., Freire, P., 2019. Saltwater Intrusion in the Upper Tagus Estuary during Droughts. *Geosci. J.* 9, 400. <https://doi.org/10.3390/geosciences9090400>
- Shen, Y., Jia, H., Li, C., Tang, J., 2018. Numerical simulation of saltwater intrusion and storm surge effects of reclamation in Pearl River Estuary, China. *Appl. Ocean Res.* 79, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.07.013>
- Sherif, M. M., Singh, V. P., 1999. Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers. *Hydrol. Process.* 13(8), 1277–1287. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990615\)13:8<1277::AID-HYP765>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990615)13:8<1277::AID-HYP765>3.0.CO;2-W)
- Tarallo, D., Alberico, I., Cavuoto, G., Pelosi, N., Punzo, M., Di Fiore, V., 2023. Geophysical assessment of seawater intrusion: the Volturino Coastal Plain case study. *Appl. Water Sci.* 13, 234. <https://doi.org/10.2478/s11600-014-0220-y>

Tarolli, P., Luo, J., Straffelini, E., Liou, Y.-A., Nguyen, K.-A., Laurenti, R., Masin, R., D'Agostino, V., 2023. Saltwater intrusion and climate change impact on coastal agriculture. *PLOS Water* 2, e0000121. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000121>

Telahigue, F., Mejri, H., Mansouri, B., Souid, F., Agoubi, B., Chahlaoui, A., Kharroubi, A., 2020. Assessing seawater intrusion in arid and semi-arid Mediterranean coastal aquifers using geochemical approaches. *Phys. Chem. Earth. Parts A/B/C* 115, 102811. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.102811>

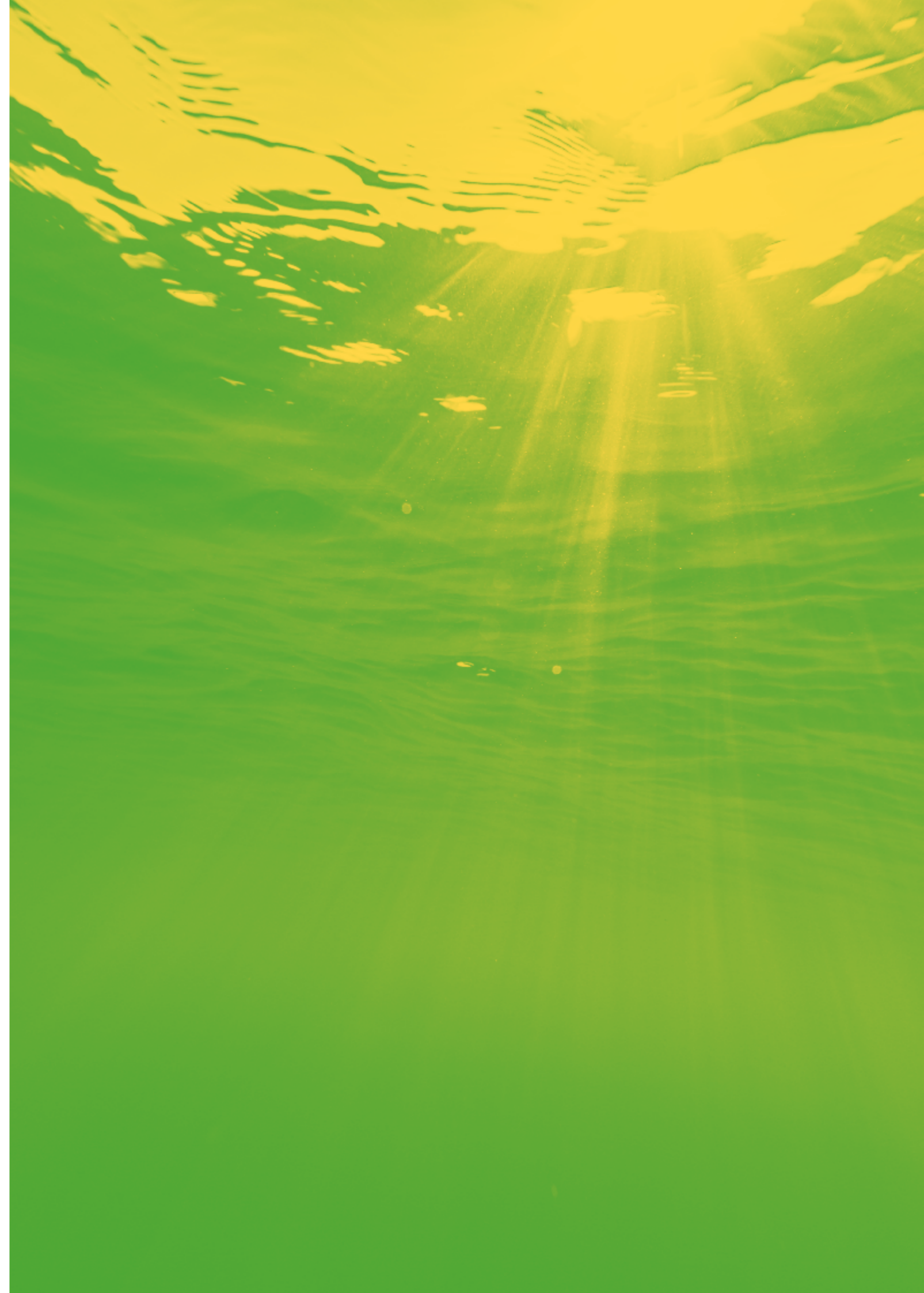
Voss, C.I., Provost, A.M., 2002. SUTRA: A model for 2D or 3D saturated-unsaturated, variable-density ground-water flow with solute or energy transport. US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wri024231>

Werner, A.D., Simmons, C.T., 2009. Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Ground Water* 47, 197–204. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x>

White, E., Kaplan, D., 2017. Restore or retreat? saltwater intrusion and water management in coastal wetlands. *Ecosyst. Health Sustain.* 3, e01258. <https://doi.org/10.1002/ehs2.1258>

Zaccaria, D., Passarella, G., D'Agostino, D., Giordano, R., Solis, S.S., 2016. Risk assessment of aquifer salinization in a large-scale coastal irrigation scheme, Italy. *Clean* 44, 371–382. <https://doi.org/10.1002/clen.201400396>

Zamrsky, D., Oude Essink, G.H.P., Bierkens, M.F.P., 2024. Global impact of sea level rise on coastal fresh groundwater resources. *Earths Future* 12. <https://doi.org/10.1029/2023EF003581>



How to cite

Ferrarin, C., Bellafiore, D., Giampaolo, V., Masciale, R., Passarella, G. 2024. "Interazione acque continentali - acque marine", in *Siccità, scarsità e crisi idriche*, Emanuele Romano, Ivan Portoghese (a cura di), Habitat signa 1, 327-346 Roma: Cnr Edizioni. <https://doi.org/10.69115/habitatsigna-2024-1/09>

Emanuele Romano è ricercatore presso l'Istituto di ricerca sulle acque del CNR. Laureato in Fisica presso l'Università degli studi di Milano, ha conseguito il Dottorato di ricerca in Scienze della terra, svolgendo parte dell'attività presso l'École des Mines di Parigi. Autore di più di cinquanta pubblicazioni scientifiche, negli ultimi anni ha focalizzato le proprie ricerche sulla valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche e sui sistemi di approvvigionamento, con particolare riferimento agli eventi siccitosi. Membro della Commissione grandi rischi del Dipartimento della protezione civile, settore "Rischio da incendi boschivi e da deficit idrico" dal 2023, collabora con numerosi enti pubblici (Ministero dell'ambiente, ISPRA, Istat, Autorità di distretto) e gestori del servizio idrico integrato.

Ivan Portoghese è ricercatore presso l'Istituto di ricerca sulle acque del CNR. Laureato in Ingegneria civile presso il Politecnico di Bari, ha conseguito un Dottorato di ricerca in Idrologia sviluppando modelli matematici per la caratterizzazione dei bacini idrografici soggetti a forte variabilità climatica stagionale e inter-annuale. Negli ultimi anni si è occupato dello sviluppo e validazione di metodi e strumenti per la pianificazione e la gestione delle risorse idriche pubblicando numerosi articoli scientifici su varie riviste internazionali. È inoltre coinvolto nello sviluppo di studi e di politiche per la gestione sostenibile delle risorse idriche a supporto di istituzioni ed enti operanti nel settore.

Sempre più spesso i mezzi di comunicazione riportano eventi di siccità sul territorio italiano con impatti drammatici sulla popolazione e sugli ecosistemi.

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Forum scientifico intergovernativo sul cambiamento climatico istituito presso le Nazioni Unite, da tempo segnala l'intensificarsi di tali fenomeni nell'area mediterranea a seguito del cambiamento climatico.

Che fare? E quale può essere il ruolo della comunità scientifica a supporto di una *governance* dell'acqua? Il presente volume, redatto dal Gruppo di lavoro "Siccità, scarsità e crisi idriche" del Dipartimento di scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente del CNR, con il supporto di altre Istituzioni (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, Dipartimento della protezione civile, Struttura commissariale per l'adozione di interventi urgenti connessi al fenomeno della scarsità idrica), ha visto il coinvolgimento di quasi cento ricercatrici e ricercatori che hanno tentato di dare risposta a tali quesiti fornendo elementi tecnico-scientifici a supporto di tutti i soggetti che, con diversi ruoli, contribuiscono alla *governance* dell'acqua.

