

6. - INTRUSIONE MARINA NEL MONDO E L'IMPORTANZA DEI *SALT-WATER INTRUSION MEETING* (SWIM)

L'intrusione marina nel continente è largamente presente nel mondo, come vedremo in questo capitolo con riferimento alle esperienze condotte da studiosi e specialisti in materia. Molte sono, infatti, le zone abitate disposte in prossimità della costa dove si attinge a risorse idriche sotterranee interessate al fenomeno dell'intrusione marina. In simili contesti l'acqua di mare occupa volumi di acquifero sempre maggiori, determinando un significativo peggioramento della qualità delle acque di falda, in ragione di un sempre crescente fabbisogno idrico soddisfatto estraendo acque sotterranee (SCHEIDLER *et alii*, 2004). La possibilità di preservare le risorse idriche sotterranee contenute negli acquiferi costieri è, dunque, strettamente legata all'adozione di opportune azioni di protezione, pena il loro totale esaurimento (TULIPANO, 2005), con effetti catastrofici nel lungo periodo, peggiorati dal continuo incremento della popolazione mondiale e dell'aspettativa di vita, nonché dai cambiamenti climatici in atto (ABD-ELHAMID & JAVADI, 2008).

Per riaffermare il peso della ricerca scientifica nella soluzione di una problematica di così grande complessità e importanza, il capitolo si apre con un'introduzione ai "*Salt-Water Intrusion Meeting*" (SWIM) e al contributo da questi offerto all'analisi e alla soluzione delle problematiche inerenti la gestione di risorse idriche sotterranee interessate dal fenomeno dell'intrusione marina. Auspichiamo che questi incontri possano continuare a rappresentare un punto di riferimento e un'occasione di confronto a livello internazionale per gli studiosi e gli operatori del settore.

In seguito passeremo all'analisi delle tecniche generalmente adottate, con più o meno successo, per la difesa dal fenomeno dell'intrusione marina, per concludere con l'analisi di alcuni significativi casi studio regionali di acquiferi costieri, interessati dall'intrusione di acque marine, e caratterizzati dal peggioramento qualitativo delle acque di falda per sovrasfruttamento.

6.1. - *SALT-WATER INTRUSION MEETING* (SWIM)

I SWIM hanno avuto origine nel lontano 1968 per merito del professor W. Richter, che invitò nel proprio Istituto di Hannover alcuni colleghi tedeschi, olandesi e danesi, per discutere, nell'ambito di incontri informali, di intrusione marina negli acquiferi costieri, viste le similitudini che il fenomeno presentava nei tre Stati in questione (WWW.SWIM-SITE.ORG, SWIM 1, 1968 HANNOVER, GERMANIA). L'interesse suscitato dall'incontro indusse ad organizzarne altri, tenutisi inizialmente in paesi che si affacciano sul Mare del Nord (SWIM 2, 1970 VOGELENZANG - PAESI BASSI; SWIM 3, 1972 COPENHAGEN - DANIMARCA; SWIM 4, 1974 GHENT - BELGIO; SWIM 5, 1977 MEDMENHAM - REGNO UNITO; SWIM 6, 1979 HANNOVER - GERMANIA). E qui non possono non essere ricordati alcuni eminenti studiosi che organizzarono quegli incontri e contribuirono agli sviluppi futuri, come il già citato W. Richter, J.C. Van Dam (fig. 6.1), e W. De Breuck. Nel corso del SWIM 4, tenutosi a Ghent nel 1974, gli incontri inizialmente definiti "*Expert-Meeting on Salinization of Groundwater in Coastal Regions*", vengono denominati SWIM, acronimo di "*Salt-Water Intrusion Meeting*".

I SWIM hanno sempre avuto cadenza grosso-modo biennale, anche in altri paesi europei, e hanno registrato un sempre crescente numero di partecipanti, provenienti dal mondo scientifico e da quello degli operatori nel settore della gestione delle risorse idriche sotterranee. I successivi *meeting* sono stati organizzati anche in Svezia (SWIM 7, 1981, UPSALA - SVEZIA) e in Italia (SWIM 8, 1983 BARI - ITALIA). Dopo un breve ritorno nel Mare del Nord (SWIM 9, 1986 DELFT - PAESI BASSI; SWIM 10, 1988 GHENT - BELGIO) i SWIM si sono tenuti in vari paesi europei (SWIM 11, 1990 DANZICA - POLONIA; SWIM 12, 1992 BARCELLONA - SPAGNA; SWIM 13, 1994 CAGLIARI - ITALIA; SWIM 14, 1996 MALMÖ - SVEZIA; SWIM 15, 1998 GHENT - BELGIO; SWIM 16, 2000 MIEDZIEZDROJE - POLONIA; SWIM 17, 2002 DELFT - PAESI BASSI; SWIM 18, 2004 CARTAGENA - SPAGNA).

Nel corso del *meeting* del 2004 a Cartagena, venne riconosciuta l'unità d'intenti tra SWIM e SWICA (*Salt-Water Intrusion in Coastal Aquifers*), e si



Fig. 6.1 - Il Professore J.C. van Dam illustre cattedratico della scuola idraulica di Delft in Olanda e studioso impegnato costantemente sotto il profilo scientifico nell'esteso argomento riguardante la intrusione marina nel continente (da COTECCHIA, 1983).

- Professor J. C. van Dam, celebrated scholar of the hydraulic engineering school at Delft, Netherlands, well-known for his long-lasting work on the topic of seawater intrusion (from COTECCHIA, 1983).

arrivò ad organizzare la prima Conferenza Internazionale SWIM-SWICA, tenutasi nel 2006 a Cagliari (1ST SWIM-SWICA, 2006, CAGLIARI - ITALIA). In questo primo *meeting* congiunto (corrispondente al diciannovesimo SWIM e al terzo SWICA) si decise di fondere i due gruppi e conservare il nome "SWIM". Intanto il numero dei partecipanti ai SWIM provenienti da paesi del mondo extra-europei (principalmente Nord America, Sud America, Nord Africa, Vicino e Medio Oriente, Asia e Australia) aumentava notevolmente, tanto da fare organizzare il primo SWIM negli USA (SWIM 20, 2008 NAPLES - FLORIDA), cui ha fatto seguito la ventunesima edizione tenutasi in Portogallo (SWIM 21, 2010 S. MIGUEL, AZORES - PORTUGAL) e la ventiduesima tenutasi di nuovo oltreoceano (SWIM 22, 2012 Rio De Janeiro, Brazil).

Gli argomenti discussi nei SWIM sono vari, e coinvolgono tutte le discipline implicate nello studio dell'intrusione marina. Si possono individuare, in linea generale, 6 categorie di argomenti in cui classificare i contributi scientifici, anche se la suddivisione non è sempre felice e definita, vista l'interdisciplinarietà delle materie trattate:

Descrizione generale del problema e indagini. Nei primi SWIM la descrizione generale del problema dell'intrusione marina partiva dall'analisi degli specifici contesti geologici ed idrogeologici dei paesi che si affacciano sul Mar del Nord e portava, tra l'altro, ad interessanti ipotesi sulla sua evoluzione nel Quaternario recente e sotto l'effetto antropico. Contributi scientifici di questo genere continuano ad essere presentati nell'ambito dei SWIM e sono incentrati generalmente sull'illustrazione del problema in alcune aree significative, sulla base dei dati disponibili.

Casi di studio regionali. Molti sono i casi di studio regionali analizzati, con diverso grado di approfondimento, durante i vari SWIM: in particolare ci si è soffermati tanto sulla descrizione geologica ed idrogeologica dei vari siti, quanto sull'analisi delle acque e sulla modellazione matematica del fenomeno. Ad Hannover, infatti, nel 1979, per la prima volta vengono presentati in campo internazionale i risultati degli studi condotti sull'intrusione marina in Puglia (COTECCHIA, 1979). Spesso i casi di studio regionali s'incentrano sull'analisi delle condizioni di efflusso delle acque di falda a mare, specie dagli acquiferi permeabili per fratturazione e carsismo, ove l'efflusso avviene in molti casi in corrispondenza di importanti sorgenti.

Modellazione matematica. Le comunicazioni in materia di calcolo numerico e modellazione sono sempre state presenti nei SWIM, sia come contributi prettamente teorici riferiti all'analisi quantitativa del fenomeno dell'intrusione marina, sia in forma di analisi di casi di studio reali. Gli argomenti trattati vanno, infatti, dallo studio del *salt-water upconing*, all'analisi dell'intrusione marina su scala regionale, con particolare riguardo agli effetti determinati tanto dalle attività antropiche, rivolte allo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee, quanto dalla previsione degli effetti determinati da interventi antropici di protezione. Le prime solu-

zioni analitiche e numeriche relative ai problemi di intrusione marina vengono approntate sotto l'ipotesi dell'esistenza di un'interfaccia netta, mentre a partire grossomodo dagli anni '80, sono andati sviluppandosi, anche grazie all'avvento del calcolatore elettronico, modelli di calcolo numerico legati alla teoria della dispersione idrodinamica.

Metodi e tecniche di indagine. Lo sviluppo di metodi e tecniche di indagine idonei all'analisi dell'intrusione marina e della sua evoluzione nello spazio e nel tempo hanno sempre rivestito grande importanza nei SWIM. Vari sono i contributi offerti, anche da parte di ricercatori pugliesi, per la descrizione di tecniche di indagine che vanno dall'adozione di prospezioni geoelettriche su grande scala, all'esecuzione di log multiparametrici, alla misura in continuo della conducibilità elettrica delle acque di falda, sino all'uso del metodo elettromagnetico per la mappatura dell'intrusione marina su grande scala.

- *Idro-geo-chimica.* L'analisi delle caratteristiche chimiche ed isotopiche delle acque di falda ha trovato grande spazio nei SWIM, vista la possibilità di trarne informazioni dettagliate sul livello di contaminazione salina raggiunto dalle acque e sui tempi di residenza delle acque di falda e marine. Un'analisi, insomma, che rappresenta un importante strumento informativo indiretto sul moto che caratterizza la circolazione idrica sotterranea nelle condizioni in argomento.

- *Tecniche di difesa.* Le tecniche di difesa trattate nei SWIM sono svariate e spaziano dalla soluzione di problemi su piccola scala, come il *salt-water upconing*, alla difesa dall'intrusione marina su grande scala. Una disamina delle tecniche di difesa più interessanti è proposta nel par. 6.2;

- *Management.* È un argomento molto importante, trattato in tutti i SWIM, e che ne rappresenta la finalità ultima, ovvero la gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee interessate dal fenomeno dell'intrusione marina.

- *Cambiamenti climatici e risalita del livello mare.* Grande importanza viene attribuita, oggi, ai cambiamenti climatici e alle conseguenti variazioni del livello mare. L'argomento è di notevole interesse anche rispetto all'intrusione marina, date le variazioni del regime delle acque sotterranee conseguenti alle variazioni del livello mare. Vari sono i

contributi presenti nei SWIM sulla quantificazione dei possibili effetti che tali variazioni possono determinare sull'equilibrio acqua dolce-acqua di mare. Viste le incertezze geo-idrologiche e climatiche associate a simili fenomenologie, le analisi, in questo caso, sono da ritenersi in gran parte unicamente orientative.

L'ultimo SWIM, tenutosi nel 2012 in Brasile, ha annoverato 103 contributi scientifici sulle discipline in genere periodicamente trattate nei SWIM. I partecipanti a detto SWIM, ben numerosi e addentro agli approfondimenti che gli SWIM biennialmente forniscono, hanno trattato in particolare problematiche inerenti la ricerca idrogeologica e il management delle acque sotterranee interessate dall'intrusione marina, dimostrandone l'attualità. Particolare attenzione è posta alla modellazione matematica dei fenomeni conseguenti all'intrusione marina che determina la presenza negli acquiferi di liquidi a densità variabile sovrapposti. Essa è idonea ad interpretare i dati provenienti dal monitoraggio idrogeologico ed a fornire gli elementi di base per progettare correttamente le azioni da adottare per invertire la rotta del degrado qualitativo e quantitativo della risorsa idrica sotterranea. L'argomento è spesso illuminato da illustrazioni di casi di studio regionali, cui purtroppo non sempre è possibile acquisire conoscenze adeguate dai *proceedings* dei SWIM, stante la brevità dei contributi, che negli ultimi anni sono spesso rappresentati dai soli *abstract*.

Molti sono i contributi pervenuti all'ultimo SWIM riguardanti la calibrazione e validazione dei modelli numerici eseguita sulla base delle conoscenze idrauliche degli acquiferi, in genere acquisite con indagini idrogeologiche eseguite *ad hoc*, e registrazioni storiche riguardanti l'impiego delle acque sotterranee (CALJÉ *et alii*, 2012), fornendo elementi utili per gestire, anche in tempo reale, gli acquiferi costieri interessati dall'intrusione di acqua di mare (PEZARD *et alii*, 2012). In Florida, ad esempio, i modelli numerici contribuiscono a studiare l'impatto che i cambiamenti climatici e le variazioni di portata estratte dai pozzi in uso per scopi potabili determinano sullo stato qualitativo e quantitativo delle acque sotterranee (WEIXING & FENG, 2012).

I partecipanti allo SWIM 2012 si sono soffermati sulla necessità di interpretare correttamente

le risultanze delle indagini e monitoraggi condotti sugli acquiferi sottoposti all'intrusione marina alla base. Vengono a tal riguardo citate indagini geologiche, idrogeologiche e geochimiche, convergenti in un unico modello interpretativo (DANSKIN, 2012; IKAWA *et alii*, 2012), secondo un approccio multidisciplinare che la presente Monografia tratta largamente in altri capitoli, in ordine a situazioni proprie degli acquiferi pugliesi, laddove si richiede un approccio integrato, facente capo alla partecipazione collettiva di esperti preparati ed addentrati a vari settori disciplinari (BARROCU, 2012).

Nello SWIM 2012 del Brasile, come già detto in precedenza, prevale il riferimento a modelli per studiare la filtrazione dei fluidi a densità variabile tenendo conto del fenomeno della dispersione idrodinamica (cap. 5), e ciò in quanto detti modelli, quando adeguatamente calibrati e validati, forniscono informazioni tanto sullo stato quantitativo, quanto su quello qualitativo delle acque sotterranee dolci galleggianti su acqua di mare. A tal riguardo DE LOUW *et alii*, 2012 analizzano le variazioni di posizione e spessore della zona di transizione, mentre DAGAN & PASTER, 2012 procedono alla determinazione del coefficiente di dispersione idrodinamica trasversale degli acquiferi su scala regionale. A tal riguardo si sottolinea che la precisione dei risultati di dette modellazioni è subordinata all'accuratezza con cui è possibile conoscere i parametri di *input*, riguardanti il comportamento idrogeologico della risorsa idrica galleggiante su acqua marina. Il suggerimento che a tal fine è fornito da VOSS, 2012 in particolare, è che la modellazione numerica sia la più agevole e semplice possibile, e ciò in quanto i modelli stessi devono essere utilizzati come strumento di supporto decisionale.

Non mancano, tra le note dello SWIM in parola, esempi di progetti pilota, che prevedono che il rilascio delle concessioni all'uso di acque sotterranee sia rigorosamente subordinato al controllo della sostenibilità dell'uso della falda idrica interessata, controllata ben ovviamente da monitoraggi e conseguenti modellazioni matematiche. Un esempio molto simpatico e di rilievo viene a tal riguardo illustrato nell'uso delle acque sotterranee dirette all'approvvigionamento idrico della città di Amburgo (MICHAELSEN *et alii*, 2012).

6.2. - TECNICHE PER LA DIFESA DAL FENOMENO DELL'INTRUSIONE MARINA NEL CONTINENTE

L'individuazione delle tecniche per la difesa dall'intrusione marina non può che partire dall'analisi dei meccanismi responsabili della contaminazione salina delle acque dolci di falda da parte delle acque di mare intruse nel continente. La scelta della tipologia di intervento più idonea dipende, infatti, dalle cause che hanno generato il fenomeno, dalla sua estensione, dalle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche locali, nonché dalle condizioni di sfruttamento della risorsa idrica sotterranea, e infine - ma non certo in ordine di importanza - dalla fattibilità economica degli interventi. Interventi che devono essere progettati tenendo conto delle condizioni idrauliche e delle leggi che regolano il fenomeno dell'intrusione marina, le quali quantificano gli effetti indotti nel breve e lungo periodo sull'equilibrio esistente tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare, ricorrendo soprattutto a modelli matematici. A questo deve far seguito l'installazione di un idoneo sistema di controllo e monitoraggio, utile sia in fase di progetto, sia in fase di collaudo dei risultati ottenuti.

Il primo intervento - adottato in genere spontaneamente per consentire il prelievo di acque sotterranee con discrete caratteristiche qualitative anche in aree ove il fenomeno dell'intrusione marina è ad uno stadio avanzato - consiste nel fare arretrare i pozzi di emungimento rispetto alla linea di costa, abbandonando le opere di captazione esistenti e prevedendone altre, là dove la falda possiede ancora discreti carichi piezometrici rispetto al livello mare. È evidente che qui non si tratta di interventi per la difesa dall'intrusione marina, ma unicamente di "palliativi" che garantiscono l'approvvigionamento idrico nel breve periodo, attraverso opere di captazione che, nel tempo, dovranno essere abbandonate. Un'altra soluzione, anch'essa spontanea ma più razionale, consiste nel ridurre le portate di emungimento dei pozzi esistenti, individuando risorse idriche alternative a quelle sotterranee, che consentono una parziale ristabilizzazione dei carichi piezometrici della falda.

Ma, al di là di questi accorgimenti, spontanei e immediati, la difesa dall'intrusione marina può dar

luogo a veri e propri interventi che blocchino o comunque controllino l'inquinamento salino delle acque di falda, i cui effetti dovrebbero sempre essere valutati a priori attraverso l'adozione di modelli matematici di previsione. Data la notevole estensione delle aree interessate dal fenomeno dell'intrusione marina, molto spesso questi interventi possono essere assolutamente inappropriati dal punto di vista della fattibilità economica. In tal caso la gestione delle acque sotterranee basata sulla interpretazione in tempo reale del monitoraggio della falda, rappresenta una tecnica di difesa molto efficace dall'intrusione marina anche su scala regionale (cap. 30).

Le tipologie di intervento per contrastare o controllare l'intrusione marina alla scala di uno o più campi pozzi e garantire l'impiego delle risorse idriche sotterranee in condizioni qualitative ottimali possono essere così riassunte:

- barriere sotterranee impermeabili;
- ricarica indotta;
- ricarica artificiale puntuale;
- ricarica artificiale areale;
- estrazione di acqua salata;
- formazione di barriere attraverso iniezioni di aria;
- metodo combinato di estrazione di acqua salmastra, dissalazione e ricarica (ADR).

Qui di seguito forniremo una sintetica descrizione di queste tipologie, basandoci su quanto riportato in COTECCHIA *et alii*, 1995 e rimandando, per ulteriori approfondimenti, alla vasta letteratura scientifica internazionale disponibile sul tema (SWIM 1÷SWIM 21), anche con riferimento a casi reali di applicazione.

6.2.1. - *Barriere sotterranee impermeabili*

La formazione di barriere sotterranee impermeabili, con sviluppo parallelo alla costa e profondità tale da penetrare in tutto lo spessore dell'acquifero, consente di diminuire la permeabilità dell'acquifero presso costa, e di ridurre, o teoricamente annullare, l'ingresso dell'acqua salata nel continente (COTECCHIA *et alii*, 1995). Per i medesimi motivi, le barriere determinano anche una riduzione della portata di deflusso a mare della falda, incrementandone i carichi piezometrici nel conti-

nente a monte. Ciò comporta la possibilità di incrementare la portata di emungimento rispetto alla massima possibile, in condizioni di assenza di barriere. Tramite le barriere, e in particolari condizioni idrogeologiche, è possibile, inoltre, contrastare l'intrusione marina anche in acquiferi ove la falda presenta carichi piezometrici inferiori al livello medio mare (fig. 6.2).

Le barriere sotterranee impermeabili vengono solitamente realizzate tramite "paratie" di pali, oppure riempiendo profonde trincee con malta argillosa, cemento o calcestruzzo. Fra gli inconvenienti vanno ricordati gli alti costi di realizzazione, la bassa resistenza ad azioni sismiche e ad erosioni chimiche e l'elevata profondità cui le barriere devono spingersi. Per ovviare a questi svantaggi, può

convenire ridurre la conducibilità idraulica nella zona saturata con iniezioni di cemento, miscele bentonitiche e sostanze bituminose. Si può anche ricorrere a prodotti chimici come gel-silicei, lacrilato di calcio o sostanze espansive. Si tratta di interventi generalmente molto difficili da eseguire, la cui efficacia è strettamente legata all'accuratezza con cui vengono eseguiti i lavori. Tuttavia la profondità massima raggiungibile con simili tipologie di intervento, non supera qualche decina di metri; nel caso di acquiferi fortemente permeabili, poi, la riuscita dell'intervento è assai incerta. Si tratta evidentemente di opere che possono essere realizzate unicamente in piccole aree, dato il forte impatto sulle condizioni idrogeologiche degli acquiferi costieri, e il loro notevole costo.

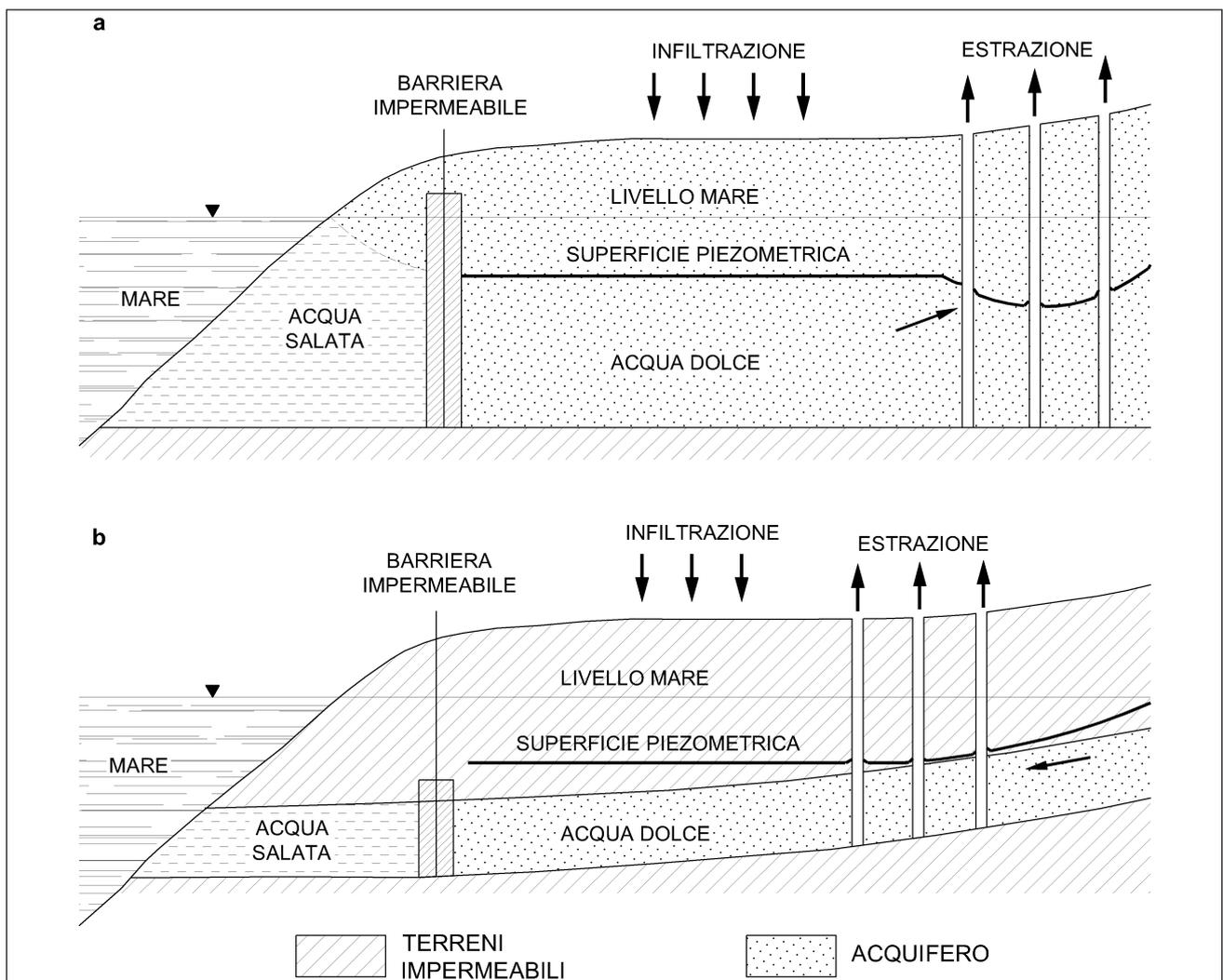


Fig. 6.2 – Controllo dell'intrusione marina mediante barriera sotterranea impermeabile: a) acquifero freatico; b) acquifero confinato (da COTECCHIA *et alii*, 1995).
– Control of seawater intrusion by means of a sub-surface impermeable barrier: a) unconfined aquifer; b) confined aquifer (from COTECCHIA *et alii*, 1995).

6.2.2. - *Ricarica indotta*

Rientrano in questa tipologia gli interventi finalizzati all'incremento della ricarica naturale, un obiettivo generalmente raggiunto con la realizzazione di gallerie, trincee o pozzi che accrescono l'alimentazione da corsi d'acqua, nonché ricorrendo a tecniche di dragaggio degli alvei, o operazioni in grado di agevolare l'infiltrazione naturale dell'acqua nel sottosuolo (terrazzamenti delle pendici, aumento della vegetazione, ecc.).

La metodologia è applicabile in caso di acquifero freatico. Nel caso di acquiferi confinati, l'unica tecnica utilizzabile consisterebbe, infatti, nell'addurre la ricarica tramite pozzi i quali, attraversando gli strati impermeabili che tengono in pressione la falda o che comunque ricoprono l'acquifero, mettano in comunicazione la superficie con l'acquifero in profondità.

6.2.3. - *Ricarica artificiale puntuale*

La ricarica artificiale puntuale consiste nella realizzazione di vere e proprie barriere alla intrusione marina, tramite immissione di acqua dolce da pozzi (COTECCHIA *et alii*, 1995). Le barriere, infatti, provocando un incremento dei carichi idraulici presso costa, consentono di controllare l'intrusione di acque marine nel continente. Le barriere idrauliche vengono generalmente eseguite disponendo i pozzi di ricarica lungo una linea parallela alla costa. Questa metodologia è utilizzata soprattutto in caso di falde profonde o dove lo spazio a disposizione non consenta la realizzazione di appositi bacini di ricarica, o l'adozione della ricarica indotta (fig. 6.3). La ricarica artificiale puntuale può essere realizzata anche in caso di acquiferi confinati, attraverso la realizzazione di pozzi che superino gli strati di terreno impermeabili sovrastanti l'acquifero.

Un sistema di iniezione per l'esecuzione della ricarica artificiale puntuale presenta non pochi problemi. Occorre, infatti, tener conto della quantità di acqua dolce a disposizione per la ricarica con relative caratteristiche qualitative, della durata della disponibilità, della distanza della barriera dalle fonti di approvvigionamento delle acque da immettere in falda, di eventuali trattamenti cui l'acqua debba

essere sottoposta prima di essere immessa in falda, della permeabilità e della capacità di immagazzinamento dell'acquifero. Le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero giocano, infatti, un ruolo fondamentale nel processo di ricarica, in quanto vi sono associati i raggi di influenza dei pozzi di immissione. Occorre, infatti, che la distanza tra i pozzi sia tale che, nel punto intermedio, si abbia un sollevamento significativo della superficie piezometrica, in modo da contrastare l'intrusione marina. Nel caso di acquifero poco permeabile, infatti, può accadere che la distanza tra i pozzi sia tale che il sollevamento della superficie piezometrica determinata dal pozzo di immissione si propaghi solo per una breve distanza dal pozzo stesso e che, quindi, nei punti intermedi l'innalzamento sia trascurabile o nullo. È chiaro, allora, che in caso di acquiferi poco permeabili sarà necessario realizzare un maggior numero di pozzi, ognuno dei quali immetta in falda un ridotta portata d'acqua. Nel caso di acquiferi molto permeabili, è possibile invece distanziare i pozzi ed adottare, per ogni singolo pozzo, una portata di immissione maggiore.

Uno dei principali inconvenienti connessi all'impiego di pozzi di iniezione di acqua dolce, è la necessità di effettuare spurghi periodici dei pozzi per evitarne l'intasamento. Una possibile soluzione potrebbe essere allora la realizzazione di pre-filtri, disposti all'imboccatura del pozzo, sostituibili o rigenerabili ad opportuni intervalli di tempo in base alla natura dell'acqua di alimentazione. Un ulteriore possibile espediente si basa sulla sostituzione del terreno naturale intorno al pozzo di iniezione con materiale filtrante, dotato di caratteristiche tali da bloccare i materiali sospesi presenti nell'acqua. È possibile, infine, spurgare il pozzo eseguendo periodiche inversioni di flusso.

6.2.4. - *Ricarica artificiale areale*

La ricarica artificiale areale avviene attraverso bacini di infiltrazione alimentati con acque di diversa provenienza (COTECCHIA *et alii*, 1995).

I bacini di infiltrazione necessitano generalmente di aree molto ampie e si impiegano soltanto in caso di alimentazione di acquiferi superficiali. Gli impianti di infiltrazione possono avere forme

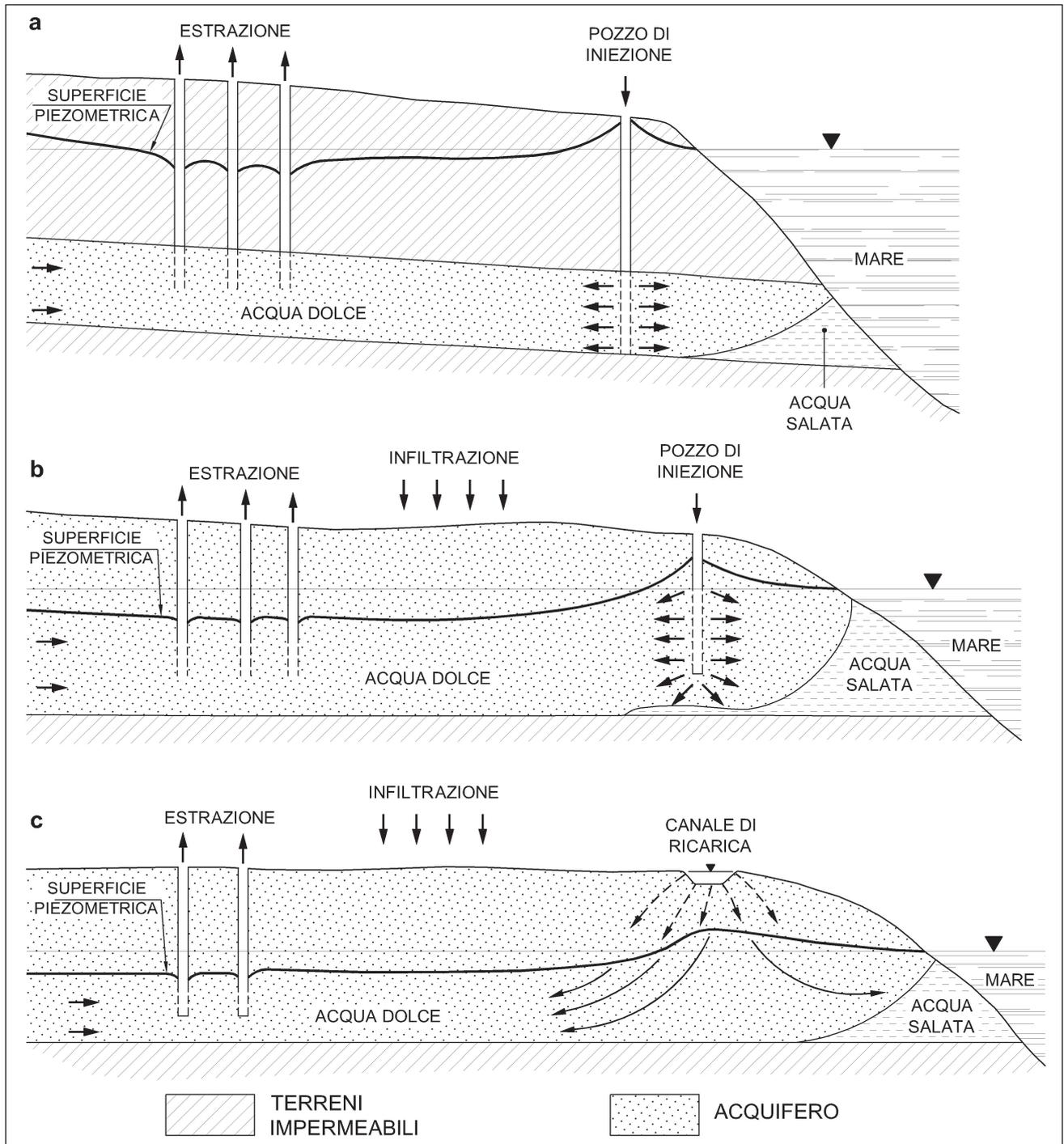


Fig. 6.3 – Differenti tipi di barriere idrauliche realizzate con la ricarica artificiale puntuale: a) mediante pozzi in acquifero confinato; b) mediante pozzi in acquifero freatico; c) mediante canale di ricarica in acquifero freatico (da COTECCHIA *et alii*, 1995).

– Different types of hydraulic barriers realized with the point artificial recharge: a) through wells in a confined aquifer; b) through wells in a phreatic aquifer; c) through recharge channel in a unconfined phreatic aquifer (from COTECCHIA *et alii*, 1995).

differenti e presentano un fondo orizzontale o dotato di pendenza minima per favorirne lo svuotamento. Possono estendersi planimetricamente, da qualche migliaio di metri quadrati alla decina di ettari. Da un punto di vista progettuale e costruttivo,

il fondo del bacino non deve mai intercettare la superficie della falda idrica, in modo da consentire le operazioni di pulizia e rendere utilizzabile uno strato parzialmente saturo, il quale svolge un ruolo fondamentale nella capacità di autodepurazione del

terreno. I bacini di infiltrazione possono essere così suddivisi:

- bacini con fondo in terra;
- bacini con fondo ricoperto da vegetazioni;
- bacini con fondo ricoperto da un filtro.

I primi vengono impiegati in caso di installazioni provvisorie e quando non è necessario garantire una particolare qualità delle acque di infiltrazione. Hanno poi il notevole vantaggio di avere bassi costi di investimento ed una certa facilità di costruzione.

Il secondo tipo necessita di particolari attenzioni per ridurre lo spessore dello strato d'acqua e la sua torpidità: un'elevata immersione e la presenza di solidi in sospensione possono infatti provocare danni alla vegetazione, intasando il fondo e causando un inquinamento di natura organica dell'acqua.

L'ultimo tipo di bacino richiede complessivamente maggiori investimenti. Il filtro consente il trattamento depurativo meccanico e biologico dell'acqua di alimentazione e diminuisce il rischio di intasamento del terreno sottostante; gli effetti dell'autodepurazione sono tanto più evidenti quanto maggiore è lo spessore del filtro. È necessario, poi, provvedere periodicamente alla sua pulizia, superficiale e profonda, a causa di una forte tendenza all'intasamento.

La ricarica artificiale areale può essere realizzata anche tramite canali di infiltrazione, che hanno il vantaggio di presentare un rischio di intasamento ridotto. In questi canali, infatti, si ottiene un moto continuo dell'acqua, che determina una ridotta sedimentazione e un minore sviluppo di alghe. Tra gli svantaggi si registrano invece le notevoli dimensioni dei canali, necessarie per ottenere un volume di ricarica soddisfacente.

Tra le possibili fonti d'acqua per la ricarica ricordiamo le acque dei fiumi, le acque reflue depurate o quelle derivanti dai processi industriali di raffreddamento. Un caso reale è quello realizzato nella Piana Sitges-Sant Pere de Ribes, a Sud di Barcellona (fig. 6.4). L'affluente di Vilafranca fa scorrere per circa 20 km le acque reflue scaricate più a monte (CUSTODIO & GALOFRÈ, 1977). Lungo il percorso si verifica una moderata auto-depurazione, sicché con l'acqua fluente è possibile eseguire la ricarica dell'acquifero mediante bacini artificiali, realizzati con dighe in terra poste lungo l'alveo. In due anni e mezzo di esercizio il sistema di ricarica artificiale ha consentito di ridurre la concentrazione salina delle acque sotterranee nella zona gravemente interessata dall'intrusione salina (COTECCHIA *et alii*, 1995).

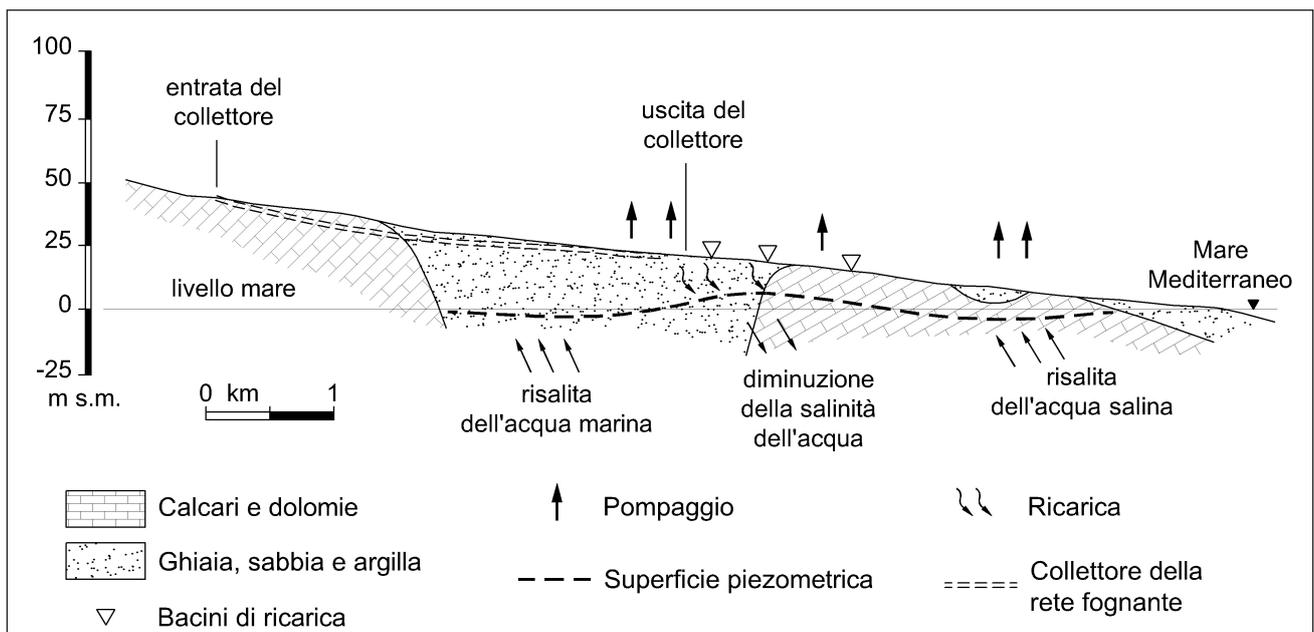


Fig. 6.4 – Sezione idrogeologica della piana di Sitges – Sant Pere de Ribes, lungo l'affluente Vilafranca, a Sud di Barcellona, Spagna (da COTECCHIA *et alii*, 1995).
– Hydrogeological cross-section of the Sitges – Sant Pere de Ribes plain, along the tributary Vilafranca, south of Barcelona, Spain (from COTECCHIA *et alii*, 1995).

6.2.5. - Estrazione di acqua salata

Questa soluzione, anche se costosa, è realizzata disponendo vicino alla linea di costa una batteria di pozzi ed effettuando un pompaggio continuo di acqua salata, determinando quindi una depressione nell'acqua marina intrusa nel continente. In generale il pompaggio determina anche un incremento del gradiente idraulico presso costa della falda di acqua dolce (fig. 6.5, TROISI, 1994).

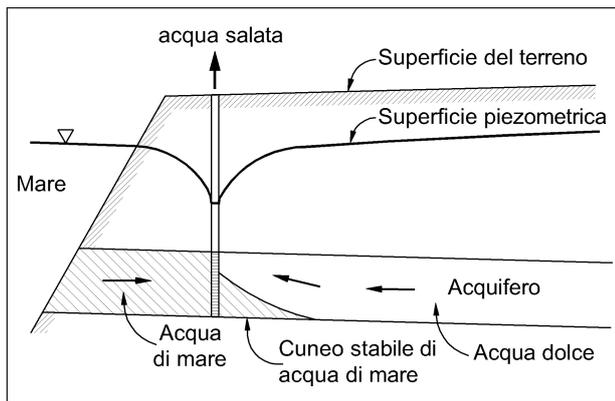


Fig. 6.5 – Controllo dell'intrusione marina tramite estrazione di acqua salata (da TROISI, 1994).

– Control of the seawater intrusion through salt-water extraction (from TROISI, 1994).

L'acqua emunta dalla barriera di estrazione è l'acqua marina intrusa nel continente, inevitabilmente mista ad acqua dolce, e scaricata in mare. Di solito questo sistema di difesa viene adottato per proteggere campi pozzi in uso per l'emungimento di acqua dolce di falda (fig. 6.6), pur presentando costi di gestione non trascurabili vista la necessità di realizzare un gran numero di pozzi e l'energia necessaria al pompaggio. Evoluzione diretta di tale metodo di protezione è poi l'adozione di un pozzo singolo dotato di due pompe (fig. 6.7): la prima posizionata nell'acqua di mare estrae acqua salata; la seconda, posizionata nella parte superficiale del pozzo, preleva l'acqua dolce di falda (STONER & BAKIEWICZ, 1992). Ciò consente di incrementare la portata di emungimento del pozzo e controllare al contempo la formazione del cono di intrusione marina. Per evitare problemi di mescolamento tra l'acqua dolce di falda e la sottostante acqua di mare, il pozzo viene realizzato con due tratti sfinestrati in corrispondenza dei tratti di acquifero da

cui prelevare la falda di acqua dolce e l'acqua di mare attraverso le pompe, tra i quali viene realizzato un *packer*. La portata di acqua salata estratta dalla base del pozzo sarà funzione della portata di emungimento dell'acqua dolce, di modo che la zona di transizione si mantenga costantemente tra i due tratti sfinestrati, e non risalga fino alla zona dove l'acqua dolce è emunta.

I principali svantaggi dell'impiego del pozzo singolo derivano dal rischio di contaminazione dell'acqua dolce per errata cementazione del pozzo, dai notevoli costi di realizzazione determinati dalla complessità costruttiva, e dagli elevati costi di gestione per effetto di un maggiore consumo energetico dovuto alla presenza di due pompe.

6.2.6. - Formazione di barriere attraverso iniezioni d'aria

L'iniezione di aria negli acquiferi viene adottata, già da alcuni decenni, per il controllo del moto delle acque sotterranee. L'iniezione d'aria può accelerare o ritardare il movimento dell'acqua sotterranea e può dunque essere impiegata per impedire o rallentare il flusso d'acqua salina verso la falda idrica dolce. Iniezioni d'aria possono inoltre essere utilizzate insieme alle barriere di iniezione di acqua dolce in falda: se usate su entrambi i lati di una barriera idraulica d'acqua dolce, riducono i costi e le quantità d'acqua necessarie, diminuendo la conducibilità idraulica. Esiste, infatti, una relazione, generalmente esponenziale, tra grado di saturazione e conducibilità idraulica, per cui al diminuire del primo, in virtù dell'aumento dell'aria intergranulare, diminuisce anche la seconda (COTECCHIA *et alii*, 1995).

6.2.7. - Metodo combinato di estrazione di acqua salmastra, dissalazione e ricarica (ADR)

Quest'ultima metodologia, denominata *Abstraction, Desalination and Recharge* (ADR), che si propone di superare le limitazioni dei metodi descritti in precedenza attraverso la loro parziale combinazione, consta di tre fasi: estrazione di acqua salmastra dall'acquifero interessato dall'intrusione marina; dissalazione dell'acqua salmastra estratta con l'impiego di processi di trattamento ad osmosi

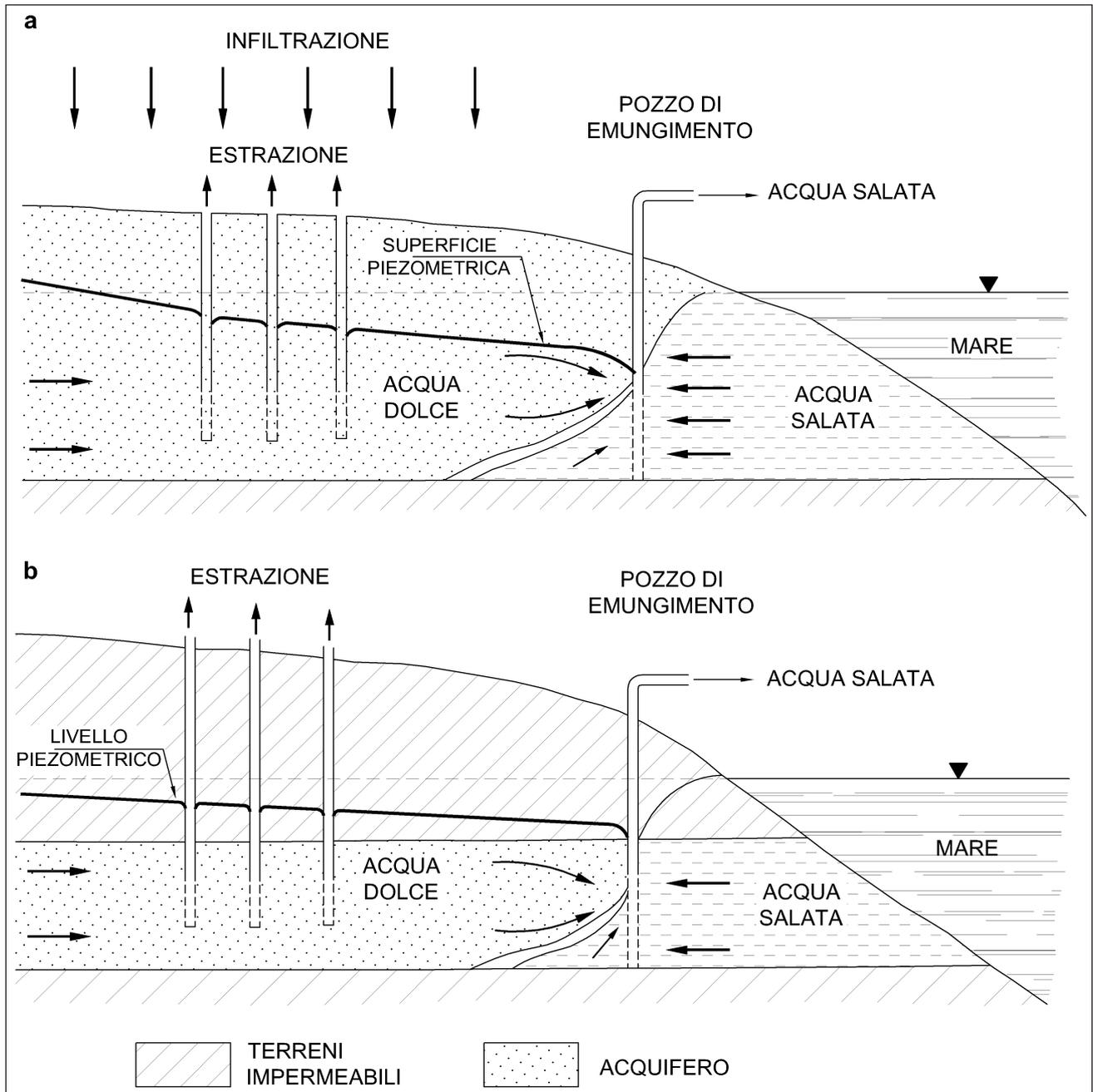


Fig. 6.6 – Protezione di pozzi in emungimento dall'intrusione marina mediante l'estrazione di acqua salata: a) acquifero freatico; b) acquifero confinato (da COTECCHIA *et alii*, 1995).

– Salt-water extraction to protect wells from seawater intrusion: a) unconfined aquifer; b) confined aquifer (from COTECCHIA *et alii*, 1995).

inversa; ricarica attraverso l'immissione nell'acquifero dell'acqua dissalata (ABD-ELHAMID & JAVADI, 2010). La metodologia consente di controllare il fenomeno dell'intrusione marina mediante riduzione del volume di acqua di mare intrusa nel continente e contemporaneo incremento del volume di acqua dolce di falda. Il processo combinato estrazione-ricarica permette, quindi, di spostare

l'interfaccia acqua dolce-acqua salata in profondità e verso il mare. Il processo continua fin quando non viene raggiunto uno stato di equilibrio dinamico, cui corrisponde una particolare distribuzione dei carichi piezometrici e della concentrazione salina della falda. Una volta raggiunta tale condizione di equilibrio, è possibile continuare ad estrarre acqua salmastra da dissalare, una determinata

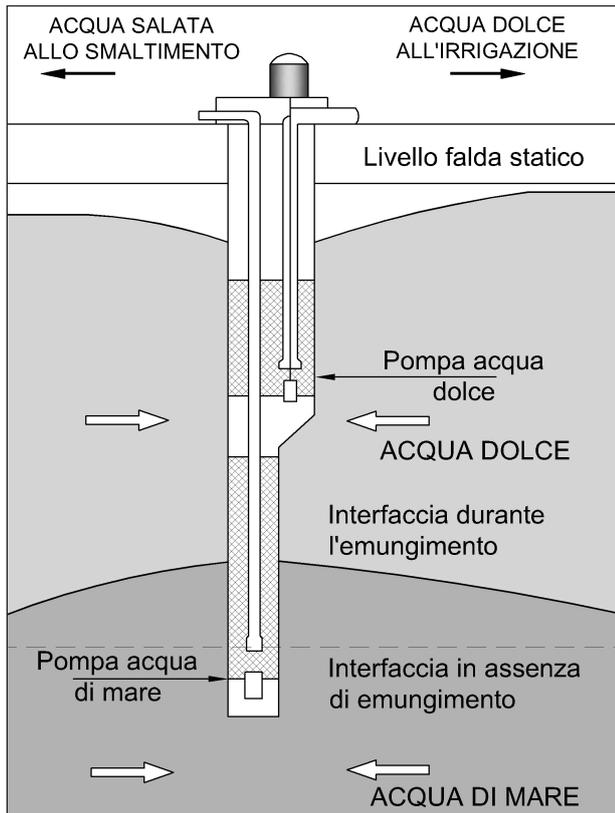


Fig. 6.7 – Controllo del *salt-water upconing* attraverso l'installazione in un singolo pozzo di due pompe, una che preleva acqua di mare e una che preleva acqua dolce.

– Control of *salt-water upconing* through installation of two pumps in a single well, respectively pumping seawater and fresh water.

quantità della quale potrà essere immessa nell'acquifero e il *surplus* disponibile usato per vari scopi o immagazzinato nell'acquifero. La dissalazione di acqua salmastra è, insomma, un'efficiente alternativa alla dissalazione di acqua di mare, in quanto la salinità dell'acqua salmastra è generalmente inferiore a un terzo di quella dell'acqua di mare.

Il metodo ADR è stato studiato con risultati incoraggianti attraverso modelli numerici di previsione per valutarne degli effetti indotti sull'equilibrio acqua dolce-acqua di mare da ABD-ELHAMID & JAVADI, 2010. Questi hanno condotto uno studio comparativo sui risultati ottenibili dall'applicazione di tre differenti metodologie di protezione: *uso di soli pozzi di ricarica*, *uso di soli pozzi di estrazione di acqua salmastra* e applicazione del *metodo ADR*. Lo studio, eseguito per un ipotetico acquifero costiero della lunghezza di 200 m e dello spessore di 100 m, ha fornito i seguenti risultati:

- utilizzando *soli pozzi di ricarica*, la concentra-

zione totale di sale nell'acquifero si è ridotta da 167 mg/l a 151 mg/l con l'immissione in falda di 3,0 Mm³/anno di acqua dolce con un costo annuo complessivo di \$ 5,72 milioni/anno;

- impiegando i *soli pozzi di estrazione di acqua salmastra*, la stessa concentrazione iniziale di sale, pari a 167 mg/l si è ridotta a 149 mg/l estraendo 2,6 Mm³/anno di acqua di mare, con una spesa totale annua di \$ 2,62 milioni/anno;

- usando il *metodo ADR* la concentrazione totale di sale nell'acquifero si è ridotta da 167 mg/l a 142 mg/l attraverso l'emungimento di 1,5 Mm³/anno di acqua di mare e l'immissione in falda di 0,5 Mm³/anno con un costo totale annuo pari a \$ 1,32 milioni/anno.

Questi studi attestano che l'impiego del metodo ADR consente di ottenere migliori risultati con ridotti costi di gestione. I risultati hanno inoltre mostrato che la quantità di acqua estratta ed emunta con questo metodo, è circa tre volte inferiore alla quantità di acqua dolce necessaria per la metodologia dei soli pozzi di ricarica; la rimanente acqua salmastra desalinizzata, può dunque essere utilizzata per altri scopi.

6.2.8. - *Considerazioni conclusive*

L'analisi delle tecniche di difesa dall'intrusione marina evidenzia la possibilità di controllare l'intrusione delle acque marine negli acquiferi ricorrendo ad alcune tipologie di interventi, che presentano notevoli costi di realizzazione e/o gestione, e sono comunque applicabili su scala ridotta.

In linea generale, il metodo della ricarica artificiale della falda acquifera è un sistema molto costoso, che richiede un'analisi preventiva dei costi e benefici. S'impone, insomma, uno studio di fattibilità, in quanto la ricarica artificiale dipende da numerosi fattori, in particolare dalle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero in esame e dal territorio in cui gli interventi devono inserirsi. È necessario, infatti, eseguire approfonditi studi preventivi, per poter stabilire il metodo di ricarica più idoneo e il migliore pre-trattamento cui sottoporre l'acqua, prima che questa venga immessa in falda. Negli acquiferi confinati, ad esempio, l'unica soluzione per la ricarica è quella dei pozzi di iniezione. In gene-

rale la ricarica, indotta o artificiale, attraverso bacini di ricarica, è abbastanza semplice da realizzare, ma spesso assai costosa, specie quando la superficie interessata è molto estesa. La ricarica areale consente tuttavia di sfruttare al meglio, attraverso il flusso dell'acqua nella zona non satura, l'autodepurazione della stessa, consentendo l'utilizzazione anche di acque di minore qualità.

Con riferimento ai metodi che prevedono una ricarica artificiale della falda è importante sottolineare la possibilità di utilizzare le acque reflue trattate, le quali potrebbero consentire di ridurre significativamente la concentrazione salina delle acque di falda. In proposito è utile richiamare il caso dell'acquifero profondo calcareo, altamente permeabile, vicino a Miami (Florida, U.S.A.), dove l'immissione di acque reflue trattate in falda ha consentito di ottenere un significativo miglioramento delle caratteristiche qualitative delle acque di falda, prima fortemente condizionate dall'intrusione marina (cap. 28).

Il metodo ADR, basato sull'estrazione di acque salmastre, sulla dissalazione e ri-immissione delle stesse in falda, sembra presentare un certo vantaggio economico rispetto agli altri metodi per il controllo dell'intrusione marina a livello locale.

Va infine sottolineata la necessità di adottare tutte le possibili misure per ridurre il consumo di acque dolci sotterranee, utilizzando acque salmastre e/o salate in alcune attività industriali al posto di quelle dolci di falda, e riutilizzando le acque reflue trattate. S'impone anche il lancio di un'estesa campagna di sensibilizzazione dell'opinione pubblica sull'uso corretto delle risorse idriche e sulla riduzione degli sprechi, accanto ad un'effettiva politica territoriale per la gestione dell'acqua e la pianificazione idrica in generale, il che implica un vero e proprio mutamento socio-economico, educativo e tecnologico.

6.3. - CASI DI STUDIO REGIONALI

Oggi è disponibile una vasta letteratura scientifica sull'analisi di contesti idrogeologici, variamente distribuiti nel mondo, interessati dal fenomeno dell'intrusione marina. Nella figura 6.8 e nella tabella 6.1 sono elencati alcuni casi di studio regionali ritenuti a tal riguardo più rappresentativi. I primi

otto casi si trovano lungo le coste degli Stati Uniti d'America (Florida, California, New York, Hawaii) dove si rilevano, specie in Florida, acquiferi con assetti geologico-strutturali e problematiche di gestione della risorsa idrica sotterranea molto simili a quelli della Puglia. L'intrusione marina in Florida verrà trattata specificatamente nel capitolo 28, dove ampio spazio sarà dato alle modalità di gestione delle risorse idriche sotterranee, insieme alle attività di monitoraggio, attuate dai governi locali. I successivi cinque casi (9÷13) sono ubicati lungo le coste del Mare del Nord (Paesi Bassi, Regno Unito), ossia in paesi oggetto di studio nell'ambito dei primi SWIM, per poi passare ad alcuni importanti casi di studio europei scelti nel Mediterraneo, in particolare in Italia (15÷16) e in Spagna (19). La rassegna si chiude con quattro casi extra europei, in Iran (14), negli Emirati Arabi Uniti (17), in Libano (18) e in Israele (20).

Di seguito si riporta una descrizione particolareggiata di quattro casi regionali ritenuti più interessanti, sia per la complessità del fenomeno dell'intrusione marina presente sia per le tecniche adottate per contrastarlo. Negli atti dei vari SWIM si leggono numerosi casi di studio regionali, trattati con diverso grado di approfondimento, in tutto il mondo. Un'analisi dei diversi acquiferi esposti all'intrusione marina nel Mar Mediterraneo è presente anche in *Cost Action 621* (fig. 6.9) (CALAFORRA *et alii*, 2005).

6.3.1. - *Intrusione marina nella parte occidentale dei Paesi Bassi - Olanda*

L'area dunale lungo la costa del Mar del Nord nella parte occidentale dei Paesi Bassi è una delle regioni più importanti del paese (fig. 6.10, tab. 6.1). In questa zona, a partire dalla metà degli anni Sessanta, si sono dovuti ridurre gli emungimenti dall'acquifero per mantenere il livello della falda a un valore abbastanza alto ed evitare un innalzamento della zona di transizione tra la falda di acqua dolce e l'acqua di mare (STAKELBEEK, 1999).

Sin dagli inizi degli anni Novanta, il PWN *Water Supply Company North-Holland*, ha previsto la realizzazione di un sistema di pozzi di infiltrazione profondi per cercare di risolvere il problema del sollevamento dell'interfaccia acqua dolce-acqua di

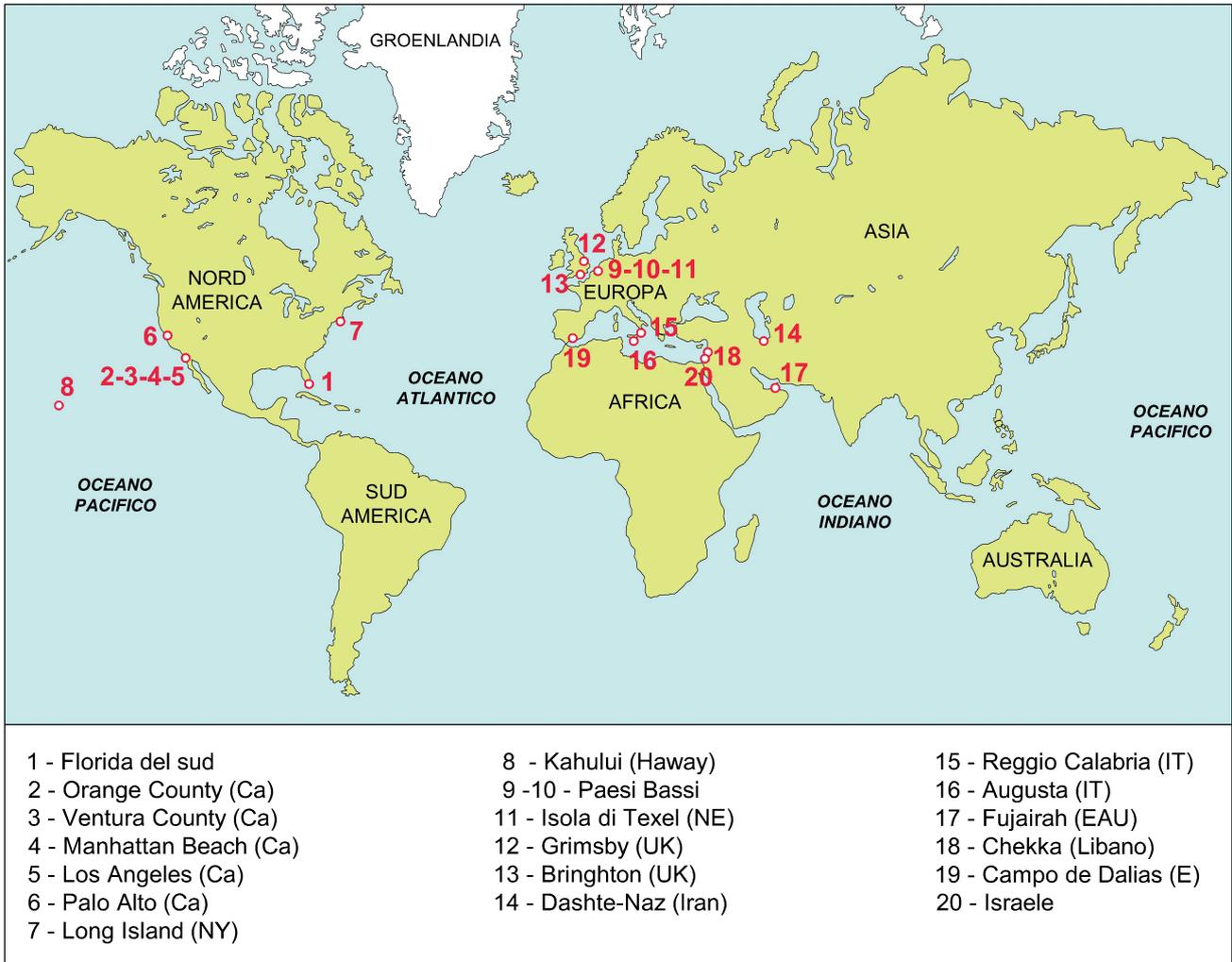


Fig. 6.8 – Mappa con alcuni casi di studio di intrusione marina nel mondo.
– Map of some case studies of seawater intrusion in the world.

mare per effetto delle estrazioni dell'acqua di falda. Il sistema ha una capacità di 5 Mm³/anno, ed è costituito da 20 pozzi di infiltrazione di acqua superficiale pre-trattata, 12 pozzi di estrazione e 10 pozzi di monitoraggio. L'infiltrazione e il contemporaneo emungimento avvengono in corrispondenza di un acquifero sabbioso, il cui tetto è posto ad una profondità variabile tra 50 e 100 metri sotto il livello mare. L'acquifero è sostenuto alla base da un sottile strato di argilla, al di sotto del quale l'acqua di falda diventa salmastra (fig. 6.11).

Per progettare correttamente il sistema di infiltrazione si è dovuta scegliere un'adeguata posizione relativa dei pozzi di emungimento e d'infiltrazione, in modo da minimizzare la portata immessa in falda ed evitare, sotto il contemporaneo emungimento, il sollevamento dell'interfaccia.

La posizione relativa dei pozzi è stata scelta in modo da garantire una certa omogeneità dei caratteri qualitativi dell'acqua di falda oggetto di ricarica artificiale, tenuto conto dei tempi di ritenzione. Nel caso in esame, i pozzi di estrazione e infiltrazione sono stati disposti, rispettivamente, sui lati e sulle diagonali di un teorico rombo (fig. 6.12).

Per calcolare la quantità d'acqua necessaria a garantire il corretto funzionamento del sistema, sono state eseguite elaborazioni numeriche con un opportuno modello matematico. In particolare, è stato utilizzato il codice di calcolo agli elementi finiti SALINA (IWACO), ipotizzando nella modellazione dell'acquifero la presenza di un'interfaccia netta, assunta coincidente con la isoalina 10 g/l. Le elaborazioni effettuate hanno evidenziato che, per prevenire il sollevamento dell'interfaccia, è neces-

Tab. 6.1 - *Descrizione di alcuni casi di intrusione marina nel mondo con indicazione dei rimedi attuati per controllare e limitare il fenomeno.*

– Description of selected cases of worldwide seawater intrusion, with indication of the techniques used to control and mitigate the phenomenon.

INTRUSIONE MARINA NEL MONDO				
ID	Luogo	Acquiferi coinvolti	Descrizione	Rimedio
1	Florida del Sud (KONIKOW & REILLY, 1999)	Due acquiferi carbonatici costieri: 1) <i>Floridan aquifer</i> ; 2) <i>Biscayne aquifer</i> .	I due acquiferi coinvolti garantiscono circa il 90% dell'approvvigionamento potabile del Sud della Florida. A partire dal 1909 è iniziata, in corrispondenza dell'area costiera di Miami (Dade County), la costruzione di una rete di canali di drenaggio per contrastare gli allagamenti dovuti alle alluvioni. Grandi quantità d'acqua dolce da Everglades e dal " <i>Biscayne aquifer</i> " sono state drenate verso il mare. Il drenaggio ha provocato un abbassamento della superficie freatica di circa 2 m nell'area di Everglades. Ciò, associato ai numerosi campi pozzi realizzati lungo la costa che captavano acqua dolce dal " <i>Biscayne aquifer</i> ", ha causato l'avanzamento progressivo verso l'entroterra di acqua di mare.	Il distretto di gestione delle acque (SFWMD) ha realizzato all'interno dei canali una serie di strutture in prossimità della costa, automatizzate e gestite da remoto, che consentono di far scorrere le portate di piena o far sollevare la superficie freatica in base alle esigenze. In concomitanza, una grossa rete di monitoraggio permette il controllo, in tempo reale, dei parametri chimico-fisici e dei livelli minimi vitali di falde e specchi d'acqua.
2	Orange County, California (KONIKOW & REILLY, 1999)	Acquifero costiero composto da depositi sabbiosi e ghiaiosi intervallati da strati impermeabili di argilla e limo. Tali depositi sono impostati su Horst e Graben di rocce di natura ignea, metamorfica e sedimentaria.	Un sistema di faglie parallele alla linea di costa costituisce una barriera naturale contro il fenomeno dell'intrusione marina. Processi erosivi hanno creato però delle discontinuità negli altopiani sulle quali si sono successivamente impostati i depositi di materiale alluvionale dotati di maggiore permeabilità e costituenti l'acquifero oggetto di studio. Queste discontinuità hanno rappresentato quindi le vie preferenziali sia per il flusso d'acqua dolce sotterranea, sia per l'intrusione marina, quest'ultima amplificata dallo sfruttamento dalla falda di acqua dolce.	L'Orange County Water District (OCWD) utilizza come metodi per contrastare l'intrusione marina la ricarica artificiale, l'ottimizzazione dell'utilizzo dell'acqua di falda e l'acquisto di acqua dai distretti vicini. Recentemente è stato inoltre costruito nell'area un impianto di trattamento depurativo terziario delle acque, a valle del quale le acque trattate vengono immesse in falda, eventualmente miscelate con acqua estratta da quattro pozzi profondi.
3	Oxnard Plain, Ventura County, California (KONIKOW & REILLY, 1999)	Acquiferi costieri: 1) sistema acquifero superficiale composto da due acquiferi separati da depositi argillosi; 2) Acquifero profondo sostenuto alla base e lateralmente da rocce vulcaniche e da rocce consolidate di origine marina che contengono acqua salata.	Il sistema acquifero superficiale inizialmente è stato il solo ad essere sfruttato per approvvigionamento idrico. Questo ha determinato, a partire dagli anni cinquanta, un abbassamento della superficie freatica al di sotto del livello mare con conseguente inizio dell'intrusione marina; ciò ha portato alla sospensione degli emungimenti da detto acquifero e trasferimento degli stessi a quello profondo, determinando anche qui una perdita di carico piezometrico e conseguente intrusione marina. L'intrusione marina nell'acquifero profondo è stata comunque sovrastimata a causa dell'infiltrazione di acqua ad elevato contenuto di cloro dall'acquifero superficiale negli acquiferi sottostanti per effetto del suo maggiore carico piezometrico.	Dopo il 1993, la individuazione di una buona strategia gestionale delle acque sotterranee e l'incremento nella disponibilità di acque superficiali da impiegare nella ricarica dell'acquifero ha consentito di riportare i carichi piezometrici della falda superficiale sopra il livello del mare. I locali enti hanno avanzato numerosi progetti di gestione delle acque sotterranee per ridurre la domanda d'acqua di falda e sviluppare fonti alternative di approvvigionamento. È stato proposto, ad esempio, l'espansione delle esistenti capacità dei bacini di ricarica con l'impiego di acqua depurata, oppure l'iniezione puntuale di acqua depurata nell'acquifero profondo.

Segue

4	Manhattan Beach, California (TROISI, 1996)	Acquifero freatico costituito da ghiaia e sabbia.	L'acquifero freatico costiero presenta spessore medio di 70 m circa ed è oggetto di intrusione marina.	Per bloccare l'intrusione dell'acqua salata venne realizzato un impianto di ricarica, costituito da otto pozzi, posti lungo una linea parallela alla spiaggia, a circa 600 m da questa, con un interasse di circa 150 m, e da un certo numero di piezometri. L'acqua di ricarica proveniva dal fiume Colorado e veniva immessa in falda a seguito di trattamento. Nel 1959 furono immessi in falda circa 4,5 Mmc d'acqua con portate, per ogni pozzo, comprese fra 11 e 28 l/s. Dopo 16 mesi di funzionamento dell'impianto, si notarono dei bulbi d'acqua dolce, di forma troncoconica rovescia, che si estendevano per circa 60 m verso il mare in corrispondenza del tetto della falda, ma non risultavano molto larghi inferiormente. Successivamente l'impianto venne potenziato, aumentando la portata di ricarica ed allungando la linea di pozzi per una lunghezza totale di circa 2,5 km.
5	Los Angeles, California (TROISI, 1996)	Acquifero costiero lungo la costa occidentale di Los Angeles.	L'intrusione dell'acqua di mare lungo la costa occidentale di Los Angeles aumentò notevolmente con lo sviluppo socio-economico dell'area degli anni 40.	Il primo grande progetto di bonifica della falda prevedeva la realizzazione di ben 94 pozzi di ricarica lungo una linea parallela alla costa ed estesa circa 11 km, in modo da proteggere dall'intrusione marina la zona interna oggetto degli emungimenti. Altri 267 pozzi di osservazione monitoravano gli effetti di tale barriera in modo da calibrare le portate di iniezione.
6	Palo Alto, California (TROISI, 1996)	Acquifero contenente una falda multistrato, costituita da due falde superficiali, separate tra loro da una lente argillosa, ed una falda profonda, separata dalle falde superficiali tramite uno strato semipermeabile argilloso.	La falda profonda è soggetta all'invasione dall'acqua salata proveniente sia dalle falde superficiali sia direttamente dal mare.	È stata realizzata una barriera, costituita da una serie di pozzi gemellari di ricarica e di pompaggio in corrispondenza delle due falde superficiali. La realizzazione di tale sistema è stata effettuata isolando idraulicamente, tramite cementazioni, le tre falde tra loro.
7	Long Island, New York (TROISI, 1996)	Acquifero caratterizzato dalla presenza di materiale sedimentario non consolidato che si estende fino ad una profondità di 600 metri.	Un sovrasfruttamento delle acque sotterranee, accompagnato da una diminuzione della ricarica per la realizzazione di un sistema di canali artificiali di drenaggio, ha determinato, intorno alla metà degli anni trenta, un abbassamento della superficie piezometrica, nella zona occidentale, fino a 10 metri sotto il livello del mare, causando un'elevata intrusione marina.	Il fenomeno è stato controllato con una diminuzione delle portate di pompaggio e con una ricarica attuata rimettendo in falda, dopo l'uso, l'acqua pompata dai pozzi industriali. Inoltre, in una zona posta più ad Est (Nassau County), per prevenire il fenomeno dell'intrusione marina, si è provveduto alla realizzazione di bacini di infiltrazione e di barriere di iniezione, utilizzando acque reflue depurate e trattate.
8	Kahului, Hawaii (TROISI, 1996)	Acquifero costituito da depositi sedimentari incoerenti poggiati su lava basaltica.	La falda di acqua dolce presenta uno spessore medio pari a circa 24 m e galleggia su acqua di mare. Le fluttuazioni del livello del mare, dovute alle maree, vengono risentite anche dalla superficie freatica, che si trova a circa 0,60-1,50 metri sul livello del mare.	Allo scopo di controllare l'invasione dell'acqua salata nella falda è stato realizzato un bacino di raccolta delle acque di pioggia e quattro pozzi di emungimento di acqua salata ed infiltrazione. Si è quindi realizzato un sistema idraulico che prevede l'emungimento di acqua salata da un pozzo profondo ed immissione della stessa, dopo trattamento, in falda tramite un pozzo di ricarica.
9	Paesi Bassi, lungo la costa occidentale del Mar del Nord (STAKELBEEK, 1999)	Acquifero sabbioso con tetto posto ad una profondità variabile tra 50 e 100 metri sotto il livello del mare. L'acquifero è delimitato alla base da un sottile strato di argilla.	Al di sotto delle argille che delimitano inferiormente l'acquifero si ha il passaggio all'acqua salmastra. L'ingresso marina avviene anche dall'alto, essendo l'acquifero disposto sotto il livello del mare.	Per consentire l'approvvigionamento idrico sotto livelli qualitativi accettabili è stato adottato un sistema costituito da pozzi di estrazione e pozzi di immissione.

10	Area dunale tra Katwijk e Hague (Paesi Bassi) (KORTLEVE & VAN GERVEN, 1998)	Acquifero costituito da sabbia grossolana confinato tra due strati di argilla. Al di sotto dello strato argilloso più profondo è presente acqua sotterranea salata.	L'acquifero sabbioso contiene una falda di acqua dolce interessata dal fenomeno dell'intrusione marina a causa delle acque salate presenti in profondità. La falda è oggetto di sfruttamento dal 1887.	Dal 1940 si adottano politiche per contrastare l'intrusione marina che provoca la salificazione delle acque estratte. È stata realizzata la ricarica artificiale dell'acquifero attraverso degli stagni (letti) di spandimento. Attualmente la capacità complessiva del sistema di ricarica artificiale è di circa 24 Mmc/anno, a fronte di circa 1Mmc/anno di acqua estratta. È stato realizzato inoltre un programma di ricarica dell'acquifero con l'impiego di pozzi profondi di ricarica e di spurgo in modo tale da garantire sempre un surplus di ricarica che eviti il sollevamento dell'interfaccia.
11	Isola di Texel, Paesi Bassi (OUDE ESSINK, 2000)	Acquifero costiero costituito da depositi quaternari.	L'acqua dolce di falda è stata rilevata a circa 50 m sotto il livello del mare, in corrispondenza di dune sabbiose. L'intrusione marina avviene dall'alto ed è stata individuata in prossimità di polder.	Sono state eseguite simulazioni numeriche atte a determinare le condizioni qualitative e quantitative della falda per un arco temporale pari a 500 anni. I risultati conseguiti indicano che il fenomeno dell'intrusione marina nei secoli futuri sarà rilevante.
12	Grimsby, Regno Unito (EVANS <i>et alii</i> , 1979)	Acquifero calcareo ubicato in prossimità dell'estuario del fiume Humber.	Nel 1962 sono stati misurati carichi piezometrici sotto il livello mare. Misure di salinità condotte hanno indicato la presenza di un cuneo di acqua marina estesa fino a 2,5 km nell'entroterra a partire dalla linea di costa.	Al fine di ridurre l'intrusione marina sotto i pozzi in emungimento e per limitare l'avanzamento dell'intrusione marina, è stato proposto di utilizzare dei pozzi muniti di due pompe, una in profondità che preleva acqua salata, l'altra superficiale che preleva l'acqua dolce di falda.
13	Brighton, Regno Unito (JONES & MEMON, 1977)	Acquifero di natura calcarea permeabile per fratturazione di spessore pari a circa 300 m che si estende lungo la costa meridionale dell'Inghilterra, su di un'area approssimativamente pari a 60 x 10 km.	Benché l'acquifero risulti avere una potenza di circa 300 m, la zona satura attraverso la quale si verifica il flusso sotterraneo è di circa 100 metri, secondo quanto dedotto da indagini geofisiche. L'intrusione marina è concentrata in corrispondenza di un limitato numero di orizzonti fessurati, ove avviene il mescolamento di acqua dolce con quella salata.	Al fine di comprendere i meccanismi secondo i quali avviene la intrusione marina nell'acquifero fessurato è stata avviata una campagna di indagini attraverso la perforazione di una serie di pozzi di osservazione parallelamente alla costa occidentale di Brighton, con misure di livelli d'acqua e salinità. Le indagini eseguite fanno parte di un più ampio programma avviato al fine di stimare le reali risorse della falda e determinare quindi delle efficienti politiche di gestione delle acque sotterranee.
14	Dashte-Naz, Iran (TROISI, 1996)	Acquifero multistrato costituito da un'alternanza di strati sabbiosi, sede degli acquiferi, e di strati limosi argillosi.	I vari livelli acquiferi contengono falde superficiali, mentre in profondità è presente una falda artesianica presentante elevata concentrazione salina a causa dell'intrusione marina ad opera del Mar Caspio. Le falde superficiali sono oggetto di intrusione marina sia per cause naturali sia a causa degli elevati emungimenti.	Sono stati realizzati 9 pozzi di immissione equidistanti fra di loro, su un allineamento di 200 metri e, a monte di questi, 5 pozzi di emungimento per l'approvvigionamento irriguo dell'area. La ricarica avviene durante le stagioni non irrigue. I pozzi di ricarica sono stati settorializzati mediante <i>packer</i> , al fine di evitare miscelamenti fra le tre falde presenti e ricaricarle, così, singolarmente. Dopo 9 mesi di ricarica l'innalzamento della superficie di falda era risultato di 9 metri. La registrazione automatizzata della salinità, dei livelli e delle portate ha permesso un controllo in tempo reale dell'impianto.
15	Reggio Calabria, Italia (TROISI, 1994)	Acquifero nei pressi della fiumara del Calopinace.	Il fabbisogno idrico di Reggio Calabria, per l'assenza quasi totale di acque superficiali o sorgentizie perenni, viene soddisfatto prevalentemente dalla risorsa idrica sotterranea. Questo sovrasfruttamento della falda ha determinato un forte abbassamento piezometrico con conseguente intrusione dell'acqua marina. In corrispondenza della fiumara del Calopinace la superficie piezometrica appare praticamente sub-orizzontale e la concentrazione salina in alcuni punti è superiore ai 500 ppm.	Sono state eseguite delle simulazioni numeriche al fine di valutare l'efficacia di tre diversi schemi di intervento. I risultati delle simulazioni dei tre diversi schemi sono stati confrontati con uno schema definito di "riferimento", relativo alla sola sospensione degli emungimenti senza ulteriori interventi complementari. La migliore soluzione, ovvero quella che prevede il tempo di risanamento minimo, è risultata essere mista: barriera di estrazione combinata alla ricarica artificiale.

16	Augusta, Italia (AURELI, 1983)	Acquifero calcareo ubicato lungo la costa orientale della Sicilia, compresa tra Augusta e Siracusa. Poggianti sull'acquifero si rinvencono rocce vulcaniche, calcareniti ed argille plio-pleistoceniche. Queste ultime, localmente, sovrastano i calcari anche oltre la linea di costa, determinando una naturale protezione dall'intrusione marina.	Negli anni '60 la zona era quasi interamente adibita alla coltivazione degli agrumi. In seguito l'area è stata interessata da un notevole sviluppo industriale che ha determinato una crescente richiesta di acqua ed un sempre crescente numero di pozzi. A seguito di ciò è stato registrato un abbassamento generalizzato del livello piezometrico al di sotto del livello del mare, sino a valori dell'ordine dei 70 metri. Detta distribuzione dei carichi piezometrici presso costa è stata possibile grazie alla naturale protezione dall'intrusione marina determinata dai depositi argillosi che coprono l'acquifero oltre la linea di costa. Il notevole abbassamento piezometrico ha però determinato fenomeni di subsidenza ed intrusione marina dalle aree ove l'acquifero non risulta protetto dai depositi argillosi.	È stato studiato un campo sperimentale per realizzare la ricarica artificiale dell'acquifero attraverso tredici pozzi che iniettano circa 350 l/s di acqua del fiume Simeto preventivamente trattata in un impianto chiarificatore. È stato anche previsto un sistema di monitoraggio delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque di falda.
17	Fujairah, Emirati Arabi Uniti (BRUNKE & SCHELKES, 1998)	Acquifero costituito da depositi sabbiosi e ghiaiosi delimitato lateralmente ed alla base da roccia ofiolitica scarsamente permeabile.	Negli ultimi venticinque anni la quantità di acqua dolce estratta dall'acquifero ha superato il volume di acqua di ricarica naturale della falda e il fenomeno dell'intrusione marina ha avuto un notevole incremento. Ciò ha causato la salsificazione dell'acqua di falda e il conseguente abbandono di numerosi pozzi di emungimento superficiali posti nelle vicinanze della linea di costa.	Nel 1989 è stata costruita una diga in corrispondenza della piana costiera, sia al fine di proteggere l'area a valle da eventuali inondazioni sia al fine di incrementare la ricarica dell'acquifero presente al di sotto del Wadi Ham. È stato possibile stimare gli effetti di detta diga attraverso simulazioni numeriche.
18	Chekka, Libano (BRUNKE & SCHELKES, 1998)	Acquifero carsico Cenomaniano-Turoniano esistente al di sotto delle montagne del Libano nell'area nord-occidentale. Nella zona della piana costiera vicino Chekka l'acquifero è coperto da uno strato di calcare marnoso Santonian-Maastrichtiano, la cui potenza varia da 100 fino a 300 metri.	Le sorgenti sottomarine ubicate nei pressi di Chekka nella regione costiera del Libano (Mar Mediterraneo), forniscono una delle più elevate e note portate sottomarine di acqua dolce di falda che fluisce nel Mar Mediterraneo. La portata stimata, infatti, è dell'ordine dei 120÷350 Mmc/anno e presenta comunque forti fluttuazioni a causa delle notevoli variazioni stagionali della ricarica naturale in corrispondenza delle montagne del Libano. È possibile osservare, infatti, la riduzione o la cessazione della quantità di acqua che fluisce da alcune sorgenti nel periodo estivo in seguito ad una riduzione negli apporti meteorici. L'intrusione marina è condizionata dal netto contrasto esistente tra l'inverno piovoso e l'estate arida.	Sono state eseguite delle simulazioni numeriche al fine di determinare i valori accettabili di portata prelevabile dall'acquifero. I calcoli eseguiti hanno consentito di comprendere il complesso comportamento dinamico del sistema acqua dolce - acqua salata, e le influenze esercitate dagli emungimenti.
19	Campo de Dalias, Almeria, Spagna (DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000)	Acquifero carbonatico (AIN) tra i più importanti della catena montuosa della Sierra de Gador e della stessa piana costiera di Campo de Dalias.	Lo sfruttamento indiscriminato per scopi irrigui e potabili ha determinato la riduzione della portata effluente dalle sorgenti costiere di Aquadulce, fino al loro esaurimento, un abbassamento piezometrico pari a circa 4-5 m, ed un avanzamento dell'acqua marina lungo gli affioramenti costieri dell'AIN, con il conseguente abbandono di pozzi di emungimento presenti nella zona e la realizzazione di nuovi pozzi ubicati in aree più interne.	L'acquifero presenta una notevole rilevanza per lo sviluppo socio-economico dell'area in esame, per cui il I.T.G.E. (Istituto Tecnológico Geominerario de Espana) ha realizzato un progetto di monitoraggio della falda. La gestione dell'acquifero per uno sfruttamento sostenibile delle acque sotterranee necessita ancora di ulteriori studi, indagini e di una nuova rete di monitoraggio della falda.

ID	Luogo	Acquiferi coinvolti	Descrizione	Rimedio
20	Israele, fascia costiera ampia 0,1-2 km che si sviluppa per 120 km tra le città di Binyamina, Hadera e Ashqelon (MELLOUL & ZEITOUN, 1999)	Acquifero costiero, bordato alla base da argille e scisti del Neogene, composto da una matrice di arenarie del Pleistocene e arenarie calcaree, con intercalazioni di limi e lenti argillose. Tali lenti o livelli argillosi si estendono verso Est e suddividono entro i 5 km dal mare l'acquifero in tre sub-acquiferi.	Ciascuno dei tre acquiferi è interessato da intrusione marina in misura diversa a seconda delle caratteristiche del mezzo, dei processi di alimentazione della falda e dei prelievi in atto. Per avere un'idea degli emungimenti in atto nell'area si consideri che a ridosso degli anni 2000 il prelievo delle acque di falda dai circa 3000 pozzi ammontava a 350-400 Mmc/anno, per una densità risultante di 10-12 pozzi/Kmq ed una portata media per singola opera di captazione pari a 4,3 l/s. Nelle aree più vicine alla costa, dove l'intrusione marina ha già significativamente alterato la qualità delle acque sotterranee, la concentrazione dello ione cloruro supera i 1000 mg/l con incrementi annui maggiori di 10 mg/l.	Al fine di favorire un bilancio idrico positivo, Israele intraprende politiche volte alla riduzione delle perdite del sistema idrico e promuove l'utilizzo delle acque di falda per l'approvvigionamento potabile piuttosto che per l'irrigazione. L'acquifero costiero, le cui acque di alimentazione provengono dalle piogge e dall'acqua che percola grazie alle attività agricole, industriali e domestiche, viene anche ricaricato artificialmente (talvolta con acque reflue trattate) in alcune particolari aree dal <i>National Water Carrier</i> , ente che garantisce un uso efficiente delle risorse idriche e la regolamentazione della fornitura d'acqua nel paese. Al fine di migliorare la rete di monitoraggio ha adottato un metodo semi-empirico per valutare l'evoluzione dell'intrusione marina attraverso l'analisi accoppiata di misure dirette <i>in situ</i> ed indagini geofisiche come il metodo geo-elettromagnetico TDEM (<i>Time-domain electromagnetic</i>). Quest'ultimo consente di rilevare un cambio di resistività dovuto alla presenza di acqua marina nell'acquifero.

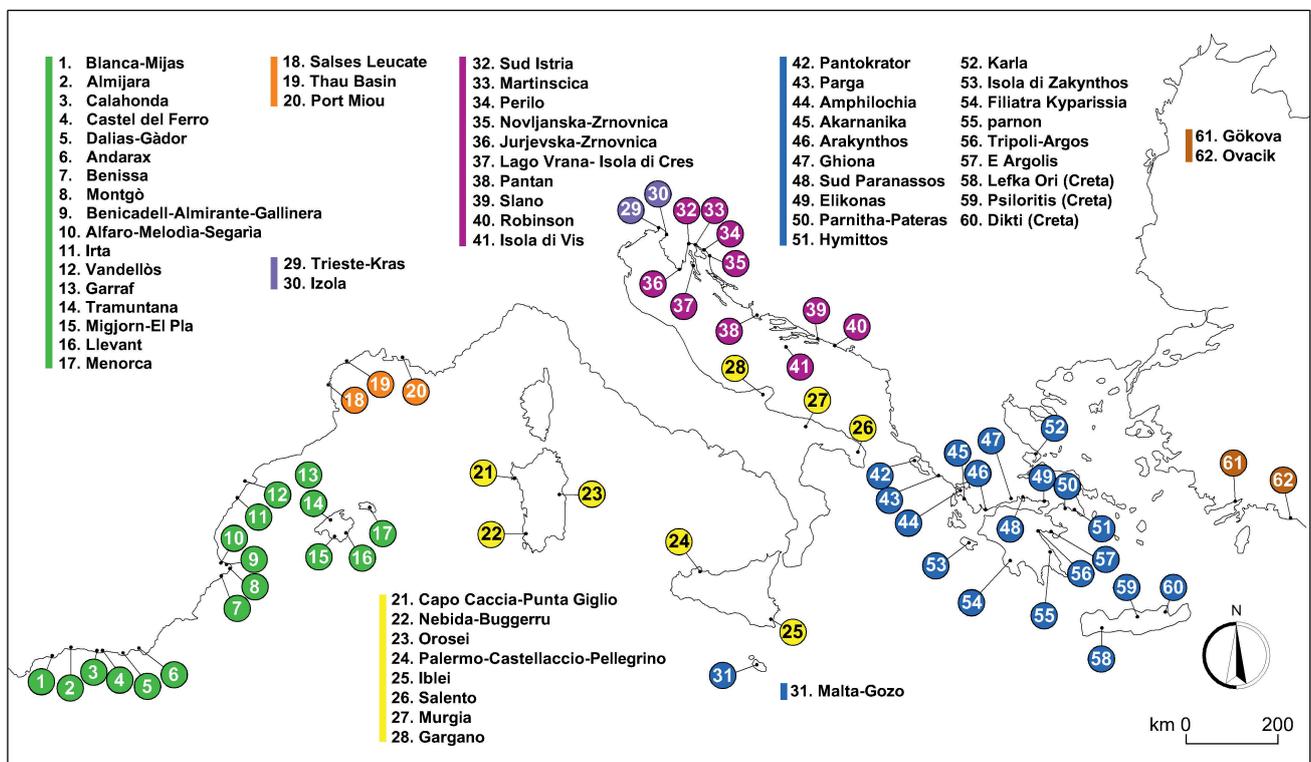


Fig. 6.9 – Ubicazione di alcuni acquiferi costieri del Sud Europa interessati dall'intrusione marina (da CALAFORRA *et alii*, 2005).
 – Location of coastal aquifers affected by seawater intrusion in southern Europe (from CALAFORRA *et alii*, 2005).

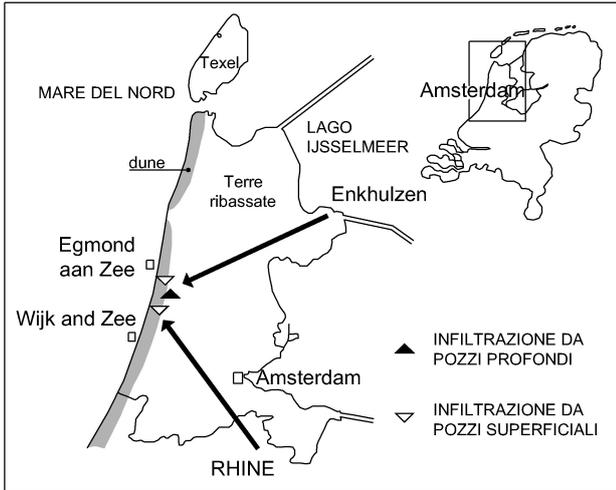


Fig. 6.10 - Intrusione marina nei Paesi Bassi e tecniche di protezione – Ubicazione dei pozzi di infiltrazione e percorso delle acque di superficie pre-trattate (da STAKELBEEK, 1999).

- *Seawater intrusion in the Netherlands and protection techniques – Location of the deep infiltration wells and pathways of the pre-treated surface waters (from STAKELBEEK, 1999).*

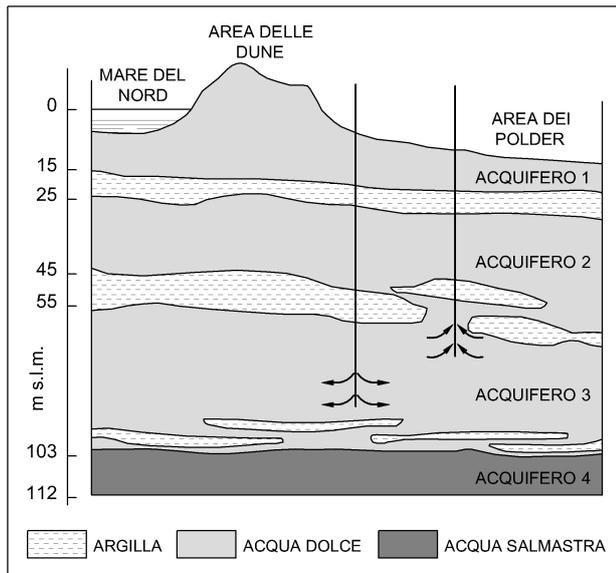


Fig. 6.11 – Intrusione marina nei Paesi Bassi e tecniche di protezione – Sezione idrogeologica schematica dell'acquifero interessato dal sistema di infiltrazione (da STAKELBEEK, 1999).

- *Seawater intrusion in the Netherlands and protection techniques – Hydro-geological section of the aquifer affected by the deep-well infiltration plant (from STAKELBEEK, 1999).*

sario adottare un'eccedenza del 10% circa del volume infiltrato nei pressi delle stazioni di estrazione situate ai bordi del campo pozzi. In queste condizioni il massimo abbassamento della isoalina 10 g/l è stato individuato nella zona centrale del campo pozzi, ed è risultato pari a 5 m rispetto alla sua posizione iniziale; infatti esso tende a ridursi man-

mano che ci si allontana dall'area centrale, e tende ad annullarsi lungo i bordi del campo pozzi e in prossimità dei pozzi di estrazione. I calcoli numerici derivati da un modello tridimensionale con interfaccia netta in condizioni stazionarie hanno indicato, inoltre, che la disposizione a rombo adottata per il posizionamento dei pozzi è la migliore possibile per prevenire il sollevamento dell'acqua di mare; il calcolo ha evidenziato in particolare che lo schema ha il vantaggio di aver bisogno di un minore surplus di acqua di infiltrazione rispetto a quello richiesto da disposizioni alternative dei pozzi.

L'ipotesi di considerare l'interfaccia netta non permette però di ottenere informazioni sul comportamento della zona di transizione, specie sul movimento dell'acqua di falda che presenta una concentrazione salina non trascurabile. Considerando, infatti, i fenomeni di dispersione è da attendersi la presenza di un sollevamento della zona di transizione lungo i bordi del campo pozzi, in prossimità dei pozzi di emungimento (fig. 6.13). Il monitoraggio della concentrazione salina dell'acqua di falda è stato poi eseguito per individuare l'effettiva posizione assunta dalla zona di transizione presente nell'acquifero. A questo scopo sono stati installati, nei pozzi di estrazione e in quelli di iniezione, degli elettrodi al di sotto dei filtri (fig. 6.14). L'individuazione della zona di transizione è avvenuta attraverso la misura della conducibilità elettrica dell'acqua di falda in corrispondenza di varie coppie di elettrodi disposte ad intervallo di 4 metri a varie profondità lungo il cavo elettrico.

Prima di avviare il programma d'iniezione d'acqua nell'acquifero dal campo pozzi, che ha avuto inizio nel 1990, la concentrazione salina della falda aumentava con la profondità. La isoalina corrispondente a 200 mg/l, disposta ad una profondità dell'ordine 50÷100 m sotto il livello del mare, aveva un andamento approssimativamente orizzontale, come rappresentato nella figura 6.15. Nella stessa figura è tracciata la distribuzione della concentrazione dello ione cloruro dell'acqua di falda dopo tre anni di contemporanee iniezioni ed emungimenti di acqua, con un surplus di infiltrazione del 10%. È possibile osservare che durante questo periodo di esercizio del campo pozzi, è stato possibile immagazzinare nell'acquifero, in particolare

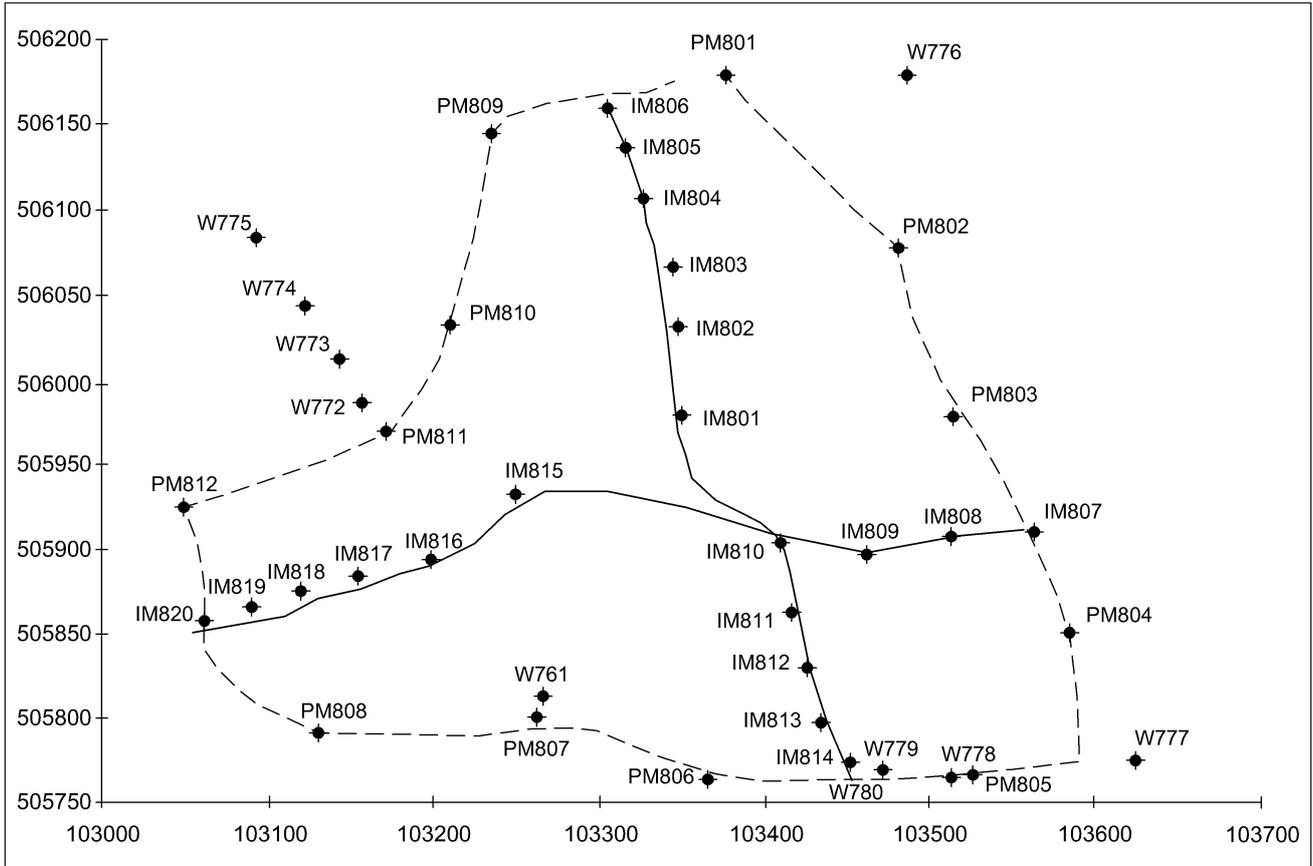


Fig. 6.12 - Intrusione marina nei Paesi Bassi e tecniche di protezione. Disposizione dei pozzi profondi di infiltrazione (IM), dei pozzi di estrazione (PM) e dei pozzi di osservazione (W) (da STAKELBEEK, 1999).

- Seawater intrusion in the Netherlands and protection techniques - Layout of deep infiltration wells (IM), abstraction wells (PM) and observation wells (W) (from STAKELBEEK, 1999).

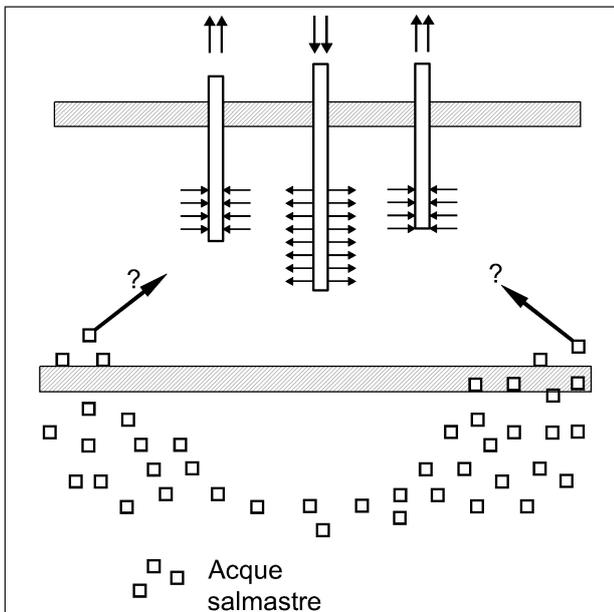


Fig. 6.13 - Intrusione marina nei Paesi Bassi e tecniche di protezione. Risalita di acque salmastre ai bordi del campo pozzi di iniezione determinata dall'emungimento (da STAKELBEEK, 1999).

- Seawater intrusion in the Netherlands and protection techniques. Uprising of brackish groundwater at the boundaries of the injection well-field, due to water abstraction (from STAKELBEEK, 1999).

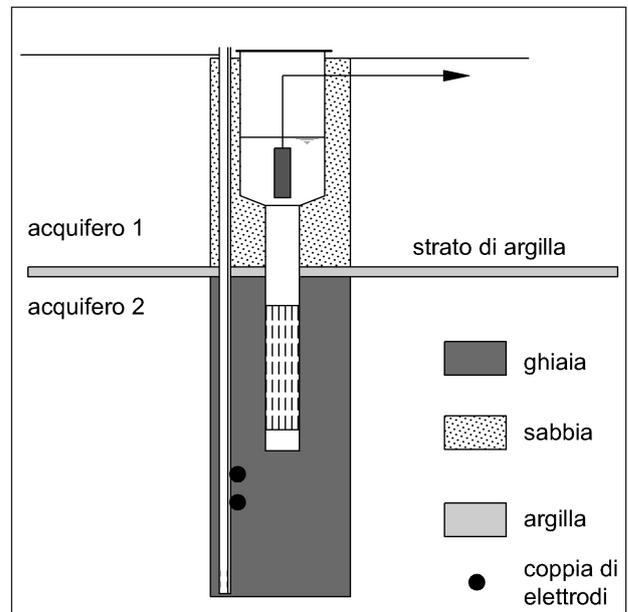


Fig. 6.14 - Intrusione marina nei Paesi Bassi e tecniche di protezione. Pozzo di estrazione monitorato con elettrodi installati al di sotto del filtro (da STAKELBEEK, 1999).

- Seawater intrusion in the Netherlands and protection techniques. Abstraction well monitored by an electrode positioned below the well filter (from STAKELBEEK, 1999).

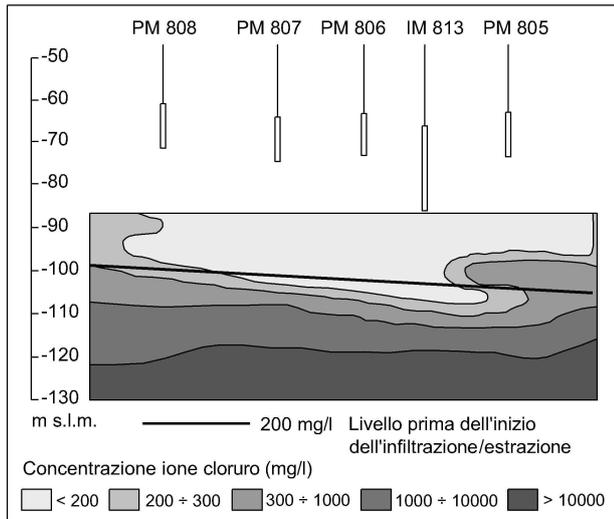


Fig. 6.15 – Intrusione marina nei Paesi Bassi: posizione della zona di transizione acqua dolce-acqua di mare dopo 3 anni di contemporanea infiltrazione ed emungimento con 10% di surplus di infiltrazione e indicazione della isoclorica 200 mg/l iniziale (da STAKELBEEK, 1999).

– *Seawater intrusion in the Netherlands: location of the fresh water-salt water transition zone after three years of simultaneous infiltration and abstraction with 10% surplus of infiltration, and indication of the initial 200 mg/l iso-chloride line (from STAKELBEEK, 1999).*

nella zona centrale del campo pozzi vicino ai pozzi di infiltrazione, una significativa quantità di acqua dolce. Tale surplus di acqua può essere impiegato nei periodi di maggiore richiesta idrica o quando la qualità dell'acqua superficiale non è tale da poter essere utilizzata nei processi di infiltrazione. Gli esperimenti condotti hanno però mostrato che il volume di acqua immagazzinato, necessario per prevenire il sollevamento dell'acqua di mare, non può essere impiegato completamente, come potrebbe essere necessario in periodi di calamità naturali, quando si deve interrompere l'iniezione ma non gli emungimenti. Si è osservato, infatti, che una certa quantità d'acqua, pari a circa il 20÷40% di quella immagazzinata, va comunque perduta. Inoltre, il periodo durante il quale è possibile continuare ad emungere acqua, senza che si debba adottare il simultaneo processo di iniezione, è legato alla durata del precedente periodo in cui si adotta il surplus di infiltrazione. Ad esempio, nel caso in esame, dopo cinque anni di emungimento e contemporanea iniezione con un surplus di infiltrazione pari al 10%, gli esperimenti condotti hanno dimostrato che è possibile continuare ad emungere acqua per tre mesi, senza che si attui la contemporanea infiltrazione. In questo breve pe-

riodo, infatti, non si presenterebbero grossi problemi di sollevamento dell'interfaccia. In definitiva, il sistema dei pozzi profondi di infiltrazione può essere considerato un utile strumento per garantire l'approvvigionamento idrico potabile, anche in caso di calamità naturali, e là dove non si possa continuare ad immettere acqua in falda, ma solo per periodi di tempo limitati.

6.3.2. - Intrusione marina ad Augusta (Sicilia – Italia)

Lungo la costa orientale della Sicilia, tra Augusta e Siracusa (fig. 6.16), è presente un'ampia zona pianeggiante che fino alla metà degli anni Sessanta è stata quasi interamente adibita alla coltivazione

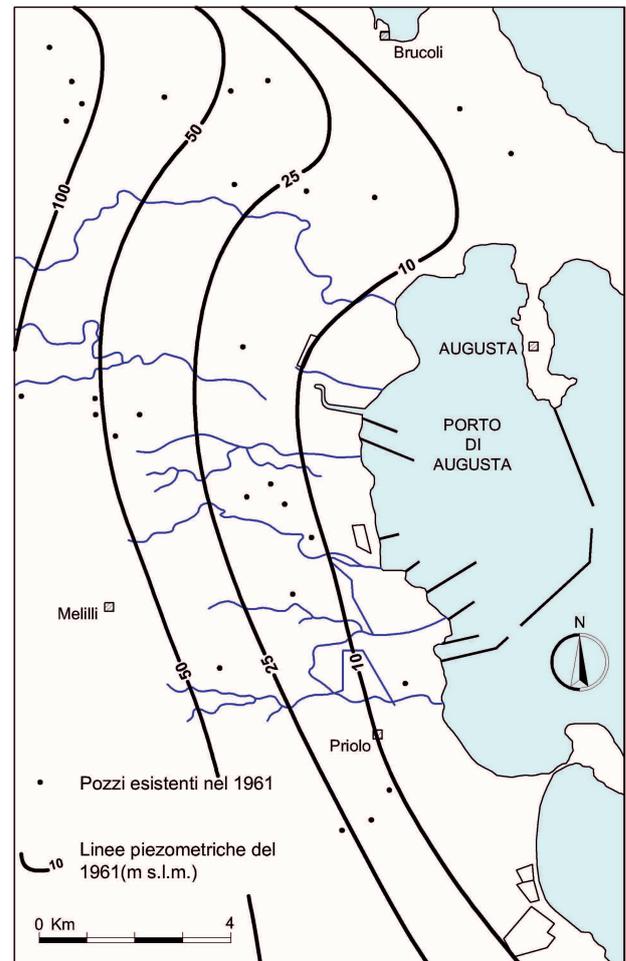


Fig. 6.16 – Intrusione marina in Sicilia. Area di studio compresa tra Augusta e Siracusa, posizionata lungo la costa orientale della Sicilia, con indicazione dei pozzi esistenti e delle linee piezometriche relative all'anno 1961 (da AURELI, 1983).

– *Seawater intrusion in Sicily. Study area between Augusta and Siracusa, eastern Sicilian coast, with indication of the existing wells and the piezometric lines for the year 1961 (from AURELI, 1983).*

degli agrumi. In seguito la zona è stata oggetto di notevole sviluppo industriale, avvenuto purtroppo senza alcun tipo di programmazione. La crescente richiesta di acqua, fronteggiata facendo ricorso alle risorse idriche sotterranee, ha quindi determinato un graduale e crescente depauperamento della risorsa idrica stessa (AURELI, 1983).

La falda oggetto di sfruttamento è quella contenuta nell'acquifero calcareo, sottostante a rocce vulcaniche, calcareniti e depositi argillosi. Questi ultimi, in alcune zone dell'area, sovrastano i calcari anche oltre le linea di costa (fig. 6.17). Le quantità d'acqua estratte dall'acquifero per fini potabili, agricoli e industriali, sono progressivamente aumentate dagli anni Sessanta agli Ottanta raggiungendo valori di $60 \div 65 \text{ Mm}^3$. Il volume totale di acqua emunta dalle riserve tra il 1960 e il 1980 è risultato di $100 \div 120 \text{ Mm}^3$, registrando, per parecchi anni, un deficit idrico tra la quantità complessiva di acqua estratta e la ricarica naturale dell'acquifero pari a circa 10 Mm^3 .

Una delle conseguenze più evidenti di tale sovrassfruttamento della falda è il notevole abbassamento generalizzato del livello piezometrico, sceso a pro-

fondità dell'ordine di diverse decine di metri sotto il livello del mare, ad indicare la quasi totale scomparsa delle risorse idriche sotterranee preesistenti.

In figura 6.18, sono state riportate le variazioni dei livelli piezometrici registrate nel 1981 rispetto a quelli misurati negli anni '60. È possibile osservare che, ove la densità dei pozzi è maggiore, ossia in prossimità del Porto di Augusta, il livello piezometrico della falda ha raggiunto profondità dell'ordine di 70 m al di sotto del livello mare, portando alla formazione di una morfologia della superficie piezometrica caratterizzata da un vero e proprio foro a forma di cono rovescio (fig. 6.17). La formazione di questa distribuzione dei carichi piezometrici entro costa, caratterizzata da notevoli depressioni sotto il livello del mare, è stata raggiunta a causa di un particolare assetto idrogeologico, caratterizzato dalla presenza, sopra l'acquifero, di depositi argillosi plio-pleistocenici, che sovrastano i calcari anche in mare. Tale strato impermeabile impedisce, di fatto, l'ingressione di acqua di mare nel continente anche sotto condizioni di notevole depauperamento, come quelle appena evidenziate. I depositi argillosi presentano

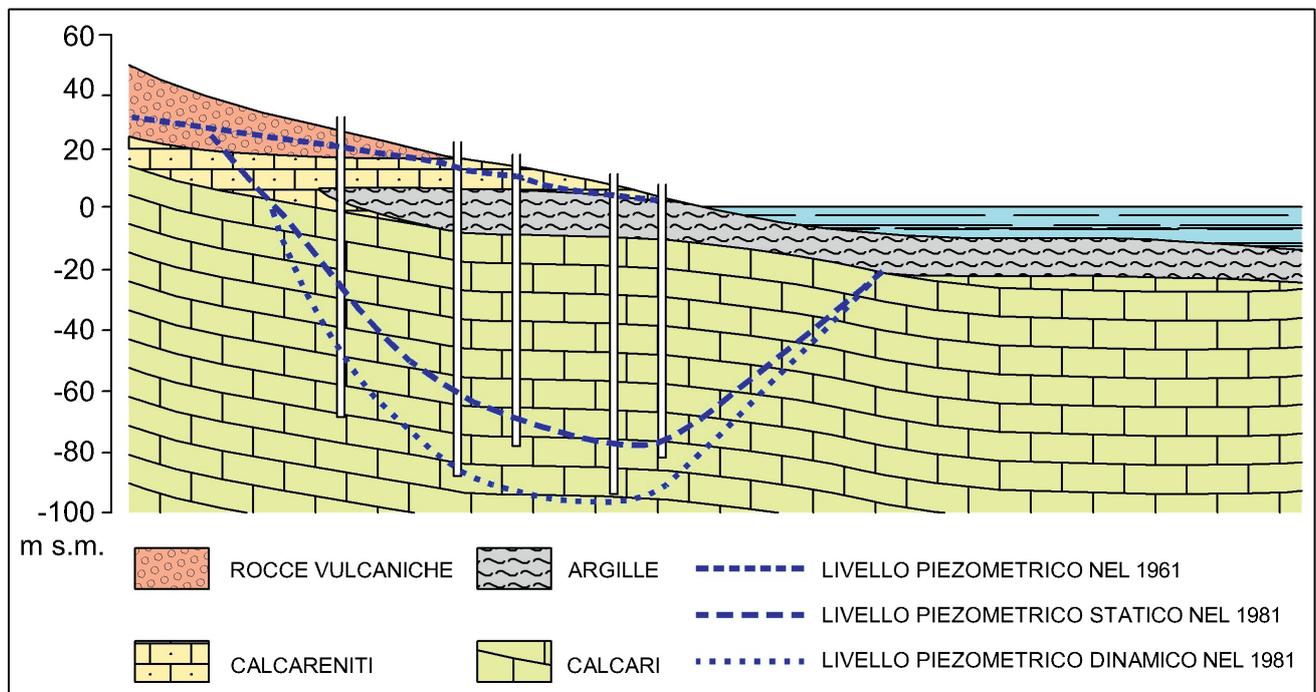


Fig. 6.17 – Intrusione marina in Sicilia. Sezione idrogeologica schematica con indicazione del cono rovescio indotto sulla superficie piezometrica dagli emungimenti attuati nell'area di studio compresa tra Augusta e Siracusa (da AURELI, 1983).

– Seawater intrusion in Sicily. Schematic hydro-geological section with indication of the cone of the piezometric surface caused by pumping in the study area between Augusta and Siracusa (from AURELI, 1983)

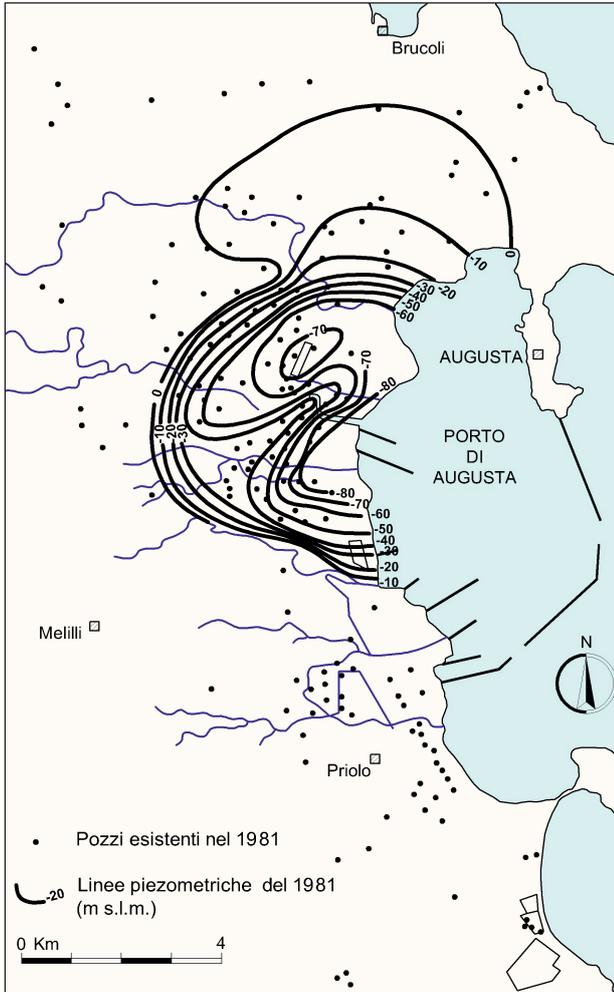


Fig. 6.18 – Intrusione marina in Sicilia. Area di studio compresa tra Augusta e Siracusa, posizionata lungo la costa orientale della Sicilia con indicazione dei pozzi esistenti e delle linee piezometriche relative all'anno 1981 (da AURELI, 1983).

– *Seawater intrusion in Sicily: study area between Augusta and Siracusa, along the eastern Sicilian coast, showing location of the existing wells and of the 1981 piezometric lines (from AURELI, 1983).*

però modesta estensione, sicché l'acqua di mare tende ad aggirare l'ostacolo e a dirigersi verso il cono determinato nella superficie piezometrica (fig. 6.19).

Il rischio che l'acquifero possa essere totalmente invaso da acque marine e la presenza di fenomeni di subsidenza nell'area in esame, hanno spinto le autorità ad intervenire, individuando le migliori tecniche di intervento per impedire l'estensione di questi fenomeni e ricreare le condizioni originarie dell'acquifero.

Si è studiato un campo sperimentale per realizzare la ricarica artificiale dell'acquifero attraverso tredici pozzi per l'immissione in falda di circa 350

l/s di acqua del fiume Simeto, preventivamente trattata in un impianto chiarificatore e si è previsto un sistema di monitoraggio delle caratteristiche chimico - fisiche delle acque di falda.

6.3.3. - *Intrusione marina nella parte Nord-orientale dell'acquifero carbonatico di Campo de Dalias, Almeria - Spagna*

Il Campo de Dalias è un'area costiera pianeggiante ubicata nella parte Sud-occidentale della provincia dell'Almeria, nel Sud-Est della Spagna, caratterizzata da un clima semiarido (fig. 6.20), (DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000). In particolare, la quantità media annua di pioggia che cade nella

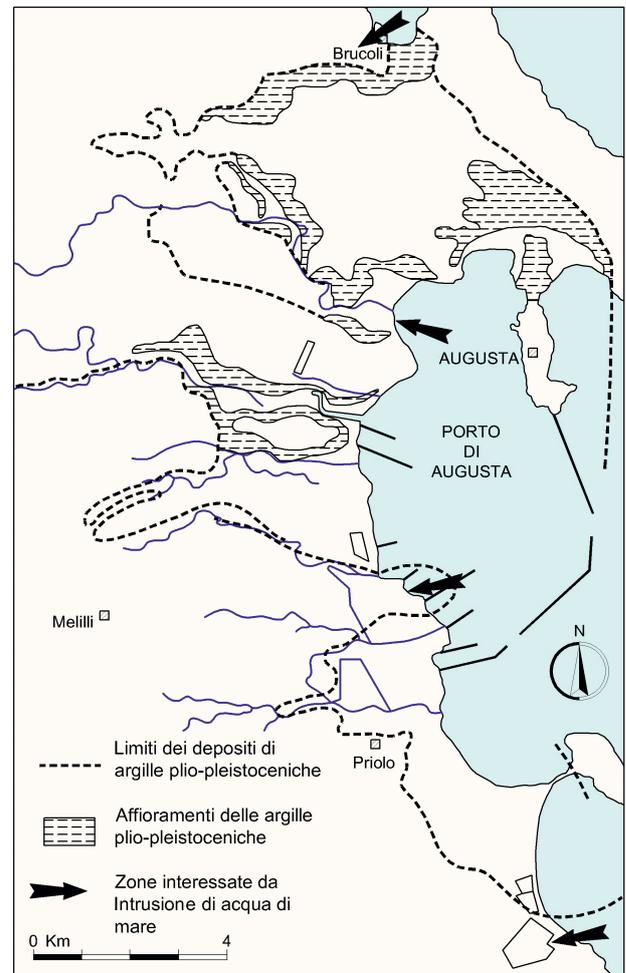


Fig. 6.19 – Intrusione marina in Sicilia. Ingressione dell'acqua di mare nell'acquifero dell'area di studio compresa tra Augusta e Siracusa influenzata dall'assetto stratigrafico dell'area (da AURELI, 1983).

– *Seawater intrusion in Sicily. Ingression of seawater into the aquifer of the study area between Augusta and Siracusa, influenced by the local stratigraphic setting (from AURELI, 1983).*

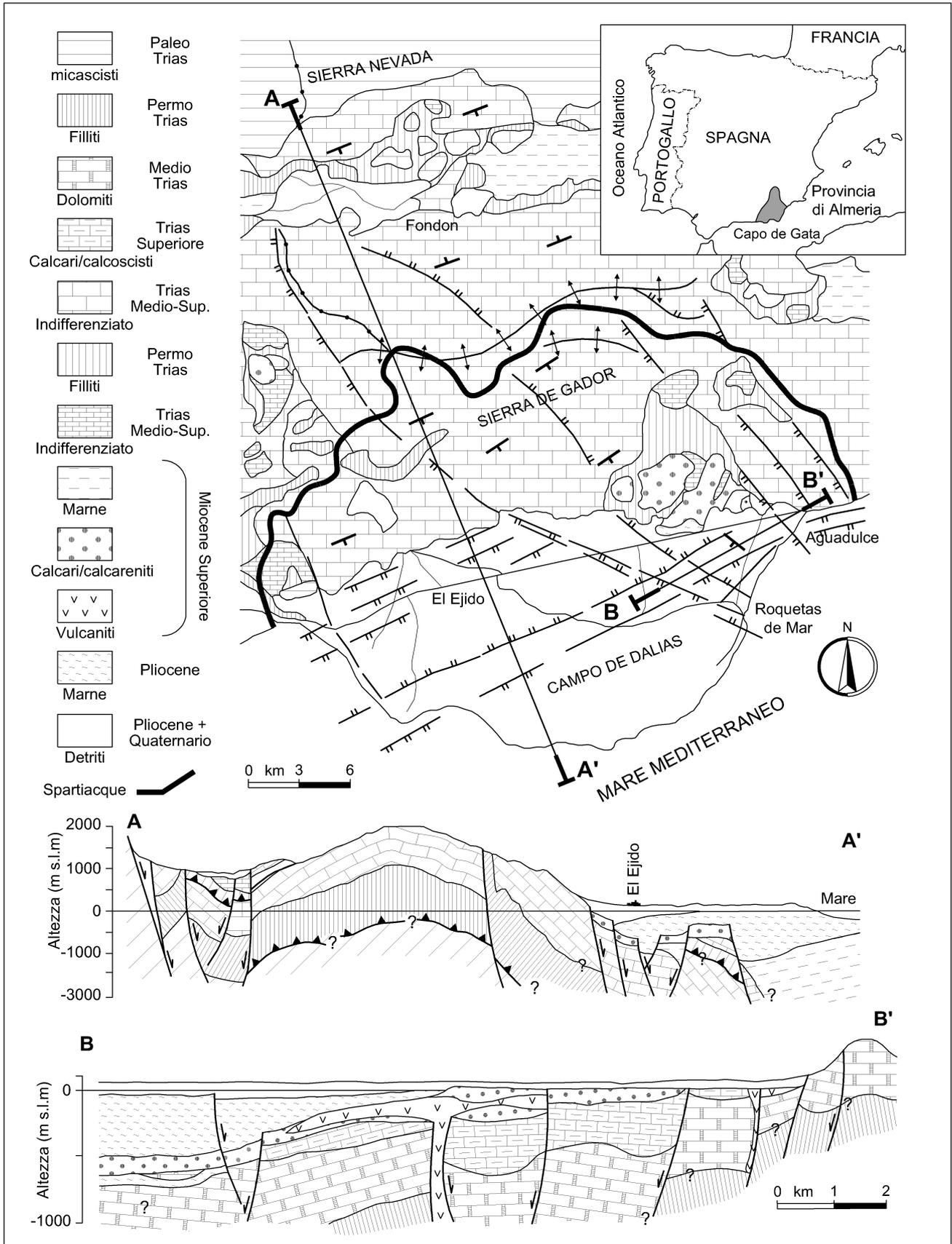


Fig. 6.20 – Intrusione marina in Spagna. Carta geologica semplificata di Sierra de Gador e relative sezioni stratigrafiche (da DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000).
 – Seawater intrusion in Spain. Simplified geological map of Sierra de Gador and related stratigraphic profiles (from DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000).

pianura varia da un minimo di circa 150 mm, nella porzione Sud-orientale, sino a un massimo di circa 600 mm nei territori più in quota in direzione NO.

Da un punto di vista idrogeologico, la piana di Campo de Dalias è caratterizzata dalla presenza di un acquifero carbonatico tra i più importanti della porzione meridionale della catena montuosa della Sierra de Gador e della stessa piana costiera di Campo de Dalias. Il sistema acquifero garantisce globalmente circa 130 Mm³/anno di acqua per l'approvvigionamento idrico irriguo e potabile di 250.000 abitanti. La maggior parte di quest'acqua (circa 110 Mm³/a) proviene dall'acquifero carbonatico profondo costituito da una serie carbonatica del Triassico medio e superiore di circa mille metri di potenza, che poggia su materiali permo-triassici di maggiore spessore.

Data la rilevanza economica dell'acquifero profondo per lo sviluppo socio-economico dell'area, l'*Instituto Tecnológico Geominerario de España* (I.T.G.E.) ha realizzato un progetto di monitoraggio dell'acquifero, iniziato già negli anni '90. Sono stati utilizzati pozzi di emungimento, eseguite periodiche misure dell'altezza piezometrica, della portata emunta, della temperatura e della salinità delle acque di falda, e prelevati campioni d'acqua per le analisi chimiche dei principali ioni. Nell'area di Campo de Dalias, i valori di temperatura e di conducibilità elettrica rilevati, indicano la presenza, nei pozzi, di importanti correnti verticali, che influenzano le caratteristiche chimico-fisiche delle acque di falda estratte. Un esempio di tale fenomeno è rappresentato dal pozzo più profondo dell'area situata in prossimità di Aguadulce (fig. 6.20). In corrispondenza di questo pozzo, alle quote comprese tra 150 e 200 metri sotto il livello medio mare, è stata misurata una temperatura pari a circa 18°C, di gran lunga inferiore alla locale temperatura della falda più superficiale, all'incirca compresa nell'intervallo 20÷23°C (fig. 6.21). Circostanza che indica l'esistenza di porzioni di acquifero profonde molto permeabili, e che forniscono la maggior quantità dell'acqua di falda emunta. All'interno del pozzo, quindi, le formazioni permeabili sovrastanti filtrano acque relativamente più calde e meno salate verso il tratto principale del pozzo, dove si miscela con l'acqua più fredda della falda

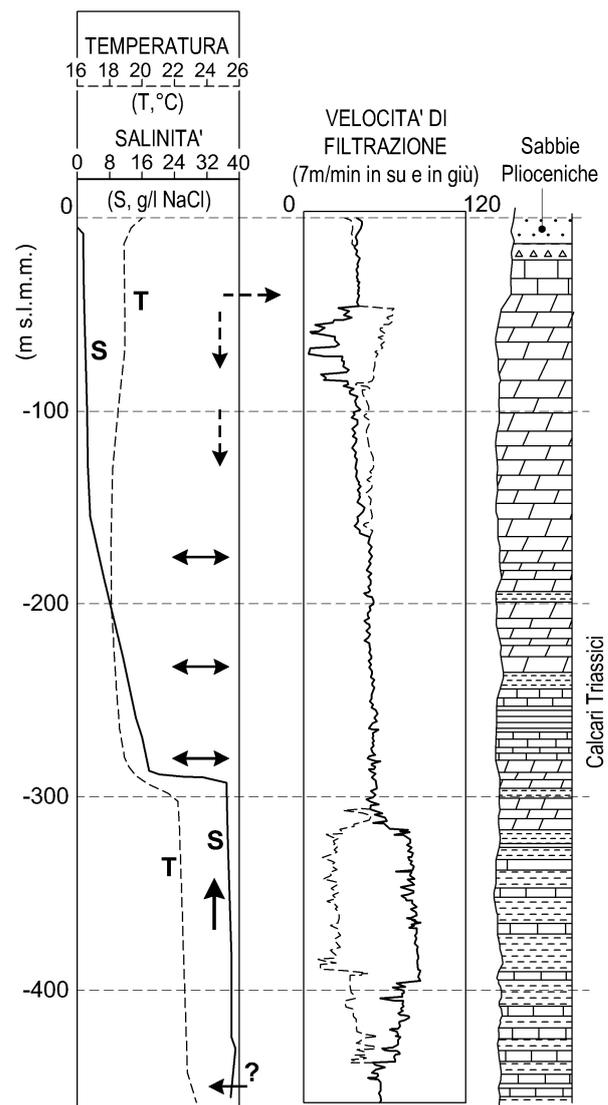


Fig. 6.21 – Intrusione marina in Spagna. Log di temperatura, salinità e velocità di filtrazione in un pozzo ubicato in località Aguadulce ed eseguito nel Luglio 1994. Le frecce indicano i flussi d'acqua nel pozzo, mentre il log di velocità di filtrazione è valutato in media (da DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000).

– *Seawater intrusion in Spain. Temperature, salinity and flow velocity logs in a well in the Aguadulce area, drilled in July 1994. Arrows indicate the water flows in the well, whilst the flow velocity log is taken as an average (from DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000).*

principale. In corrispondenza delle formazioni meno permeabili sottostanti la falda principale, le altezze piezometriche sono superiori a quelle rilevate nelle formazioni sovrastanti, il che determina un flusso verticale di acqua di falda diretto dal basso verso l'alto. Questo flusso d'acqua è però caratterizzato da notevoli concentrazioni saline e temperatura più alta, per probabile effetto del gradiente geotermico.

La ricarica naturale dell'*acquifero carbonatico profondo*, denominato *AIN*, presente nel settore Nord-orientale, è rappresentata dalla pioggia che cade a quote elevate, in corrispondenza della catena montuosa della Sierra de Gador. L'*AIN* è coperto lungo la costa da spesse formazioni marine, ad eccezione dell'angolo Nord-orientale. Proprio in corrispondenza di tale area in passato è stata rilevata la presenza di sorgenti di acqua dolce costiere che hanno dato il nome alla località (Aguadulce). Negli anni '60 l'altezza piezometrica registrata nei pozzi ubicati in tale zona era pari a circa 4-5 metri al di sopra del livello medio mare. A partire dagli anni Settanta, lo sfruttamento indiscriminato dell'acquifero carbonatico di Campo de Dalias per scopi irrigui e potabili, ha provocato un abbassamento dell'altezza piezometrica nell'intera area. In particolare, in corrispondenza dell'*AIN*, i valori piezometrici registrati a partire dal 1991 fino al 1995 (ultimo anno di misurazioni effettuato) hanno subito un abbassamento tale da portare il livello della falda profonda al di sotto del livello medio mare (fig. 6.22). Il fenomeno non è stato registrato in corrispondenza degli acquiferi superficiali presenti nelle formazioni permeabili sovrastanti l'acquifero principale *AIN*. In corrispondenza della località di Aguadulce i valori negativi di piezometria sono stati registrati a partire dal 1992 e fino al 1995. Il che ha determinato non solo l'inesorabile riduzione di portata effluente dalle sorgenti costiere di Aguadulce fino al suo completo esaurimento, ma anche un avanzamento dell'acqua marina lungo gli affioramenti costieri dell'*AIN* nel settore Nord-orientale, con conseguente incremento della conducibilità elettrica dell'acqua (fig. 6.23) sia nella falda principale che nei livelli acquiferi meno permeabili sottostanti. Il risultato è stato l'abbandono dei pozzi di emungimento presenti nella zona e la realizzazione di nuovi pozzi ubicati in aree più interne. La futura gestione dell'acquifero per uno sfruttamento sostenibile delle acque sotterranee necessita però di ulteriori studi, indagini e di una nuova rete di monitoraggio della falda, considerate le difficoltà di interpretare i risultati delle indagini condotte sui pozzi a causa della presenza di correnti verticali.

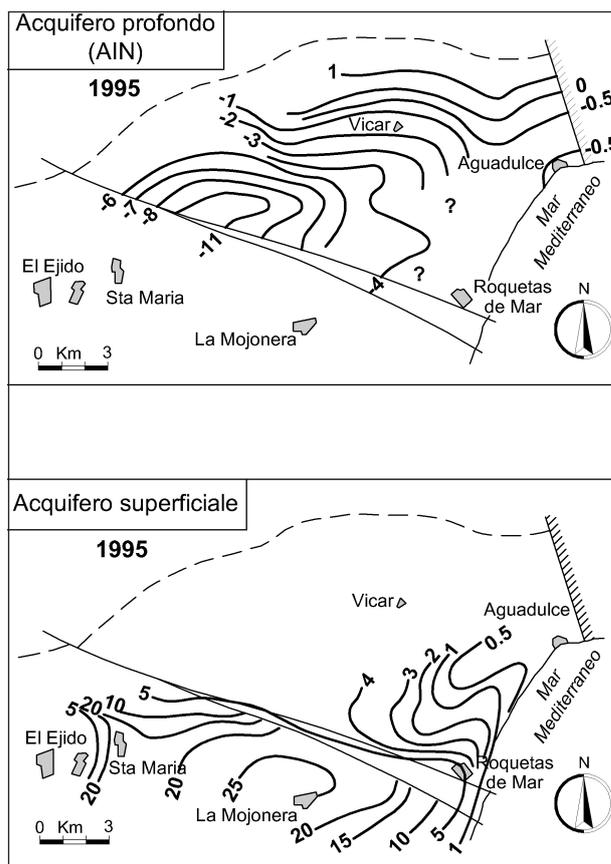


Fig. 6.22 – Intrusione marina in Spagna. Carta piezometrica della falda profonda contenuta nell'acquifero carbonatico (AIN) e di quella contenuta nell'acquifero superficiale relative all'anno 1995 (da DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000).

– Seawater intrusion in Spain. Piezometric map of deep groundwater contained in the carbonate aquifer (AIN) and of the water contained in the shallow aquifer for the year 1995 (from DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000).

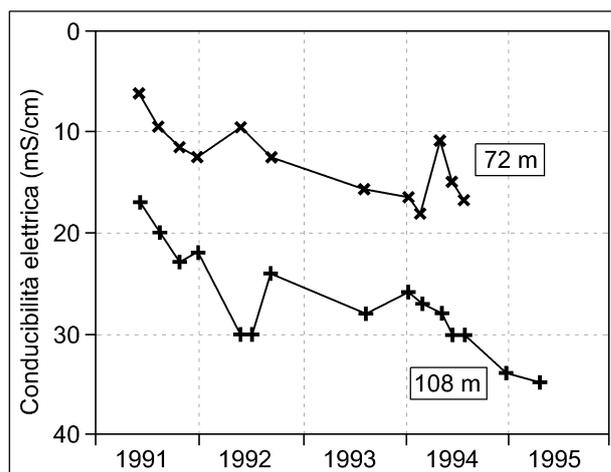


Fig. 6.23 – Intrusione marina in Spagna. Variazione della conducibilità elettrica in un pozzo ubicato in località Aguadulce a 72 m di profondità (all'interno della falda principale) ed a 108 m di profondità (all'interno delle acque salmastre che presentano un flusso dal basso) (da DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000).

– Seawater intrusion in Spain. Variation of electrical conductivity in a well in the Aguadulce area at 72 m depth (within the main groundwater) and at 108 m depth (within the brackish waters with upward flow) (from DOMINGUEZ & CUSTODIO, 2000).

6.3.4. - Intrusione marina nell'acquifero costiero di Israele

L'area del territorio israeliano comprendente una fascia costiera larga fino a 2 km, che si sviluppa longitudinalmente per 120 km tra le città di Binyamina, Hadera e Ashqelon (fig. 6.24), è sede di importanti acquiferi sotterranei cui si attinge ampiamente per far fronte ai fabbisogni idrici della zona. Ivi ha pertanto sede un acquifero costiero, bordato alla base da argille o sedimenti scistososi del Neogene, dove prevale, sotto il profilo

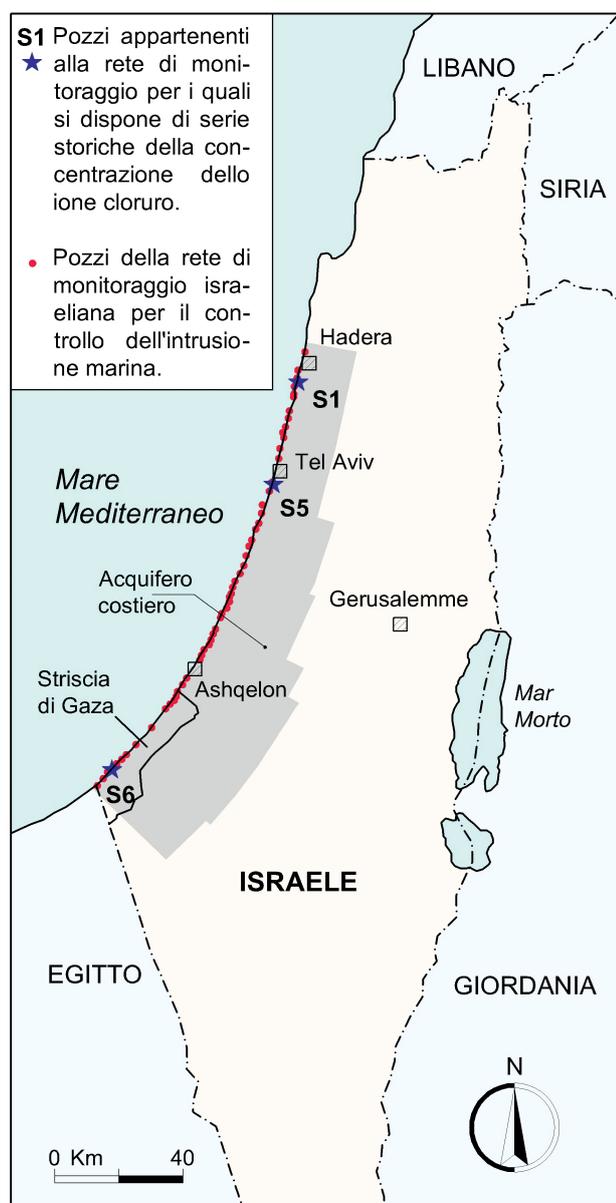


Fig. 6.24 – Area interessata da intrusione marina nell'acquifero costiero di Israele e della striscia di Gaza (mod., da MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

– Area subjected to seawater intrusion in the coastal aquifer of Israel and the Gaza Strip (modified from MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

idrogeologico, una matrice di arenarie pleistoceniche, con intercalazioni di limi e lenti argillose (fig. 6.25). Questi livelli argillosi si estendono verso Est e suddividono, entro 5 km dal mare, l'acquifero costiero in tre sub-acquiferi denominati A, B e C, dal più superficiale al più profondo; ciascuno afflitto da intrusione marina in misura diversa, a seconda delle condizioni idrogeologiche locali e del mezzo, dei processi di alimentazione della falda, e dei prelievi in atto (MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

Le acque di falda dell'acquifero costiero costituiscono per Israele una delle risorse idriche più importanti, contribuendo all'approvvigionamento potabile, irriguo e industriale. Per avere un'idea degli emungimenti di acque sotterranee nell'area, si consideri che a ridosso degli anni 2000 il prelievo delle acque di falda, attuato con circa 3.000 pozzi, ammontava a 350-400 Mm³/anno; i pozzi sono distribuiti in misura di 10-12 pozzi/km², con una portata media per singola opera di captazione pari a 4,3 l/s. Per ragioni pratiche ed economiche, lo sfruttamento della falda è stato limitato negli anni ai sub-acquiferi superiori, per cui la maggior parte dei dati idrogeologici noti afferiscono ai livelli acquiferi più superficiali e meno a quelli profondi. I livelli acquiferi più profondi sono spesso confinati fra livelli argillosi e, dunque luoghi disconnessi dal mare. Talvolta si riscontra la presenza di acque salmastre fossili. L'acquifero, le cui acque di alimentazione provengono dalle piogge e dall'acqua che percola grazie alle attività agricole, industriali e domestiche, viene ricaricato anche artificialmente (talvolta con acque reflue trattate). Ciò avviene in particolare in aree gestite dal *National Water Carrier*, ente che garantisce l'uso efficiente delle risorse idriche e regola la fornitura d'acqua del paese.

Per assicurare al territorio l'approvvigionamento idrico, favorendo un bilancio idrico positivo, da qualche tempo Israele ha intrapreso politiche mirate al risanamento delle perdite della rete di distribuzione acquifera; viene dunque promosso l'utilizzo delle acque di falda soprattutto per l'approvvigionamento potabile piuttosto che per l'irrigazione. Tuttavia, l'intrusione marina interferisce sfavorevolmente sulla qualità delle acque estratte dal sottosuolo, aumentandone progressi-

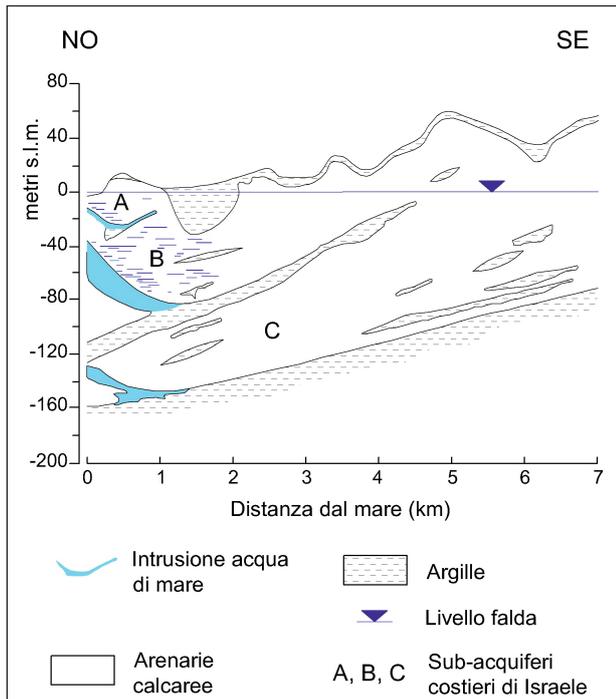


Fig. 6.25 – Sezione idrogeologica tipo dell'acquifero costiero di Israele (mod., da MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

– Typical hydro-geological profile of the coastal aquifer of Israel and the Gaza Strip (modified, from MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

vamente la concentrazione salina.

Nelle aree interne dell'acquifero costiero, laddove si addensano i maggiori prelievi, la concentrazione dello ione cloruro è minore di 250 mg/l; ma a partire dagli anni '70 si è registrato un progressivo incremento di salinità di circa 1 mg/l/anno. In certe aree nelle porzioni di territorio ad Est e Sud-Est dell'acquifero, la concentrazione del solo ione cloruro ha raggiunto i 1000 mg/l. Nelle aree più vicine alla costa, dove l'intrusione marina ha già alterato significativamente la qualità delle acque sotterranee, la concentrazione dello ione cloruro ha raggiunto i 1000 mg/l, con incrementi annui maggiori di 10 mg/l. Il fenomeno è evidente, ad esempio, se si osservano le serie storiche dei pozzi S1, S5 e S6 di figura 6.26, posti ad una distanza dal mare tra i 500 e i 1500 metri (fig. 6.24), in aree dove il fenomeno dell'intrusione marina è molto esteso. A partire dagli anni '70, ad una prima fase, durata poco meno di dieci anni, in cui si registravano contenuti accettabili di ione cloruro e leggere oscillazioni rispetto alla media, ha fatto seguito una fase caratterizzata da incrementi annui esponenziali, pari a 30 mg/l in tempi relativamente brevi.

Nella regione il monitoraggio quali-quantitativo del fenomeno dell'intrusione marina avviene con continuità dal 1970, come mostrano le misure dei livelli idrici della falda, i profili conduttimetrici e di salinità nei pozzi, le misure di resistività elettrica, della temperatura, della concentrazione dello ione cloruro e la stima di altri indicatori chimici. Nel 1990 la rete di monitoraggio era composta da circa 200 pozzi (*observation wells*), mentre in passato poteva contare su 400 pozzi, la metà dei quali è ormai fuori servizio per mancanza di manutenzione. Le indagini vengono condotte soprattutto durante l'estate con frequenza annuale e, solo per un numero limitato di pozzi (circa 30), si effettua una campagna supplementare di monitoraggio in primavera. Nella figura 6.27 è possibile osservare il profilo conduttimetrico di uno dei pozzi "spia", appartenenti alla rete di monitoraggio: la zona di transizione acqua dolce- acqua di mare è sottile e il passaggio all'acqua di mare è stato assunto in corrispondenza di un TDS pari a 17,5 g/l. Israele, pur in presenza di un'intrusione marina rischiosa, non dispone di un adeguato numero di pozzi spia, capaci di fornire informazioni sino all'acqua marina intrusa nel continente. È opinione, infatti, di chi gestisce l'approvvigionamento idrico del territorio, che alla rete di monitoraggio idrogeologico e idraulico venga concesso scarso apporto finan-

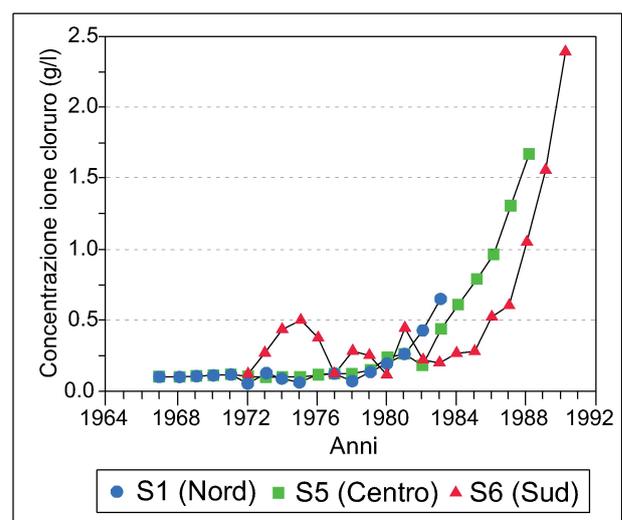


Fig. 6.26 – Evoluzione nel tempo della concentrazione dello ione cloruro dei pozzi costieri S1, S5 ed S6 pescanti nell'acquifero costiero di Israele (mod., da MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

– Change with time of chloride ion concentration in coastal wells S1, S5 and S6 pumping from the coastal aquifer of Israel (modified, from MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

ziario, per cui nel monitoraggio spesso prevalgono metodi semi-empirici, per valutare l'evoluzione dell'intrusione marina. Vengono quindi adottate sia misure dirette in situ sia indagini geo-elettriche, come il metodo geo-elettromagnetico TDEM (*Time-domain electromagnetic*). Quest'ultimo consente, a valle di un'efficiente taratura del sistema, di determinare la salinità e quindi la presenza di acqua marina in profondità. Discretizzando il territorio in strisce normali alla costa, per ogni striscia è stata valutata la posizione del fronte marino nei sub-acquiferi più superficiali (A e B), sulla base dei profili salinometrici dei pozzi appartenenti alla rete di monitoraggio presente e dei risultati del TDEM. L'analisi congiunta di tali forme di monitoraggio ha consentito di accertare, fra il 1990 e il 1995, un significativo avanzamento nel continente del fronte marino lungo l'acquifero costiero. L'entità dell'avanzamento, come mostra la figura 6.28, pare straordinariamente aumentata dal 1970 in poi.

Sempre in ragione di accertamenti acquisiti per via geo-elettrica, il progressivo incremento del fenomeno di intrusione marina si osserva soprattutto nella parte Nord dell'acquifero, il cui fronte progredisce verso l'interno all'incirca di 30 m l'anno. La ricerca idrogeologica sull'evoluzione dell'intrusione

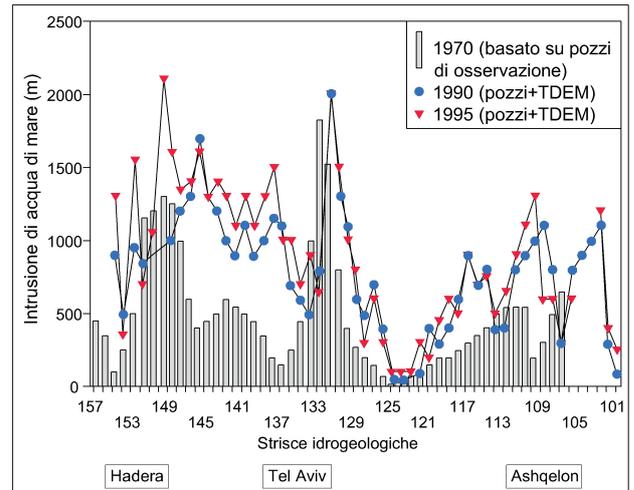


Fig. 6.28 – Progressione nel tempo dell'intrusione marina nell'acquifero costiero di Israele (mod., da MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

– *Time progression of seawater intrusion in the coastal aquifer of Israel (modified, from MELLOUL & ZEITOUN, 1999).*

marina entro gli acquiferi considerati non è, ad avviso degli studiosi inseriti nelle istituzioni israeliane, appoggiata da adeguate risorse finanziarie. I gestori della risorsa acquifera di Israele insistono dunque perché lo Stato provveda ad incrementare le ricerche e i monitoraggi, che consentono di gestire correttamente le acque sotterranee.

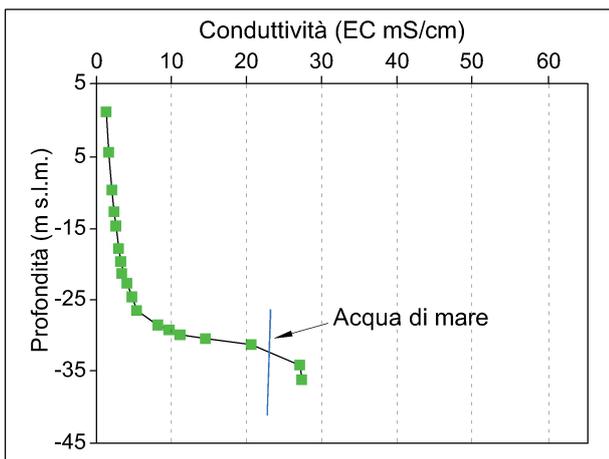


Fig. 6.27 – Profilo conduttimetrico di un pozzo spia appartenente alla rete di monitoraggio quali-quantitativo delle acque di falda dell'acquifero costiero di Israele (mod., da MELLOUL & ZEITOUN, 1999).

– *Conductivity profile of an observation well of the qualitative and quantitative groundwater monitoring network of the coastal aquifer of Israel (modified, from MELLOUL & ZEITOUN, 1999).*