

PROGETTAZIONE DI UN NUOVO CAMPO POZZI CADF PER L'APPROVVIGIONAMENTO IDRICO DEL BASSO FERRARESE. ANALISI MODELLISTICHE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

C. Bariani¹; S. Biolcati²; F. Borea³, M. Ferronato^{4,5}, A. Gargini⁶, I. Graldi³, G. Martelli¹,
P. Teatini^{4,5}; S. Stricchi¹ & V. Vincenzi⁶

- (1) CADF S.p.A. Ciclo integrato Acquedotto Depurazione Fognatura, via Alfieri 3, Codigoro
e-mail: carlo.bariani@cadfe.it; giovanni.martelli@cadfe.it; silvio.stricchi@cadfe.it
- (2) Geotema spin off Unife, Via Saragat, 144100 Ferrara
e-mail: biolcati@geotema.it
- (3) Agenzia per i Servizi Pubblici di Ferrara, ATO 6, Corso Ercole I d'Este 14, 44100 Ferrara
e-mail: Francesca.Borea@ato6.provincia.fe.it; Ivano.Graldi@ato6.provincia.ferrara.it
- (4) MED INGEGNERIA S.r.l., Sede legale: Via Kennedy, 37, 44100 Ferrara
e-mail: pietro.teatini@medingegneria.it
- (5) Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate, Università degli Studi di Padova, via Trieste 63, 35121 Padova
e-mail: teatini@dmsa.unipd.it; ferronat@dmsa.unipd.it
- (6) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, via Saragat 1, 44100 Ferrara
e-mail: gga@unife.it; vncvnt@unife.it

SOMMARIO

Sin dal 1927 il primo acquifero artesiano del sistema multi-falda padano è stato sfruttato presso Ro Ferrarese come risorsa acquedottistica dai 15 comuni del Basso ferrarese confluiti in CADF S.p.A.. L'aumento del fabbisogno idrico e la ricerca di un'alternativa agli approvvigionamenti da Po hanno indotto CADF S.p.A a richiedere l'ampliamento dell'attuale campo pozzi di Ro mediante la realizzazione di 10 nuovi pozzi nella fascia golenale prossima a Guarda Ferrarese. Per realizzare tale progetto, l'ATO 6 ha avviato presso la Regione Emilia-Romagna la procedura di Valutazione d'Impatto Ambientale .

È stato redatto uno Studio d'Impatto Ambientale (S.I.A.) finalizzato principalmente all'analisi della dinamica idrogeologica nelle condizioni di esercizio dei due campi pozzi, al fine di individuare una linea di sfruttamento sostenibile della risorsa idrica sotterranea tenendo conto dei possibili effetti indotti dagli emungimenti: l'interferenza con il campo pozzi esistente, gli effetti di subsidenza sul territorio circostante, in particolare sull'argine maestro del fiume Po, l'aumento della salinità per richiamo dagli acquiferi sottostanti, il mantenimento delle condizioni di protezione della falda.

Il S.I.A ha preso poi in esame tutte le rimanenti componenti ambientali: aria, acqua, flora, fauna, paesaggio, rumore, salute. Per cercare di minimizzare l'impatto dell'opera si è proposta una serie di misure di mitigazione e di monitoraggi soprattutto sui prelievi e sulla subsidenza. La procedura di VIA, durata un anno, si è conclusa con parere favorevole di tutti gli Enti coinvolti.

1 INTRODUZIONE

L'Agenzia d'Ambito per i Servizi Pubblici di Ferrara, ATO 6, costituita nel 2003 ai sensi della LR 25/99, è composta dai Comuni e dall'Amministrazione Provinciale di Ferrara, con la funzione di pianificare e programmare gli interventi, e di conseguenza gli investimenti, relativi al Servizio Idrico Integrato (S.I.I.) nell'ottica di una chiara divisione tra la pianificazione del servizio e la sua gestione, lasciata in capo ai Gestori.

Nel territorio ferrarese operano due Gestori del S.I.I.: Hera Ferrara S.r.l., che serve l'Alto Ferrarese, e CADF S.p.A., che opera nel Basso Ferrarese.

L'approvvigionamento idrico a scopo idropotabile della Provincia avviene quasi interamente attraverso prelievi superficiali dal fiume Po. Esistono 4 impianti di captazione e potabilizzazione distribuiti lungo l'asta del fiume Po: Stellata, alimentata da 10 pozzi; Pontelagoscuro, con due opere di presa superficiale e 24 pozzi; Ro Ferrarese con 19 pozzi e Serravalle, con due torrini di presa superficiale. Tutti i campi pozzi esistenti interessano il primo acquifero in pressione della pianura ferrarese.

Il fabbisogno idropotabile complessivo per l'anno 2006 è riportato in Tabella 1.

Ingresso al sistema locale di potabilizzazione (m ³ /anno)		
da falda	da superficie	TOTALE
16.675.403	35.228.413	51.903.816
32%	68%	100%

Tabella 1. Volumi d'acqua per l'approvvigionamento idropotabile nella provincia di Ferrara nel 2006.

In questo contesto appare evidente la necessità di aumentare e privilegiare, pur in un'ottica di tutela e conservazione, il prelievo sotterraneo rispetto a quello superficiale, in quanto l'acqua del fiume Po presenta caratteristiche qualitative scadenti (si pensi che le opere di presa sono classificate in A3 o Primo elenco speciale) e ultimamente anche quantitative, a causa del ripetersi di fenomeni di siccità.

È stato pertanto richiesto l'ampliamento dell'attuale campo pozzi di Ro, individuando nella golena di Guarda Ferrarese un'area per la realizzazione di un nuovo impianto costituito da 10 pozzi di profondità circa 65 m e con una portata massima nominale di 35 l/s (Figura 1).

Per poter procedere alla realizzazione del nuovo campo pozzi è stato necessario avviare presso la Regione Emilia-Romagna la procedura di Valutazione d'Impatto Ambientale (V.I.A.), finalizzata da una parte alla realizzazione dell'opera, dall'altra alla regolarizzazione degli atti di concessione per derivare acqua pubblica destinata all'uso acquedottistico. Il Regolamento Regionale 41/01 prevede infatti che l'acqua destinata al consumo umano, erogata mediante il servizio idrico integrato, di cui CADF S.p.A. è il Gestore, sia concessa all'Agenzia, ovvero ad un soggetto pubblico.

La procedura di VIA ha previsto la redazione di uno Studio d'Impatto Ambientale, i cui risultati principali sono riportati nel presente lavoro dopo una breve descrizione del progetto del nuovo campo pozzi.

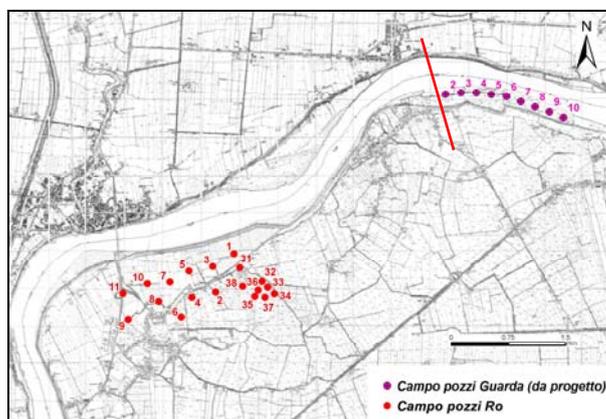


Figura 1. Ubicazione geografica dei campi pozzi di Ro e Guarda Ferrarese. In rosso è riportata la traccia della sezione di Figura 2.

2 IL PROGETTO

2.1 Il Campo Pozzi Golenale

Il progetto del nuovo campo pozzi è stato corredato da un'accurata indagine idrogeologica e dalla realizzazione di un pozzo pilota monitorato per un anno in continuo. I nuovi pozzi (nove), dimensionati per una portata massima nominale di 35 l/s, avranno una profondità prevista di 65 m, modificabile in corso d'opera in base alla natura dei terreni e a seguito delle prove idrogeologiche di campo da eseguire durante la perforazione.

La trivellazione sarà eseguita in diametro costante di 900 mm per tutta la profondità ed il rivestimento definitivo del pozzo sarà eseguito con tubazione in acciaio inox con diametro 450 mm. La tubazione sarà cieca nella parte superiore del pozzo in corrispondenza delle falde superficiali non interessanti per l'emungimento. In corrispondenza dell'acquifero da captare verranno posizionate tubazioni filtranti con filtri a ponte di luce adeguate alla composizione granulometrica del mezzo poroso incontrato nella perforazione.

Per l'emungimento dell'acqua grezza dalla falda sarà collocata all'interno del pozzo una elettropompa sommersa completa di valvola di fondo e tubazione di mandata di diametro 150 mm. Le tubazioni di mandata di ogni pozzo saranno collegate ad un unico collettore golenale in acciaio al carbonio con rivestimento di tipo pesante di diametro via via crescente da DN 200 a DN 600 dotato di un sistema di protezione catodica.

Nella parte superiore a protezione della testa del pozzo si prevede la realizzazione di una cameretta in cemento armato a tenuta stagna (avampo), all'interno della quale saranno alloggiati, oltre al pozzo stesso, tutte le apparecchiature idrauliche accessorie, quali tubazioni di diametro 150 mm, 200 mm, pezzi speciali, valvole di non ritorno, valvole di intercettazione, sfiati, misuratore di portata, quadri di comando e connessioni elettriche.

Il funzionamento dei pozzi verrà regolamentato e gestito utilizzando l'attuale sistema di telecontrollo installato nella Centrale di Ro Ferrarese, opportunamente

aggiornato. In particolare si prevede il funzionamento contemporaneo in continuo di tutti i pozzi; i convertitori di frequenza installati ed i misuratori di portata, a servizio di ognuno di essi, permetteranno di regolare il numero di giri delle elettropompe in modo da adeguare la portata di ogni singolo pozzo alle caratteristiche dello stesso e la portata complessiva alle esigenze dell'utenza.

2.2 Condotta adduttrice dal Campo Pozzi alla Centrale di Potabilizzazione

La condotta adduttrice, in ghisa sferoidale DN 600, è calcolata per una portata media di circa 300 l/s ed ha uno sviluppo di circa 3.580 m; avrà inizio in corrispondenza dell'argine destro del Po, in golena, scavalcherà l'argine in posizione a cavaliere, con un tratto in acciaio al carbonio, e proseguirà seguendo la strada provinciale da Guarda alla Centrale di Ro. La tubazione sarà posata al di sotto della sede stradale ad una profondità di circa 1-1,20 m.

3 CARATTERIZZAZIONE, MONITORAGGIO E MODELLIZZAZIONE IDROGEOLOGICA

Il Gruppo di Idrogeologia dell'Università di Ferrara si è occupato della caratterizzazione dell'acquifero e della modellizzazione numerica del flusso di falda alterato dai due campi pozzi.

La caratterizzazione idrogeologica, a valle di una rivisitazione ed analisi critica di tutta la documentazione esistente ed a seguito dell'effettuazione di misure, analisi e prove *in situ*, ha permesso di definire un modello concettuale, aggiornando lo scenario fino ad ora considerato valido per il campo pozzi di Ro, cioè quello di un insieme di pozzi di subalveo in connessione idraulica diretta con il Po. Il monitoraggio in continuo dei carichi piezometrici ha ulteriormente confermato tale modello concettuale ed ha permesso di comprendere meglio i meccanismi di trasferimento di massa e pressione fra Po ed acquifero. Il modello numerico di flusso è stato fondamentale per verificare la sostenibilità idrogeologica del contemporaneo attingimento dai due campi pozzi (quello esistente e quello in progetto) e per quantificare la portata d'esercizio di sicurezza (*safe yield*) del sistema costituito dai 2 campi pozzi.

Le attività connesse sono state sviluppate su un arco temporale di circa 2 anni (dall'estate del 2004 all'estate del 2006) e, oltre a costituire un supporto tecnico fondamentale sia per la progettazione dell'impianto che per la valutazione del rischio di subsidenza, hanno permesso di ottenere nuove conoscenze idrogeologiche del sistema acquifero padano e di capire meglio i meccanismi di ricarica laterale Po-acquifero nella pianura ferrarese.

3.1 Il sistema acquifero di Ro Ferrarese-Guarda

L'acquifero principale dell'area, già sfruttato e soggetto ad incremento di prelievo, è il sistema acquifero A1-I (Molinari et al., 2007), comunemente noto come I acquifero confinato (o, più correttamente, "in pressione") della pianura ferrarese. Si tratta di un litosoma costituito da sabbie di origine alluvionale, caratterizzato da un'ottima continuità sia orizzontale (è praticamente esteso, senza soluzione di continuità, dal confine occidentale della provincia di Ferrara, dove coalesce con il sottostante sistema acquifero A2, fino al mare), sia verticale (presentando uno spessore variabile da 30 a 60 m). L'ambiente deposizionale è la media pianura fredda dell'ultima glaciazione (Pleistocene Superiore) percorsa da un paleo-sistema padano caratterizzato da

elevatissima competenza di trasporto solido, con meccanismi di dinamica fluviale marcatamente diversi dai sistemi meandrici attuali.

Per migliorare il grado di conoscenza del sistema acquifero A1-I sono stati eseguiti 4 sondaggi geognostici a carotaggio continuo di cui 2 profondi e condotti fino alla base dell'acquifero (uno a Ro ed uno a Guarda) e 2 superficiali, finalizzati alla ricostruzione dettagliata della stratigrafia della copertura ed al prelievo di campioni di terreno per prove di laboratorio. Il litosoma acquifero principale è risultato di circa 48 m di spessore, maggiore di quanto risultava dalle stratigrafie disponibili e posizionato a profondità comprese tra 12/18 m e 48/70 m dal piano campagna, ossia tra -8.5/-14.5 m s.l.m. e -45/-68 m s.l.m. È costituito principalmente da sabbie medio-grossolane pulite; solamente al tetto ed al letto sono presenti frazioni limose congiuntamente a sabbie di granulometria più fine, mentre occasionalmente sono presenti lenti argillose o sottili livelli di materiale organico/torboso. Risulta limitato superiormente da un complesso di termini prevalentemente fini in cui sono dominanti una litozona limo-argillosa più superficiale ed una litozona argilloso-torbosa inferiore; fra le due è presente una litozona sabbioso-limosa con spessore fino a 10 m. Un aquitardo di 8-10 m separa A1-I da A2. In Figura 2 è presentata una sezione idrostratigrafica perpendicolare al corso del fiume Po, nei pressi dell'abitato di Guarda, la cui traccia in pianta è riportata in Figura 1. A differenza delle condizioni idrogeologiche che si ritrovano nei campi pozzi *Hera* di Stellata-Malcantone e Pontelagoscuro (*Gargini & Messina, 2004*), pure localizzati in riva destra del Po, non si ha una connessione idraulica diretta fra Po ed acquifero A1 (come finora ritenuto sulla base degli studi idrogeologici precedentemente effettuati) ma l'alveo fluviale è scavato nella litozona limoso-argillosa superficiale; in corrispondenza di Guarda la connessione idraulica diretta fra sub-alveo e litozona limoso-sabbiosa, unita all'esile spessore della litozona argilloso-torbosa, fa sì che la ricarica indotta da Po abbia una maggiore efficacia, anche se, comunque, tale ricarica è sempre per drenanza e mai per travaso diretto.

Il modello geologico concettuale di cui sopra è confermato sia dalle campagne piezometriche che dalla parametrizzazione idrodinamica tramite test di acquifero. Sono state complessivamente svolte 5 campagne piezometriche dell'area Ro-Guarda (sui pozzi e piezometri di Ro e Guarda Ferrarese e sui pozzi privati misurabili delle zone circostanti): tre dinamiche (settembre 2004, portata complessiva di picco di circa 350 l/s del campo di Ro; maggio e luglio 2005, quest'ultima in forte magra del Po) e due pseudo-statiche (ottobre 2004; dicembre 2004). I gradienti idraulici pseudo-statici sono ridotti, con un valore medio di 5×10^{-4} . In relazione alla stagione il carico idraulico assoluto varia fra circa +2 e -2 m s.l.m.; in condizioni dinamiche il massimo abbassamento piezometrico osservabile ed imputabile alle sole perdite di carico di acquifero (e non di pozzo) è pari a circa 4 m.

La parametrizzazione idrodinamica, oltre alla rielaborazione di un test di acquifero eseguito nel pozzo pilota di Guarda nel 2003, si è basata sulla effettuazione di un test in acquifero di lunga durata (8 giorni) relativamente al medesimo pozzo (maggio 2005) con abbassamento misurato in 6 piezometri. In particolare, la curva abbassamenti-tempo su scala semilogaritmica mostra una diminuzione della pendenza che avviene dopo circa 10.000 s, indicando un probabile inizio di drenaggio dal Po attraverso la litozona sabbio-limosa in connessione diretta con il fiume (Figura 3). L'acquifero A1-I, pertanto, si comporta come acquifero semi-confinato (*Hantush & Jacob, 1955*) risentendo del trasferimento di carico piezometrico dal Po attraverso le sabbie sovrastanti (Figura 4).

La trasmissività idraulica T è dell'ordine di 10^{-2} m²/s, il coefficiente di immagazzinamento S è compreso fra 10^{-2} - 10^{-3} (i valori più elevati indicano un immagazzinamento apparente frutto del flusso ritardato di drenanza da Po), la conducibilità idraulica K è nell'ordine di 10^{-4} m/s, con estremi pari 2 e 9×10^{-4} m/s ed un valor medio di 5×10^{-4} m/s che appare compatibile con una serie di altre prove effettuate dal gruppo di Idrogeologia dell'Univ. di Ferrara in altri pozzi o campi pozzi attigenti all'acquifero A1.

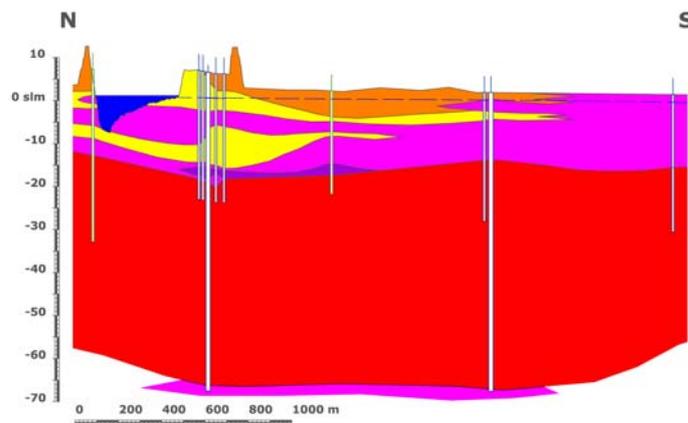


Figura 2. Profilo idrogeologico trasversale al Po presso la golena di Guarda Ferrarese. In arancione: limi e limi argillosi; in magenta: argille; in viola: torbe; in rosso: sabbie; in giallo: limi sabbiosi e sabbie limose; la linea tratteggiata indica il livello piezometrico dell'acquifero in pressione (rosso) misurato a ottobre 2004.

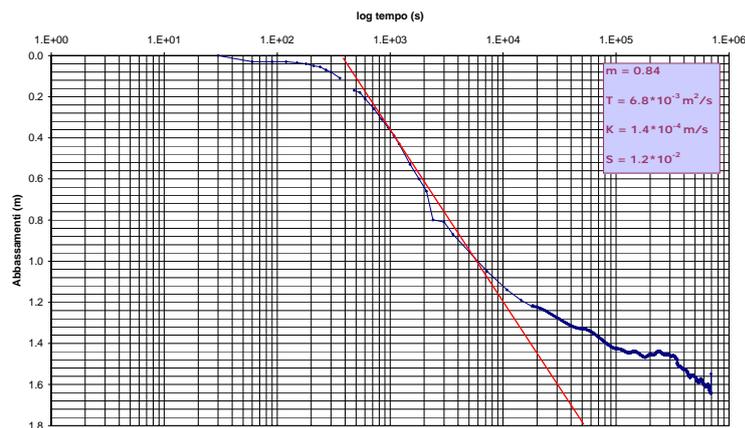


Figura 3. Relazione abbassamenti-log(tempo) per un piezometro di osservazione della prova di acquifero di lunga durata nella golena di Guarda Ferrarese.

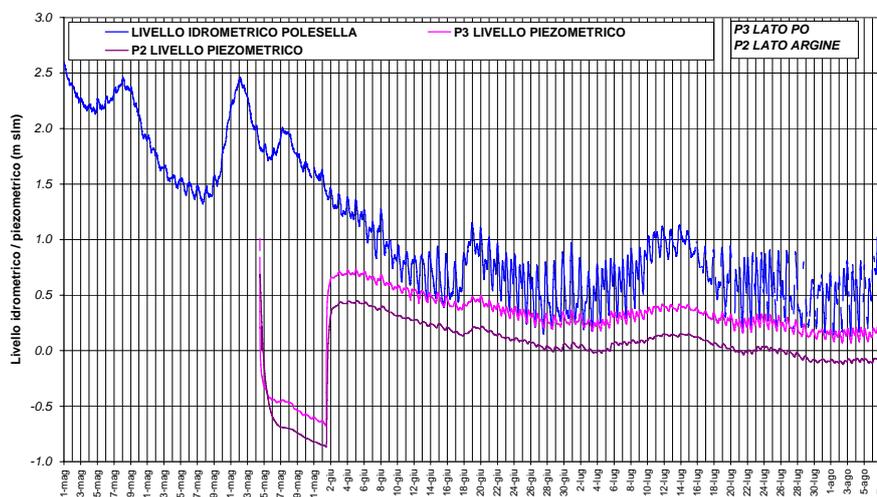


Figura 4. Monitoraggio in continuo del livello del Po a Polesella (in blu) e di 2 piezometri durante l'emungimento e la successiva risalita del pozzo-pilota a Guarda Ferrarese.

Una campagna idrochimica, effettuata nel Luglio 2005 su tutti i pozzi CADF e su alcuni pozzi privati, ha evidenziato come il chimismo prevalente della falda confinata appartenga alla facies bicarbonato-calcica; comunque l'acquifero si trova in condizioni redox di tipo riducente per la presenza di Fe^{2+} e Mn^{2+} in quantità significative (nella parte veneta superano anche i 5 mg/L; nel campo pozzi di Ro si aggirano su 1-4 mg/L) e di ione ammonio NH_4^+ in concentrazione fino a 5 mg/L. Alcuni campioni, caratterizzati da conducibilità elettriche superiori, sono spostati verso la facies bicarbonato/clorurato calcico/sodica, ossia sono arricchiti in Na^+ e Cl^- ; la salinizzazione delle acque è presumibilmente dovuta al richiamo di acque salmastre da S-SE, presenti dentro lo stesso acquifero per risalienze di acque fossili salmastre predisposte dall'alto strutturale della Dorsale Ferrarese.

3.2 Modellizzazione numerica per la previsione del *safe-yield* di Ro-Guarda

La modellizzazione del flusso di falda per la verifica della sostenibilità dell'emungimento è stata effettuata utilizzando il codice alle differenze finite *MODFLOW-2000* (McDonald & Harbaugh, 1988) con interfaccia *Visual Modflow 3.1* (Waterloo Hydrogeologic, Inc.). Il flusso di falda entro l'acquifero A1-I è stato inizialmente simulato in regime stazionario in fase di calibrazione, per riprodurre le condizioni idrodinamiche dell'area di studio in un momento di magra e quindi di elevato stress del sistema (piezometria dell'ottobre 2004).

Il dominio del modello è costituito da un rettangolo di lunghezza 14 km e larghezza 8.8 km, inclinato di 67° rispetto al Nord. La griglia è a maglia quadrata di 100×100 m, con un raffinamento presso i campi pozzi (25×25 m) per un totale 154 righe e 363 colonne (55.902 celle per strato). Gli strati considerati sono 4 (a loro volta suddivisi in zone a diversa conducibilità idraulica): l'acquifero A1-I (K compreso fra 10^{-4} e 9×10^{-4} m/s) corrisponde allo strato basale, mentre i tre strati superiori discretizzano la copertura (litozona limo-argillosa, litozona sabbio-limosa, litozoma argillo-torbosa), per

un totale di 223.608 celle. Alle litozone argillose è stata assegnata K di 10^{-9} m/s mentre alla litozona sabbio-limosa è stata assegnata una K pari a 10^{-5} m/s; si è inoltre assunta una anisotropia verticale nella permeabilità pari a 0.1 mentre il mezzo è supposto isotropo nel piano orizzontale. La geometria degli strati e delle zone a diversa conducibilità idraulica è basata sul modello geologico concettuale desunto dall'indagine idrostratigrafica; in tal modo è stato possibile ricostruire la geometria lentiforme e non continua della litozona sabbio-limosa della copertura.

Il fiume Po è stato simulato attraverso una condizione al contorno del 3° tipo applicata agli strati 3 e 4 (in connessione idraulica indiretta per drenanza o diretta), con un parametro "conductance" del sub-alveo determinato sulla base di tutte le sezioni batimetriche Brioschi ricadenti all'interno del dominio. Il battente idrico presso ogni sezione è stato dedotto dai dati AIPO di Pontelagoscuro e Polesella, ipotizzando un gradiente lineare costante tra le 2 sezioni.

La calibrazione del modello è buona, soprattutto considerato lo scarso numero dei punti di controllo al di fuori dell'areale dei campi pozzi; la media dei residui è risultata pari a -0.028 m con un valore di RMS normalizzato pari a 9.9 %. Il modello calibrato in condizioni stazionarie è stato utilizzato per effettuare delle simulazioni in transitorio al fine di valutare l'estensione del cono di depressione, indotto dal pompaggio indipendente o contemporaneo dei 2 campi pozzi (quello esistente e quello in progetto). La simulazione di emungimento per il solo campo pozzi di Ro (portata totale=320 l/s) determina un abbattimento piezometrico massimo di 5 m al centro del cono di depressione (sole perdite di carico di acquifero) e di 3 m al di sotto del corpo arginale; per portate superiori a 400 l/s (di fatto raggiunte dal gestore durante i picchi estivi di domanda) il prelievo risulta non più sostenibile a medio-lungo periodo. Il solo campo pozzi di Guarda (10 pozzi ipotizzati con distanza inter-pozzo di 200 m) determina, con un prelievo complessivo di circa 300 l/s, abbattimenti piezometrici massimi di circa 5 m entro la zona più depressa e fino a 3 m al di sotto dell'abitato di Guarda e sotto l'argine.

Simulando l'esercizio contemporaneo dei 2 campi pozzi (Guarda con 10 pozzi e portata totale di 250 l/s, Ro con 19 pozzi e portata totale di 247 l/s) la sostenibilità a lungo termine dell'emungimento appare invece garantita. Si individuano due coni di depressione in coincidenza dei due campi pozzi con una lieve interferenza reciproca ed un massimo abbattimento piezometrico nella zona di confine pari a 1.8 m (Figura 5).

Il modello di flusso ha consentito, con l'impiego del pacchetto *MODPATH*, di ricavare le linee di flusso attraverso un processo di *particle tracking* e di ricostruire la localizzazione della isocrona del tempo d'arrivo relativa ai 60 giorni (zona di rispetto ristretta) ed ai 180 giorni (zona di rispetto allargata), sulla base dell'applicazione della proposta regionale RER, in bozza (2004), per l'applicazione del DL 152/99. In totale le aree vincolate con il criterio temporale risultano pari a 195.6 ettari rispetto ai 212.5 ettari del criterio geometrico (zona di rispetto di raggio 200 m sull'opera di presa). Oltre ad una leggera riduzione delle aree da sottoporre a vincoli relativamente all'uso del territorio, il criterio temporale permette una protezione idrogeologica sensata delle risorse idriche sotterranee, che tiene conto della reale dinamica della falda e degli abbattimenti indotti dall'effetto simultaneo di più pozzi in emungimento.

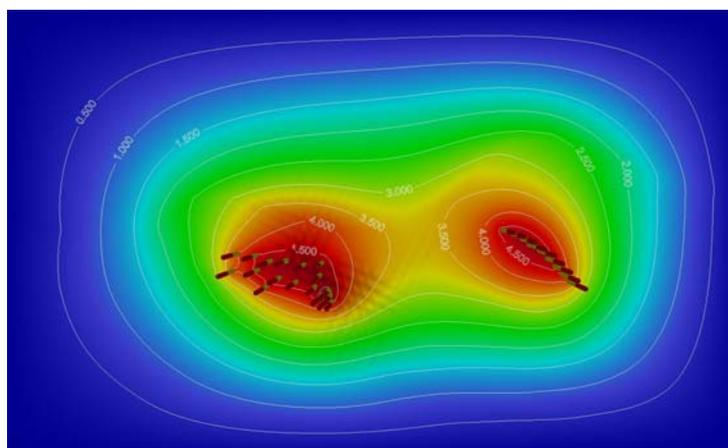


Figura 5. Distribuzione degli abbassamenti piezometrici indotti dalla simulazione dei 2 campi pozzi in esercizio ad una portata complessiva di 500 L/s; in bianco le isolinee di ugual abbassamento piezometrico (equidistanza di 0.5 m).

4 VALUTAZIONE DELLA SUBSIDENZA INDOTTA DAI POMPAGGI

Nell'ambito della produzione degli elementi tecnici necessari al conseguimento dell'approvazione del progetto del nuovo campo pozzi golenale di Guarda Ferrarese, è stato implementato un modello matematico per la simulazione del comportamento del suolo in relazione alle problematiche di subsidenza e di instabilità dell'argine maestro del Po che possono essere indotte dai pompaggi. La ricostruzione dell'impatto ambientale in termini di subsidenza è stata condotta a partire dal 1930, con la messa in funzione dei primi pozzi nella zona di Ro, e si è protratta fino al 2035, circa 30 anni dopo la possibile entrata in funzione del campo di Guarda. Per far fronte alla variabilità intrinseca della geometria e dei parametri fisici che caratterizzano le unità idrostratigrafiche nell'area di studio, nonché alla non perfetta conoscenza della distribuzione spazio-temporale dei volumi emunti (soprattutto per il periodo antecedente il 1983), le simulazioni sono state effettuate su alcuni scenari caratterizzati da diverse combinazioni dei valori della conducibilità idraulica e della compressibilità dei sedimenti.

4.1 Il modello di simulazione

La simulazione della subsidenza è stata realizzata utilizzando un approccio disaccoppiato (*Gambolati & Freeze, 1973*). Dapprima vengono calcolati con un modello di flusso i campi di moto e di pressione indotti nel sottosuolo dai prelievi d'acqua e poi vengono simulati gli spostamenti del terreno con un modello poromeccanico che utilizza il campo di pressione come sorgente di tensione distribuita all'interno del mezzo poroso.

La modellizzazione è stata svolta mediante l'applicazione in successione dei codici agli elementi finiti MED-FLOW3D e MED-SUB3D sviluppati dal Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate dell'Università di Padova

(Paniconi et al., 1994; Gambolati et al., 2000) ed utilizzati da Med Ingegneria. I modelli risolvono rispettivamente l'equazione del flusso sotterraneo e quella di consolidazione in regime transitorio su domini tridimensionali.

4.1.1 La griglia 3D di calcolo

L'acquifero di interesse e le unità geologiche che lo confinano, così come ricostruite dalle indagini idrogeologiche dell'Univ. di Ferrara integrate da alcuni SEV (Sondaggi Elettrici Verticali) e sezioni geoelettriche eseguite da MED Ingegneria, sono state discretizzate in elementi finiti tetraedrici. La proiezione orizzontale del volume di calcolo è un quadrato di lato 40 km; lungo la verticale il modello si estende dal piano campagna alla base dello strato argilloso che confina inferiormente l'acquifero sfruttato dai pozzi CADF S.p.A. (a circa -70 m s.l.m.). La griglia tridimensionale, ottenuta proiettando verticalmente una griglia triangolare (Figura 6), consente un'accurata ricostruzione della litostratigrafia, della distribuzione spaziale della conducibilità idraulica individuata nello studio idrogeologico e degli elementi idraulici (alveo del fiume Po, pozzi di estrazione) di interesse. Nella modellizzazione geomeccanica la griglia di calcolo è stata estesa fino alla profondità di 2000 m dove si è ipotizzata la presenza di un basamento rigido. La raffinata discretizzazione complessiva del mezzo è costituita da 1.335.996 elementi e 230.510 nodi. Ciascuna singola formazione geologica è suddivisa in 5 strati di elementi (Figura 7) in modo da simulare accuratamente la propagazione verticale degli abbattimenti di pressione indotti dai prelievi.

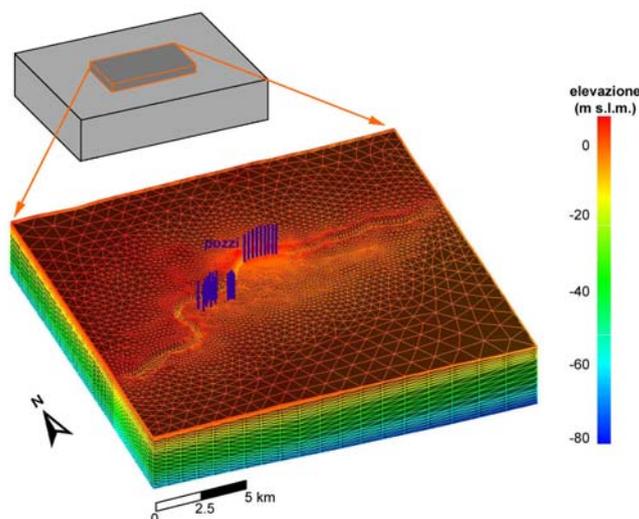


Figura 6. Vista assonometrica della porzione della griglia tridimensionale agli elementi finiti nelle aree adiacenti ai pozzi. Il colore degli elementi è rappresentativo dell'elevazione rispetto al mare. È evidenziata la posizione dei pozzi di emungimento e la scala verticale nel particolare è amplificata di 40 volte rispetto a quella orizzontale.

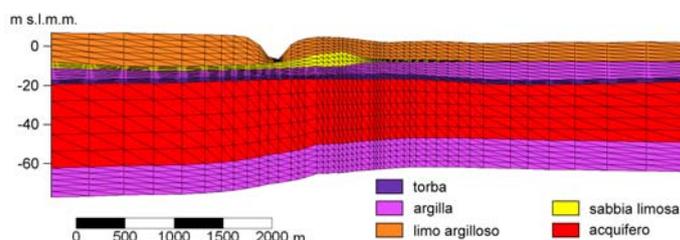


Figura 7. Sezione verticale della griglia del modello di flusso attraverso il campo di Guarda Ferrarese con direzione Nord-Sud. Sono evidenziate con diversa colorazione le litologie di riferimento. La scala verticale è amplificata di 20 volte rispetto a quella orizzontale.

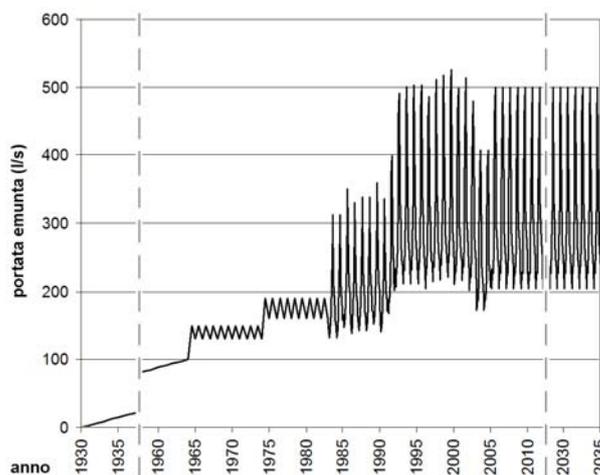


Figura 8. Andamento della portata cumulativa emunta dai campi pozzi CADF S.p.A. ed implementata nel modello di simulazione *MED-FLOW3D*.

4.1.2 Condizioni al contorno e forzanti

I modelli sono stati applicati in termini incrementali rispetto alla configurazione iniziale del 1930. Sono state imposte variazioni nulle del carico piezometrico e spostamenti orizzontali e verticali nulli su tutti i contorni della griglia di calcolo ad eccezione del piano campagna dove le componenti dello spostamento sono libere (Baiù *et al.*, 2004).

Per quanto riguarda la forzante del modello, la storia produttiva del campo pozzi di Ro Ferrarese è lunga e complessa. I dati forniti da CADF S.p.A. sono via via più precisi man mano che ci si avvicina all'ultimo decennio (Figura 8). La portata complessiva emunta tra il 1930 ed il 1964 aumenta linearmente tra 0 e 100 l/s e non è presente alcun andamento stagionale nei prelievi. Durante il periodo 1965-1974 gli emungimenti variano linearmente tra un minimo invernale di 130 l/s ed un massimo estivo pari a 150 l/s, valori che aumentano rispettivamente a 160 l/s e 190 l/s tra il 1975 ed il 1983; fino al 1983 l'estrazione avviene solamente all'interno dell'area della centrale di potabilizzazione di Ro. Dal 1984 le estrazioni iniziano anche dai pozzi ubicati

all'esterno dell'area della centrale; la portata annua prelevata è documentata con buona accuratezza su base mensile e nell'estate del 2000 viene raggiunto il valore massimo di oltre 500 l/s. Dal 2005 al 2035 la portata di 300 l/s è suddivisa equamente tra i due campi pozzo; in entrambi i siti il valore cumulativo annuo ($4.730.400 \text{ m}^3$) è distribuito mensilmente mediante dei pesi che tengono conto dell'effettivo andamento stagionale della richiesta idrica. Sulla base di tale andamento dei prelievi è stato utilizzato un passo di calcolo di 6 mesi tra il 1930 ed il 1983 e di 1 mese tra il 1984 ed il 2035.

4.1.3 Calibrazione del modello

Utilizzando come distribuzione della conducibilità idraulica K nell'acquifero quella definita nello studio idrogeologico, i modelli di flusso e di subsidenza sono stati calibrati in relazione al coefficiente specifico di immagazzinamento elastico S_s ed alla compressibilità edometrica c_M ($S_s \approx c_M \gamma$ con γ il peso specifico dell'acqua) utilizzando i risultati delle prove di pompaggio condotte nel 2003 e 2005 sul pozzo pilota di Guarda e le misurazioni di subsidenza per il periodo 1994-2004 eseguite su alcuni capisaldi istituiti in prossimità del campo pozzi di Ro. In buon accordo con i risultati di alcune prove edometriche condotte recentemente su campioni di diversa litologia prelevati nell'area, la procedura di calibrazione ha fornito una compressibilità dell'acquifero variabile tra 10^{-3} e $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kg}$, quella degli strati argillosi tra 5×10^{-3} e $3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}$; le torbe sono caratterizzate da $c_M = 5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}$.

4.2 Risultati delle simulazioni

La subsidenza antropica ricostruita dal modello dall'inizio dell'attività di estrazione (1930) al 2005 è fornita in Figura 9a; il valore massimo, in corrispondenza dei pozzi di Ro Ferrarese, è pari a 16 cm; sulla base della prevista suddivisione dei pompaggi tra i due campi la subsidenza attesa nei prossimi 30 anni è riportata in Figura 9b. Si può osservare come in corrispondenza al campo pozzi di Guarda l'incremento di subsidenza sia pari a circa 6 cm; viceversa, il parziale recupero di pressione nell'area di Ro indotto dalla riduzione dei pompaggi nel vecchio campo pozzi comporterebbe un leggero incremento altimetrico di circa 1 cm.

I risultati delle simulazioni indicano che nel 2035, alla fine del periodo coperto dalle simulazioni, la subsidenza antropica indotta dai campi pozzi del CADF S.p.A. interesserà in modo apprezzabile (ovvero con un abbassamento superiore a 3 cm) un'estensione di circa 50 km^2 ; l'abbassamento medio sarà di 5-6 cm. Si deve far notare che la subsidenza antropica massima durante i 105 anni coperti dallo studio (di entità pari a circa 15 cm) è circa metà della subsidenza naturale che si esplica sul territorio durante lo stesso intervallo temporale (stimata in circa 3 mm/anno da *Gambolati & Teatini*, 1998).

A causa degli emungimenti l'argine maestro del fiume Po ha subito una subsidenza massima ad oggi di circa 14 cm in corrispondenza di Ro; nei prossimi 30 anni dovrebbe abbassarsi di 5-6 cm presso Guarda. Alla luce di tali risultati ottenuti si può concludere che, data l'entità e la graduale variazione spaziale degli abbassamenti antropici indotti, il rilevato arginale non dovrebbe subire alcun danno che ne possa compromettere la stabilità. Il corpo arginale in terra, caratterizzato da un'elevata elasticità strutturale, si adatterà agli spostamenti imposti. Ciò è confermato dall'assenza di evidenti indebolimenti dell'opera in corrispondenza al campo di Ro Ferrarese dove l'abbassamento a seguito delle estrazioni è già avvenuto.

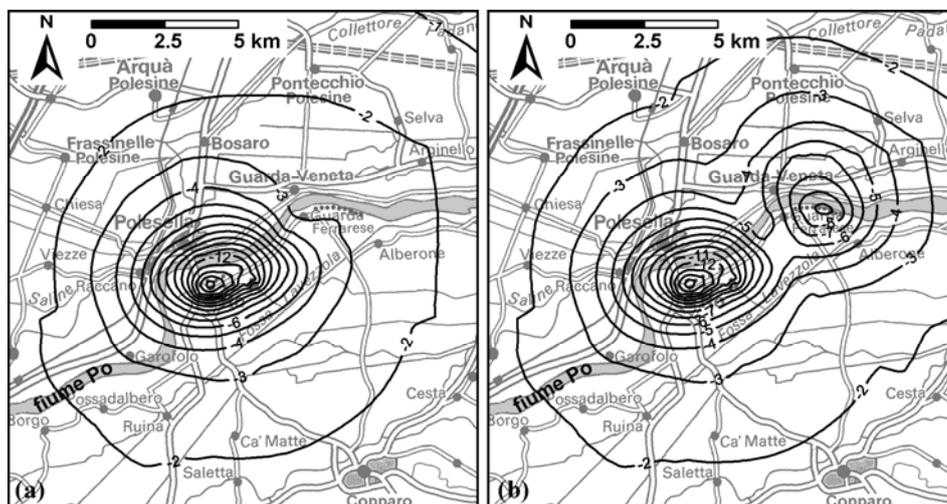


Figura 9. Ricostruzione modellistica della subsidenza antropica prodotta dai campi pozzo di Ro e Guarda Ferrarese (a) al 2005 e (b) al 2035.

5 LO STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE DEL VECCHIO E NUOVO CAMPO POZZI CADF

Lo studio di impatto ambientale, redatto sulla base della LR 9/99 e s.m.i., è strutturato in tre macro parti: il Quadro di Riferimento Programmatico, il Quadro di Riferimento Progettuale e il Quadro di Riferimento Ambientale. In quest'ultimo sono riprese le risultanze delle relazioni tecniche di settore legate alle componenti ambientali maggiormente interessate dal progetto, quali la situazione idrogeologica locale e la subsidenza, trattate nei capitoli precedenti.

Il primo quadro del SIA si occupa di valutare l'ubicazione e la tipologia dell'opera rispetto ai Piani territoriali, urbanistici, ambientali e di settore.

Il campo pozzi esistente e quello in progetto sono stati confrontati con le norme degli strumenti di pianificazione a livello regionale, provinciale e comunale. Nel caso del campo pozzi esistente si è verificata la conformità al PRG, mentre per il campo pozzi nuovo è apparsa chiara la necessità di una variante allo strumento urbanistico. L'area della golenale di Guarda, interessata alla realizzazione del nuovo campo pozzi, è sottoposta all'art. 24 "Invasi ed alvei di bacini e corsi d'acqua" delle norme del piano; la variante necessaria alla tutela dei nuovi pozzi, ha previsto per la zona golenale un articolo 37 "Tutela delle aree di ricarica delle falde" sulla base anche della vigente normativa D.lgs 152/99 (ora D.lgs. 152/06), che prevede attorno al pozzo una zona di salvaguardia, che si formalizza con una fascia di rispetto di 200 metri.

Per gli altri piani, che riguardano in modo particolare la componente acqua (PTA Piano Tutela delle Acque) e l'assetto idrogeologico (PAI, Piano Assetto Idrogeologico), si è accertata una sostanziale conformità. Invece dai Piani paesaggistici è emerso un vincolo denominato "luoghi Bacchelliani"; questa tutela è legata alla rivalutazione storico-ambientale, messa in atto nel territorio di Ro, sia con l'istituzione del parco

letterario dedicato a R. Bacchelli e al suo romanzo storico (“Il mulino del Po”), sia con la realizzazione del mulino galleggiante sul Po a Ro Ferrarese.

Il secondo Quadro descrive il progetto con particolare attenzione alla fase di cantiere dell’opera. Descrive inoltre le nuove reti tecnologiche e le opere accessorie a servizio del campo pozzi in progetto (cabina Enel, condotta adduttrice).

Infine, il Quadro Ambientale analizza tutte le componenti ambientali, coinvolte e non, dal progetto, ovvero descrive in maniera dettagliata lo stato attuale dell’ambiente in cui verrà inserita l’opera, utilizzando degli indicatori ambientali che consentono di stimare l’effettivo impatto sull’ambiente il più oggettivamente possibile.

Le componenti ambientali analizzate nel S.I.A. sono: atmosfera, acque superficiali e sotterranee, suolo e sottosuolo, flora, fauna ed ecosistemi, paesaggio, rumore, salute pubblica. Per ognuna delle sensibilità sopra elencate e grazie al confronto fra gli indicatori, si è realizzata una matrice che mette in evidenza quali componenti subiscono i maggiori effetti negativi dal nuovo campo pozzi e dal vecchio.

5.1 La stima degli impatti ambientali e le misure di mitigazione

Dalla stima degli impatti, i ricettori ambientali maggiormente interessati dalla realizzazione del campo pozzi risultano essere: qualità e prelievo acque sotterranee, subsidenza, disponibilità risorse idropotabili e valore dei paesaggi sensibili.

Per ridurre al minimo le influenze negative sull’ambiente si adottano quelle che nel settore vengono definite misure di mitigazione. Le misure di mitigazione, in un caso come questo, consistono nel dare corrette indicazioni sulla modalità di gestione dei due campi pozzi; lo schema progettuale proposto di pompaggio simultaneo pari ad un massimo di 250 l/s per il vecchio campo pozzi e di 250 l/s per il nuovo campo pozzi, risulta garanzia di uno sfruttamento sostenibile della risorsa.

La distribuzione dei pompaggi su un fronte più ampio, l’abbassamento delle portate di picco e lo sfruttamento di una porzione di acquifero a salinità più bassa sono garanzie di sostenibilità dello sfruttamento delle risorse e di prevenzione dei fenomeni di subsidenza e salinizzazione.

L’altra misura di mitigazione è una misura fisica, per ridurre l’impatto visivo dei pozzi e della condotta nei confronti del territorio “bacchelliano” vincolato. Intervenedo sui colori e sull’uso dei materiali si è ottenuto un buon risultato, riducendo anche questa influenza.

6 CONCLUSIONI

La redazione del SIA per un progetto complesso, quale un ampliamento di un campo pozzi, in una zona potenzialmente soggetta a rischio di salinizzazione e subsidenza, ha richiesto un approccio interdisciplinare e coordinato, con azioni e valutazioni tecniche appropriate nella giusta sequenza temporale. Le “raccomandazioni” evidenziate in vari punti del S.I.A., le misure di mitigazione proposte e le azioni di monitoraggio consentono il controllo e la gestione, sia in fase di realizzazione che in fase di esercizio, di un’opera di grande interesse pubblico, quale un’infrastruttura acquedottistica, in modo tale da rendere gli impatti sull’ambiente sostenibili e moderati.

La procedura di VIA, durata un’anno, si è conclusa con parere favorevole di tutti gli Enti coinvolti (Regione, Provincia, Comune, Beni Culturali, Autorità di Bacino Fiume Po, AIPO, Enel, HERA, etc).

BIBLIOGRAFIA

- Baù, D., Ferronato, M., Gambolati, G. & Teatini, P. Surface flow boundary conditions in modelling land subsidence due to fluid withdrawal, *Ground Water*, 2004, 42(4), 516-525.
- Farina A.(2004). Verso una scienza del paesaggio, Alberto Perdisa Editore, Bologna.
- Gambolati, G. & Freeze, R. A. Mathematical simulation of the subsidence of Venice. 1. Theory. *Water Resources Research*, 1973, 9(3), 721-733.
- Gambolati, G. & Teatini, P. Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the Upper Adriatic Sea basin, *CENAS, Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*, ed. G. Gambolati, Kluwer Academic Publ., Water Science and Technology Library NO. 28, 198, pp. 103-132.
- Gambolati, G., Teatini, P., Baù, D. & Ferronato, M. The importance of poro-elastic coupling in dynamically active aquifers of the Po river basin, Italy, *Water Resources Research*, 2000, 36(9), 2443-2459.
- Gargini A. & Messina A. Processi di trasferimento di massa e pressione in un acquifero sabbioso ricaricato lateralmente dal fiume Po: osservazioni basate su un sistema di monitoraggio in continuo, in 29° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, vol.2, Trento, 7-10 settembre 2004.
- Hantush M.S., Jacob C.E. Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Trans. Am. Geophys. Union*. 36(1955), pp 95-100.
- McDonald M.G. and Harbaugh A.W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1* (1988), 586 p.
- Malcevschi SQualità ed impatto ambientale, 1991, Etaslibri, Milano.
- Molinari F.C., Boldrini G., Severi P., Dugoni G., Rapti Caputo D., Martinelli G. Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara. Monografia a cura di Provincia di Ferrara, Regione Emilia-Romagna, 2007, DB-Map, Firenze.
- Paniconi, C., Ferraris, S., Putti, M., Pini, G. & Gambolati, G. Three-dimensional numerical codes for simulating groundwater contamination: FLOW-3D, flow in saturated and unsaturated porous media, *Pollution Modeling*, ed. P. Zannetti, Comp. Mechanics Publ., Vol. I, 1994, pp. 159-156.