

L'acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione

Luciana Bonzi¹, Lorenzo Calabrese¹, Paolo Severi¹, Valentina Vincenzi²

¹ Geologo, Regione Emilia – Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli

² Geologo, libero professionista

1. INTRODUZIONE

Nella zona costiera della Regione Emilia - Romagna molti ambienti diversi e preziosi, in cui terra e acqua convivono in un delicato equilibrio, sono fortemente influenzati non solo dalle caratteristiche dei sistemi deposizionali naturali e dalla geomorfologia dell'area, ma anche dalle attività antropiche e dalle pratiche di gestione e tutela del territorio.

La recente e rapida urbanizzazione della costa ha modificato gli equilibri naturali in gioco ed ha contribuito all'insorgenza di alcuni problemi di approvvigionamento idrico come tipicamente accade nei sistemi costieri densamente popolati (Boggess, 1968).

Il deciso aumento della popolazione ed il crescente fabbisogno di risorsa per fini commerciali ed agricoli, unitamente allo sviluppo di un esteso reticolo di drenaggio, indispensabile per smaltire le acque in eccesso nelle zone bonificate, rendono poi queste problematiche particolarmente complesse.

I rischi ambientali connessi ai processi di sovrasfruttamento delle acque sotterranee sono noti e comuni, ma ciò che rende unici gli acquiferi costieri è il rischio di salinizzazione della risorsa idrica (Post V.E.A., 2005).

In questo contesto l'intrusione di acqua salata all'interno della falda freatica potrebbe danneggiare i delicati ecosistemi che rendono il territorio costiero regionale una riserva di biodiversità.

Diventa pertanto importante acquisire delle informazioni specifiche inerenti queste problematiche. A tal fine il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) della Regione Emilia - Romagna ha intrapreso negli ultimi due anni un progetto di studio riguardante l'acquifero freatico costiero (Figura 1.1) al fine di costruire un quadro conoscitivo aggiornato che ne evidenzia le caratteristiche fisiche, la dinamica e le eventuali fragilità.

Nella prima fase dello studio è stato sviluppato il modello geologico del corpo acquifero, nella fase successiva è stata pianificata e realizzata una apposita rete di monitoraggio quali – quantitativo delle acque sotterranee. I dati

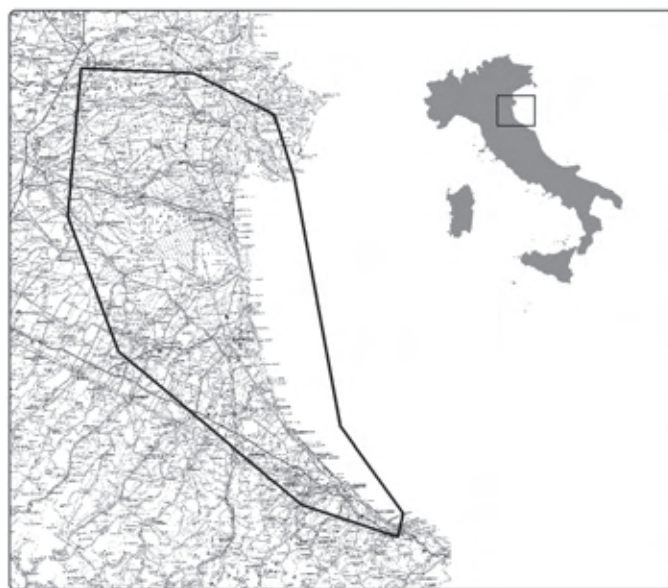


Figura 1.1 - Inquadramento dell'area di studio

mostrati e discussi in questo articolo sono il risultato del primo anno di misure su questa rete.

L'impostazione metodologica di questo studio è stata condivisa con i Servizi regionali competenti in materia di risorse idriche, le Province costiere, le Autorità di Bacino, i Comuni costieri più estesi, il Parco Regionale del Delta del Po, il Consorzio Generale di Bonifica nella Provincia di Ferrara, le Università di Ferrara e Bologna, ARPA ed alcuni professionisti, che hanno contribuito con idee ed informazioni preziose per la sua definitiva formulazione.

2. IL MODELLO GEOLOGICO

L'acquifero freatico costiero è un corpo geologico che è stato oggetto di approfondite ricerche a scala locale nell'ambito di studi specifici, talvolta ai fini della modellazione idrogeologica (si veda ad esempio Ulazzi et alii, 2007) o nell'ambito di campagne geognostiche relative

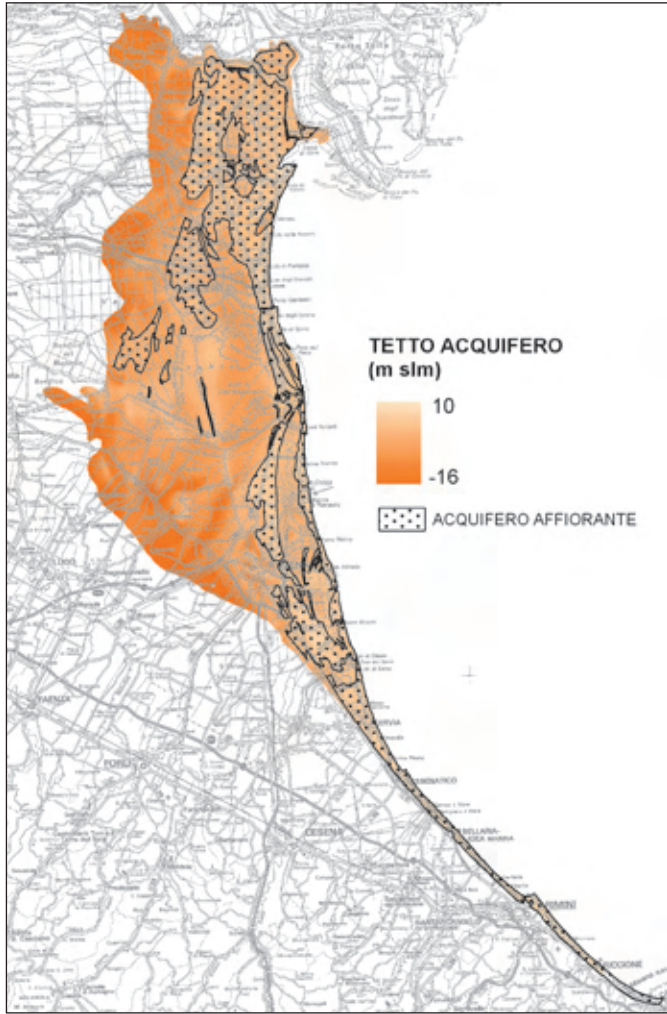


Figura 2.1 - Superficie di tetto dell'acquifero costiero: i valori massimo e minimo sono rispettivamente 10 m e -16 m s.l.m.; il retinato indica le aree di affioramento dell'acquifero (dove esso è freatico in senso stretto) ricavate dall'assemblaggio dei Fogli CARG

alla costruzione di opere ingegneristiche (Esca et alii, 2006; Venturini, 2008).

Uno studio a scala provinciale, riguardante il territorio costiero settentrionale e focalizzato principalmente sul monitoraggio dei parametri idrogeologici ed idrochimici della falda freatica, è stato condotto dalla Provincia di Ferrara nel 2001 (Gargini et alii, 2001).

Alla scala regionale, infine, l'acquifero è conosciuto in modo indiretto ed in termini approssimativi, attraverso le ricostruzioni geologiche del cuneo sedimentario trasgressivo-regressivo olocenico presenti in letteratura a partire dai lavori di Rizzini (1974) fino ad arrivare a quelli più recenti di Amorosi et alii (2003) e Stefani e Vincenzi (2005).

I sedimenti che caratterizzano l'acquifero freatico costiero sono le sabbie litorali s.l. che si sono sedimentate durante la fase trasgressiva e soprattutto durante quella regressiva, quando nel settore centrale e settentrionale

della costa progradavano le foci padane ed appenniniche mentre nel settore meridionale si impostava una sottile piana di sabbia ("strand plain").

Da un punto di vista sedimentologico le sabbie litorali s.l. risultano, ad una osservazione più attenta, assai variabili ed eterogenee, includendo depositi di spiaggia e duna e di fronte deltizio, con intercalazioni locali di depositi più fini di baia, laguna e palude costiera.

Lo studio idrogeologico che si è voluto intraprendere necessitava quindi di un modello regionale dettagliato che non era stato ancora realizzato, in cui fossero chiare l'architettura tridimensionale dell'acquifero e l'organizzazione latero-verticale delle facies sedimentarie al suo interno.

A questo proposito è stata svolta una nuova analisi geologica che ha integrato, in ambiente GIS, i dati più recenti ed aggiornati derivanti dal progetto di cartografia geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (progetto CARG) con nuove ricostruzioni stratigrafiche del sottosuolo della piana costiera emiliano-romagnola.

La fascia costiera analizzata ricade all'interno dei Fogli 187, 205, 204, 223, 240-241, 256 e 268, la maggior parte dei quali sono stati rilevati dallo stesso SGSS e sono consultabili all'indirizzo http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/sito_cartografia.htm (Martini et alii, 2007).

Le principali informazioni derivate da questi Fogli riguardano la mappatura degli affioramenti dei corpi sabbiosi, che costituiscono le aree di ricarica per l'acquifero in questione, la cartografia delle isobate di tetto delle sabbie litorali e le sezioni geologiche, che descrivono l'assetto del sottosuolo.

Nella prima e fase del lavoro, quindi, è stato realizzato l'assemblaggio (in formato *grid*) delle isobate dei singoli Fogli, a cui è stata aggiunta l'informazione relativa alle quote assolute degli affioramenti, estratte dal DTM regionale. In questo modo è stata automaticamente costruita la superficie di tetto dell'acquifero e sono stati resi fruibili per le analisi territoriali i dati relativi all'andamento del tetto delle sabbie litorali. (Figura 2.1).

La mappa della superficie di tetto dell'acquifero costiero ha evidenziato molte delle sue caratteristiche geometriche, tra cui la tendenza ad approfondirsi verso ovest. Emerge inoltre in modo evidente che l'acquifero è propriamente freatico nel settore meridionale, dove è (come si vedrà in seguito) anche molto sottile, mentre nel settore centrale e settentrionale esso è libero nella fascia più prossima alla costa e diviene, procedendo verso ovest, semi-confinato e quindi confinato, con il tetto progressivamente più antico e sepolto da depositi generalmente poco permeabili.

Le analisi condotte per lo studio qui illustrato si sono basate sulla grande quantità di dati contenuti nella Banca

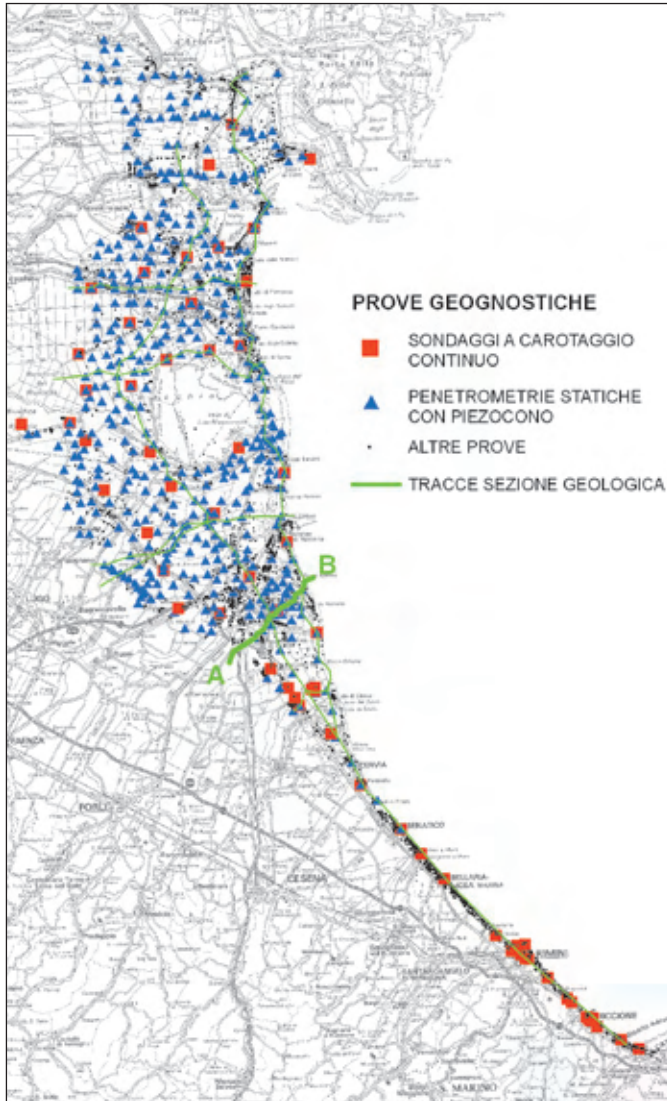


Figura 2.2 - Prove geognostiche utilizzate in questo studio e traccia delle sezioni geologiche di dettaglio realizzate

Dati Geognostica del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (prevalentemente stratigrafie di pozzi per acqua, penetrometrie e sondaggi).

Il numero delle prove geognostiche a disposizione nell'area in esame è pari a 5726 (Figura 2.2) e di queste, quelle che hanno fornito le più preziose informazioni per la realizzazione del modello geologico sono le 464 penetrometrie con piezocono ed i 65 sondaggi a carotaggio continuo (realizzate prevalentemente *ad hoc* per l'elaborazione dei Fogli geologici).

L'ubicazione delle prove è visibile sul sito http://geo.regione.emilia-romagna.it/catalogo_web/catalogo/.

L'analisi del sottosuolo, finalizzata alla ricostruzione della superficie di base dell'acquifero, è stata intrapresa infatti grazie alla costruzione di una fitta maglia di sezioni (circa 50) che intercettano la quasi totalità di queste prove e che sono state correlate partendo dal confronto con le sezioni CARG.

Una descrizione più dettagliata del sottosuolo è stata invece affidata a sette sezioni geologiche, cinque delle quali con andamento circa perpendicolare alla linea di riva e due con orientazione circa parallela alla costa (Figure 2.2 e 2.3).

Le sezioni geologiche oltre a riportare la stratigrafia, le facies e l'interpretazione in termini di ambiente deposizionale, illustrano le caratteristiche geometriche e litologiche del corpo acquifero e ne mettono in evidenza la base e il tetto. In particolare, il tetto, laddove non affiorante, è posto in corrispondenza del contrasto di facies tra depositi fini alluvionali e costieri superficiali e le prime sabbie che si sviluppano estesamente sia in profondità (da 2 a oltre 20 m di spessore) che lateralmente (da 1 a oltre 30 km) mentre la base è stata tracciata in corrispondenza del netto passag-

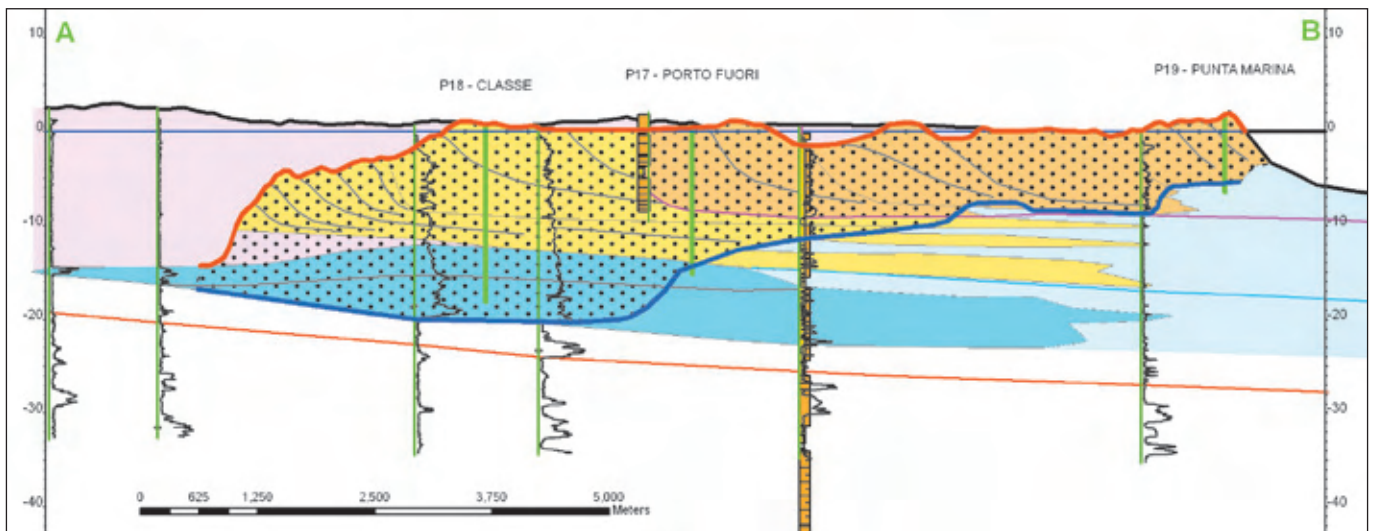


Figura 2.3 - Esempio di sezione geologica in cui sono rappresentati la distribuzione dei depositi olocenici e le principali superfici stratigrafiche. Con il retinato è evidenziato il corpo acquifero, con la linea blu è tracciata la base e con quella rossa il tetto

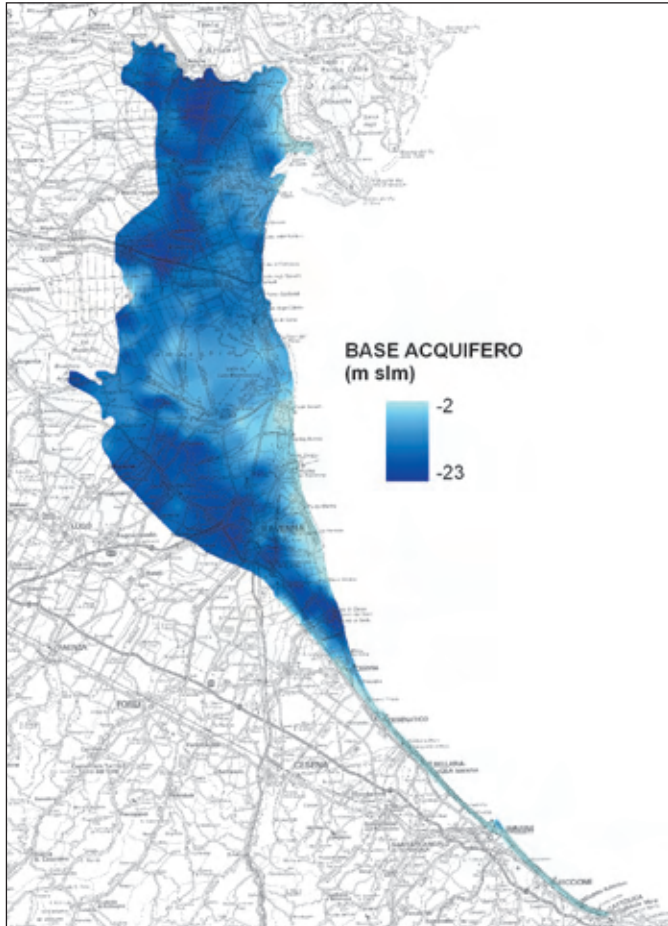


Figura 2.4 - Superficie di base dell'acquifero costiero: i valori massimo e minimo sono rispettivamente -2 e -23 m s.l.m.

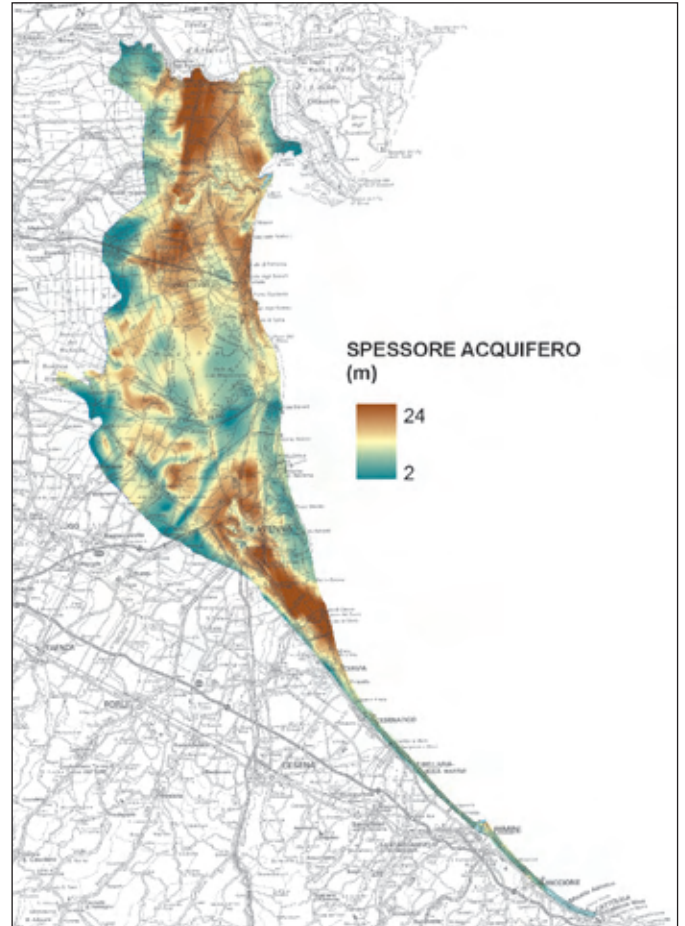


Figura 2.5 - Mappa degli spessori dell'acquifero costiero

gio di facies tra questa successione prevalentemente sabbiosa e massiva e i depositi stratificati, prevalentemente limosi sottostanti e laterali che sono ritenuti costituire un importante contrasto e barriera di permeabilità (Figura 2.3).

La fase successiva è stata quella di mappare, utilizzando le informazioni della maglia delle sezioni, la superficie basale in tutta l'area di studio (Figura 2.4).

La mappa della superficie di base dell'acquifero costiero ha rivelato che tende, come del resto la superficie di tetto, ad approfondirsi verso ovest e ad essere più superficiale nel settore meridionale e nella fascia più prossima alla linea costiera nel settore centrale e settentrionale.

Così come per l'andamento del tetto, la geometria della superficie di base riflette due fenomeni geologici di primaria importanza nella comprensione dell'architettura del corpo acquifero: una maggiore subsidenza nel settore centrale e settentrionale ed un tetto ed una base, definite su base litologica, che si configurano a seguito del progressivo accrescimento della piana costiera ver-

so mare e quindi con età via via più recenti da ovest verso est.

L'insieme di queste informazioni e l'analisi in ambiente GIS ha reso infine possibile creare un modello geologico tridimensionale dell'acquifero che, oltre ad offrire una più realistica visualizzazione del sottosuolo, consente di elaborare dati fondamentali come la stima degli spessori (Figura 2.5), ottenuta combinando le superfici di tetto e base, e le variazioni delle litofacies nello spazio.

La mappa degli spessori dell'acquifero è particolarmente interessante in quanto ne evidenzia la notevole variabilità laterale, a cui si associa la complessità dei parametri idrogeologici e quindi della trasmissività.

Gli spessori maggiori, osservabili nella fascia centrale con orientazione circa nord-sud, sono legati alla coalescenza ed amalgamazione dei depositi sabbiosi trasgressivi più profondi con quelli regressivi più recenti; inoltre, i massimi registrati tra il Po e Comacchio e tra Ravenna e Cervia sono verosimilmente dovuti ai maggiori apporti sabbiosi garantiti dal fiume Po, per la zona a nord, e dai fiumi romagnoli per il settore più meridionale.

Spessori notevoli si registrano anche nella fascia costiera più orientale, in corrispondenza dei cordoni litorali sviluppati tra la foce del F. Reno e il Bosco della Mesola e in corrispondenza della cuspidè deltizia del F. Savio. Gli spessori minimi, invece, si trovano nella porzione occidentale, dove sono legati alla chiusura del cuneo sedimentario olocenico (ponendo il limite dove lo spessore dell'acquifero è inferiore ai 2 m), ed in quella orientale laddove viene meno l'amalgamazione tra depositi trasgressivi e regressivi e fra i due si interpone un cospicuo spessore di depositi fini (generalmente di prodelta e spiaggia sommersa distale) che funge da acquitardo. Il quadro geologico e idrostratigrafico è complicato dalla notevole variabilità litologica dell'acquifero, a testimonianza dei complessi rapporti latero-verticali degli ambienti deltizi e di spiaggia che si sono avvicendati nel tempo. In linea generale le variazioni di facies sono maggiormente frequenti nei settori dove si sono impostati importanti apparati deltizi ovvero nel settore centrale e settentrionale dell'area di studio. Nel settore meridionale, dove i processi marini di ridistribuzione dei sedimenti sono stati dominanti su quelli fluviali, le variazioni di facies sono invece più contenute. A questo proposito è in corso uno studio specifico per la valutazione e la mappatura delle litologie e delle eterogeneità all'interno dell'acquifero attraverso nuove elaborazioni dei dati della Banca Dati Geognostica integrate con le ricostruzioni paleoambientali.

3. LA RETE DI MONITORAGGIO DELL'ACQUIFERO FREATICO COSTIERO

L'elaborazione del modello geologico dell'acquifero costiero ha rappresentato la fase preliminare necessaria per affrontare lo studio idrogeologico finalizzato alla comprensione dei fenomeni di contaminazione da acqua salata di origine marina a scala regionale. A questo proposito è stata predisposta una rete di monitoraggio costituita complessivamente da 30 piezometri, dei quali 11 sono situati nella provincia di Ferrara, 12 in quella di Ravenna, 2 in provincia di Forlì-Cesena e 5 in quella di Rimini (Figura 3.1). Per garantirne la maggiore durata possibile nel tempo tutti i piezometri sono stati posizionati, con la collaborazione degli Enti citati nell'introduzione, in aree pubbliche o protette e chiusi da un tombino carrabile raso terra di 40 x 40 cm.

L'ubicazione dei piezometri è stata scelta in modo da ottenere una distribuzione omogenea di dati sulla porzione freatica dell'acquifero e da rappresentare il fenomeno di ingressione del cuneo salino nei diversi settori dell'acquifero costiero. Generalmente è stata privilegiata la realizzazione di transetti perpendicolari alla linea di riva,

così da poter riportare sulle sezioni geologiche i dati rilevati, ma in alcuni casi si è scelto di ubicare un punto di misura che permettesse di valutare anche i rapporti con le acque superficiali (ne è un esempio il piezometro P4 realizzato a Mesola (FE), a poche decine di metri dall'argine del Po) o l'eventuale diversa risposta del sistema in presenza di un acquifero semiconfinato e confinato (come nel transetto a Nord di Ravenna).

Tutti i piezometri sono stati perforati nella zona dove l'acquifero costiero è in condizioni freatiche, tranne in due casi nella provincia di Ravenna in cui i piezometri interessano la porzione dove l'acquifero è confinato da sedimenti fini sovrastanti, di natura alluvionale.

I sondaggi per la posa in opera dei piezometri sono stati realizzati a distruzione di nucleo con un carotiere semplice ed hanno sempre attraversato l'intero spessore dell'acquifero, valutato in fase di progettazione sulla base del modello geologico.

Le profondità raggiunte, comprese fra un minimo di 6.9

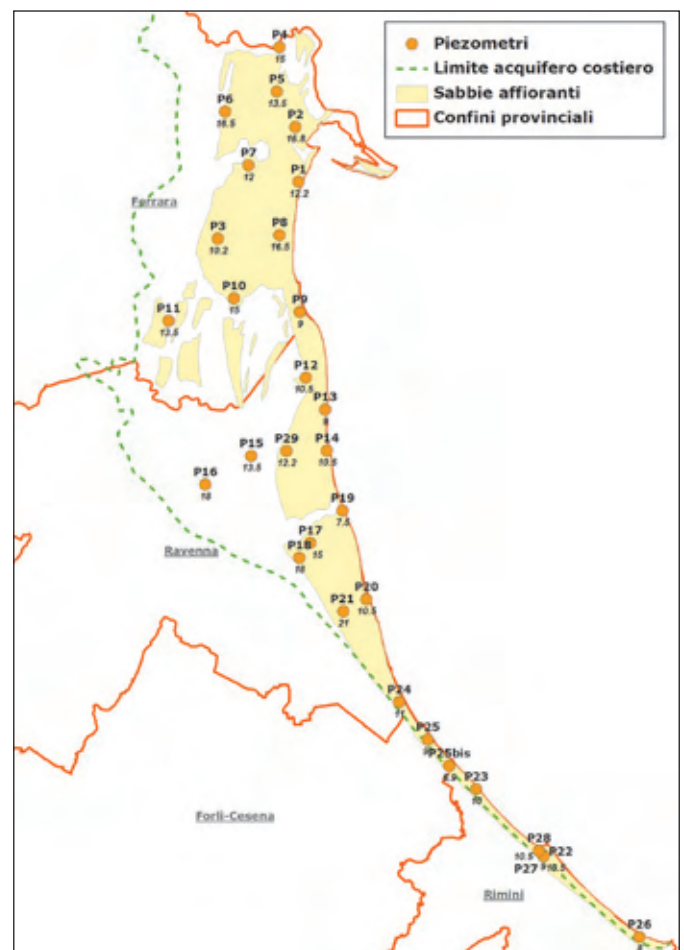


Figura 3.1 – Ubicazione e profondità dei piezometri della rete di monitoraggio. Sono riportati il limite interno dell'acquifero ricostruito in questo studio ed il limite delle sabbie affioranti derivato dal progetto CARG

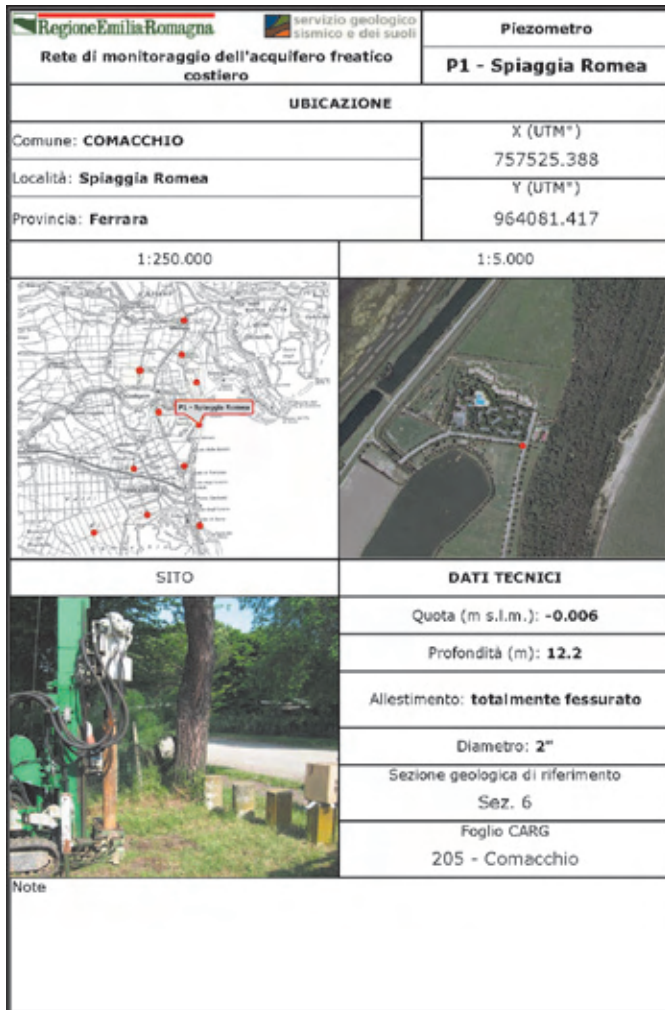


Figura 3.2 – Scheda monografica di un piezometro della rete di monitoraggio predisposta per lo studio dell'acquifero costiero. L'ubicazione in scala 1:250.000 fornisce un inquadramento del piezometro rispetto agli altri punti di controllo realizzati, mentre la foto del sito permette a qualunque operatore di trovare agevolmente il punto di misura. Le coordinate e la quota assoluta (in m s.l.m.) sono state misurate con un ricevitore GPS Trimble R8 con un rilievo in modalità VRS

m ed un massimo di 21 m, sono riportate nella Figura 3.1. Per l'allestimento sono stati utilizzati dei tubi in PVC del diametro di 2" rivestiti da un geotessuto permeabile, ciechi nell'ultimo metro della perforazione e fessurati per il resto del foro.

A completamento dell'opera è stato versato del ghiaietto siliceo drenante tra il foro e il tubo per tutto lo spessore del tratto filtrato. Si è inoltre provveduto alla quotatura di precisione dei piezometri tramite GPS.

Per ciascun piezometro è stata infine predisposta una scheda monografica che riassume tutte le caratteristiche tecniche e di ubicazione (Figura 3.2)

Il monitoraggio idrogeologico, tutt'oggi in corso, ha previsto la misura dei parametri quali - quantitativi delle acque sotterranee secondo una tempistica valutata sulla base di analoghi lavori precedenti (Carbognin et alii 2005, Piccinini et alii, 2008): sono state realizzate in totale sei campagne di misura in un anno idrologico (una ogni due mesi circa) a partire dal mese di Giugno 2009, compatibilmente con le condizioni meteorologiche e gli aspetti logistici.

In ogni piezometro vengono misurati la soggiacenza della falda e l'andamento con la profondità della conducibilità elettrica specifica (CE, in mS/cm), della temperatura (T, in °C) e del TDS (Total Dissolved Solids, in g/l), effettuando una misura ogni metro con una sonda multiparametrica portatile dotata di cavo graduato.

Dalle misurazioni si ottengono i profili verticali (*log*) di ciascun parametro per ogni piezometro ed in condizioni stagionali diverse.

Nella Figura 3.3, ad esempio, è riportato l'andamento della conducibilità elettrica con la profondità nel piezometro P12 – Reno. Con colori e simboli diversi sono rappresentate le varie campagne di misura eseguite in questo punto.

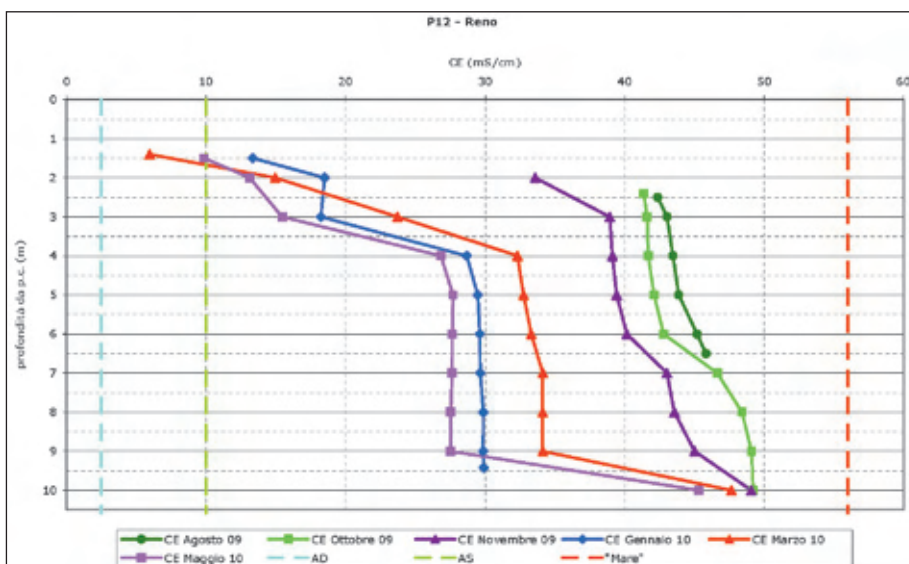


Figura 3.3 – Andamento della CE (mS/cm) ad ogni metro di profondità. Nel grafico vengono rappresentati il valore di 2.5 mS/cm (in riferimento al limite per la CE riportato nel D.Lgs 31/01) con la linea verticale azzurra, un limite a 10 mS/cm per distinguere le acque salmastre da quelle salate con la linea verde, ed il valore di 56 mS/cm come CE media del Mare Adriatico con la linea rossa (Piccinini et alii, 2008)

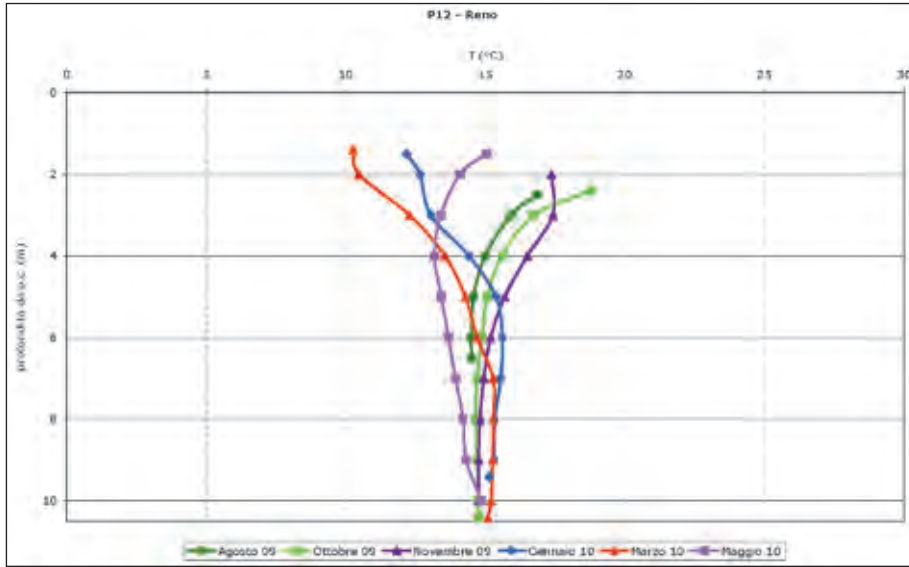


Figura 3.4 – Andamento della T (°C) ad ogni metro di profondità. Come si vede, nella parte più superficiale si ha una maggiore variabilità della temperatura (zona di eterotermia) in relazione alla temperatura esterna, alla copertura vegetale ed all'esposizione del sito. Andando più in profondità la temperatura tende invece ad assestarsi su un medesimo valore nelle diverse stagioni (zona di omotermia)

L'andamento della temperatura con la profondità nello stesso piezometro e nelle stesse campagne di misura è invece rappresentato nella Figura 3.4.

In tre piezometri della provincia di Ferrara (P2, P4 e P8) sono state inoltre installate delle sonde per il monitoraggio in continuo con cadenza oraria: nel piezometro più prossimo al Po (P4 - Mesola) il monitoraggio ha reso importanti informazioni riguardo i rapporti fiume – falda; negli altri due casi (P2 – Elciola e P8 – San Giuseppe), invece, il monitoraggio ha interessato anche i parametri di temperatura e conducibilità della zona di interfaccia acqua dolce – acqua salata, al fine di valutarne dettagliatamente le oscillazioni in funzione delle condizioni al contorno.

4. I RISULTATI DEL PRIMO ANNO DI MONITORAGGIO (2009-2010)

La ricostruzione dei log di conducibilità di ciascun piezometro per ogni campagna di misura e il confronto fra di essi sono risultati molto utili per valutare le caratteristiche delle acque sotterranee e la dinamica del fenomeno di ingressione marina a scala locale.

Le informazioni dei singoli piezometri sono state utilizzate per realizzare una prima sintesi della distribuzione della qualità delle acque dell'acquifero freatico costiero a scala regionale.

Valutando in particolare lo spessore di acqua dolce al di sopra della zona di transizione ($CE \leq 2.5 \text{ mS/cm}$), è stato possibile rappresentare i dati a scala regionale individuando le zone in cui questo spessore è sempre presente, è più o meno accentuato o è sempre assente (Figura 4.1).

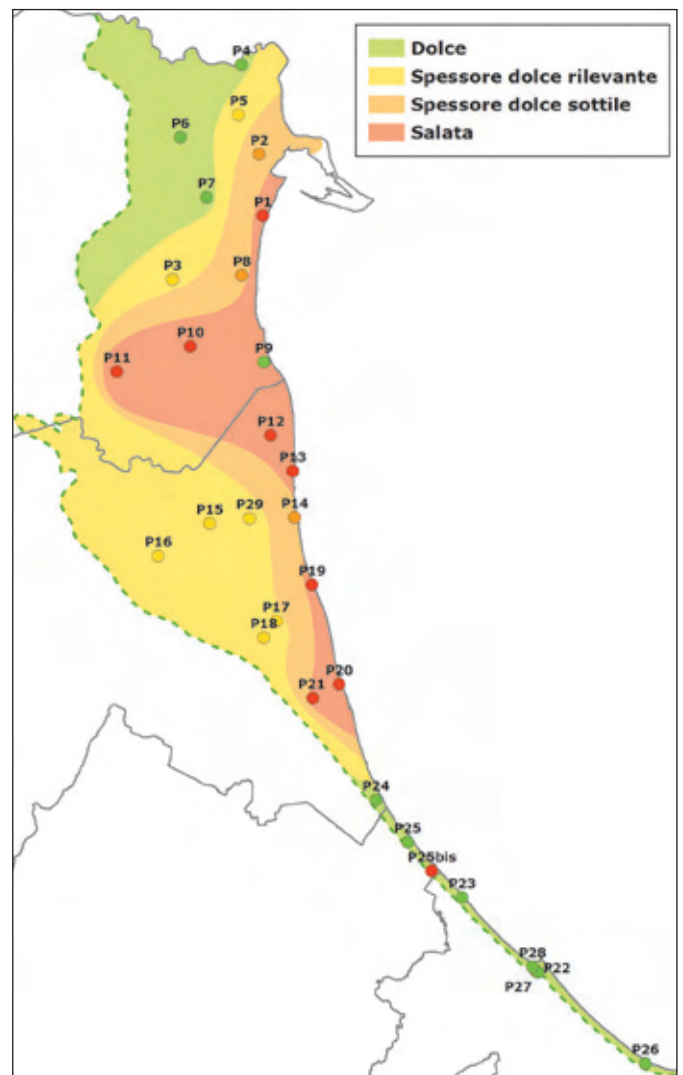


Figura 4.1 – Sintesi regionale del primo anno di monitoraggio basata sulla presenza e sullo spessore di acqua dolce al di sopra della zona di transizione acqua dolce – acqua salata

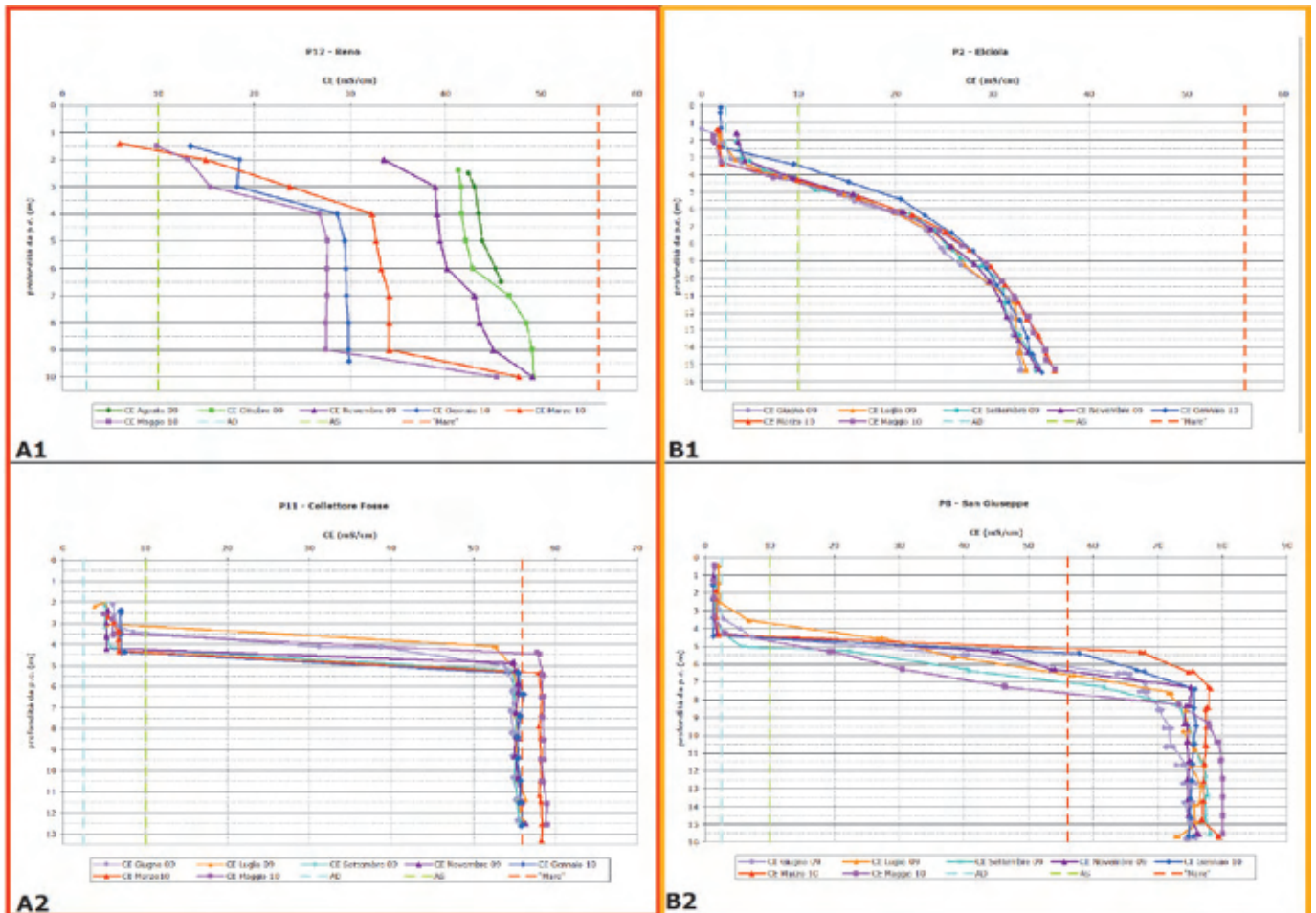


Figura 4.2 – Piezometri ricadenti nella zona rossa (A) e nella zona arancione (B). All'interno di una stessa zona i piezometri possono avere log caratteristico e valori assoluti di CE anche molto diversi tra loro. La scala verticale rappresenta la profondità dal p.c.

Nella zona rossa della Figura 4.1 ricadono i punti in cui tutta la colonna d'acqua è salmastra o salata; nella zona arancione quelli in cui vi è uno spessore sottile di acqua dolce al di sopra della zona di transizione; nella zona gialla i punti con un maggiore spessore di acqua dolce; nella zona verde i punti in cui la colonna d'acqua è tutta e sempre dolce. In linea generale, le aree a nord e a sud risultano verdi rispettivamente per il contributo del Po e per gli apporti dei fiumi appenninici.

I punti di colore non congruente con quello dell'area in cui ricadono, testimoniano la complessità locale del sistema e la valenza limitata alla scala regionale della mappa presentata.

All'interno delle zone così individuate la forma del profilo di conducibilità nei singoli piezometri mostra in alcuni casi delle differenze anche sensibili.

La forma del profilo di conducibilità è direttamente proporzionale alla salinità e dipende dai parametri idrodinamici caratteristici del sito, dalla distribuzione dei carichi piezometrici nel sistema e dal bilancio di massa al suo interno.

La forma dei log è quindi un elemento peculiare di ciascun piezometro e, nella maggior parte dei casi, ha un andamento piuttosto regolare nel tempo.

A risultare più variabili sono stati lo spessore di acqua dolce al di sopra della zona di transizione acqua dolce – acqua salata (e conseguentemente la quota di tale zona) ed i valori assoluti di conducibilità, specie nei punti più vicini al mare.

All'interno della stessa zona individuata, quindi, ricadono piezometri con log e valori assoluti di CE tra loro anche molto diversi.

Alcuni esempi di profili di conducibilità misurati e raggruppati per zona di appartenenza, sono proposti nelle Figure 4.2 e 4.3.

Sui grafici, insieme ai valori di CE misurati in ciascuna campagna vengono rappresentati con tre linee verticali colorate i valori di CE scelti come riferimento: in azzurro i 2.5 mS/cm (limite per la CE del D.Lgs 31/01 per le acque destinate al consumo umano); in verde i 10 mS/cm (limite scelto per distinguere le acque salmastre da quelle salate); in rosso i 56 mS/cm (CE

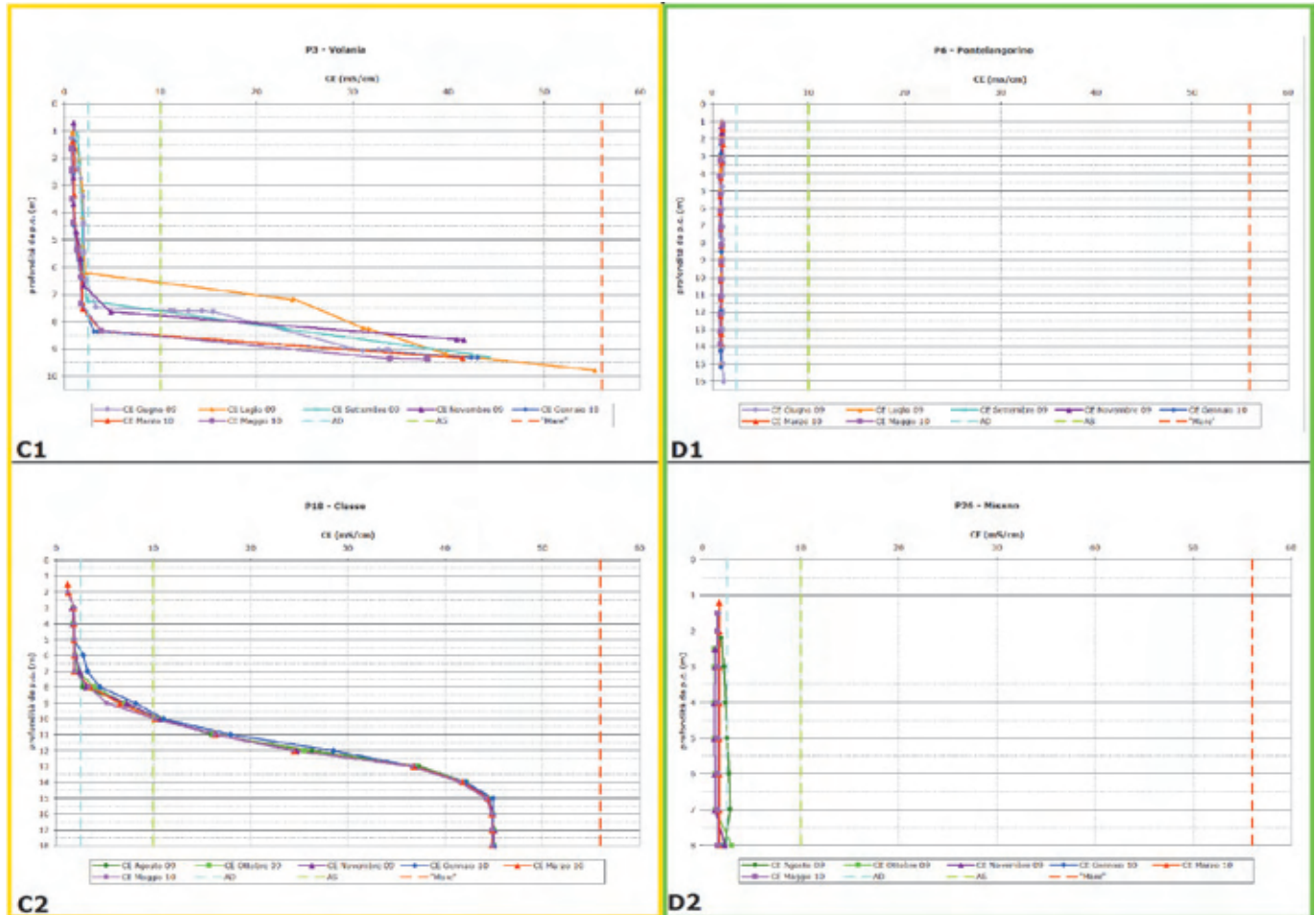


Figura 4.3 – Piezometri ricadenti nella zona gialla (C) e nella zona verde (D). All'interno di una stessa zona i piezometri possono avere log caratteristico e valori assoluti di CE anche molto diversi tra loro. La scala verticale rappresenta la profondità dal p.c.

media del Mare Adriatico proposto in Piccinini et alii, 2008).

Nella Figura 4.2 A sono rappresentati due piezometri scelti fra quelli che ricadono nella zona rossa, in cui la colonna d'acqua è salata per tutto lo spessore dell'acquifero. Il piezometro P12 – Reno (Figura 4.2 A1) mostra una forte variabilità stagionale nei valori di CE dovuta probabilmente alle proprietà idrodinamiche locali: i valori più alti si sono registrati nella campagna di Agosto 2009 e sono andati via via diminuendo in relazione alle abbondanti precipitazioni invernali ed al conseguente aumento del carico idraulico che ha contrastato l'ingressione del cuneo salino.

Nel piezometro P11 – Collettore Fosse (Figura 4.2 A2), situato nelle valli del Mezzano, risulta evidente la somiglianza tra i vari log e il brusco passaggio della CE da valori inferiori ai 10 mS/cm a valori prossimi a quelli medi del Mare Adriatico, che identifica un'interfaccia netta, con lievi oscillazioni stagionali di quota, tra acque salmastre ed acque molto salate.

Le piogge invernali non sembrano sortire effetti apprezzabili sull'ingressione del cuneo salino, se non un lieve abbassamento di quota della zona di transizione che passa da una profondità di 3 m dal piano campagna del mese di Luglio 2009 ai 4.5 m da p.c. di Gennaio e Marzo 2010.

Un analogo comportamento è stato rilevato anche nel piezometro P10 – Collettore Pega, anch'esso ubicato nel Mezzano, a dimostrazione del fatto che in queste zone di bonifica del basso ferrarese l'attuale stato di salinizzazione non è spiegabile solamente con lo schema classico del cuneo di ingressione marina, ma deve considerare la più recente storia geologica del sottosuolo: si tratta infatti di terre sottratte al mare o a zone di laguna salata attraverso le bonifiche, dove l'irrigazione artificiale operata dall'uomo negli ultimi decenni/secoli ha permesso di sostituire lentamente e solo superficialmente le acque salate contenute naturalmente nei sedimenti con acque relativamente dolci (seppur superiori ai 2.5 mS/cm).

I piezometri riportati nella Figura 4.2 B sono invece rappresentativi della zona arancione in cui nelle diverse stagioni è presente un sottile spessore di acqua dolce.

Nel piezometro P2 – Elciola (Figura 4.2 B1) la forma del *log* di conducibilità si ripete uguale nelle diverse campagne ed anche i valori di CE risultano pressoché costanti.

Lo spessore di acqua dolce varia tra i 2 ed i 3 m. Si nota un peggioramento della salinità nella parte più superficiale nei mesi di Settembre e Novembre 2009, mentre a Gennaio 2010 lo spessore di acqua dolce viene incrementato dall'infiltrazione delle acque piovane invernali.

Non c'è un passaggio netto da valori bassi a valori elevati di CE, ma vi è sempre un passaggio graduale a testimonianza di una zona di transizione più spessa e diffusa. Il piezometro P8 – San Giuseppe (Figura 4.2 B2), situato in una zona di lagune salmastre in cui la bonifica è avvenuta solo di recente (anni '50), presenta uno spessore di acqua dolce che varia, a seconda delle campagne, tra i 2 e i 4 m ed un'interfaccia piuttosto netta tra acque dolci ed acque salate con blande oscillazioni stagionali di quota.

Queste ultime raggiungono valori di CE molto superiori a quelli medi del Mare Adriatico, probabilmente per la presenza di acque connate ad elevata salinità "intrappolate" nella parte più profonda dell'acquifero freatico.

L'oscillazione della zona di transizione non sembra avere una connessione univoca con le precipitazioni (ad esempio a Marzo 2010 è più alta che a Settembre 2009), ma è probabilmente legata anche al regime irriguo dell'area circostante il punto di misura.

Nella Figura 4.3 sono invece proposti degli esempi di *log* di conducibilità in piezometri ricadenti nelle zona gialla (C) e nella zona verde (D).

Il piezometro P3 – Volania (Figura 4.3 C1), ad esempio, ricade nella zona gialla e presenta infatti un considerevole spessore di acqua dolce (tra 6 e 7.5 m) al di sopra dell'interfaccia, in questo caso piuttosto netta, tra acque dolci e salate.

Come si vede, il *log* ha grossomodo lo stesso andamento nelle diverse stagioni, mentre varia la posizione dell'interfaccia che in Luglio 2009 si trova a 6 m di profondità dal p.c., mentre a Maggio 2010 è a circa 8.5 m dal p.c..

Nel piezometro P18 – Classe (Figura 4.3 C2) si registrano sempre gli stessi valori di CE con la profondità ed il suo profilo si ripete sempre in maniera identica.

Si nota un ispessimento della porzione di acqua dolce più superficiale nei mesi primaverili del 2010, a seguito dell'inverno piovoso.

L'incremento di questo spessore, che si traduce in un aumento del carico idraulico, non ha tuttavia alcun effetto sulla zona di transizione che, come detto, rimane stabile nel tempo.

I piezometri P6 – Pontelangorino (Figura 4.3 D1) e P26 – Misano (Figura 4.3 D2) sono rappresentativi della zona

verde, in cui l'intero spessore di acqua nel piezometro risulta sempre dolce anche, come nel caso di Misano e degli altri piezometri a Sud di Ravenna, a poche decine di metri dal mare.

Gli esempi riportati mostrano situazioni assai diverse tra loro in cui le variazioni dei parametri misurati sono influenzate da molteplici fattori naturali e antropici di carattere locale e regionale (condizioni meteo-climatiche, livelli idrometrici, interventi di bonifica ecc.) e risultano intrinsecamente legate alle caratteristiche geologiche dell'acquifero.

In alcuni casi, ad esempio, è stato possibile confrontare e relazionare queste variazioni con l'andamento di importanti fattori di influenza come le precipitazioni o i prelievi.

In particolare, mettendo a confronto i livelli piezometrici misurati nelle varie campagne con l'andamento delle precipitazioni della rete pluviometrica di ARPA SIMC, si sono potute trarre interessanti informazioni sulla dinamica delle acque sotterranee e sull'influenza, in ciascun sito, di alcuni fattori di condizionamento locale, siano essi di origine naturale o antropica.

Nella Figura 4.4 vengono comparati i livelli piezometrici misurati in tre punti della rete di monitoraggio e le piogge cumulate a partire dal 1 Maggio 2009 nella stazione pluviometrica di Ponte Chiavica, nel Comune di Ravenna.

Come si vede, nel piezometro P12 – Reno, dove l'acquifero è propriamente freatico, la corrispondenza tra piogge cumulate e innalzamento del livello piezometrico è praticamente immediata; nel piezometro P15 – San Romualdo, l'innalzamento del livello piezometrico avviene con un pò di ritardo rispetto alle piogge, a testimonianza della presenza, in questa zona, di un acquifero semiconfinato; nel piezometro P15 – Mezzano, infine, dove l'acquifero è confinato, si nota un netto ritardo tra le piogge e l'aumento del livello piezometrico.

Un esempio di interferenza dell'attività antropica col sistema, è invece quello di Figura 4.5, dove si nota un forte abbassamento del livello nel piezometro P3 – Volania nonostante il deciso incremento delle precipitazioni, probabilmente per l'entrata in funzione degli impianti idrovori necessari ad evitare l'allagamento delle aree topograficamente depresse delle zone bonificate.

La cadenza delle misure fatte non ha tuttavia permesso di valutare a tutto tondo l'influenza di questa dinamica di gestione delle acque sulla variazione dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata.

Le difficoltà maggiori nell'interpretazione dei dati raccolti, nel tentativo di definire un quadro più approfondito rispetto a quello di sintesi regionale presentato nella Figura 4.1, risiedono nella correlazione a scala regionale tra le informazioni rese da ciascun piezometro.

Lo studio di casi simili (Barlow, 2003) e la disponibilità di un modello geologico approfondito quanto quello precedentemente descritto, forniscono però un valido punto di partenza.

Partendo quindi dalle sezioni geologiche che intercettano i transesti di piezometri perpendicolari alla linea di riva e riportando su di esse i valori di CE misurati nelle diverse campagne, si possono correlare i dati rilevati nei diversi punti ed osservare la variazione della zona di transizione nel tempo nella terza dimensione

ed in relazione alle caratteristiche fisiche di un'area più ampia rispetto a quella dell'intorno di ciascun piezometro.

A titolo di esempio, riportando sulla sezione di Figura 2.3 i valori di CE misurati nei i piezometri P18 – Classe, P17 – Porto Fuori e P19 – Punta Marina nei mesi di Agosto 2009 e Gennaio del 2010 si ottiene lo schema concettuale presentato nella Figura 4.6.

Le linee tratteggiate rappresentano le isocone di ugual conducibilità corrispondenti ai limiti di 2.5 mS/cm (linea

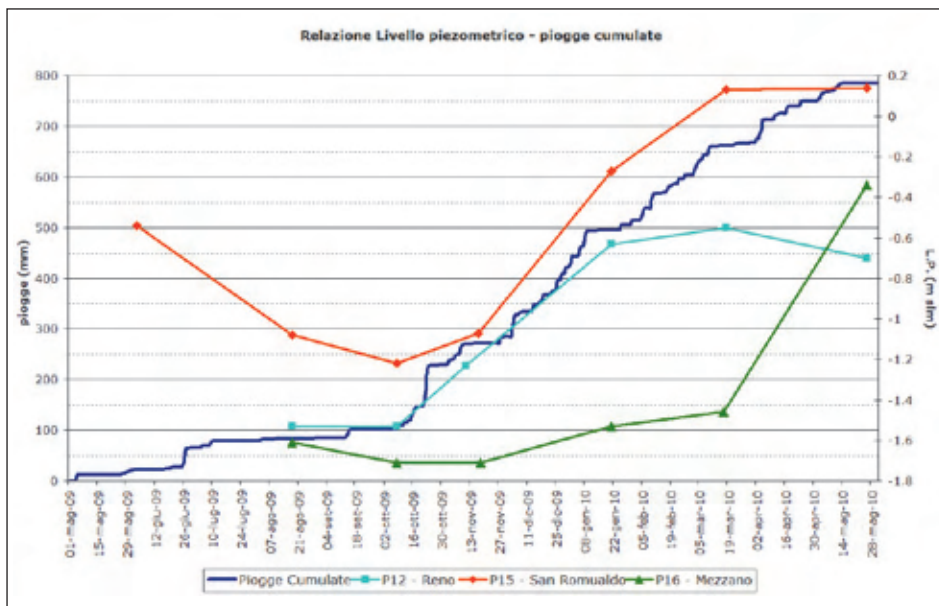


Figura 4.4 – Confronto fra piogge cumulate e livelli piezometrici nei piezometri P12 – Reno, P15 – San Romualdo e P16 - Mezzano

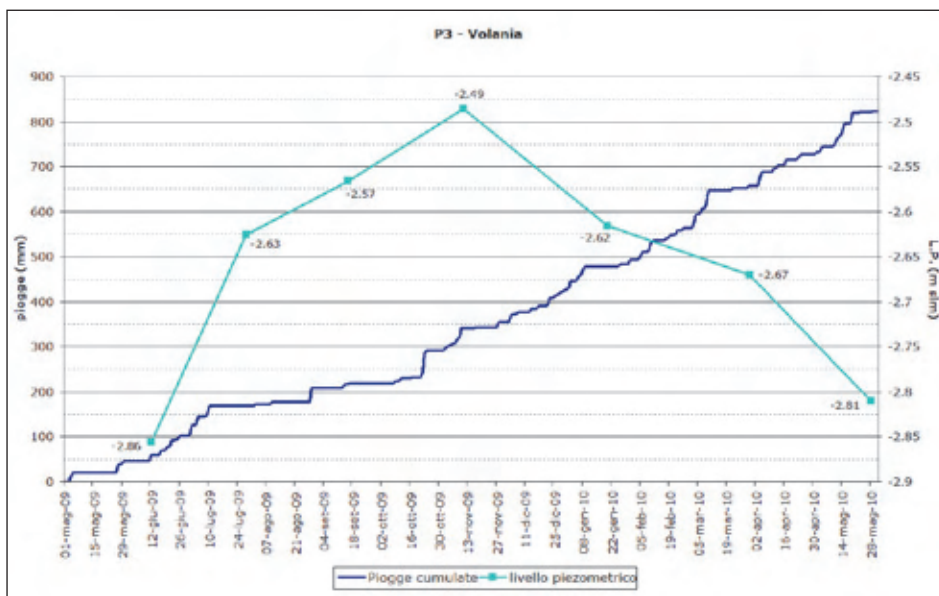


Figura 4.5 – Influenza delle idrovore sul livello piezometrico a Volania (FE)

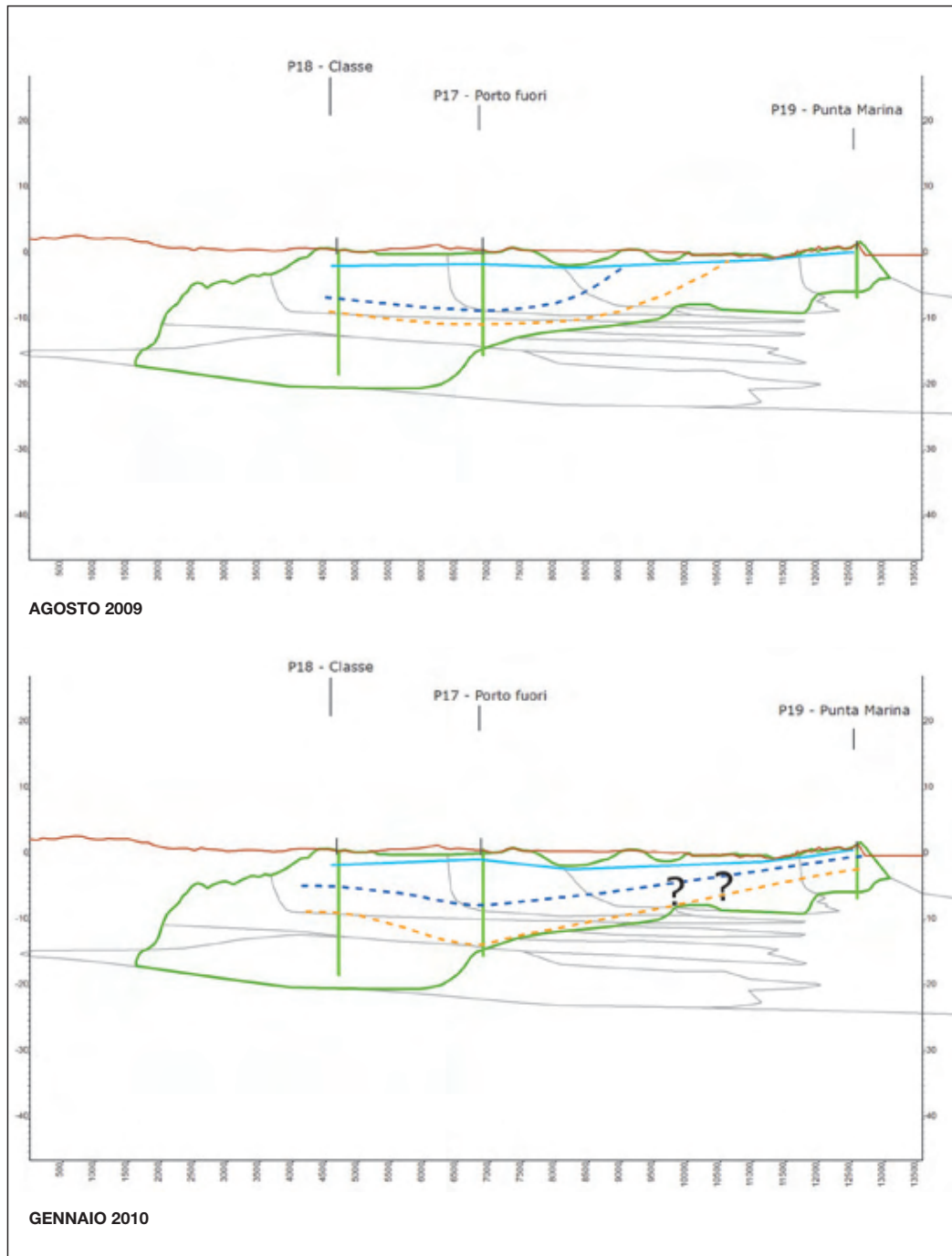


Figura 4.6 –La linea tratteggiata blu interpola il valore di riferimento di 2.5 mS/cm, mentre quella arancione interpola i 10 mS/cm. In verde scuro è rappresentato l’acquifero, in azzurro il livello piezometrico

blu) e 10 mS/cm (linea arancio) e sono state tracciate, oltre che sulla base dei valori misurati, attraverso l’interpretazione idrogeologica della sezione: le acque salate e salmastre sono contenute nei depositi trasgressivi ed in quelli regressivi, costituiti da sabbie più o meno omogenee da medie a grossolane fino a ghiaie fini nelle porzioni più alte ed occidentali.

L’acqua dolce si trova invece nelle sabbie fini e medie di cordone litorale che costituiscono l’ala meridionale

dell’antico delta romano e del delta del Po di Primaro tra i piezometri P18 e P17 e, stagionalmente, nei più recenti rilievi di Punta Marina (P19). Tra i due sistemi di cordoni si trovano i depositi litologicamente più eterogenei legati alla progradazione dell’antica foce dei fiumi Ronco e Montone.

Nella Figura 4.6 si nota in particolare come vari l’andamento della zona di transizione tra Porto Fuori e Punta Marina.

Prendendo come riferimento la linea che identifica i 2.5 mS/cm, si vede che in questa zona nel mese di Agosto 2009 l'acqua dolce nell'acquifero freatico è limitata ad una bolla che si estende poco ad Est di Porto Fuori per la presenza di acqua salata che, a Punta Marina, interessa tutto lo spessore dell'acquifero.

Questa situazione è certamente da imputarsi alla dinamica stagionale del sistema che ad Agosto si trova in magra, con scarse precipitazioni a fronte di un'elevata evapotraspirazione, ed è probabilmente favorita anche dalla direzione di flusso delle acque sotterranee che su questa sezione, come si vede, è diretto (seppure con un gradiente molto blando) da mare verso terra.

Nel mese di Gennaio 2010 si registra un generale aumento del livello piezometrico e si nota che la bolla di acqua dolce è estesa (secondo l'interpretazione preliminare data) per tutta la lunghezza della sezione, ovvero fino a Punta Marina, dove si sviluppa un cordone litorale più rilevato.

Non avendo dati a disposizione tra i piezometri P17 e P19, rimane certamente dubbio se si tratti di uno spessore di acqua dolce continuo o di bolle tra loro separate e indipendenti.

Anche in questo caso, comunque, la stagionalità gioca un ruolo importante: le intense piogge autunnali e invernali e l'assenza di evapotraspirazione determinano un aumento del carico idraulico in grado di scalzare in parte il cuneo salino.

5. CONCLUSIONI

Lo studio dell'acquifero freatico costiero dell'Emilia-Romagna è partito dall'approfondimento della geologia di sottosuolo che ha portato alla realizzazione di un modello concettuale a scala regionale sulla base del quale è stata poi allestita la rete di monitoraggio delle acque sotterranee, costituita da 30 piezometri distribuiti lungo l'intera fascia costiera.

L'analisi dei dati raccolti nel primo anno di monitoraggio, con 6 campagne di misura all'attivo, permette di trarre alcune conclusioni preliminari sul fenomeno di contaminazione da acqua salata dell'acquifero freatico costiero regionale. I profili di conducibilità, caratteristici di ciascun punto, ma assai diversificati da piezometro a piezometro, testimoniano una complessa architettura del sistema acquifero costiero superficiale.

Nelle diverse campagne di misura, inoltre, le variazioni dei profili di conducibilità di ciascun piezometro non sono state radicali e ciascuno ha mantenuto, in linea generale, il suo "aspetto" tipico, con eccezione di alcuni punti molto prossimi al mare o a corsi d'acqua superficiali interessati da ingressione di acqua marina.

Sulla base della presenza di uno spessore più o meno consistente di acqua dolce al di sopra dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata, è stata proposta una prima sintesi della distribuzione della qualità dell'acqua dell'acquifero in oggetto a scala regionale.

Sono state messe in relazione le variazioni dei vari parametri misurate nei piezometri con l'andamento di possibili fattori di influenza naturali o antropici, come le precipitazioni e i prelievi: generalmente vi è una buona corrispondenza tra la piovosità, l'aumento del livello piezometrico e l'andamento del profilo verticale di conducibilità: a maggiori piogge corrisponde un maggiore spessore acqua dolce ed un generale approfondimento dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata.

Tuttavia, in alcuni casi si nota che ad un consistente aumento delle precipitazioni segue una diminuzione del livello piezometrico, da imputarsi, con buona probabilità, all'entrata in funzione degli impianti idrovori presenti sul territorio.

Le sezioni geologiche costruite, "vestite" con i dati misurati nei piezometri, consentono di proporre le prime correlazioni e tracciare le isocone di conducibilità nel sottosuolo e quindi di avanzare interessanti considerazioni sulla dinamica del sistema ed in particolare sulle variazioni dell'interfaccia dolce - salata riscontrate nelle varie campagne di monitoraggio.

È evidente, per quanto visto, che l'acquifero freatico costiero dell'Emilia-Romagna dietro una apparente semplicità presenta le complessità proprie dei corpi geologici, oggetti tridimensionalmente disomogenei e anisotropi, e dei processi chimico-fisico che vi hanno sede; i dati raccolti nel primo anno di monitoraggio e le conclusioni preliminari qua espone vogliono essere un primo passo verso una appropriata caratterizzazione fisica e dinamica della risorsa idrica da cui dipendono importanti ecosistemi naturali.

Il prosieguo del monitoraggio e l'ulteriore approfondimento del modello concettuale avranno lo scopo di meglio definire le caratteristiche idrogeologiche ed idrodipersive dell'acquifero in esame, nonché i principali termini del bilancio idrico sotterraneo, che concorreranno all'implementazione di una modellistica numerica di flusso a densità variabile a partire da specifiche aree localizzate.

RINGRAZIAMENTI

- *Raffaele Pignone* – Responsabile del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia – Romagna
 - *Prof. Marco Bondesan* – Parco Regionale del Delta del Po
 - *Alceste Zecchi, Anna Maria Pangallo, Gabriella Dugoni* della Provincia di Ferrara

BIBLIOGRAFIA

Amorosi A., M. C. Centineo, M. L. Colalongo, G. Pasini, G. Sarti, e S. C. Vaiani (2003) - Facies Architecture and Latest Pleistocene-Holocene Depositional History of the Po Delta (Comacchio Area), Italy. *The Journal of Geology*, 111, 39-56

Barlow P.M., 2003. Ground water in freshwater-saltwater environments of the Atlantic Coast. USGS Circular 1262.

Boggess D.H., 1968. Water-supply problems in southwest Florida. U.S. Geological Survey Open-File Report.

Carbognin L., Rizzetto F., Tosi L., Teatini P., Gasparetto-Stori G., 2005. L'intrusione salina nel comprensorio lagunare veneziano. Il bacino meridionale. *Giornale di Geologia Applicata* 2 (2005) 119-124.

Esca S., Venturini L., 2006. Hydrogeological impact of wellpoint dewatering upon unconfined coastal aquifer of the municipality of Cervia (Ravenna - Italy). Proceedings 1st SWIM-SWICA Joint Saltwater intrusion Conference, Cagliari-Chia Laguna, Italy - September 24-29, 2006, 71-77.

Gargini A., Spensieri P., Rossi M. (2001). Monitoraggio dei parametri idrogeologici ed idrochimici della rete freaticometrica costiera della provincia di Ferrara nel periodo 1989-1999. Università degli Studi di Ferrara, Provincia di Ferrara. Italia tipolitografia (Fe).

Martini A., Semenda srl, Daniele G., Angelelli A., 2007. La cartografia Geologica e dei Suoli online.

Rapporto Interno, Servizio Geologico Simico e dei Suoli, Luglio 2007.

Piccinini L., Vincenzi V., Gargini A., 2008. Modellazione di flusso a densità variabile di un acquifero freatico salinizzato. *Giornale di Geologia Applicata* 2008, 9 (2) 249-261.

Post V.E.A., 2005. Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead? *Hydrogeol J*, 16: 120-123.

Rizzini A. (1974) - Holocene sedimentary cycle and heavy mineral distribution, Romagna-Marche coastal plain, Italy. *Sedimentary Geology*, 11, 17-37.

Stefani M. e S. Vincenzi (2005) - The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system. *Marine Geology*, 222-223, 19-48

Ulazzi E., M. Antonellini, G. Gabbianelli (2007) - Characterization of the Coastal Phreatic Aquifer of the Cervia Area (NE Italy). *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, 76, 277-288

Venturini L. (2008) - Impatto idrogeologico degli scavi sotto falda in ambito costiero (Dewatering dei terreni di fondazione). http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/convegni_e_seminari/convegni_2008/2008_10_castell_arquato/06_venturini_catArq_2008.pdf. Presentazione orale in: *Idrogeologia in Emilia-Romagna risorsa, applicazioni e tutela*, 3 ottobre 2008 Palazzo del Podestà Castell'Arquato Piacenza.

LABORATORIO GEOTECNICO Dr. Antonio Mucchi

**Concessione Ministero Infrastrutture e Trasporti
per l'esecuzione e certificazione di prove geotecniche:
decreto n. 52494 del 11/10/04**

**Settore a: prove di laboratorio sui terreni e prove di carico su piastra
(ai sensi dell'art. 8 del DPR 246/1993 - Circolare 349/99/STC)**



Dott. Geol. Antonio Mucchi

www.mucchilab.it

- prove di classificazione geotecnica
- prove di consolidazione edometrica
 - prove di compressione triassiale
 - prove di taglio diretto
- prove su conglomerati bituminosi
- prove di costipamento e CBR
- prove di permeabilità
- altre prove specifiche
- prove di carico su piastra
- prove per stabilizzazione terra-calce

Via A. Ascari, 8 - 44019 Gualdo di Voghiera (FE) - Nuova Area Artigianale
Tel. e fax 0532/815681 - Cell. 368/3048814
email: mucchilab@tin.it - Isc. C.C.I.A.A. di Ferrara n° 170861