Bollettino dell'A.I.C., n. 121-122 / 2004

PROBLEMI NELLA REDAZIONE DELLA CARTOGRAFIA IDROGEOLOGICA IN ZONE COSTIERE DELL'ADRIATICO EMILIANO ROMAGNOLO

PROBLEMS IN THE CONSTRUCTION OF HYDROLOGIC MAPS OF EMILIA-ROMAGNA COASTAL AREA, NORTHEN ADRIATIC SEA

Ulazzi E. (*), **Antonellini M.** (**), **Gabbianelli G.** (*)

(*) Università di Bologna, Centro interdipartimentale di Ricerca per le Scienze Ambientali - via Sant'Alberto, n.163 - 48100 Ravenna

(**) Stanford University (CA, USA), Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford, CA 94305, 2115 USA

Riassunto

Nell'ambito dello studio dell'intrusione d'acqua salata nell'acquifero freatico costiero del Comune di Cervia, la creazione di una carta delle isofreatiche è stata particolarmente difficile a causa della mancanza di una topografia del territorio dettagliata e aggiornata e d'informazioni omogenee e recenti relativamente alla profondità della falda. Le uniche informazioni disponibili si riferiscono al rilievo topografico del 1978 e a dati freatimetrici relativi al 1994, troppo vecchi se si considera che l'area investigata si colloca in una zona con forti tassi di subsidenza (maggiore di 2 mm/anno) e caratterizzata da enormi trasformazioni indotte sia dalle opere di bonifica sia dall'enorme sviluppo urbanistico e turistico.

Un nuovo rilievo topografico di dettaglio e il monitoraggio della falda su base GIS, hanno permesso di creare una carta delle isofreatiche aggiornata e precisa, da cui identificare e localizzare la presenza di acqua salata nell'acquifero superficiale. L'importanza della precisione topografica è stigmatizzata dal fatto che la profondità della superficie di separazione fra acque dolci e salate, secondo la legge di Ghyben-Herzberg, è circa 40 volte l'altezza del livello freatico sopra il livello del mare. Una errore di pochi centimetri nella stima di quest'altezza si traduce in un errore 40 volte superiore nella localizzazione della superficie di separazione.

Molte delle quote topografiche nel nuovo rilievo si sono rilevate sotto il livello del mare o in prossimità di esso e le quote freatiche sono raramente, se non nelle zone dunari e nei mesi invernali, sopra il livello del mare. I nuovi rilievi sono consistenti con i dati di conducibilità elettrica che mostrano un acquifero prevalentemente salato.

Parole chiave: Intrusione salina, opere di bonifica, estrazione di acqua sotterranea.

Abstract

During the characterization of the salt-water intrusion in the freatic aquifer of Cervia, we had many problems in reconstructing the water table maps, because of the lack of an updated topography of the territory.
The only available information refer to the topographical survey of 1978 and to water table depths data going back to 1994, too old considering that the investigated area is placed in a strong subsidence region (larger than 2 mm/year).
A new detailed topographical survey and aquifer monitoring, integrated within a GIS, allowed to construct new precise and updated water table maps that characterize the actual condition of salt water intrusion in the aquifer. The importance of topographical precision stems from the fact that the salt water – fresh water interface depth, as stated by the Ghyben-Herzberg relationship, is approximately 40 times the height of water table above sea level. An error of a few centimeters in estimating this height translates in an error 40 times larger in estimating the saltwater/freshwater interface depth.
Most of the topography in this area is now placed below sea level or in its proximity and the freatic level is very rarely above it. The new water table maps are consistent with the electric conductivity data that show an aquifer almost completely salty.

Introduzione

Gli acquiferi delle zone costiere, spesso estremamente urbanizzate e con un fabbisogno di acqua dolce che diventa sempre maggiore, rappresentano una preziosa risorsa idrica (es. California, Florida, Hawaii, Olanda, solo per citare alcuni casi molto conosciuti (Segol et al. 1976, Sonenshein R.S. 1995, Souza W.R. et al. 1987, Konikow L.F. et al. 1999).

Essi sono estremamente sensibili ai cambiamenti indotti sia dalla naturale evoluzione della morfologia costiera, che rappresenta un sistema altamente dinamico e complesso, sia dalle modificazioni del territorio indotte dall'azione umana (Carter R.W.G. 1988).

La ragione di questa vulnerabilità prende il nome di Intrusione Salina, definita come l'ingressione di acqua salata in un acquifero derivante da una diminuzione, naturale o indotta dalle attività antropiche, del carico idraulico di acqua dolce originaria dell'acquifero stesso.

L'equilibrio tra l'uscita di acqua dolce e l'ingresso di acqua salata dipende dal livello freatico e dal gradiente idraulico della tavola d'acqua e segue principalmente la relazione di Ghyben-Herzberg (1889-1901) (Fig. 1) che stabilisce la profondità della superficie di separazione acqua dolce – acqua salata proporzionalmente alla quota freatica della tavola d'acqua.

La causa principale dell'intrusione di acqua salata riscontrabile nella maggior parte degli acquiferi costieri è rappresentata da un uso intensivo e spesso incontrollato della riserva di acqua dolce sotterranea mediante pozzi di estrazione, che col tempo devono poi essere abbandonati in conseguenza della progressiva salinizzazione dell'acquifero stesso (Bear et al., 1999).

Lo studio effettuato ha riguardato la caratterizzazione chimico-fisica dell'acquifero freatico costiero di Cervia per ve-

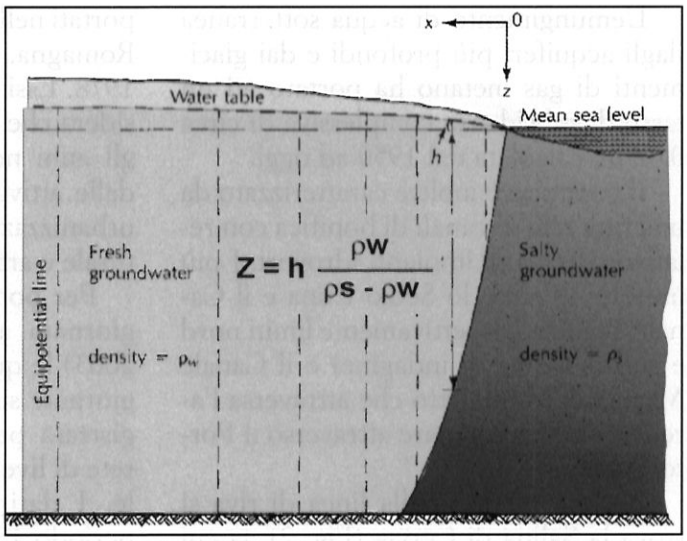

FIGURA 1 – *Relazione di Ghyben-Herzberg.*

rificare l'estensione dell'intrusione salina e identificare i principali fattori che hanno portato allo stato attuale. Qui si riportano in particolare le difficoltà riscontrate nella creazione della cartografia dell'acquifero.

Inquadramento dell'area

L'area indagata è rappresentata dall'acquifero costiero del Comune di Cervia, per un'estensione complessiva di circa 20 km^2.

L'acquifero superficiale non confinato si estende per una profondità variabile da 0 a circa -18 m in prossimità della linea di costa.

A partire dagli anni '50 il territorio costiero è stato interessato da una progressiva urbanizzazione che ha portato all'impermeabilizzazione di circa il 50% dell'area considerata. Il restante territorio è occupato per lo più da campi agricoli e da pineta comunale (Fig. 2) (compresa nel Parco del Delta del Po).

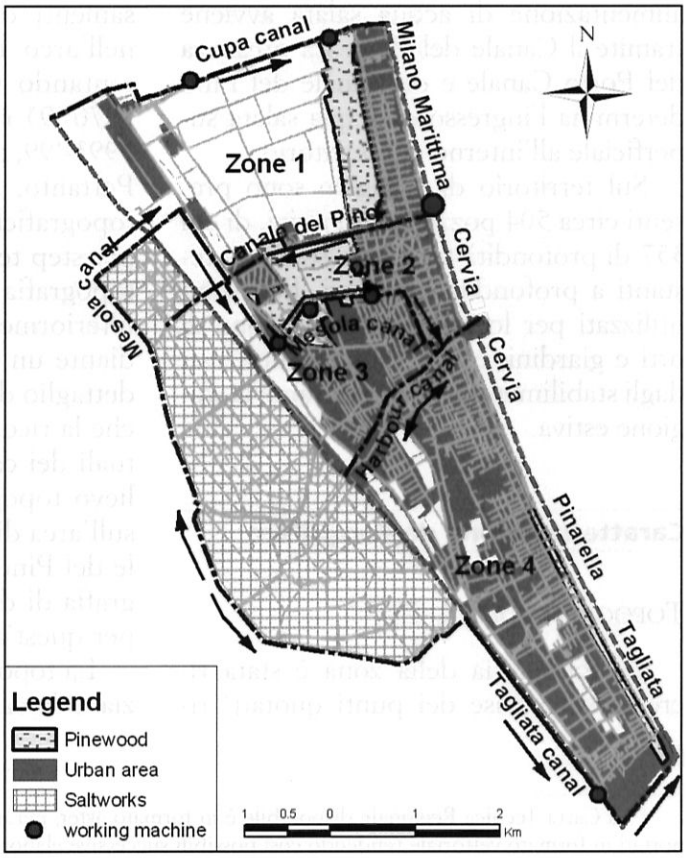

FIGURA 2 – *Study area.*

L'emungimento di acqua sotterranea dagli acquiferi più profondi e dai giacimenti di gas metano ha portato ad un tasso di subsidenza complessiva di circa 0.42 m, calcolata dal 1950 ad oggi.

Il territorio è inoltre caratterizzato da una fitta rete di canali di bonifica con relativo sistema di impianti idrovori. I più importanti sono lo Scolo Cupa e il Canale Tagliata (rispettivamente limiti nord e sud dell'area di indagine) e il Canale Mesola di Montaletto che attraversa l'area e confluisce a mare attraverso il Porto Canale.

A circa 1.5 km dalla linea di riva si trova la Salina di Cervia (Fig. 2), la cui alimentazione di acqua salata avviene tramite il Canale del Pino. La presenza del Porto Canale e del canale del Pino determina l'ingresso di acqua salata superficiale all'interno del territorio.

Sul territorio di indagine sono presenti circa 504 pozzi ancora attivi, di cui 357 di profondità tra i 3 e i 10 m, e i restanti a profondità maggiori. Essi sono utilizzati per lo più per l'irrigazione di orti e giardini, e 232 vengono utilizzati dagli stabilimenti balneari durante la stagione estiva.

Caratterizzazione dell'acquifero

Topografia dell'area

La topografia della zona è stata ricreata sulla base dei punti quotati[1] riportati nella C.T.R. della Regione Emilia-Romagna, scala 1:5000, aggiornata al 1978. Essi sono troppo vecchi se si considera che l'area ha subito nel corso degli anni notevoli modificazioni indotte dalle attività umane: opere di bonifica, urbanizzazione crescente, subsidenza naturale e artificiale.

Per poter ottenere la topografia aggiornata al periodo di studio (2002-2003) le quote sono state dapprima aggiornate sulla base della subsidenza registrata per il periodo 1978-'99 dalla rete di livellazione di caposaldi regionale. I dati disponibili sono relativi al periodo 1950-'99 e evidenziano abbassamenti del territorio non omogenei nell'arco temporale considerato, presentando valori maggiori nel periodo 1970-'93 rispetto al successivo periodo 1993-'99, e non omogenei sul territorio. Pertanto, l'aggiornamento delle quote topografiche del 1978 è stato effettuato per step temporali successivi. Infine, la topografia così ottenuta al 1999 è stata ulteriormente aggiornata al 2003 mediante un nuovo rilievo topografico di dettaglio dell'area, che ha permesso anche la ricostruzione delle arginature attuali dei canali; dal momento che il rilievo topografico è stato eseguito solo sull'area di 5 km^2 compresa tra il Canale del Pino e il Porto canale, una topografia di dettaglio è stata ottenuta solo per quest'area (Fig. 3).

La topografia così ricostruita evidenzia un'area più elevata topograficamente

[1] La Carta Tecnica Regionale disponibile è in formato aster, pertanto utilizzando ArcGis 8.2 sono stati portati in formato vettoriale rendendo così possibili successive elaborazioni.

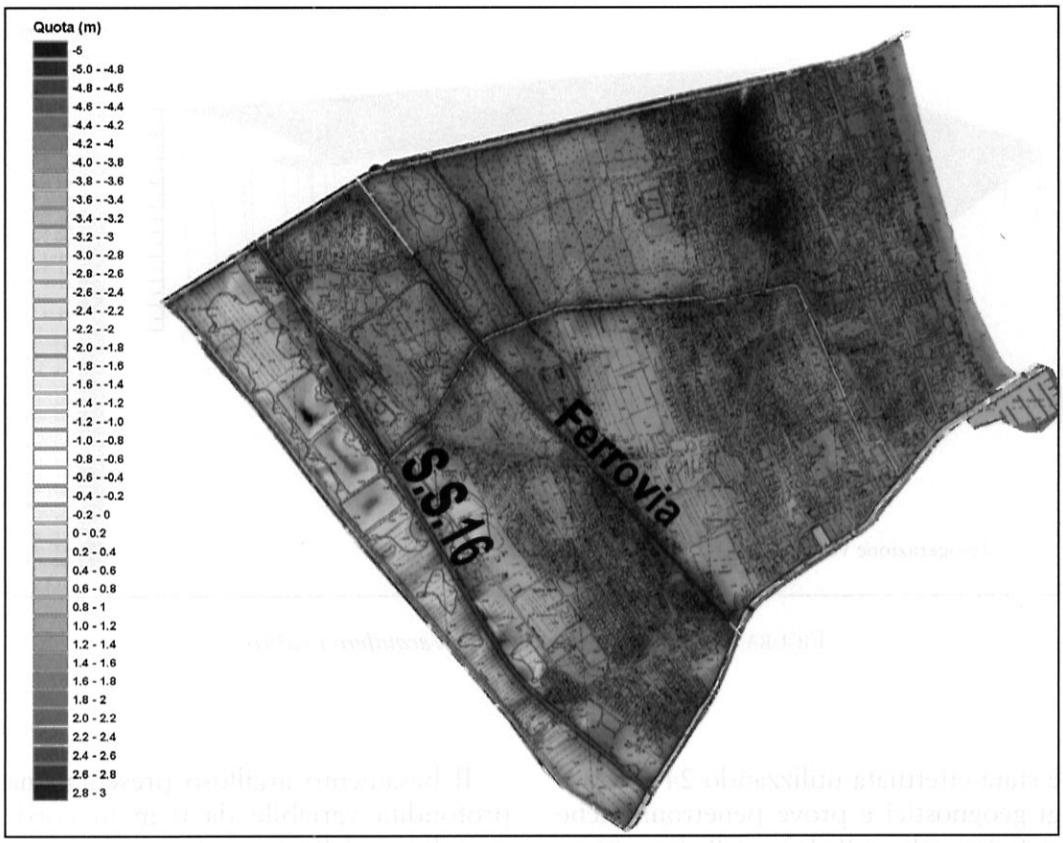

FIGURA 3 – *Topografia dell'area aggiornata al 2003.*

in prossimità e lungo la linea di riva, con quote comprese tra 1.2 e 2 m s.l.m.m.. Nella zona più settentrionale si evidenzia un'area più rilevata che arriva a quote di 2.8-3 m s.l.m.m., residuo di un'antica duna che tutt'ora è presente nell'area più a nord, occupata dalla pineta di Milano Marittima nelle quali si raggiungono quote fino a 5-5.5 m s.l.m.m..

Procedendo verso ovest si identifica un'area più depressa a quota topografica compresa tra 0.2-1.2 m s.l.m.m. che si estende indicativamente fino alla ferrovia, ben evidente da un rilevato. Sono però da notare alcune aree depresse sotto il l.m.m. nella pineta comunale di Cervia e nella zona retrostante la S.S. 16, nella quale si localizzano anche bacini d'acqua delle ex cave.

LIVELLO CONFINANTE BASALE DELL'ACQUIFERO

La ricostruzione della lito-stratigrafia dell'acquifero freatico, eseguita solo sull'area interessata dal rilievo topografico,

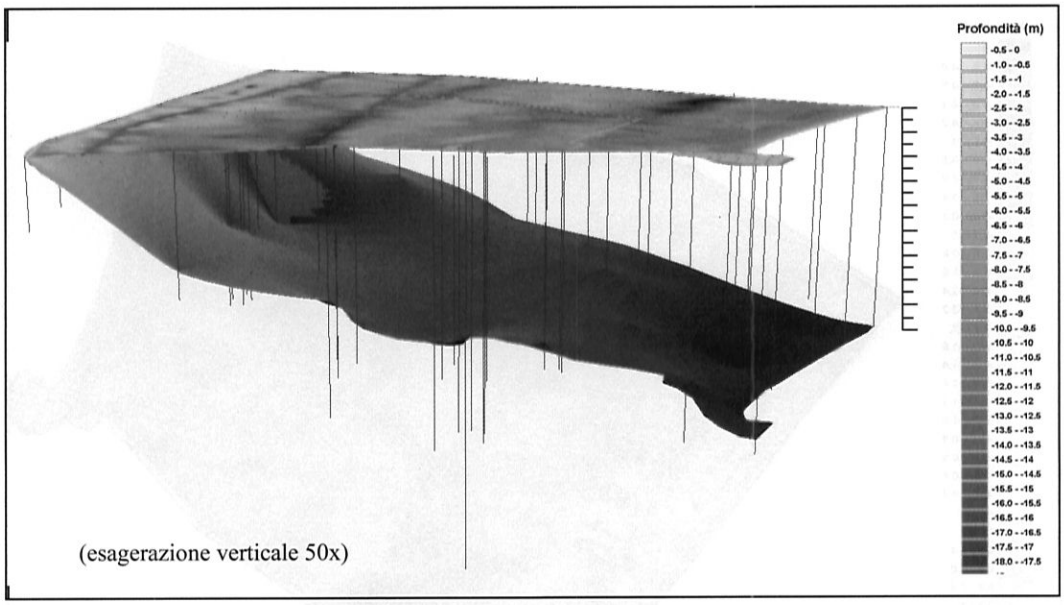

FIGURA 4 – *Basamento argilloso dell'acquifero freatico.*

è stata effettuata utilizzando 24 sondaggi geognostici e prove penetrometriche statiche scelte sulla base della loro attendibilità.

Le descrizioni litologiche sono state normalizzate utilizzando la scala granulometrica di Udden-Wentworth. Le elaborazioni sono state effettuate mediante il software Rockworks e implementate in un sistema GIS.

L'acquifero è costituito prevalentemente da sabbia medio-fine, con una componente media nella zona più prossima a costa e una componente più fine prevalentemente nella zona retrostante. Si tratta comunque di sabbia con presenza di livelli limosi-limosi/argillosi, particolarmente abbondanti nella zona centrale dell'area considerata.

Il basamento argilloso presenta una profondità variabile da 0 m in corrispondenza della linea di massima trasgressione marina a circa –18 m in corrispondenza della linea di costa. Si approfondisce inoltre in direzione S-N.

MAPPE DELLE ISOFREATICHE

Sull'area di studio è stato impostato un monitoraggio mensile dei parametri di profondità della falda, di temperatura e di conducibilità elettrica per il periodo Giugno '02-Maggio '03. La rete di monitoraggio è formata da 187 punti, costituiti da 69 piezometri (di cui 63 della profondità di circa –3 m e 6 della profondità di circa –12/-15 m), 20 pozzi a largo diametro, 50 pozzi a servizio degli

stabilimenti balneari e 50 punti lungo canali presenti nell'area di indagine, nonché 6 bacini d'acqua. La mancanza di punti di monitoraggio lungo la fascia costiera, che rappresenta anche la porzione di acquifero più sensibile all'intrusione salina, ha richiesto l'installazione di ulteriori piezometri lungo costa per il rilievo della profondità della falda.

Le carte delle isofreatiche (Fig. 5), elaborate solo per l'area investigata con rilievo topografico, che ha previsto anche la livellazione dei punti di monitoraggio.

Esse evidenziano un acquifero quasi completamente sotto il l.m.m. o di pochi cm al di sopra di esso, e non presenta quindi un carico idraulico tale per poter frenare l'intrusione di acqua salata alla base dell'acquifero (Ghyben-Herzberg). Le uniche aree poste al di sopra del livello del mare si collocano in prossimità della linea di costa, e lungo i canali presenti nell'area (Canale del Pino, Porto Canale e Canale Mesola di Montaletto). La freatica varia stagionalmente con un'escursione media di circa 0.9 m, con valori massimi di 0.82 m s.l.m.m. in inverno e valori minimi in estate a –1.06 m s.l.m.m..

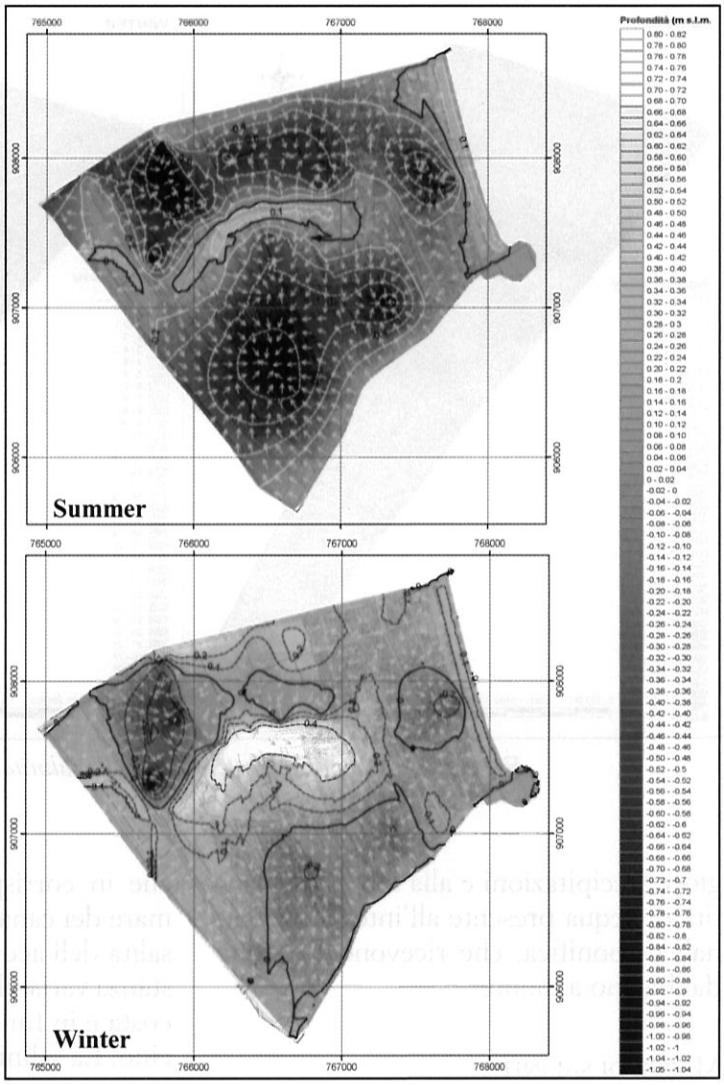

FIGURA 5 – *Mappe delle isofreatiche relative alle stagioni estiva e invernale.*

Durante la stagione autunnale-invernale la freatica si presenta maggiormente al di sopra del l.m.m. grazie alle mag-

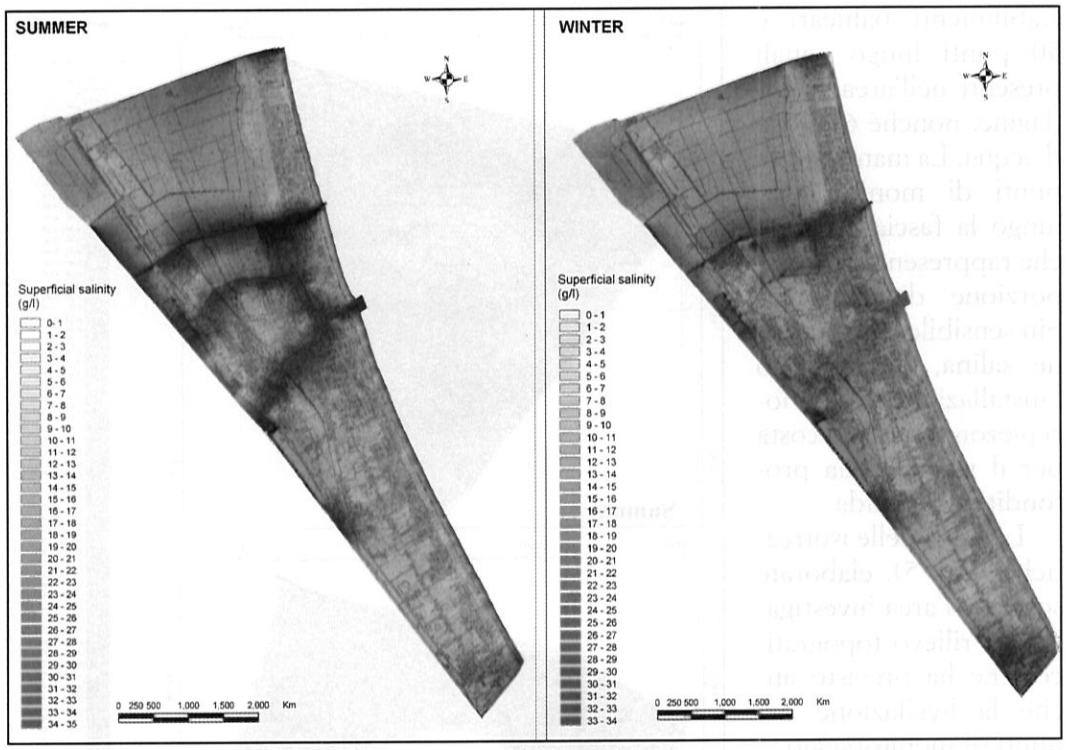

FIGURA 6 – *Mappe di distribuzione delle salinità superficiale.*

giori precipitazioni e alla maggior quantità di acqua presente all'interno dei canali di bonifica, che ricevono le acque dal bacino a monte.

MAPPE DI SALINITÀ

Le mappe della salinità superficiale (di cui si riportano quelle relative al periodo estivo e invernale in Fig. 6) evidenziano l'alimentazione di acqua di origine marina (circa 34 g/l in estate) da parte del Porto Canale e del Canale del Pino fino ad una distanza di circa 250 m dall'asse del canale. L'alimentazione di acqua a salinità >30 g/l, si evidenzia anche in corrispondenza degli sbocchi a mare dei canali di scolo, a causa della risalita dell'acqua di mare fino ad una distanza variabile di 1-1.5 Km dalla linea di costa e in funzione degli apporti dal bacino. La salinità risulta più elevata anche in corrispondenza delle aree pinetate e in vicinanza degli impianti idrovori, come conseguenza del richiamo di acqua salata dal basso a seguito dell'abbassamento della superficie freatica per opera della vegetazione e degli impianti meccanici.

L'acquifero presenta una salinità minore di 2-3 g/l in corrispondenza della fascia costiera e in zone circoscritte, distribuite sul territorio.

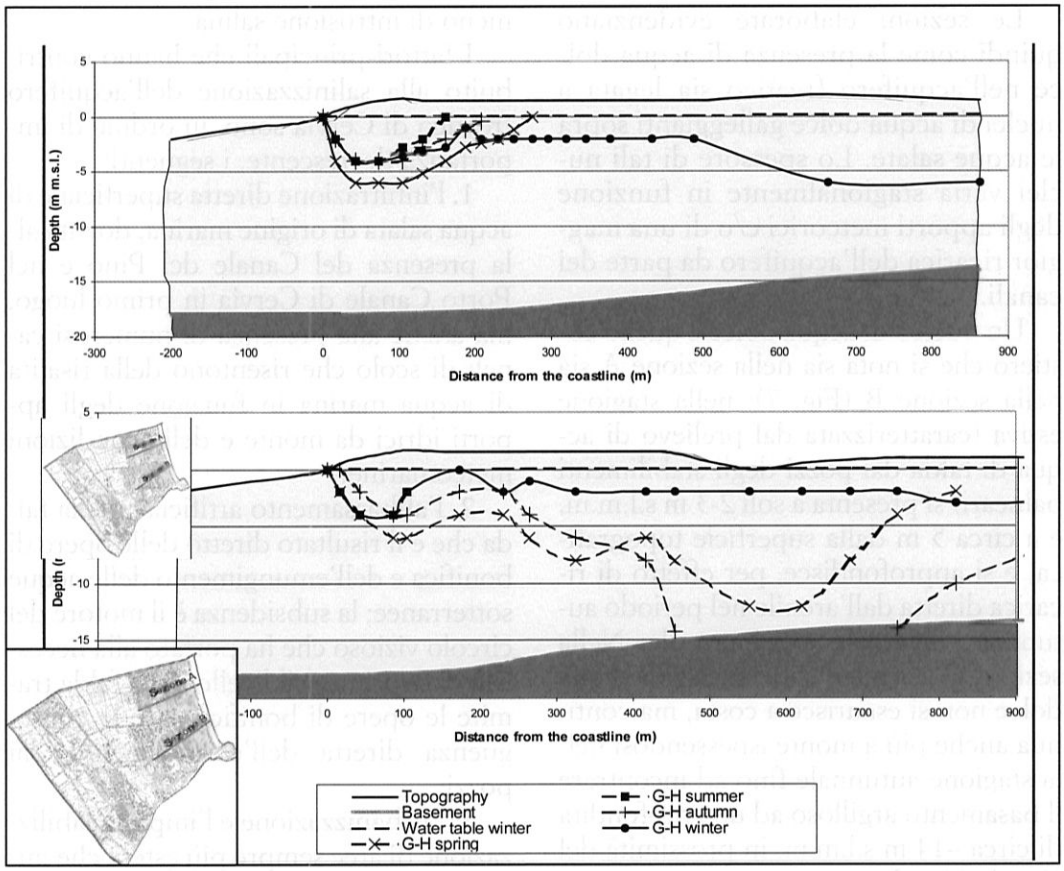

FIGURA 7 – *Interfaccia acqua dolce – acqua salata nell'acquifero studiato.*

Interfaccia acqua dolce - acqua salata

Sulla base della teoria di Ghyben-Herzberg si è ricostruita la posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata partendo dalle mappe delle isofreatiche discusse.

La relazione di G-H è stata applicata su due sezioni (A e B; Fig. 7). L'interfaccia acqua dolce – acqua salata non presenta la forma tipica delineata nella Fig. 1; essa non raggiunge la base dell'acquifero e non determina a mare uno «sbarramento» all'ingressione di acqua salata nell'acquifero freatico costiero studiato: la quota della freatica sopra il livello del mare non è sufficiente per poter spingere l'interfaccia più in profondità fino ad incontrare il basamento dell'acquifero. Situazione che si verifica solamente nella sezione B e relativamente alla stagione autunnale e in corrispondenza del Canale Mesola di Montaletto (Fig. 7).

Le sezioni elaborate evidenziano quindi come la presenza di acqua dolce nell'acquifero freatico sia legata a nuclei di acqua dolce galleggianti sopra le acque salate. Lo spessore di tali nuclei varia stagionalmente in funzione degli apporti meteorici e/o di una maggior ricarica dell'acquifero da parte dei canali.

Un nucleo di acqua dolce è quello costiero che si nota sia nella sezione A sia nella sezione B (Fig. 7); nella stagione estiva (caratterizzata dal prelievo di acqua di falda dai pozzi degli stabilimenti balneari) si presenta a soli 2-3 m s.l.m.m. e a circa 5 m dalla superficie topografica, e si approfondisce, per effetto di ricarica diretta dall'arenile nel periodo autunnale, invernale e primaverile. Nella sezione B il nucleo superficiale di acqua dolce non si esaurisce a costa, ma continua anche più a monte ispessendosi nella stagione autunnale fino ad incontrare il basamento argilloso ad una profondità di circa –14 m s.l.m.m. in prossimità del Canale Mesola.

Conclusioni

Lo studio ha evidenziato la mancanza di dati relativi alla topografia del territorio aggiornato e dettagliato della zona, estremamente importante per poter identificare la posizione dell'interfaccia acqua dolce – acqua salata e delineare l'intrusione di acqua salata nell'acquifero.

Si è inoltre evidenziata l'importanza di una rete di monitoraggio il più omogenea possibile con particolare riguardo alla fascia costiera più sensibile al fenomeno di intrusione salina.

I fattori principali che hanno contribuito alla salinizzazione dell'acquifero freatico di Cervia sono, in ordine di importanza decrescente, i seguenti:

1. l'infiltrazione diretta superficiale di acqua salata di origine marina, dovuta alla presenza del Canale del Pino e nel Porto Canale di Cervia in primo luogo, ma anche alla presenza di numerosi canali di scolo che risentono della risalita di acqua marina in funzione degli apporti idrici da monte e delle condizioni meteomarine;
2. l'abbassamento artificiale della falda che è il risultato diretto delle opere di bonifica e dell'emungimento delle acque sotterranee; la subsidenza è il motore del circolo vizioso che ha portato alla necessità di deprimere il livello della falda tramite le opere di bonifica ed è la conseguenza diretta dell'emungimento dai pozzi;
3. l'urbanizzazione e l'impermeabilizzazione di aree sempre più estese che impediscono l'infiltrazione di acqua meteorica nell'acquifero.

Bibliografia

BEAR J., CHENG A.H.-D., SOREK S., OUAZAR D. and HERRERA I. (1999), *Seawater intrusion in coastal acquifer – concepts, methods and practices.*

FETTER C.W. (2001), *Applied hydrogeology*. Ed. Prentice hall, fourth edition.

CARTER R.W.G. (1988), *Coastal Environments. An introduction to the Physical, Ecological and Cultural System of Coastalines*, 431-443.

SEGOL G., PINDER G.F. (1976), *Transient si-*

mulation of salt water intrusion in south eastern Florida, Water Resour. Res., 12, 65-70.

SOUZA W.R., VOSS C.I. (1987), *Analysis of an anysotropic coastal aquifer system using variable-density flow and solute transport simulation*, Journal of Hydrogeology, 92 (1987), 17-41.

SONENSHEIN R.S. (1995), *Delineation of Saltwater Intrusion in the Biscayne Aquifer, Eastern Dade County, Florida, 1995*, Water-Resources investiogation Report 96-4285. U.S. Department of the interior – U.S. Geological Survey.