

Caratterizzazione geotermica dell'acquifero costiero di Ravenna.

Geothermal characterization of the coastal aquifer near Ravenna (Italy)

Antonellini M., Pandolfini M., Greggio N., Mollema P. N.

Riassunto: L'acquifero costiero della provincia di Ravenna è un'importante riserva di acqua ($2,5 \times 10^9 \text{ m}^3$), sempre più compromessa dal fenomeno dell'intrusione salina. L'uso di questa risorsa è pertanto limitato alla sola salvaguardia di habitat di grande pregio naturalistico quali le Pinete storiche e costiere nonché per le attività agricole. Al fine di accrescere la comprensione delle dinamiche di flusso e l'interscambio fra acque superficiali e sotterranee, si è intrapreso uno studio basato sull'analisi delle temperature delle acque della falda freatica per valutare il grado di interazione fra acque superficiali e sotterranee. Contemporaneamente si è tentato di caratterizzare l'acquifero freatico dal punto di vista termico al fine di poterlo eventualmente sfruttare come "serbatoio di calore" nell'ambito della geotermia a "bassa entalpia", che prevede lo sfruttamento del sottosuolo come serbatoio termico dal quale estrarre calore durante la sta-

gione invernale ed al quale cederne durante la stagione estiva. Lo studio della distribuzione delle temperature nell'acquifero freatico ha permesso di cartografare l'ampiezza della zona che risente delle variazioni stagionali di temperatura, nonché la temperatura alla sommità della zona geotermica. Queste temperature dipendono essenzialmente dall'uso del suolo, dalla distanza dal mare, dai tipi di sedimenti presenti e dall'interscambio fra acque superficiali e sotterranee. La conoscenza dei fattori che causano queste variazioni in temperatura ha permesso di valutare quali sono le zone in cui il potenziale geotermico dell'acquifero può essere sfruttato al meglio dall'eventuale messa in opera di pompe di calore.

Parole chiave: Acquiferi costieri, Relazioni acque sotterranee/superficiali, Salinizzazione, Ravenna, Geotermia a bassa entalpia.

Keywords: Coastal aquifers, Groundwater/surface-water relations, Salinization., Ravenna, Low enthalpy geothermal energy.

Abstract: *The coastal aquifer near Ravenna (Italy) contains a large volume of groundwater ($2,5 \times 10^9 \text{ m}^3$) whose quality has been compromised by sea-water intrusion. Today, the phreatic groundwater is mostly brackish with some lenses of freshwater floating on top of more saline water. This water, although impossible to use as drink-water or for irrigation, is still important to guarantee the health of wetland habitats and especially of the roman historical and coastal pine forests of Ravenna. With the objective of defining the flow pattern within the aquifer and the exchange between surface and ground water, we characterized the temperature distribution in the shallow subsurface by means of a dense network of piezometers. At the same time we had the opportunity to characterize the phreatic aquifer from the geothermal point of view, so that it could eventually be considered for use as a "low enthalpy" heat source. Heat pumps are able to extract heat during the winter and dissipate it during the summer. The temperature of the groundwater in the top layer of the aquifer (surficial zone) is sensitive to the changes in atmospheric temperature throughout the year whereas the temperature of the deeper groundwater follows the geothermal gradient (geothermal zone). One of the scopes of the project is to discover at what depth is located the geothermal zone, so that the aquifer has a constant temperature throughout the year. A constant temperature is needed for storage of heat at low enthalpy. The thickness of the surficial zone and the temperature at the top of the geothermal zone are essentially related to land use, distance from the sea, sediment type, and amount of interaction between surface and groundwater. A knowledge of these factors allows to better exploit the geothermal potential of the aquifer when choosing the optimal placement of the heat pumps.*

Marco ANTONELLINI ✉

Martino PANDOLFINI

Nicolas GREGGIO

Pauline Nella MOLLEMA

Centro Interdipartimentale di Ricerca

nelle Scienze Ambientali (C.I.R.S.A.)

Università di Bologna

Via San Alberto, 163 - 48123 Ravenna

Tel. 3394978001

m.antonellini@unibo.it

Ricevuto: 20 luglio 2012 / Accettato: 17 ottobre 2012

Publicato online: 30 dicembre 2012

© Associazione Acque Sotterranee 2012

Introduzione

L'acquifero costiero della provincia di Ravenna potrebbe essere un'importante riserva d'acqua dolce per l'agricoltura e gli ecosistemi litorali (Antonellini e Mollema, 2010). Tale risorsa, però, è sempre più compromessa dalla crescente salinizzazione dell'acquifero freatico (Antonellini et al., 2008), il che sta creando seri problemi agli ecosistemi costieri, all'agricoltura e alle pinete storiche di Ravenna. Studi recenti hanno messo in evidenza che la salinizzazione dell'acquifero è causata indirettamente dalla subsidenza che costringe le idrovore della bonifica ad un drenaggio sempre più spinto ed alla risalita di acqua salata lungo i fiumi che sfociano a mare (Antonellini et al., 2008; Giambastiani et al., 2007; Giambastiani et al., 2009; Mollema et al., 2012; Vandebroede et al., 2012). Il più recente di questi studi (Antonellini et al., 2012) ha analizzato il problema dell'intrusione salina nell'acquifero ravennate con lo scopo di migliorare la gestione delle risorse idriche, di contenere la salinizzazione dei suoli e di salvaguardare gli habitat di grande pregio naturalistico come le pinete storiche e le lagune facenti parte del "Parco Regionale del Delta del Po". Inoltre tale lavoro ha evidenziato la criticità delle interazioni fra acque superficiali e sotterranee nel controllare il processo di salinizzazione delle acque.

L'oggetto del presente studio è invece la valutazione delle potenzialità del sistema acquifero superficiale di essere sfruttato come un "serbatoio di calore", la caratterizzazione termica e la definizione del potenziale geotermico dell'acquifero freatico costiero e di quello semiconfinato della provincia di Ravenna. La tipologia di geotermia a cui si farà riferimento è quella a «bassa entalpia», che prevede nello specifico lo sfruttamento del sottosuolo come serbatoio termico dal quale estrarre calore durante la stagione invernale ed al quale cederlo durante la stagione estiva mediante l'utilizzo di pompe di calore (Manzalla e Ungarelli, 2011). Si tratta di una fonte energetica rinnovabile essenzialmente utilizzata per il condizionamento (riscaldamento, raffrescamento ed eventuale produzione di acqua calda sanitaria) di edifici destinati a qualunque uso.

L'area in esame si estende dalla foce del fiume Reno sino alla foce del fiume Savio, per una lunghezza complessiva di circa 30 km ed una larghezza di 10 km nel punto di massima distanza dal mare (Fig. 1). L'elevazione dell'area è compresa tra i 3 m.s.l.m. dei cordoni dunosi più recenti e i -1,5 m.s.l.m. delle aree adiacenti alle cave, site nella porzione meridionale dell'area di studio. L'acquifero è costituito da un corpo cuneiforme di sabbia formatosi durante la trasgressione olocenica (Fig. 2). Una delle caratteristiche salienti è la presenza di due corpi sabbiosi: uno superficiale, di circa 10 metri di spessore, sede della falda freatica, e uno inferiore di spessore limitato (circa 1-2 metri). I due corpi risultano separati da una sequenza di limi argillosi e sabbiosi il cui spessore si riduce mano a mano che ci si allontana dalla costa (Fig. 2). Proseguendo verso l'entroterra, le sabbie più superficiali vengono ricoperte da uno strato di argille limose di spessore variabile compreso fra 0 e 2 m. Il substrato è costituito da sedimenti argillosi riconducibili alla precedente trasgressione olocenica (Amorosi, 2004).

Il sistema idrologico della pianura costiera ravennate risulta estremamente complesso e articolato, perché costituito da corpi idrici diversi per origine (naturale o artificiale) e uso. Gli elementi che caratterizzano maggiormente questa parte di territorio sono i bacini salmastri denominati Piasse, le zone umide come quella chiamata Ortazzo, le aste fluviali, i canali che compongono il reticolo della bonifica, le opere di presa e distribuzione delle acque fluviali e il mare Adriatico (Fig. 1c). Il clima di quest'area risulta essere tipicamente mediterraneo, caratterizzato da precipitazioni moderate, 618 mm/anno in media (con picchi nei periodi autunnali-primaverili) e temperature medie annuali relativamente elevate, 13.7 °C (dati DEXTER Regione Emilia-romagna e registrazioni dell'azienda Marani nel periodo 1978-2007). Il bilancio idrologico denota come evapotraspirazione, drenaggio e irrigazione siano voci particolarmente rilevanti nel bilancio idrologico capaci pertanto di influenzare le dinamiche di ricarica dell'acquifero che risulta essere particolarmente limitata: 17 mm/anno, in anni con scarse precipitazioni come il 2008 e 67 mm/anno in quelli eccezionalmente piovosi come nel caso del 2010 (Mollema et al. 2012).

Metodi

Monitoraggio e misura delle temperature

Lo studio qui descritto si basa sul monitoraggio di 56 piezometri attestati nell'acquifero costiero ravennate, avvenuto in due distinte campagne di raccolta dati, più precisamente a giugno e a dicembre 2010. I piezometri considerati (Fig. 1b) sono interamente filtranti e penetranti l'acquifero. Il diametro dei piezometri è di 12 cm, mentre la lunghezza a cui questi si spingono in profondità varia tra i 5 e i 30 metri. I valori di temperatura sono stati registrati mediante sonde multiparametriche "CTD Diver probe" e "Aquatroll", contemporaneamente alle misurazioni di conduttività elettrica e profondità. I piezometri sono stati realizzati a carotaggio continuo. Si è provveduto alla messa in quota (metri su livello mare) con un sistema GPS delle bocche pozzo. Per rendere il dato di temperatura dell'acqua raccolto in pozzo il più attendibile possibile si è seguito un protocollo che prevede lo stazionamento per cinque minuti della sonda circa 30 centimetri al di sotto della tavola d'acqua, quale fase preliminare atta ad equilibrare la temperatura; la successiva registrazione della temperatura dell'acqua è stata eseguita nella fase di discesa della sonda all'interno del pozzo, mantenuta ad una velocità sufficientemente lenta e costante necessaria per registrare eventuali variazioni di temperatura.

Una volta raccolti, i dati sono stati elaborati per ottenere i profili di temperatura-profondità e poi si è usato il software *EnviroInsite* con un algoritmo di *kriging* per il *contouring* delle isoterme su una base geo-referenziata. Con questi software sono stati realizzati i profili di temperatura per ciascun pozzo, le mappe delle isoterme (a diverse profondità) e i transetti (Fig. 3), relativi a entrambi i mesi investigati. Inoltre per mostrare la litologia (Fig. 4) e le variazioni della zona vadosa dei pozzi sono state redatte ulteriori mappe e transetti (Fig. 3 e 4).

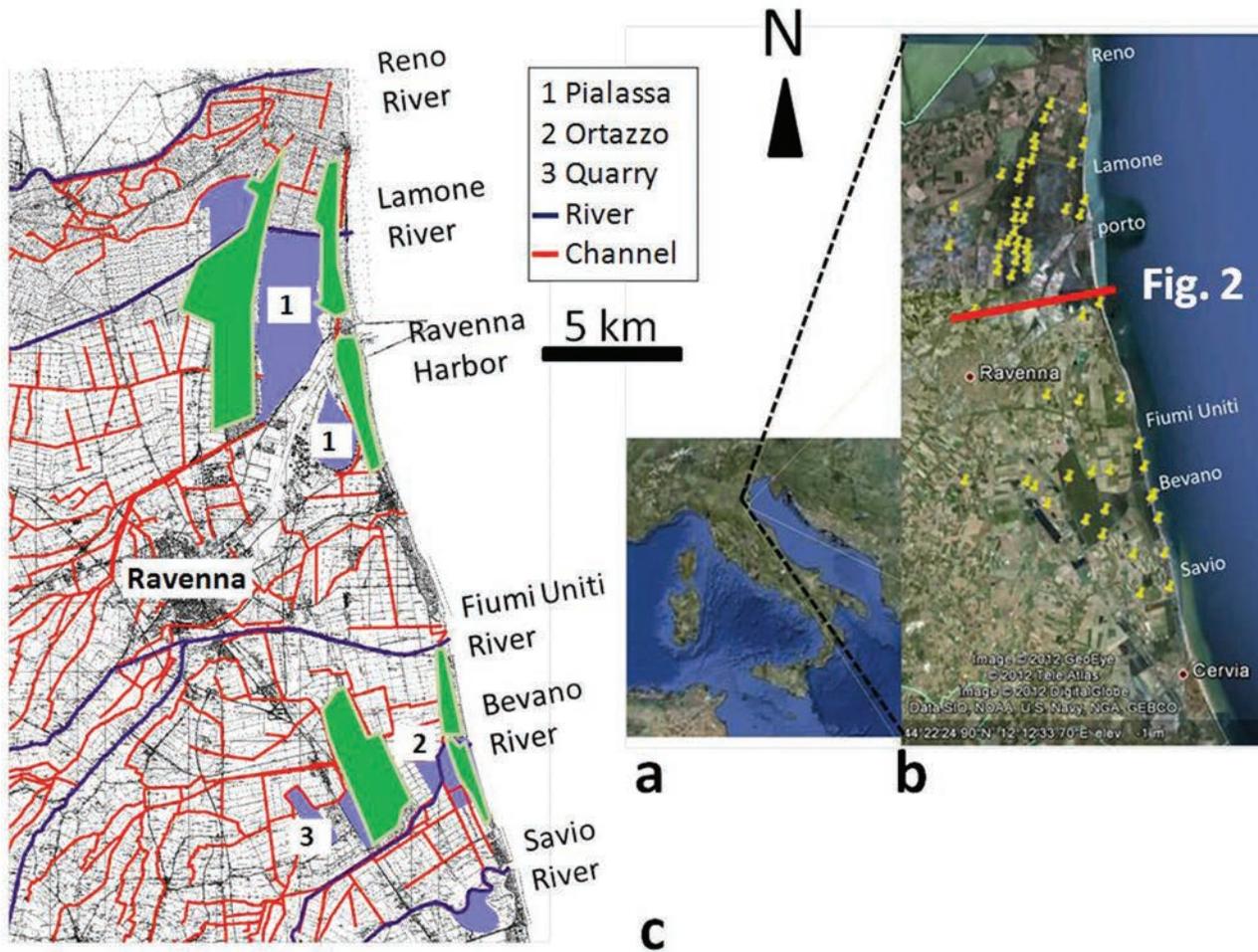


Fig. 1 - (a) Carta indice con localizzazione dell'area di studio. (b) Estensione dell'area costiera di Ravenna con ubicazione dei piezometri usati in questo studio e posizione della sezione riportata in Fig. 2 (linea rossa). (c) Mappa dettagliata della zona di studio con evidenziata la rete di fiumi, i canali, le zone umide e le pinete (in verde).

Fig. 1 - (a) Index map for the study area. (b) Extent of the coastal zone near Ravenna and location of the piezometers used in this study; the location of the section reported in Fig. 2 is given by the red line. (c) Detailed map reporting the network of rivers, canals, wetlands, and pine forests (in green) fragmenting the coastal zone of Ravenna.

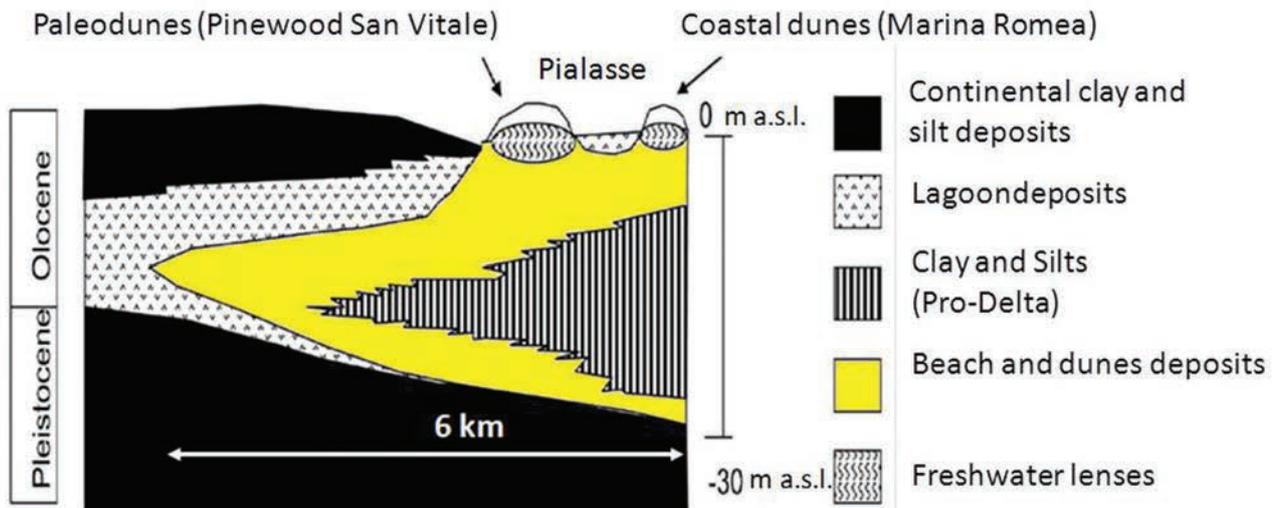


Fig. 2 - Sezione geologica schematica dell'acquifero costiero di Ravenna (traccia in Fig. 1b).

Fig. 2 - Schematic geologic cross-section of the coastal aquifer of Ravenna (trace in Fig. 1b).

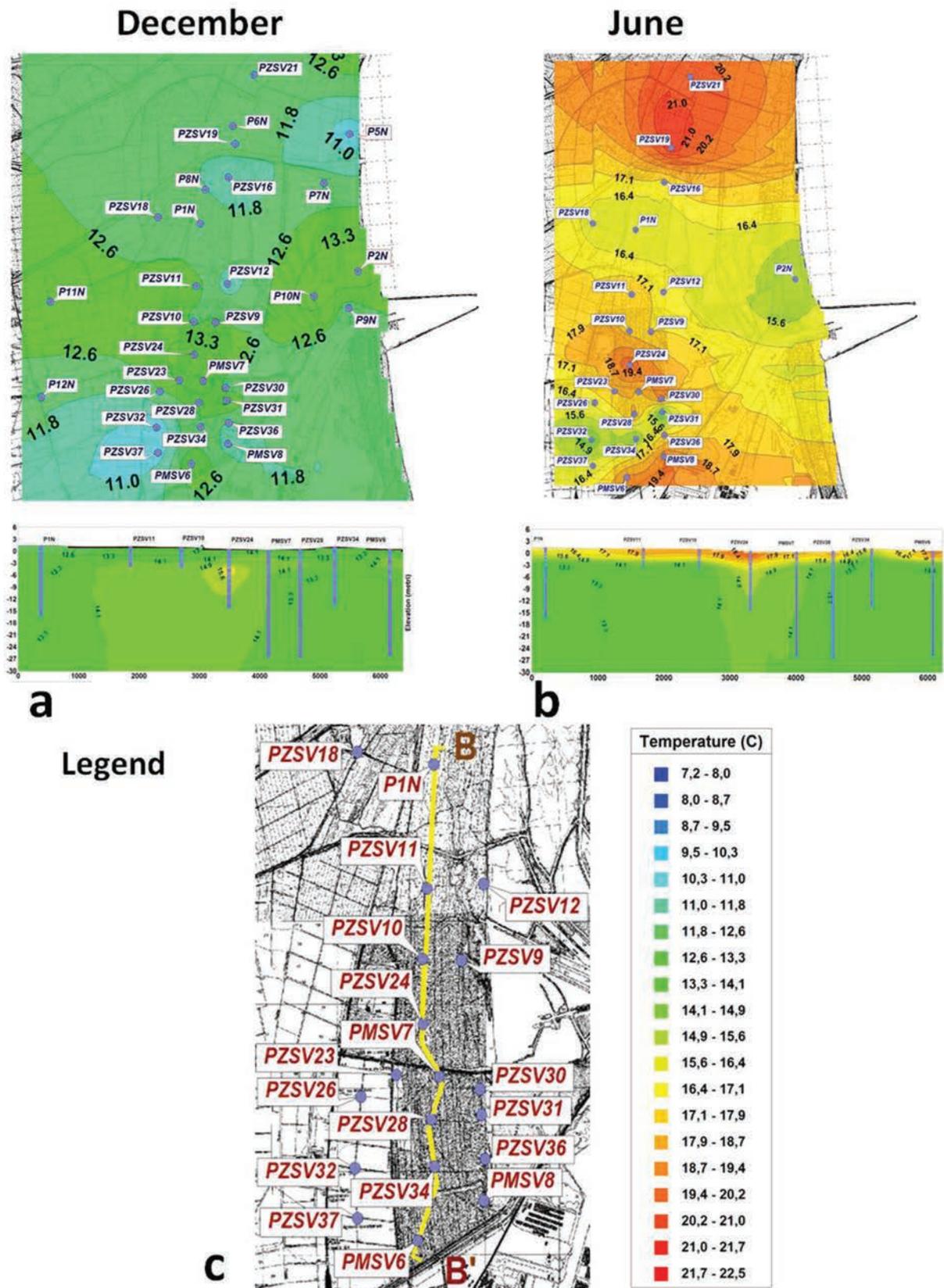


Fig. 3 - Carte delle isoterme nella zona di studio relative alla parte superiore dell'acquifero (tra il livello freatico ed un metro al di sotto di esso) costruite con i soli dati rilevati nei piezometri in dicembre (a) e in giugno (b). La legenda con la mappa riportante l'ubicazione ed il nome dei piezometri usati nello studio nonché l'ubicazione delle sezioni parallele alla costa è mostrata in (c).

Fig. 3 - Maps of equal temperature contour lines in the study area at the top of the aquifer (between the water table level and 1 m below it) constructed from piezometers data only measured in December (a) and in June (b). The legend with the location and name of the piezometers as well as the trace of the sections reported below the maps is shown in (c).

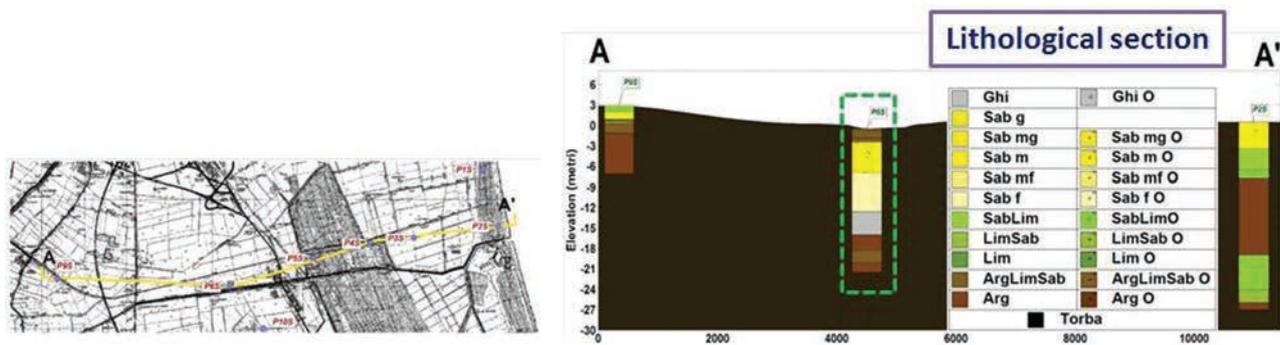


Fig. 4 - Esempio di una sezione litologica ottenuta dai carotaggi eseguiti durante la perforazione dei piezometri. La sezione mostra che l'acquifero non sempre è freatico ma lateralmente passa a condizioni confinate e semi-confinate dove argille e limi di origine fluviale ricoprono le sabbie di origine marina.

Fig. 4 - Example of a lithological transect reconstructed from the cores obtained during drilling of the wells. The cross-section shows that the aquifer changes laterally from unconfined to confined and semi-confined conditions where clay and silt of fluvial origin overlies the marine sandy deposits.

Distribuzione teorica della temperatura nella zona di skin

La zona del sottosuolo investigata durante questo studio è piuttosto superficiale. La distribuzione delle temperature nella sottosuperficie risente fino ad una data profondità di quelle che sono le oscillazioni stagionali in temperatura atmosferica (*skin zone*). Per confrontare i profili di temperatura misurati nei vari piezometri, la profondità a cui le variazioni stagionali in temperatura si omogeneizzano (temperatura di stabilizzazione) ed eventuali anomalie nella distribuzione delle temperature stesse, è stata utilizzata l'equazione di conduzione del calore di Fourier nel caso di un semispazio con condizioni periodiche (annuali) di temperatura applicate al confine superiore. L'equazione unidimensionale di Fourier è espressa da Turcotte e Schubert (2005) nella forma:

$$q = -k \frac{dT}{dy} \quad (1)$$

dove:

q è il flusso del calore per unità di area per unità di tempo (W m^{-2}),

k è il coefficiente della conducibilità termica (Nei profili teorici abbiamo usato valori standard per le sabbie saturate in acqua di $2\text{-}2,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$),

y è la coordinata nella variazione della temperatura (m),

T è la temperatura ($^{\circ}\text{K}$).

La soluzione di questa equazione con condizioni periodiche di variazioni in temperatura al confine superiore è espressa da Turcotte e Schubert (2005)

$$T = T_o + \Delta T \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2k}}\right) \cos\left(\omega t - y \sqrt{\frac{\omega}{2k}}\right) \quad (2)$$

dove:

ω è la frequenza circolare (rad giorno^{-1} periodo annuale),

t è il tempo (giorni),

T_o è la temperatura media annuale alla superficie terrestre ($^{\circ}\text{K}$),

ΔT è l'ampiezza della variazione annuale in temperatura ($^{\circ}\text{K}$).

In Fig. 5 sono mostrati i profili teorici di temperatura previsti da questa soluzione per i mesi di giugno e dicembre; i vari profili di temperatura misurati in pozzo sono stati confrontati con questi profili teorici per identificare eventuali anomalie nella distribuzione della temperatura (vedi Fig. 5 per il piezometro P14S).

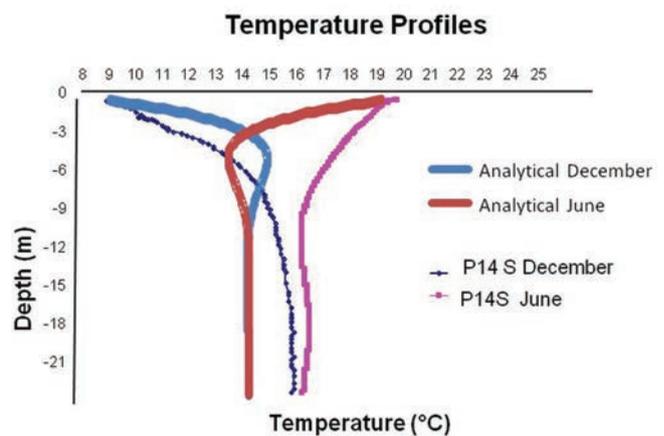


Fig. 5 - Profili teorici mensili di temperatura (dicembre e giugno) nella sezione di sottosuolo che risente delle variazioni stagionali di temperatura indotte dalla temperatura atmosferica ottenuti dalla soluzione dell'equazione di Fourier con condizioni al contorno periodiche messi a confronto con i profili di temperatura anomali misurati in alcuni pozzi tra i quali il P14S. Nota l'anomalia rispetto ai profili teorici dove nei mesi estivi ed invernali i profili si incrociano qualche metro sotto la superficie mentre i due profili del piezometro P14S non si incrociano.

Fig 5 - Theoretical monthly temperature profiles (December and June) in the surficial zone obtained applying periodic seasonal boundary conditions to the solution of the Fourier equations and compared with anomalous profiles as measured in well P14S. Note the anomaly with respect to the theoretical profiles where the profiles of the winter and summer months cross a few meters below the surface. The two profiles of piezometer P14S do not cross.

Calcolo del rendimento di una pompa di calore

Al fine di valutare il potenziale geotermico dell'acquifero superficiale è necessario calcolare quale possa essere il rendimento di una pompa di calore al suo interno. Il metodo utilizzato in questo articolo è il caso classico di una pompa di calore verticale con sistema di geo-scambio a circuito chiuso, da mettere pertanto in opera con un pozzo senza scambio di fluido con l'acquifero (Yang et al., 2010; Chiasson, 1999). Sembra essere questa la soluzione standard più economica ed efficiente per la zona in esame. Il calcolo del rendimento r di una pompa di calore, noto come COP (*Coefficient of Performance*), viene fatto utilizzando la seguente relazione (Kavanaugh e Rafferty, 1997; Yavuzturk, 1999):

$$r = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{(Q_2 - Q_1)} = \frac{T_c}{(T_c - T_e)} \quad (3)$$

per il riscaldamento e

$$r = \frac{T_e}{(T_c - T_e)} \quad (4)$$

per il raffreddamento

dove Q_1 è l'assorbimento del calore dalla sorgente all'evaporatore ($W m^{-2}$). Q_2 è il trasferimento del calore per gli utilizzatori nel condensatore ($W m^{-2}$). L è il consumo di energia elettrica nel compressore (Wh). T_e è la temperatura del fluido refrigerante quando evapora (K° ; corrisponde alla temperatura della sorgente). T_c è la temperatura del fluido refrigerante quando viene compresso (K° ; la stessa temperatura richiesta all'interno del locale che necessita di riscaldamento/refrigerazione). Un buon rendimento r per una pompa di calore può essere ritenuto tale per COP di almeno 2.5 (Kavanaugh e Rafferty, 1997; Yavuzturk, 1999). Il calcolo del rendimento con questa metodologia è stato fatto in quei piezometri dove i profili completi di temperatura estivi e invernali erano disponibili. Per semplicità, nei risultati presentiamo i valori del COP per alcuni piezometri che sono caratteristici di condizioni diverse presenti lungo la costa di Ravenna, sia in termini di uso del suolo che per condizioni idrologiche.

Risultati

La Fig. 6 riporta le isoterme in prossimità della superficie freatica (primo metro di spessore della falda) per il periodo di Dicembre 2010 per le zone a nord (Fig. 6a) e a sud (Fig. 6b) di Ravenna. Queste carte sono state costruite utilizzando sia i dati di temperatura rilevati nei piezometri che quelli misurati nei corpi d'acqua superficiali. Queste carte mostrano l'interazione fra le acque superficiali più fredde di dicembre e le più calde acque freatiche sotterranee. Le Figure 6a e 6b mostrano che per una distanza di circa 500 m da un lato e dall'altro di un corso d'acqua, le acque di falda sono raffreddate di circa $3^\circ C$ durante il periodo invernale rispetto alle acque di falda

che si trovano lontane dai corpi d'acqua superficiali. L'anomalia termica superficiale fredda è presente in prossimità delle zone umide, dei fiumi, dei canali maggiori e delle Pialasse (bacini salmastri aperti alle maree).

I risultati delle elaborazioni ottenute solamente con i dati dei piezometri sono riportate in forma sintetica nella Fig. 3 per tutto l'acquifero studiato (zona nord e sud di Ravenna). Le mappe delle isoterme per il periodo di dicembre 2010 (Fig. 3a) e di giugno 2010 (Fig. 3b) nella porzione più superficiale dell'acquifero mostrano l'escursione in temperatura nell'acquifero durante le due campagne di monitoraggio che va dai $2,3^\circ C$ del piezometro P2N ai $6,1^\circ C$ del piezometro PZSV24 (Fig. 3). Quasi ovunque nella zona di *skim* le temperature di giugno risultano superiori ai $15^\circ C$, mentre a dicembre le temperature sono quasi ovunque inferiori ai $14^\circ C$.

Le sezioni parallele alla costa di Fig. 3 per i mesi di dicembre (Fig. 3a) e di giugno (Fig. 3b) mostrano come l'escursione termica stagionale si limiti agli strati più superficiali nell'84% dei pozzi; alla quota di -4 m.s.l.m. le temperature sono comprese tra i $12,6$ e $16^\circ C$, alla profondità di -10 m s.l.m. si raggiunge la temperatura di $14^\circ C$, che è vicina a quella media atmosferica annuale per la città di Ravenna ($13,7^\circ C$). Al di sotto di tale profondità è il gradiente geotermico a regolare l'andamento della temperatura.

Le isoterme in sezioni di acquifero a diverse profondità dalla tavola d'acqua (da 0 a -1 , da -4 a -5 e da -17 a -18 metri) sono presentate rispettivamente in Fig. 7a, 7b e 7c per la zona a sud di Ravenna (la zona a nord ha un andamento molto simile). A parte il progressivo diminuire dell'escursione stagionale in temperatura con la profondità che risulta evidente dall'esame delle isoterme nei tre livelli dell'acquifero di Fig. 7a, 7b e 7c, si possono anche fare le seguenti osservazioni. Dal punto di vista areale, sia nella zona nord che nella zona sud, le temperature di stabilizzazione vanno a delineare fasce ben precise: (1) la fascia della duna costiera dove le temperature di stabilizzazione sono di circa $14^\circ C$ nel caso di P1S, P2S e P15S, (2) la fascia di retro-duna costiera priva di vegetazione (P16S e P18S) dove la temperatura di stabilizzazione sale a $14,6^\circ C$ e può raggiungere valori fino a $15,8^\circ C$ (P14S), (3) la fascia della paleo-duna che corrisponde a valori più freddi di temperatura di stabilizzazione (dai $12,9^\circ C$ del P4S ai $13,3^\circ C$ del P13S), (4) la fascia del retro-paleo-duna che mostra valori di temperatura di stabilizzazione simili a quelli della fascia (2). I grafici di Fig. 8a per la zona nord e di Fig. 8b per la zona sud mostrano la profondità e il valore della temperatura di stabilizzazione in piezometri a diversa collocazione geografica e con diverso uso del suolo. Questi grafici confermano quanto osservato a livello areale in Fig. 7c. Le dune attuali hanno una temperatura di stabilizzazione media di $13,9^\circ C$ ad una profondità abbastanza superficiale di 5-8 m. Le paleo-dune hanno una temperatura di stabilizzazione bassa di $13,3^\circ C$ ad una profondità di 9-13 m. Le zone agricole hanno la temperatura di stabilizzazione più alta di $14,5^\circ C$ ad una profondità molto variabile da 7 a 23 m.

La Fig. 9 mostra due sezioni dell'acquifero riportanti le isoterme nei mesi di giugno (Fig. 9a) e dicembre 2010 (Fig. 9b).

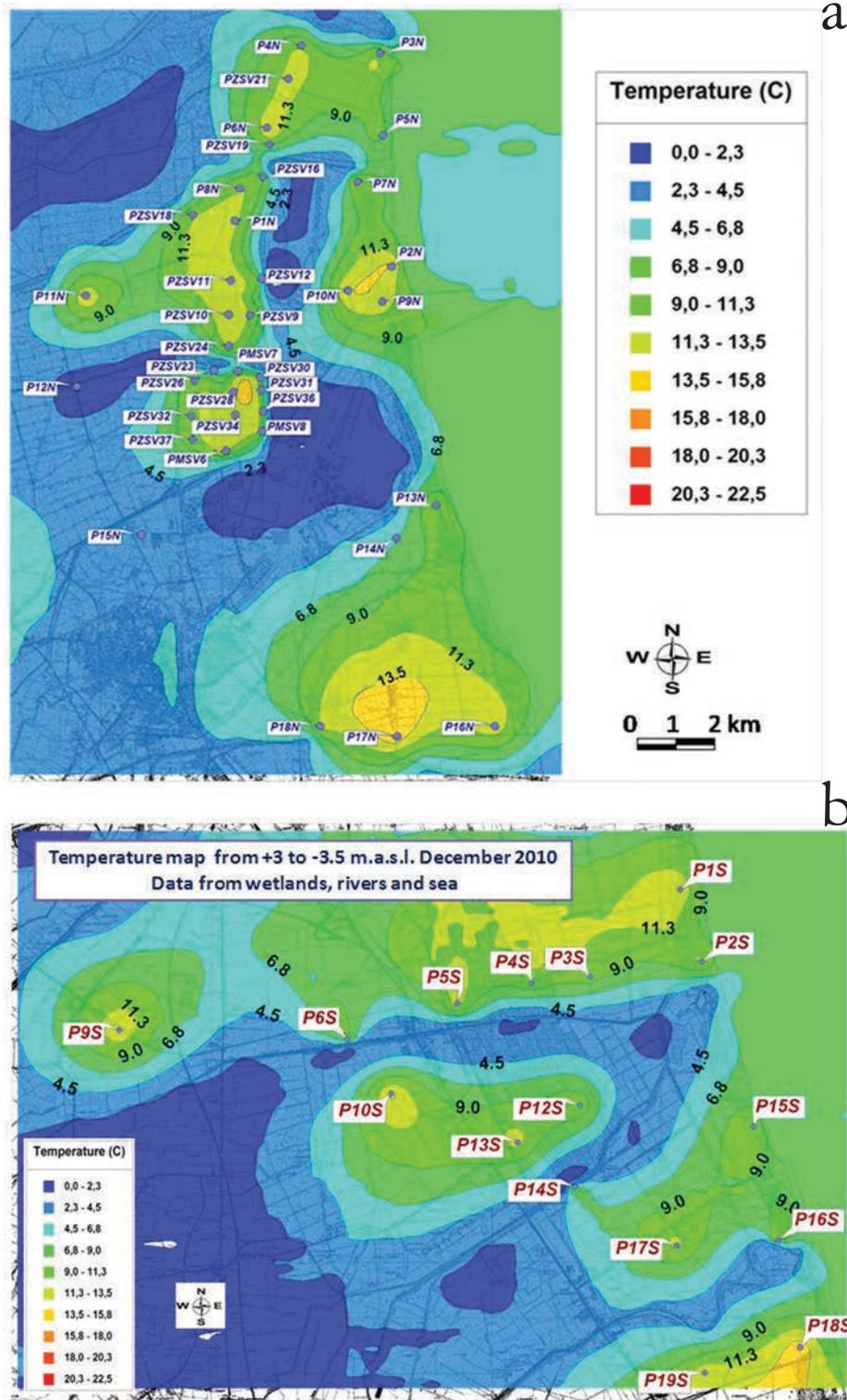
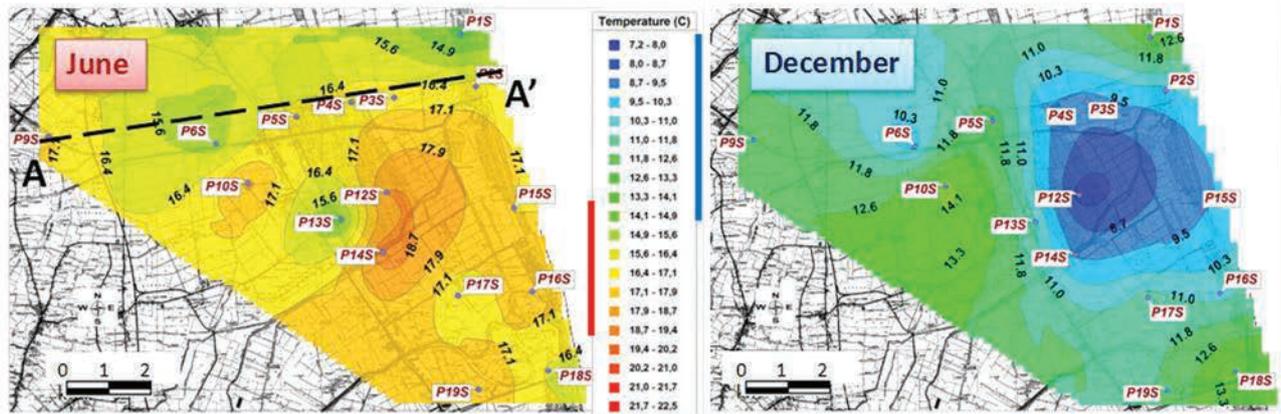


Fig. 6a,b - Carte delle isoterme nella zona di studio relative alla parte superiore dell'acquifero (tra il livello freatico ed un metro al di sotto di esso) costruite con i dati rilevati nei piezometri e nelle acque superficiali. (a) Situazione misurata nella zona nord. (b) Situazione misurata nella zona sud.

Fig. 6a,b - Maps of equal temperature contour lines in the study area at the top of the aquifer (between the water table level and 1 m below it) using data from piezometers and surface water bodies. (a) Situation measured in the northern area. (b) Situation measured in the southern area.

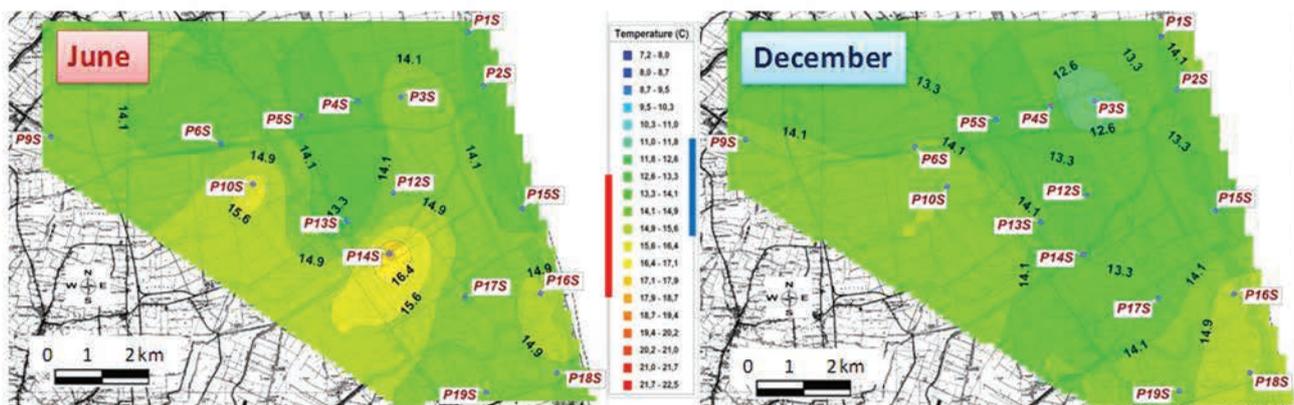
a

Temperature maps from 0 to -1 m below the water table



b

Temperature maps from -4 to -5 m below the water table



c

Temperature maps from -17 to -18 m below the water table

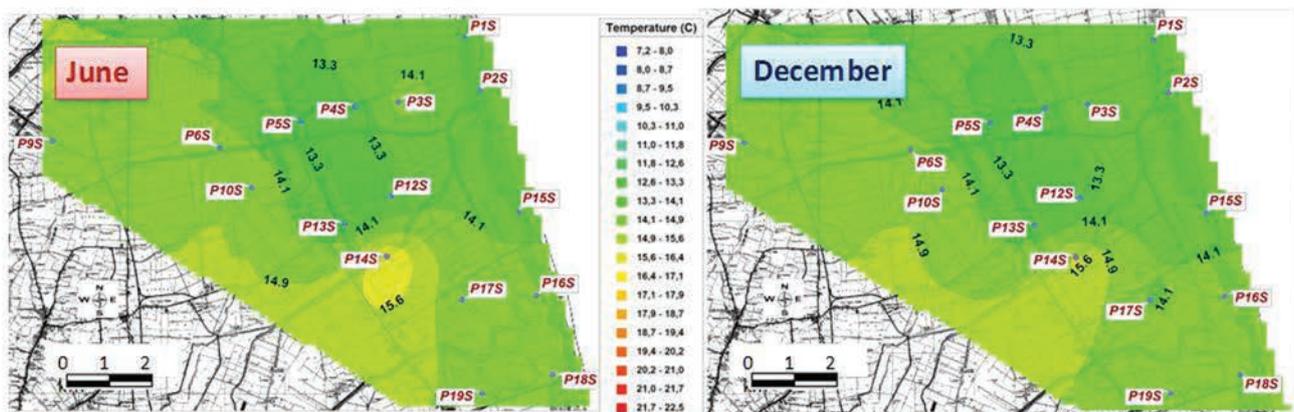


Fig. 7a,b,c - Carte delle isoterme nella zona di studio sud relative a diversi livelli entro l'acquifero, costruite con i dati rilevati nei piezometri. Le carte di giugno 2010 sono a sinistra, quelle di dicembre sono a destra. (a) mappe di temperatura fra 0 e -1 m, (b) mappe di temperatura fra -4 e -5 m, (c) mappe di temperatura fra -17 e -18 m.

Fig. 7a,b,c - Maps of equal temperature contour lines in the southern part of the study area at different levels within the aquifer. June map is on the left side, December map is on the right side. (a) temperature maps from 0 m to -1 m below the water table, (b) temperature maps from -4 m to -5 m below the water table, (c) temperature maps from -17 m to -18 m below the water table.

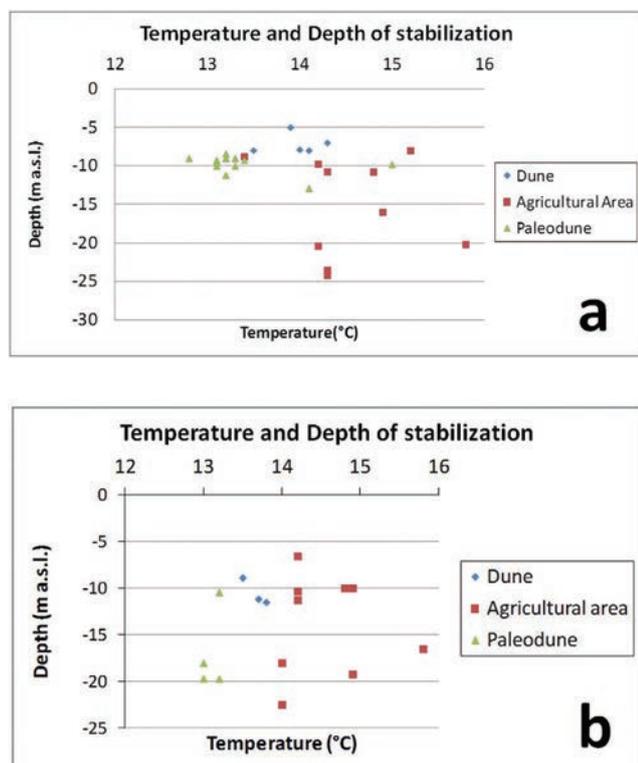


Fig. 8a, b - Grafici che mostrano la profondità ed il valore della temperatura di stabilizzazione in aree a diverse collocazioni geografiche e con diversi usi del suolo. (a) Zona nord dell'area di studio. (b) Zona sud dell'area di studio.

Fig 8a, b - Plots showing the depth and value of the stabilization temperature in areas with different land use and geographic location. (a) Northern study area. (b) Southern study area.

La traccia della sezione è riportata in Fig. 7a. Le anomalie di temperatura rappresentate in queste due sezioni sono dovute alla presenza di canali drenanti vicino al piezometro P6S ed al piezometro P5S. Queste anomalie nella distribuzione della temperatura si riflettono anche nella profondità della temperatura di stabilizzazione.

La Tabella 1 mostra i calcoli del rendimento della pompa di calore verticale per tre pozzi rappresentativi di tre situazioni geotermiche diverse dell'area di studio: il P14S, il P2N ed il PZSV34. Il P14S (Fig. 7) è localizzato vicino ad un canale e risente delle interazioni con le acque superficiali, il P2N e il PZSV34 sono rispettivamente nelle dune costiere e nella pineta di San Vitale vicino a Ravenna (Fig. 3c). Il pozzo P14S ha la temperatura di stabilizzazione più alta in assoluto tra i piezometri studiati (16°C) e il PZSV34 ha quella più bassa (12,9°C). Il rendimento è stato calcolato a -5 metri sotto la tavola d'acqua e a fondo pozzo alla temperatura di stabilizzazione (Tabella 1). Inoltre i calcoli sono stati fatti sia per il periodo invernale che per quello estivo, assumendo che le specifiche dell'impianto richiedano che l'edificio debba mantenere una temperatura di 30°C per il riscaldamento e di 19°C per la refrigerazione. La Tabella 1 mostra che il rendimento complessivo (invernale e estivo) migliore è raggiunto nel

pozzo P14S sia a una profondità di -5 m dalla tavola d'acqua ($r = 2,19$) che a fondo pozzo ($r = 2,27$). Il pozzo con un rendimento complessivo peggiore è quello situato nelle pinete (PZSV34).

Discussione

Le osservazioni fatte sono importanti per localizzare e progettare il sistema geotermico che sfrutta il calore del sottosuolo (Chua et al., 2010; Chiasson, 1999; Milenic et al., 2010; Yang et al., 2010; Lamarche et al., 2010). Le temperature delle acque sotterranee superficiali risentono dell'effetto del mare e di quello delle acque superficiali (Fig. 3 e Fig. 6); il primo ha come effetto l'incremento della temperatura media durante tutto l'anno; le seconde tendono a far aumentare le temperature delle acque sotterranee in estate e a farle diminuire in inverno (Fig. 6). In prossimità (il raggio di influenza è di circa 1 km) delle acque superficiali o di idrovore sono anche localizzati tutti quei piezometri (vedi Fig. 5 per un esempio) che hanno dei profili di temperatura anomali rispetto a quanto previsto dalla legge di Fourier (Fig. 5). Questi profili di temperatura anomali non presentano il caratteristico incrocio fra profilo invernale e profilo estivo (vedi Fig. 5), previsto dal modello teorico, ad alcuni metri di profondità. La localizzazione di questi profili di temperatura anomali è importante quando si considera la localizzazione delle pompe di calore (Yang et al., 2010; McQuay, 2002).

La sezione in Fig. 4 mostra come l'acquifero non sia ovunque freatico ma a tratti sia confinato da un orizzonte di argilla alluvionale che può raggiungere 1,5 m di spessore. Le sezioni geologiche che sono state costruite (vedi Fig. 4 per un esempio) avrebbero dovuto dare un'indicazione su come le temperature (soprattutto le più superficiali) potrebbero essere controllate dalla diversa conducibilità termica dei sedimenti affioranti e dallo spessore della zona vadosa. E' però difficile discernere l'effetto delle diverse conduttività termiche di sabbia e argilla nelle mappe delle isoterme. Sembra infatti che il diverso grado di interazione fra acque superficiali e sotterranee, nonché il diverso tasso di ricarica dovuto alla distribuzione areale degli affioramenti di sabbia e argilla, contribuiscano a rendere più eterogenea la distribuzione superficiale delle temperature rispetto a quanto ci si sarebbe aspettato dalla sola distribuzione di sabbie e argille all'interno dell'acquifero.

Per valutare il potenziale geotermico dell'acquifero freatico ravennate bisogna considerare che dall'acquifero non è possibile estrarre energia come in un sistema ad alta e media entalpia; la tecnologia che meglio si presta in questo serbatoio a bassa temperatura è quella delle pompe di calore. E' quindi necessario valutare il rendimento di una pompa di calore nell'acquifero in questione e soprattutto come esso vari in aree diverse al suo interno. Prima di tutto bisogna dire che la pompa di calore geotermica può essere inserita orizzontalmente o verticalmente nel terreno (Yang et al., 2010; Chua et al., 2010; Hanova e Dowlatabadi, 2007); nel primo caso si è all'interno della zona delle fluttuazioni stagionali di temperatura, nel secondo caso si può raggiungere la temperatura di stabilizzazione e quindi avere una sorgente di calore pressoché costante

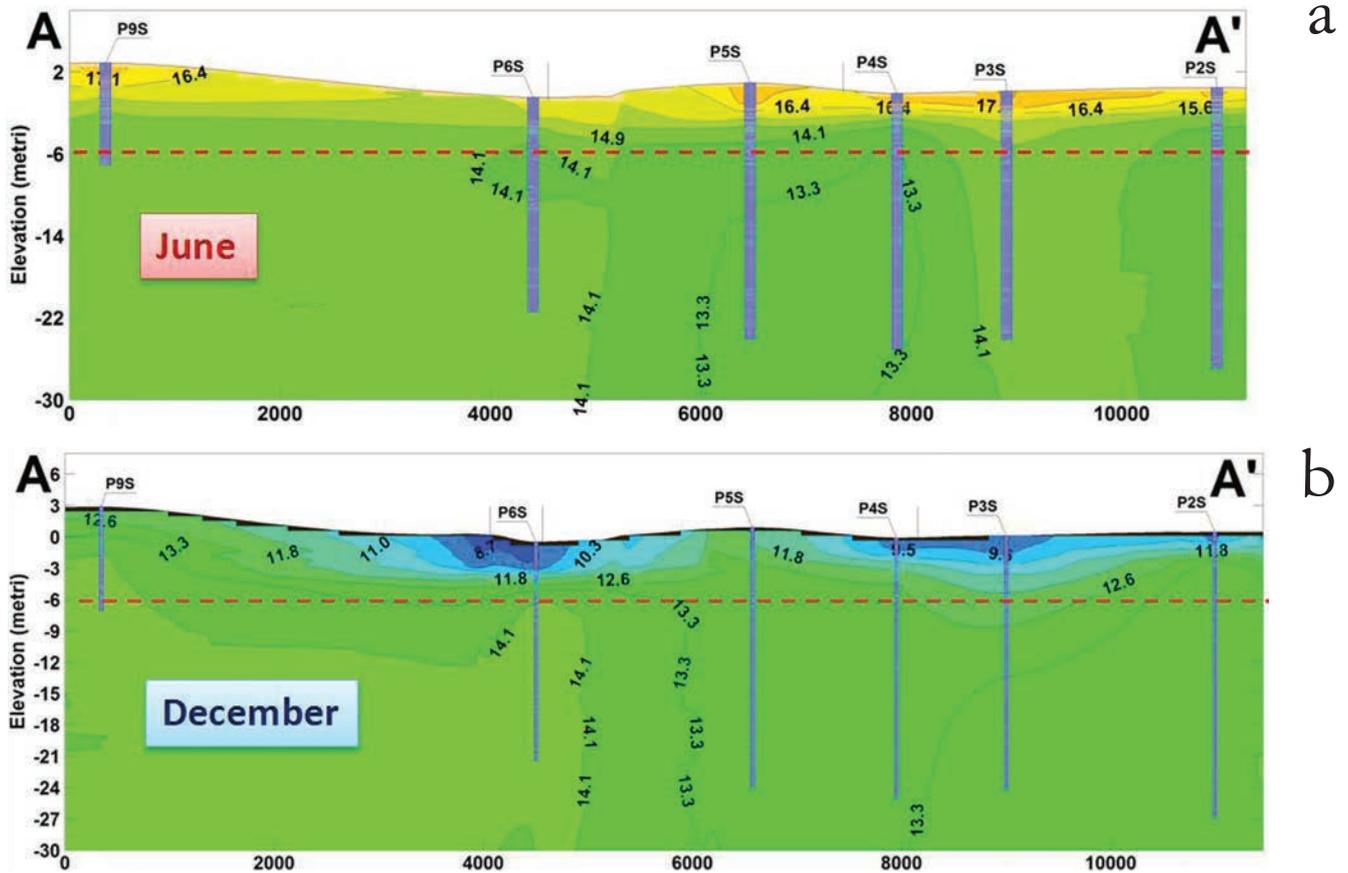


Fig. 9a, b - Sezioni di temperature lungo un profilo normale alla costa. La traccia del profilo è mostrata in Fig. 7a. (a) Sezione di temperatura per il giugno 2010. (b) Sezione di temperatura per il dicembre 2010.

Fig. 9a, b - Temperature sections along a profile normal to coast. The trace of the profile is given in Fig. 7a. (a) Temperature section for June 2010. (b) Temperature section for December 2010.

durante tutto l'anno. Nella scelta fra questi due sistemi di pompe di calore, sono i fattori economici e tecnologici che guidano la decisione e questi sono al di fuori della competenza degli autori di questo articolo. Inoltre le pompe di calore possono prevedere uno scambio di fluido con le acque sotterranee o essere a circuito chiuso. Quelle del primo tipo, oltre che a notevoli difficoltà negli iter autorizzativi, hanno delle serie limitazioni in zone costiere dove l'intrusione marina è un problema (come nella zona in esame) e dove questo tipo di tecnologia è meno adatto (Masciale et al., 2012). Bisogna anche considerare che le acque salmastre, come quelle dell'acquifero in questione, sono aggressive e quindi richiedono l'utilizzo di materiali particolari nella costruzione delle pompe di calore e nell'installazione delle sonde geotermiche (Milenic et al., 2010).

La Tabella 1 mostra che le temperature di stabilizzazione superiori (P14S) sono quelle che permettono i rendimenti migliori alle pompe di calore. Diventa quindi importante esaminare la relazione osservata che lega la temperatura di stabilizzazione con l'uso del suolo, la copertura vegetale e la distanza dal mare. Le temperature di stabilizzazione più elevate registrate sono state osservate in terreni agricoli dove quindi i rendimenti delle pompe di calore saranno i più ele-

vati nella zona. Le singole aziende agricole potrebbero sfruttare la risorsa geotermica per il riscaldamento degli ambienti o eventualmente di serre (<http://www.glastuinbouw.wur.nl/NL/thema/teelt-productiesystemen/integrale-kassystemen/sunergiekas/>) anche se queste non sono molto diffuse nella zona. I pozzi situati vicino a corpi d'acqua superficiale (per esempio il P14S), dove il gradiente idraulico e termico delle acque sotterranee è elevato, possono più facilmente dissipare il calore della pompa di calore geotermica e producono quindi rendimenti superiori. Le zone dell'acquifero più fredde sotto copertura vegetale forniscono dei rendimenti più bassi e sono meno adatte ai sistemi geotermici. Del resto queste zone sono situate in zone naturalistiche quali le Pinete di Ravenna dove non vi sono insediamenti civili o industriali. Pozzi con pompe di calore vicini al mare (1-2 km di distanza vedi pozzo P2N) hanno rendimenti intermedi ($r = 2$) grazie all'effetto di innalzamento della temperatura esercitato dalla massa d'acqua marina e potrebbero essere eventualmente utilizzati dagli stabilimenti balneari che sono presenti lungo quasi tutta la costa ravennate. In quest'ultimo caso, data la stagionalità di queste attività, l'alternativa di un sistema fotovoltaico sembra da preferire.

Tab. 1 - Risultati dei calcoli del rendimento r per tre pompe di calore geotermiche ubicate in tre piezometri differenti: il P14S è vicino ad un canale, il PZSV34 è in una pineta, il P2N è vicino al mare (vedi Fig. 3 e Fig. 7 per l'ubicazione dei piezometri).

Tab. 1 - Results of yield calculation r for three geothermal heat pumps located in three different piezometers: P14S is close to a canal, PZSV34 is in a pine forest, P2N is close to sea (see Fig. 3c and 7 for piezometers location).

Rendimento r per tre pompe di calore geotermiche ubicate in tre zone diverse per uso del suolo e idrologia Yield calculation r for three geothermal heat pumps located in three areas with different land use and hydrology								
P14S								
	Inverno - Winter				Estate - Summer			
5 meters below ground level		home	source			home	source	
	r	Tc	Te		r	Tc	Te	Total yield
	1,73	30	12,7		11,67	19	17,5	2,19
Downhole 24,25 m below ground level		home	source			home	source	
	r	Tc	Te		r	Tc	Te	Total yield
	2,11	30	15,8		5,55	19	16,1	2,27
P2N								
	Inverno - Winter				Estate - Summer			
5 meters below ground level		home	source			home	source	
	r	Tc	Te		r	Tc	Te	Total yield
	1,9	30	14,2		2,96	19	14,2	1,95
Downhole 24,25 m below ground level		home	source			home	source	
	r	Tc	Te		r	Tc	Te	Total yield
	1,89	30	14,1		2,88	19	14,1	1,93
PZSV34								
	Inverno - Winter				Estate - Summer			
5 meters below ground level		home	source			home	source	
	r	Tc	Te		r	Tc	Te	Total yield
	1,72	30	12,6		2,58	19	13,7	1,76
Downhole 24,25 m below ground level		home	source			home	source	
	r	Tc	Te		r	Tc	Te	Total yield
	1,75	30	12,9		2,11	19	12,9	1,77

Conclusioni

Lo studio qui presentato mostra che la distribuzione del calore nell'acquifero superficiale (freatico e semiconfinato) della zona di Ravenna è controllato dalle fluttuazioni stagionali in temperatura dell'aria fino ad una profondità variabile fra 1 -5 e -25 m. La profondità a cui si raggiunge la temperatura di stabilizzazione ed il suo valore dipendono dalla distanza dal mare e dall'uso del suolo. Sotto terreni agricoli la temperatura

di stabilizzazione di 14-15°C si raggiunge ad una profondità di 10-25 m che è in media maggiore ed è più elevata che nelle zone sotto le paleo-dune (13°C a 8-15 m di profondità) o le dune costiere (13,5°C a 8-10 m di profondità). L'interazione fra acque superficiali e sotterranee, la presenza di idrovore e la copertura vegetale hanno tutte un influsso determinante sulla temperatura di stabilizzazione e debbono essere attentamen-

te considerate durante uno studio di fattibilità geotermica a bassa entalpia.

Le pompe di calore geotermiche hanno un rendimento superiore nell'acquifero ravennate dove le temperature di stabilizzazione sono più elevate (zone agricole senza copertura vegetale con $r = 2.2$) e nelle aree in cui vi è un forte gradiente idraulico. In queste ultime, infatti, il livello di calore nel sottosuolo adiacente alla sonda geotermica può essere continuamente rigenerato (entro 1 km di distanza dai canali di drenaggio e dai fiumi). Le pompe di calore potrebbero essere un'alternativa energetica efficiente per le aziende agricole che sono localizzate nelle aree più favorevoli per lo sfruttamento dell'acquifero ravennate nell'ambito di sistemi geotermici a bassa entalpia.

Ringraziamenti: Si ringrazia l'ENI per il finanziamento del progetto CSI (Coastal Salt-water Intrusion) che ha permesso la realizzazione dei pozzi che poi sono stati usati in questo studio per la raccolta dei profili di temperatura. Si ringraziano anche gli editori e i due revisori anonimi del manoscritto che hanno permesso di migliorarne notevolmente la forma e la struttura.

Bibliografia

- Amorosi A., Colalongo M.L., Fiorini F., Fusco F., Pasini G., Vaiani S.C., Sarti G. (2004). Palaeogeographic and palaeoclimatic evolution of the Po Plain from 150-ky core records. *Global and Planetary Change* 40: 55–78.
- Antonellini M., Mollema P.N. (2010). Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy. *Ecological Engineering* 36: 1201-1211.
- Antonellini M., Mollema P.N., Giambastiani B., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G. (2008). Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy. *Hydrogeology Journal* 16: 1541-1556.
- Antonellini M., Capo D., Gabbianelli G., Greggio N., Laghi M., Mollema P.N. (2012). Mapping salinization in the coastal aquifer of Ravenna (Italy). 7th European Congress on Geoscientific Cartography and Information Systems - Proceedings Vol. 1. 7th European Congress on Geoscientific Cartography and Information Systems. Bologna. June 12-15, 1: 403 - 404.
- Chiasson A.D., (1999). Advances in modeling ground-source heat pump systems. Master thesis, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada.
- Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy* 87: 3611–3624.
- Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman R.J. (2007). Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model. *Journal of Hydrology* 340: 91-104.
- Giambastiani B.M.S., Mollema P.N., Antonellini M. (2009). Groundwater Management in the Northern Adriatic Coast (Ravenna, Italy): New Strategies to Protect the Coastal Aquifer From Saltwater Intrusion. In: *Groundwater: Modelling, Management and Contamination*. p. 203-230, Hauppauge NY:NOVA Science Publishers, ISBN: 978-1-60456-832-5.
- Hanova J., Dowlatabadi H. (2007). Strategic GHG reduction through the use of ground source heat pump technology. *Environmental Research Letters* 2: 1-8.
- Kavanaugh S., Rafferty K. (1997). *Ground Source Heat pumps: Design of Geothermal Systems For Commercial and Institutional Buildings*. ASHRAE. Atlanta Ga.
- Lamarche L., Stanislaw K., Beauchamp B. (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics* 39: 187–200.
- Manzella A., Ungarelli C. (2011). *La Geotermia – L'energia sotto i nostri piedi*. Il Mulino.
- Masciale R., Caputo M.C., De Carlo L. (2012). Exploitation of low enthalpy geothermal re source: a methodology to characterize a coastal area. *EngHydroEnv Geology* 14B, 161. doi: 10.1474/EHEGeology.2012-14.B.130.
- McQuay (2002). *Geothermal heat pump design manual. Application Guide*. AG 31-008, McQuay International.
- Milenic D., Vasiljevic' P., Vasiljevic' A. (2010). Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes. *Energy and Buildings* 42: 649–657.
- Mollema P.N., Antonellini M., Gabbianelli G., Laghi M., Marconi V., Minchio A. (2012). Climate and water budget change of a Mediterranean coastal watershed, Ravenna, Italy. *Environmental Earth Sciences* 65: 257-276.
- Turcotte D., Schubert G. (2005). *Geodynamics*. Second Edition. Cambridge University Press.
- Vandebode A., Antonellini M., Greggio N., Mollema P.N., Pandolfini M. (2012). Temperature as a tracer for surface water – groundwater interactions in the Ravenna coastal plain, Italy. *SWIM 2012*, June 17-22, Buzios Brasil.
- Yang H., Cui P., Fang Z. (2010). Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied Energy* 87: 6–27.
- Yavuzturk C. (1999). Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems. PhD thesis, Oklahoma State University, Oklahoma, USA.