



La costruzione del sistema MOSE ha richiesto la realizzazione di tre porti rifugio alle bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia. Due di queste strutture, alla bocca di Lido – lato nord (Punta Sabbioni) ed alla bocca di Chioggia – lato nord (Ca' Roman), sono state inoltre usate come spazi di prefabbricazione delle barriere mobili. Questa soluzione ha permesso di evitare l'utilizzo di vaste aree sulla terraferma che avrebbe

determinato pesanti impatti ambientali. Poiché questi bacini sono aree sottratte al mare, in ciascun sito si è resa necessaria l'esecuzione di un pompaggio continuo mediante idrovore e pozzi, al fine di prosciugarli permettendone l'accessibilità. Le misure in continuo dei livelli di falda effettuate in corrispondenza delle postazioni di monitoraggio piezometrico hanno permesso da un lato di quantificare

l'impatto delle attività di cantiere e dall'altro di minimizzare le portate estratte nelle varie fasi realizzative. L'impatto sulla falda profonda, in termini di abbassamenti e variazioni di salinità, è risultato sostenibile e reversibile, mentre non sono stati osservati effetti apprezzabili sulla falda superficiale, che in quest'area è fondamentale per l'agricoltura e per la vegetazione tipica di queste zone umide costiere. Il monitoraggio è durato dal 2005 al 2014.



Motivazioni del monitoraggio

Nell'ambito del sistema MOSE è prevista la costruzione di tre porti rifugio alle bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia, che permetteranno il passaggio delle navi durante il funzionamento delle barriere mobili grazie a un sistema di chiuse che collega due bacini, uno posizionato sul lato mare della schiera di barriere, l'altro posizionato sul lato rivolto verso la laguna. In due di queste strutture, Punta Sabbioni (Lido) e Ca' Roman (Chioggia), il bacino lato mare è stato anche utilizzato come area di prefabbricazione delle barriere mobili, al fine di ridurre il consumo di suolo sulla terraferma. Una combinazione di paratie e diaframmi plastici ha permesso di confinare idraulicamente il bacino (tura) mentre, per garantirne l'accessibilità e la sicurezza, è stato installato un sistema di pozzi perimetrali di drenaggio (dewatering) che hanno permesso di mantenere il livello idrico interno al di sotto della quota di fondo. Si è quindi reso necessario attuare un programma di monitoraggio delle falde idriche in cui è ipotizzabile un effetto dell'emungimento di cantiere, per comprendere e quantificarne l'impatto su questa matrice ambientale.

Rilievi effettuati sulla rete di monitoraggio: a sinistra, freatimetro dotato di sonda multiparametrica utilizzato per la misura del profilo verticale della temperatura e della conducibilità elettrica specifica dell'acqua di falda; a destra, scaricamento su PC dei dati del trasduttore automatico di misura della pressione idraulica installato in ciascun piezometro della rete di monitoraggio.



Cantiere di prefabbricazione delle barriere mobili a Punta Sabbioni. L'utilizzo come spazio di cantiere di un bacino del futuro porto rifugio ha permesso di evitare l'occupazione di circa 7 ettari di terreno.

I numeri del monitoraggio

2 siti monitorati, Punta Sabbioni (bocca di Lido) e Ca' Roman (bocca di Chioggia).

91 mesi di monitoraggio a Punta Sabbioni, da ottobre 2005 ad aprile 2013.

22 piezometri installati inizialmente a Punta Sabbioni, e 3 piezometri installati nel novembre 2008 per integrare la rete.

93 mesi di monitoraggio a Ca' Roman, da febbraio 2007 ad ottobre 2014;

2 piezometri installati esternamente al cantiere di Ca' Roman.

10 minuti è la cadenza di misura dei livelli nei due siti.

Più di 300mila misure acquisite da ciascun piezometro in quasi 8 anni.

Più di 100 rilievi per acquisizione dati.

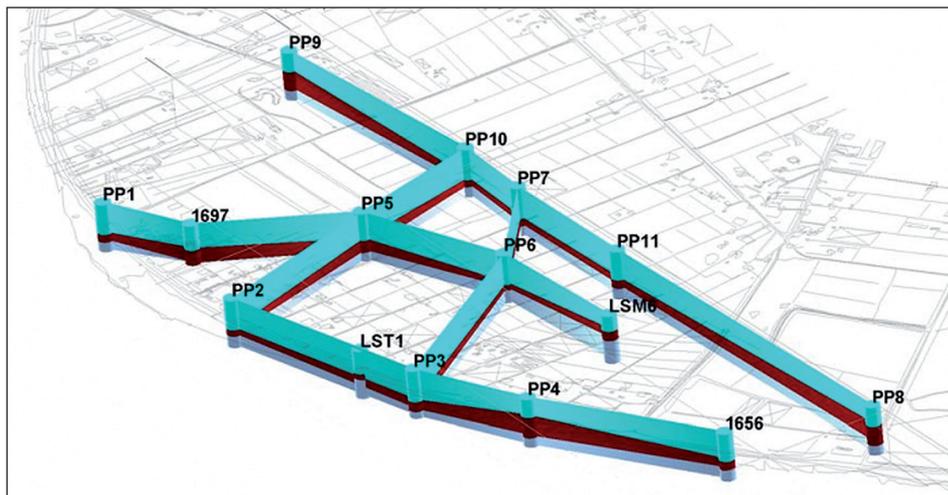


Monitoraggio di falda nel cantiere di Punta Sabbioni (Lido)

Il bacino provvisorio di prefabbricazione nel cantiere di Punta Sabbioni ha una quota di fondo di 8.70 m sotto il livello medio del mare. Il sistema di pompaggio ha interessato quindi le prime due falde idriche: la falda freatica superficiale, che raggiunge profondità di 15 m circa, e la prima falda confinata, che si estende tra 20 e 25 m di profondità (figura a destra).

Nel mese di luglio 2005 è stata installata una rete di 11 postazioni doppie di monitoraggio installate in un'area di 70 ettari a ridosso del cantiere. Ciascuna postazione è composta da due pozzi di monitoraggio (piezometri), uno per la misura dei livelli in falda superficiale (0÷15 m di profondità) ed uno per misurare i livelli della falda profonda (20÷25 m di profondità). Ogni piezometro è stato dotato di un trasduttore automatico per la misura dei livelli, con una cadenza regolare di una misura ogni 10 minuti.

L'evoluzione temporale dei livelli è stata messa in relazione con le altre forzanti naturali: le precipitazioni atmosferiche,



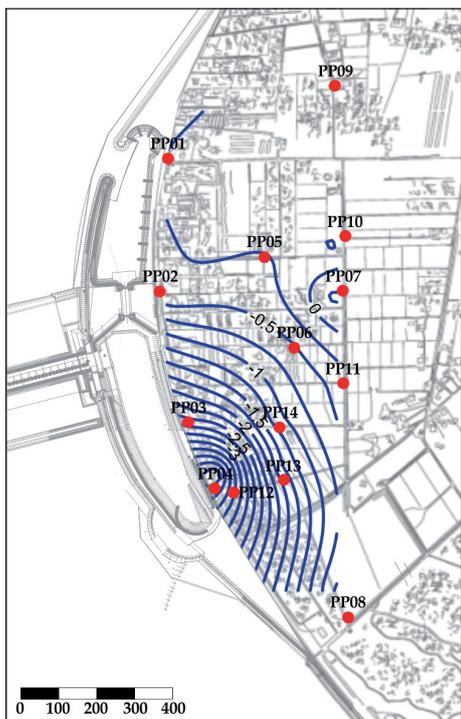
Stratigrafia tridimensionale del sito di Punta Sabbioni: in azzurro è evidenziata la falda superficiale, in grigio la falda profonda, in rosso lo strato meno permeabile che isola le due falde, detto acquicludo. Sono stati utilizzati i dati provenienti dalle colonne stratigrafiche dei piezometri profondi (PP01÷11) e da alcuni sondaggi resi disponibili dalla Provincia di Venezia (1697, 1656, LSM6 e LST1).

l'evapotraspirazione dalla falda (che dipende dalla temperatura) e i livelli del mare.

Oltre ai livelli, un altro aspetto sul quale era ipotizzabile un impatto è la salinità delle falde idriche. Per questo motivo,

sono stati effettuati rilievi mensili dei profili verticali della conducibilità elettrica. In questo modo è stato possibile seguire l'evoluzione dell'intrusione salina durante le stagioni ed individuare eventuali impatti del cantiere.

Principali risultati del monitoraggio a Punta Sabbioni

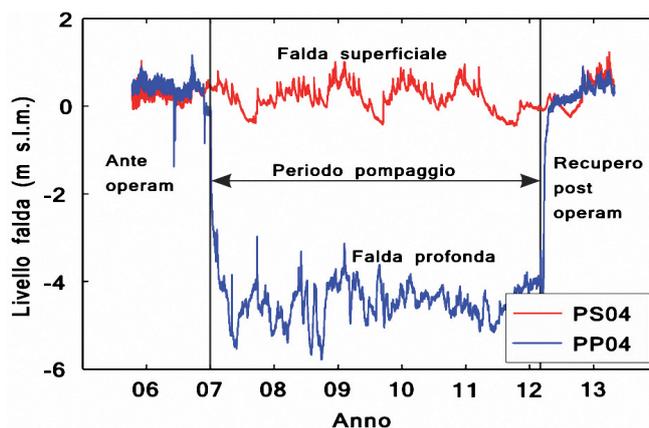


Distribuzione spaziale dei livelli di falda profonda. Le curve di livello, calcolate a partire dalle misure effettuate nei piezometri (punti rossi sulla mappa), evidenziano l'impatto del cantiere sulla terraferma.

L'attività di monitoraggio delle falde idriche ha permesso di appurare che le attività di cantiere hanno comportato un impatto sulla falda profonda sostenibile e reversibile. Da gennaio 2007 a marzo 2012, infatti, si è verificato un abbassamento di falda esteso per alcune centinaia di metri dalla costa (figura a sinistra), con una depressurizzazione massima corrispondente a circa 5 m di colonna d'acqua nelle postazioni più prossime al cantiere (piezometri PP04 e PP12), mentre in quelle più distanti (PP09, PP10, PP11, PP07) si è attestata a circa

1 m. Terminato il pompaggio di cantiere, i livelli di falda profonda sono ritornati alla configurazione originaria (ante operam) nell'arco di circa 5 mesi.

Il pompaggio di cantiere non ha però avuto effetti apprezzabili sulla falda superficiale, fondamentale per l'agricoltura e per la vegetazione tipica di queste zone umide costiere, come è possibile osservare da un confronto degli andamenti del livello di falda nella postazione più prossima al cantiere (piezometri PP04 e PS04) riportato nella figura sottostante.



Confronto tra gli andamenti dei livelli in falda superficiale (linea rossa) e profonda (linea blu) nel sito di Punta Sabbioni, prima (ottobre 2005-dicembre 2006), durante (gennaio 2007-marzo 2012) e dopo (marzo 2012-aprile 2013) l'attività di pompaggio in cantiere.

Monitoraggio di falda nel cantiere di Ca' Roman (Chioggia)

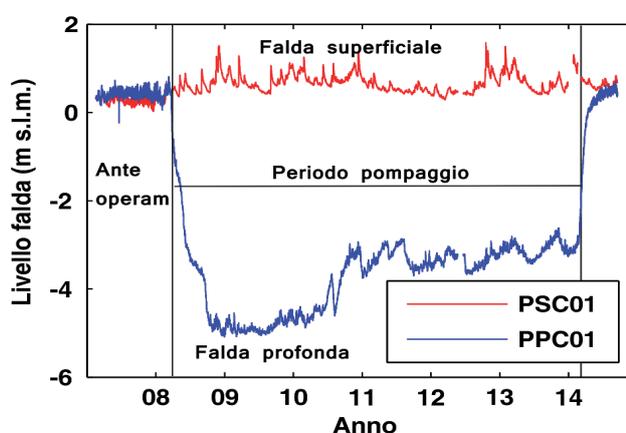
Nel mese di febbraio 2007 è stata installata una postazione doppia di monitoraggio di falda a ridosso dell'area di cantiere di Ca' Roman (bocca di Chioggia), composta da due piezometri, uno per la misura dei livelli di falda superficiale (PSC01, 0÷15 m di profondità) e l'altro per la falda profonda (PPC01, 20÷37 m di profondità).

Come nel sito di Punta Sabbioni, nel periodo aprile 2008 – marzo 2014 è stato attivo un sistema di pompaggio (dewatering) per drenare un bacino utilizzato nella prefabbricazione delle barriere mobili.

Anche in questo caso, il monitoraggio ha evidenziato un abbassamento nella falda profonda indotto dalle attività di cantiere, ma nessun impatto è stato riscontrato nella falda superficiale, che avrebbe potuto determinare conseguenze negative per la vegetazione.

Al termine del pompaggio, nel mese di marzo 2014 il bacino è stato ri-allagato, e la condizione *ante operam* della falda profonda è stata ripristinata completamente.

Cantiere di Ca' Roman: piezometri (PSC01 e PPC01) per il monitoraggio degli effetti del pompaggio attuato nel bacino di prefabbricazione delle barriere mobili che saranno installate alla bocca di Chioggia (foto aerea da Google Earth, 2010).



Confronto tra gli andamenti dei livelli in falda superficiale (linea rossa) e profonda (linea blu) nel sito di Ca' Roman, prima (febbraio 2007-aprile 2008), durante (aprile 2008-marzo 2014) e dopo (marzo-settembre 2014) l'attività di pompaggio in cantiere.

Produzione scientifica

Il programma di monitoraggio di falda dei cantieri MOSE ha rappresentato, a livello tecnico e scientifico, un interessante caso di studio di monitoraggio degli acquiferi costieri e dell'impatto di attività di dewatering di cantiere, comunemente adottate per opere in sotterraneo (metropolitane, sottopassaggi, fondazioni di grattacieli ecc.).

I risultati del monitoraggio e lo schema concettuale della rete e del programma di misure sono l'argomento di una pubblicazione internazionale sulla rivista *Environmental Earth Sciences*, edita da Springer, dal titolo "Groundwater monitoring at a building site of the tidal flood protection system "MOSE" in the Lagoon of Venice, Italy".

Un'altra pubblicazione ha riguardato la simulazione dei livelli di falda superficiale nel sito di Punta Sabbioni con le reti neurali artificiali. La rivista è *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, edita da Pergamon, ed il titolo dell'articolo è "Artificial neural network simulation of hourly groundwater levels in a coastal aquifer system of the Venice lagoon".

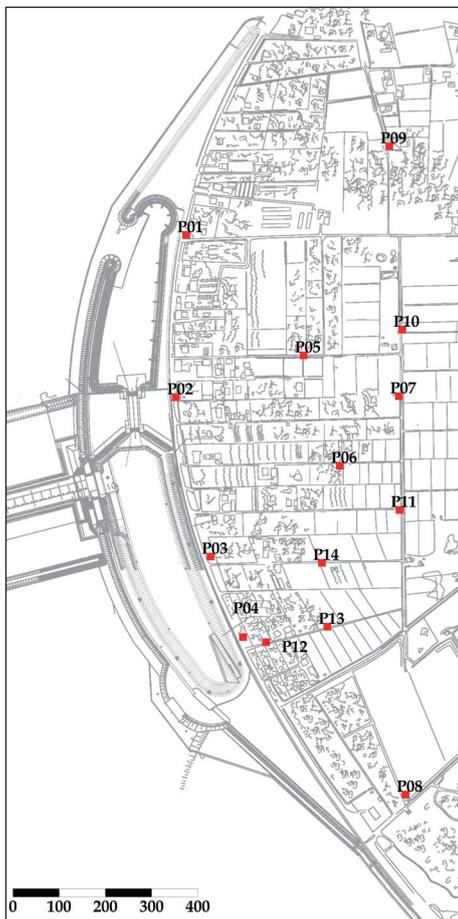


Il monitoraggio è stato commissionato al Politecnico di Torino – DITAG (dal 2012 DIATI) nel 2004, con responsabile il Prof. **Antonio Di Molfetta**. A partire

dal giugno 2013, la supervisione è passata al Prof. **Rajandrea Sethi**. I sopralluoghi e la redazione dei report sono stati affidati, nel corso degli anni, agli ingg. Silvia Delforno, Chiara Santi, Tommaso Baldarelli e Alessandro Casasso. La realizzazione dei piezometri è stata

effettuata nel 2005 dalla SELC (postazioni P01÷P11) e nel 2008 dalla Ecosonda SRL (postazioni P12÷P14). Il rilievo topografico delle postazioni sulla rete installata nel 2005 è stato effettuato dal gruppo di Topografia del DIATI - Politecnico di Torino, nel 2008 dai geol. Enrico Fagarazzi e Francesco Benincasa.

Misura dei livelli di falda

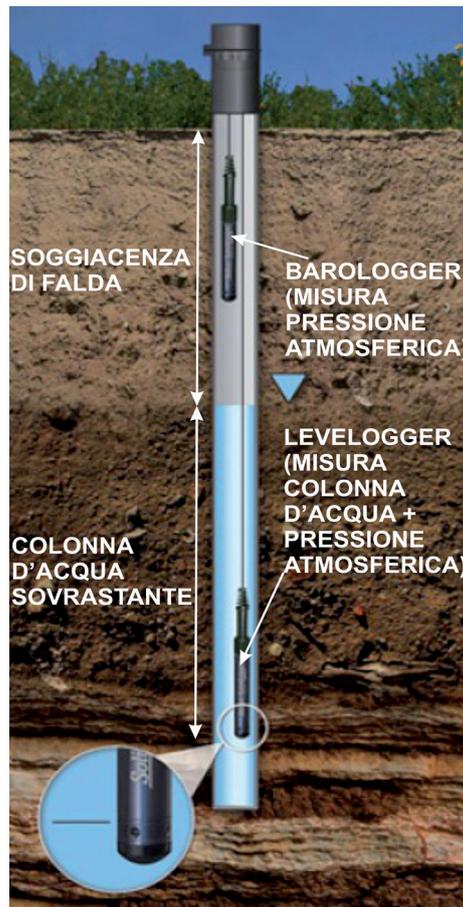


La rete di monitoraggio nel sito di Punta Sabbioni (Lido), composta da 14 postazioni (P01 - P14), di cui 11 doppie (piezometri superficiali PS01-PS11 e piezometri profondi PP01-PP11) e 3 singole (piezometri profondi PP12 - PP14).

I livelli di falda sono stati misurati in continuo e con una strumentazione automatica. All'interno di ciascun pozzo di monitoraggio (piezometro) è stato installato un Levelogger® Solinst: un trasduttore di pressione con un datalogger che registra le letture secondo una programmazione stabilita dall'utente (figura a sinistra). Viene quindi misurata una pressione, convertita in una altezza equivalente di colonna d'acqua, che è pari alla somma della pressione del battente d'acqua sovrastante e della pressione atmosferica (figura a destra). Per eliminare quest'ultimo contributo, che falserebbe le misure di livello di falda, un barometro viene installato fuori dai pozzetti e misura la pressione atmosferica.



Levelogger® Solinst per la misura e la registrazione automatica dei livelli di falda.

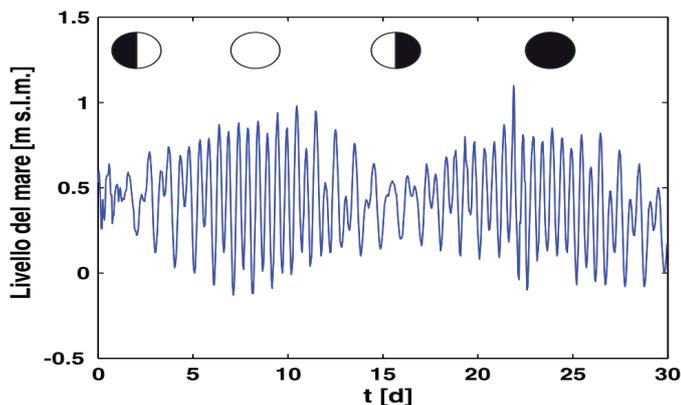


Schema di installazione e grandezze misurate dagli strumenti installati nei piezometri (Levelogger e dai Barologger).

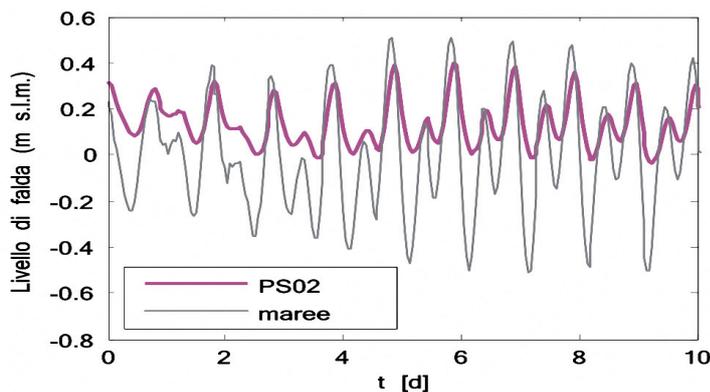
Il monitoraggio ha permesso di comprendere le dinamiche cicliche dei livelli di falda superficiale, che a ridosso della costa sono governati dalle oscillazioni mareali e nell'area interna sono influenzati dalle variabili climatiche. La ciclicità delle variazioni è differente:

- nei piezometri costieri il ciclo di innal-

zamenti e abbassamenti segue le maree (figura in basso a sinistra) e dura da 12 ore (maree nelle fasi di plenilunio e novilunio, dette di sizigie) a 24 ore (maree nelle fasi di primo e ultimo quarto, dette di quadratura), come si osserva nella figura in basso a destra;

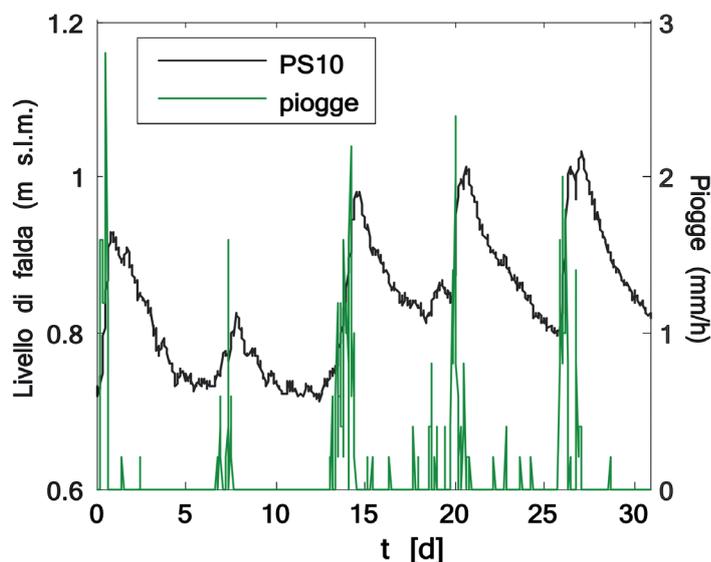


Andamento delle maree secondo le fasi lunari: primo quarto, luna piena, ultimo quarto, luna nuova.



Dinamica dei livelli in un piezometro lungo la costa (PS02, a circa 20 m dalla costa).

- nell'entroterra la ciclicità è annuale. La falda si abbassa infatti durante l'estate a causa della forte evapotraspirazione dal suolo e dalle piante, mentre nelle altre stagioni le precipitazioni si infiltrano e in parte vanno a ricaricare la falda nel giro di poche ore (figura a destra), in parte fluiscono verso il mare o verso i canali di scolo del sistema di bonifica. La comprensione di questi meccanismi ha permesso, ad esempio, di appurare che gli abbassamenti anomali di falda registrati durante alcune estati siccitose (su tutte, 2007 e 2012) erano dovuti esclusivamente a ragioni climatiche, escludendo un impatto da parte del cantiere.

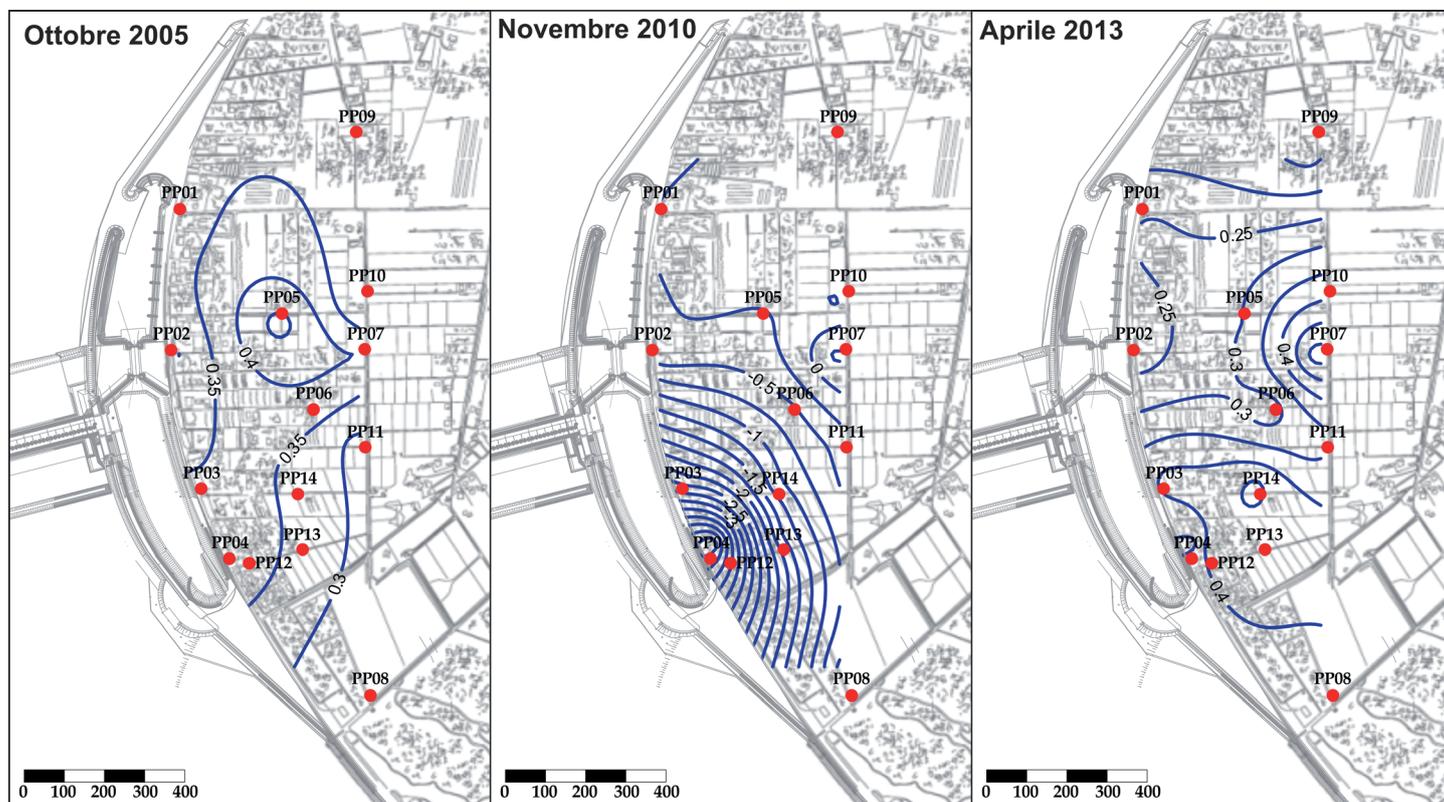


Dinamica dei livelli in un piezometro nell'entroterra (PS10, a 500 m dalla costa).

Nella falda profonda, durante il periodo di pompaggio (gennaio 2007 – marzo 2012) è stata riscontrata un'alterazione della distribuzione delle pressioni idriche (carichi idraulici), con un cono di depressione il cui centro è situato nel piezometro PP04, in corrispondenza del bacino sud drenato dai pozzi di emungimento (figura sottostante). Durante la fase di svuotamento della tura, si è osservato un declino

graduale dei livelli di falda profonda, che durante gli anni hanno oscillato secondo le variazioni di portata emunta. La depressurizzazione massima corrisponde a circa 5 m di colonna d'acqua (piezometri PP04 e PP12), mentre nelle postazioni più distanti (PP09, PP10, PP11, PP07) si è attestata a circa 1 m. La depressurizzazione massima corrisponde a circa 5 m di colonna d'acqua (piezometri PP04

e PP12), mentre nelle postazioni più distanti (PP09, PP10, PP11, PP07) si è attestata a circa 1 m. Il monitoraggio, avendo evidenziato tali dinamiche, ha permesso di ottimizzare la distribuzione delle portate estratte contenendo al massimo gli impatti. Terminato il pompaggio di cantiere, i livelli di falda profonda sono ritornati alla configurazione originaria (ante operam) nell'arco di circa 5 mesi.



Confronto tra le curve di livello (piezometrie) di falda profonda prima del pompaggio di cantiere (Ottobre 2005), durante il pompaggio (Novembre 2010) e dopo il termine del pompaggio (Aprile 2013). In rosso sono indicati i piezometri profondi (PP01÷14) dai quali sono stati tratti i dati puntuali di carico idraulico della falda.

Profili della conducibilità elettrica dell'acqua di falda

Durante tutto il periodo di monitoraggio (ottobre 2005 – aprile 2013 nel sito di Punta Sabbioni; febbraio 2007 – ottobre 2014 nel sito di Ca' Roman) sono stati acquisiti i profili verticali della conducibilità elettrica dell'acqua di falda, con una cadenza mensile. I rilievi sono stati effettuati con uno strumento di misura del livello di falda (freatimetro) dotato di sonda multiparametrica per la misura di temperatura e conducibilità elettrica.

Il monitoraggio della conducibilità elettrica dell'acqua di falda, fortemente correlata alla sua salinità, ha permesso di comprendere le dinamiche stagionali, in particolare dell'acquifero superficiale (figura in alto).

La salinità segue dei cicli e, in particolare, durante l'estate si osserva un incremento della salinità dovuto alla riduzione dell'apporto dovuto all'infiltrazione delle piogge.

Tale incremento è però reversibile e, negli anni, non sono stati osservati trend di crescita che avrebbero



Sonda multiparametrica TLC107 Solinst, utilizzata per la misurazione dei profili di conducibilità elettrica specifica dell'acqua di falda.

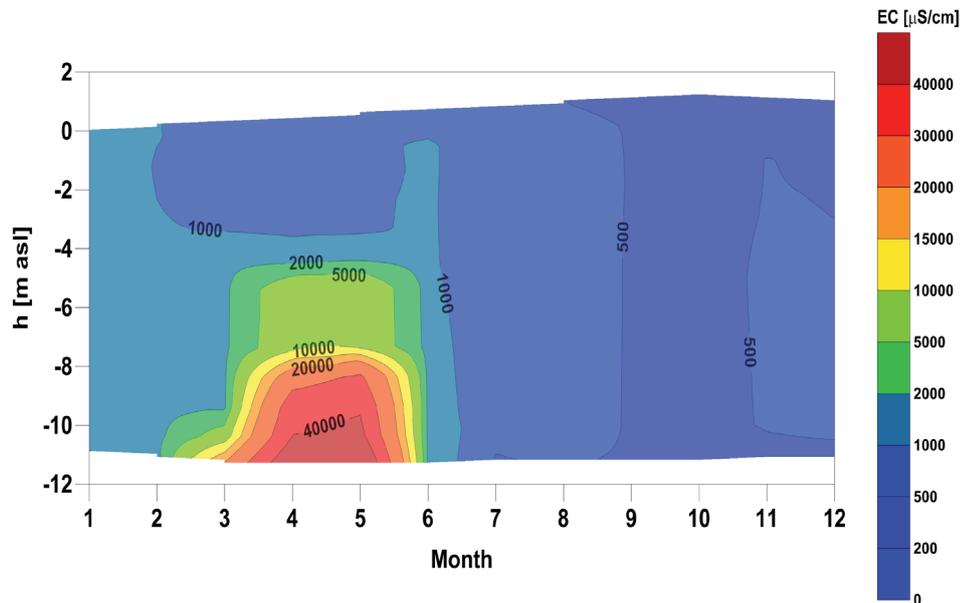
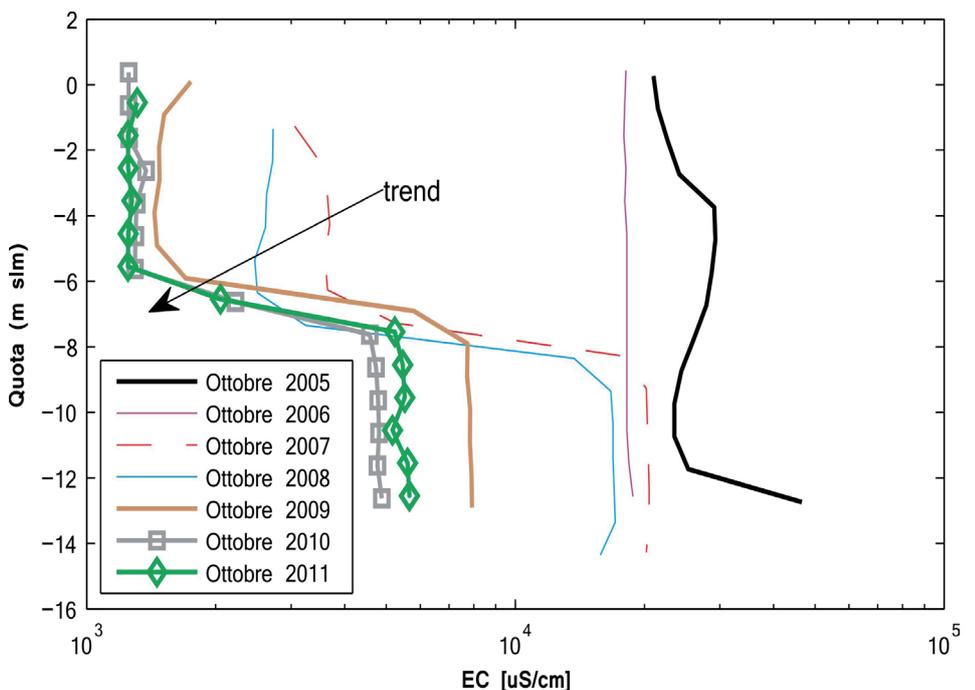


Grafico che evidenzia come varia, nel corso delle stagioni, l'andamento verticale della conducibilità elettrica e quindi della salinità dell'acqua in un piezometro dell'acquifero superficiale (PS06). Si osserva come in estate si verifichi un netto incremento dei valori.

potuto avere impatti negativi sulla vegetazione.

In entrambi i siti di Punta Sabbioni e Ca' Roman, in corrispondenza del bacino drenato, la falda superficiale

ha subito una riduzione della salinità dell'acqua a causa dell'installazione di un diaframma impermeabile che blocca i flussi provenienti dal mare (figura in basso).



Profili verticali di conducibilità elettrica nel piezometro PS04, vicino al bacino di prefabbricazione delle barriere mobili. Si osserva che, nel tempo, la conducibilità (e quindi la salinità) dell'acqua si è notevolmente ridotta.