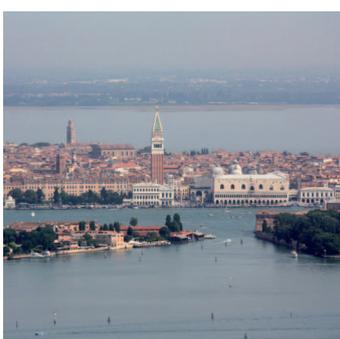


# IL CONTROLLO AMBIENTALE DELLA COSTRUZIONE DEL MOSE

10 anni di monitoraggi  
tra mare e laguna di Venezia  
2004 - 2015



*Editors*

*P. Campostrini, C. Dabalà, P. Del Negro, L. Tosi*



Questo volume riassume i principali risultati dei "Monitoraggi degli effetti dei cantieri prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari" condotti a partire dal 2004 nell'ambito degli Studi B.6.72 B/1 - B/11 del Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (già Magistrato alle Acque di Venezia), affidati al Consorzio Venezia Nuova e sviluppati da CORILA.

#### **Alta sorveglianza**

Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (già Magistrato alle Acque)  
Ufficio Salvaguardia di Venezia  
*Giampietro Mayerle, Fabio Riva, Valerio Volpe, Maria Adelaide Zito*

#### **A cura di**

CORILA  
*Editors: Pierpaolo Campostrini, Caterina Dabalà, Paola Del Negro, Luigi Tosi*

#### **Con i contributi specialistici di**

CORILA  
*Pierpaolo Campostrini, Caterina Dabalà, Chiara Dall'Angelo*

Dipartimento di Biologia, sezione di Etologia, Università di Pisa  
*Natale Emilio Baldaccini*

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Politecnico di Torino  
*Alessandro Casasso, Antonio Di Molfetta, Rajandrea Sethi*

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli Studi di Padova (DICEA-UNIPD)  
*Giampaolo Di Silvio*

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara  
*Renzo Cremonini, Patrizio Fausti, Maria Carmen Guerra, Andrea Santoni, Giuliano Scalpelli Quiqueto, Nicolò Zuccherini Martello*

Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica, Università Ca' Foscari di Venezia (DAIS-UNIVE)  
*Marco Anelli Monti, Francesco Cavarro, Francesca Coccon, Piero Franzoi, Vyrion Georgalas, Elisa Morabito, Fabio Pranovi, Simone Redolfi Bristol, Giovanni Sburlino, Patrizia Torricelli, Matteo Zucchetto*

© Copyright CORILA  
Consorzio per il Coordinamento delle Ricerche inerenti al sistema Lagunare di Venezia

S. Marco 2847, Palazzo Franchetti  
30124 Venezia  
Tel. +39-041.2402511 - pec: corila@pec.it  
direzione@corila.it  
www.corila.it

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Stampa Nuova Jolly, Padova 2017

#### **Coordinamento generale**

Consorzio Venezia Nuova  
*Fabio Beraldin, Giovanni Cecconi, Claudia Cerasuolo, Massimo Gambillara*

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISAC-CNR)  
*Franco Belosi, Daniela Cesari, Daniele Contini*

Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISMAR-CNR)  
*Giuliano Lorenzetti, Giorgia Manfè, Marco Sigovini, Davide Tagliapietra, Luca Zaggia*

Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali, Consiglio Nazionale delle Ricerche (IDPA-CNR)  
*Andrea Gambaro*

Museo di Storia Naturale di Venezia  
*Luca Mizzan, Marco Uliana, Cecilia Vianello*

SELC soc. coop.  
*Isabelle Cavalli, Emiliano Checchin, Daniele Curiel, Daniele Mion, Chiara Miotti, Andrea Rismondo, Francesco Scarton*

Università IUAV di Venezia  
*Marco Della Puppa, Marco Mazzarino*

*Francesco Barbieri, Elena Elvini, Leonardo Ghirelli, Lorenzo Zanella*

*Tutti i rapporti relativi ai monitoraggi dei cantieri del MOSE sono a disposizione al sito web [www.monitoraggio.corila.it](http://www.monitoraggio.corila.it).*

*La presente relazione scientifica è parte delle attività finanziate dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche del Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (PROVV.OO.PP.), già Magistrato alle Acque di Venezia (MAG.ACQUE), tramite il concessionario Consorzio Venezia Nuova (CVN).*

*Tutte le figure, salvo quelle di cui è indicata esplicitamente la fonte, sono di proprietà di CORILA e degli autori.*

*Le affermazioni qui riportate sono di responsabilità degli autori e non necessariamente sono condivise dal Provveditorato o dal Concessionario.*



# Le falde idriche in prossimità dei cantieri MOSE

## *Shallow aquifers close to the MOSE building sites*

Alessandro Casasso, Rajandrea Sethi, Antonio Di Molfetta

### Introduzione

Al fine di contenere i costi e i rischi legati a un trasporto su lunghe distanze, i cassoni di alloggiamento delle barriere mobili del sistema MOSE sono stati realizzati *in situ*. Questa scelta progettuale ha reso necessaria l'individuazione di tre aree di cantiere, poste nelle vicinanze delle bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia.

L'area di cantiere alla bocca di Malamocco, situata in un terrapieno realizzato ad hoc, è stata utilizzata per la realizzazione dei cassoni di alloggiamento che sono stati successivamente installati alla bocca di Malamocco e nella parte sud della bocca di Lido (San Nicolò). Per le altre due schiere di cassoni, da installare alla bocca di Chioggia e Lido, è stato necessario utilizzare spazi in mare.

In ciascuno dei due porti rifugio di Punta Sabbioni-Treporti (Lido) e Ca' Roman (Chioggia), uno dei due bacini è stato trasformato in una *tura* di fabbricazione (figura 1), isolata idraulicamente dal mare e prosciugata al suo interno con un sistema di pompaggio in continuo. L'isolamento idraulico della *tura* è composto da palancole metalliche su tutto il perimetro del bacino drenato e da un diaframma plastico sul lato posto lungo la linea di costa, che è stato installato per contenere l'impatto del pompaggio di cantiere sulla terraferma. Il drenaggio della *tura* è stato effettuato inizialmente mediante idrovore (fase di aggotamento) e, in seguito, con un sistema di pozzi perimetrali di *dewatering* che hanno mantenuto il livello di falda al di sotto di una soglia di sicurezza, garantendo l'agibilità della superficie di cantiere posta al fondo del bacino durante le attività di costruzione dei cassoni.

La soluzione tecnica adottata ha evitato l'utilizzo di vaste aree sulla terraferma, che avrebbe determinato pesanti impatti ambientali ed economici. L'attività di pompaggio di *dewatering* comporta però il rischio di un impatto negativo per le falde idriche sulla terraferma, in termini quantitativi (abbassamento dei livelli di falda superficiale) e qualitativi (incremento della salinità dell'acqua) (Bear, 1999; Powers *et al.*, 2007).

Per questo motivo, nei siti di Punta Sabbioni e Ca' Roman è stato prescritto il monitoraggio dei livelli di falda sulla terraferma su un arco temporale che, per ciascuno dei due siti, comprende tre periodi: prima di tutte le lavorazioni con potenziale impatto sul sistema acquifero (Fase A o *ante operam*), durante l'esecuzione di lavorazioni potenzialmente impattanti (Fase B) e nel periodo successivo a tali attività (Fase *post operam*). A Punta Sabbioni il monitoraggio è iniziato a ottobre 2005 e si è concluso ad aprile 2013, mentre a Ca' Roman è iniziato a febbraio 2007 e si è concluso a novembre 2014. Di seguito si riporta la sintesi dei risultati del monitoraggio condotto negli anni suindicati.

## Metodologia

Sulla base del progetto dell'opera e delle informazioni stratigrafiche disponibili, è stato evidenziato che i corpi idrici sotterranei potenzialmente impattati dai cantieri sono l'acquifero non confinato, definito "superficiale", e il primo acquifero confinato, definito "profondo" (MAG.ACQUE-CORILA, 2005b). Gli altri acquiferi confinati presenti a profondità maggiori, alcuni dei quali sfruttati anche per uso potabile, sono separati idraulicamente rispetto alle opere in realizzazione da strati impermeabili di notevole spessore, tale da poter escludere la possibilità di impatti legati alle attività di cantiere (CNR, 1999; Da Lio *et al.*, 2013).

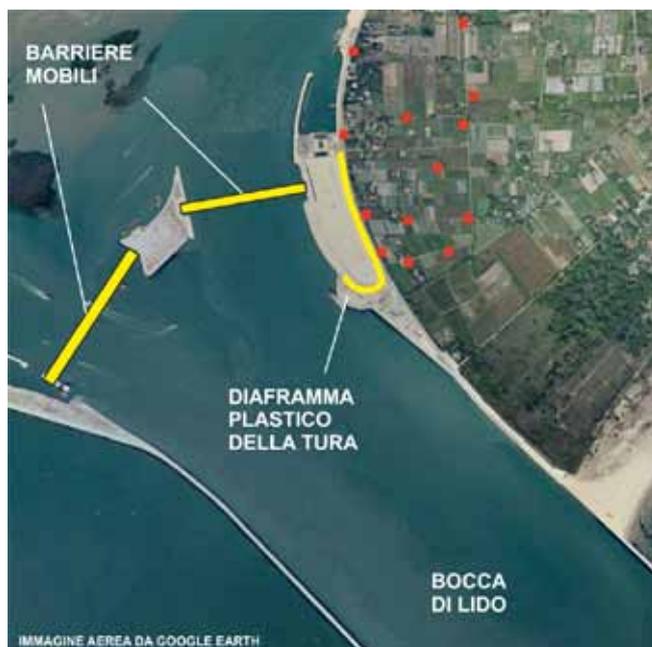
Il monitoraggio dei livelli di falda nei siti di Punta Sabbioni e Ca' Roman è stato condotto su due reti di piezometri installate appositamente nelle aree prospicienti i cantieri.

Nel sito di Punta Sabbioni sono state installate, nel luglio 2005, 11 postazioni doppie di monitoraggio su un'area di 70 ettari a ridosso del cantiere (MAG.ACQUE-CORILA, 2005b) (figura 2, a sinistra). Ciascuna postazione è composta da due piezometri per la misura dei livelli di falda superficiale (PS01÷11, fino a 15 m di profondità) e profonda (PP01÷11, circa 20÷25 m di profondità). I due acquiferi sono separati da un acquicludo limoso-argilloso di spessore pari a circa 5 m. Dalle informazioni stratigrafiche ottenute con i carotaggi eseguiti per l'installazione dei piezometri profondi è stato possibile ricostruire la configurazione tridimensionale del sottosuolo in corrispondenza del sito di Punta Sabbioni (figura 3). Nel dicembre 2008 la rete è stata integrata con altre tre postazioni (PP12÷14) per la misura dei livelli di falda profonda, che hanno permesso di ottenere un maggior dettaglio nella misurazione degli abbassamenti di livello indotti dal sistema di pompaggio nella zona più vicina all'area di cantiere (MAG.ACQUE-CORILA, 2009).

Nel sito di Ca' Roman è stata installata, nel febbraio 2007, una postazione doppia di monitoraggio dei livelli di falda (MAG.ACQUE-CORILA, 2007), con un piezometro per la misura dei livelli di falda superficiale (PSC01, fino a 15 m di profondità) e uno per la falda profonda (PPC01, tra 20 e 37 m di profondità). La postazione (figura 2, a



1. Cassoni di alloggiamento delle barriere in costruzione nella *tura* di Punta Sabbioni; è evidente la differenza di livello tra mare e tura. Fonte: Consorzio Venezia Nuova (2010).



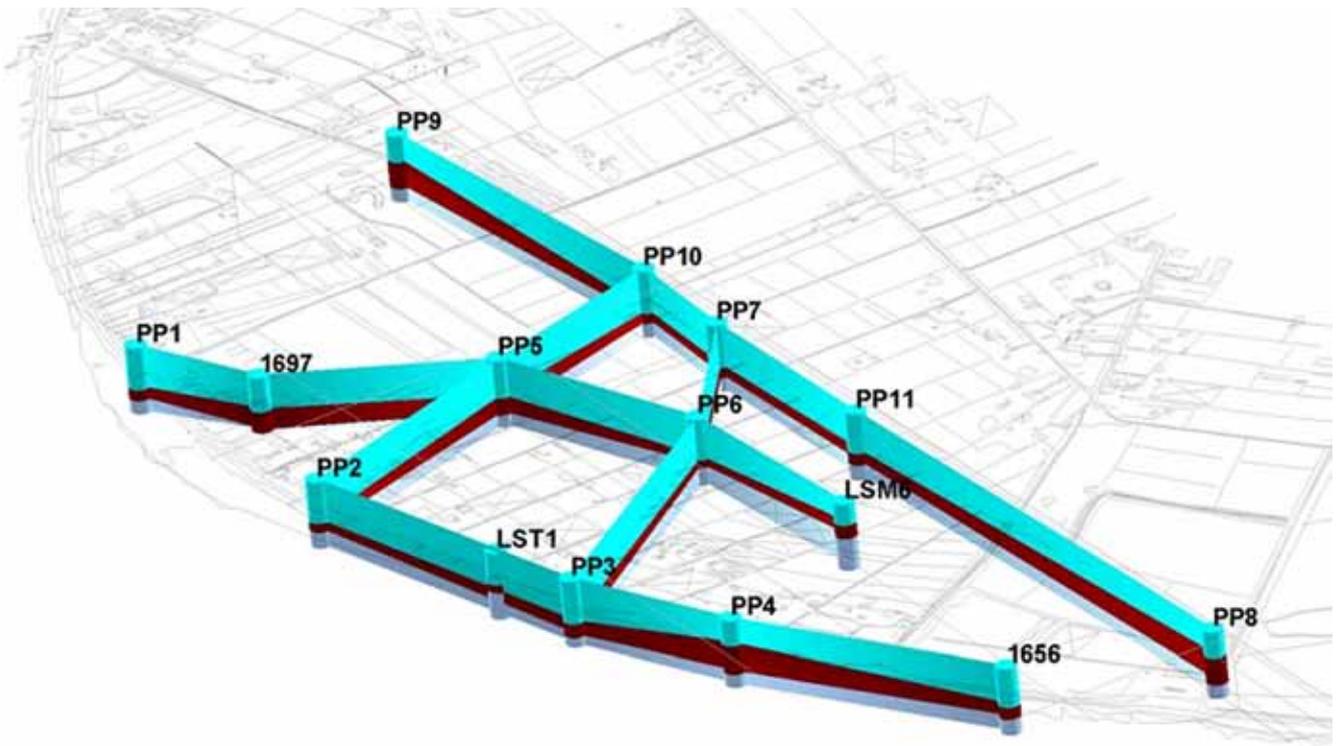
2. Foto aeree del cantiere MOSE alla bocca di Lido (a sinistra) e di Chioggia (a destra), con indicazione delle postazioni di monitoraggio piezometrico (quadrati rossi); scala è 1:30000. Immagine aerea da Google Earth.

destra) è situata a ridosso della recinzione del cantiere. Non essendo presenti insediamenti abitativi nell'area attorno al cantiere, non sono state installate altre postazioni di monitoraggio piezometrico.

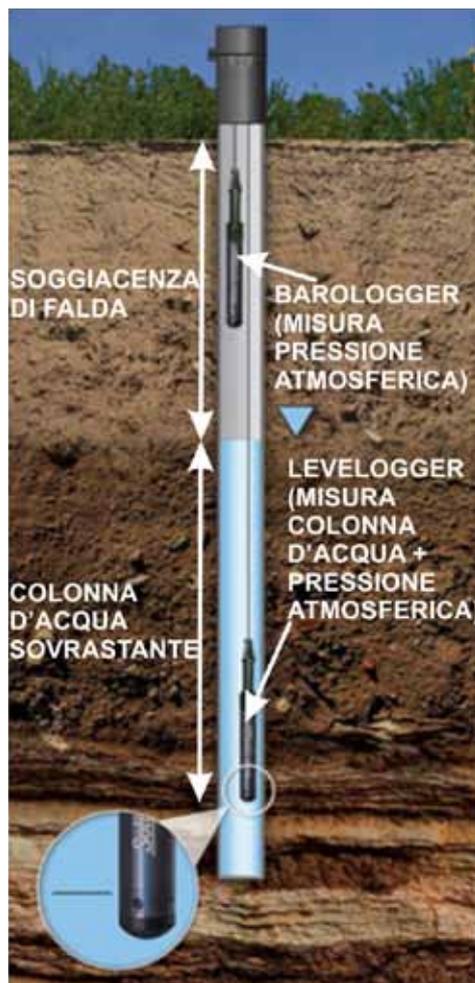
I 27 piezometri che compongono le due reti di monitoraggio sono stati equipaggiati con trasduttori di pressione per la registrazione in continuo dei livelli di falda (figura 4). In entrambi i siti sono stati inoltre installati trasduttori di misura della pressione dell'aria, per tenere conto degli effetti barometrici sui carichi idraulici misurati in falda (compensazione barometrica) (MAG.ACQUE-CORILA, 2005b). In figura 4 è rappresentato lo schema di installazione dei trasduttori all'interno di un piezometro.

I livelli registrati sono stati confrontati con gli andamenti delle precipitazioni piovose delle centraline di ARPA Veneto "Cavallino Treporti" (posta a 5.5 km a Nord-Est rispetto al sito di Punta Sabbioni) e "Chioggia-loc. S. Anna" (posta a 12 km a Sud rispetto al sito di Ca' Roman) e dei livelli di marea dei mareografi dell'ICPSM "Diga Sud Lido" (posto a circa 2 km a Sud del sito di Punta Sabbioni) e "Diga Sud Chioggia" (posto circa 1 km a Sud rispetto al sito di Ca' Roman). I dati acquisiti (ARPA Veneto, 2014; ICPSM, 2014) sono serviti a quantificare l'influenza di queste forzanti naturali che agiscono sui due acquiferi e quindi quantificare l'impatto delle attività di cantiere.

Durante il monitoraggio sono state previste due soglie di livello di falda, di basso e di alto livello, per l'individuazione dei valori anomali. La soglia di basso livello è pari a 1 m al di sotto del livello del mare misurato con cadenza oraria (Soglia di Basso Livello Istantaneo) o mediato su 24 ore (Soglia di Basso Livello Medio), confrontata con i valori corrispondenti di carico idraulico nei piezometri superficiali e profondi. La scelta di questa soglia è dovuta alla forte influenza della forzante mareale, soprattutto per la porzione di acquifero prospiciente la linea di costa (Casasso *et al.*, 2014; Casasso *et al.*, 2011; MAG.ACQUE-CORILA, 2005a). Un valore del carico idraulico inferiore alla Soglia di Basso Livello identifica quindi un potenziale impatto antropico oppure, come riportato in seguito, un effetto della siccità estiva. La Soglia di Alto Livello è invece pari alla quota di piano campagna, sia per i livelli misurati con cadenza oraria (Soglia di Alto Livello Istantaneo) che per quelli mediati su 24 ore (Soglia di Alto Livello Medio). Si tratta di una soglia che identifica valori anomali di carico idraulico, che non devono essere tenuti in conto nell'analisi e che sono attribuibili a temporanei allagamenti in seguito ad eventi piovosi intensi.



3. Stratigrafia tridimensionale dell'area monitorata a Punta Sabbioni, con l'indicazione degli strati A (acquifero superficiale, in azzurro), B (acquicludo, in marrone) e C (acquifero profondo, in grigio). Fonte: Sethi *et al.* (2005b).



4. Schema di funzionamento dei trasduttori di misura del livello di falda (Levellogger) e della pressione atmosferica (Barologger).

A seguito dei superamenti delle Soglie di basso livello, è stato inviato il Rapporto di Anomalia ed è stata attivata la procedura con la Direzione Lavori dei cantieri, che periodicamente ha trasmesso i dati sulle portate totali emunte dal sistema di *dewatering*. Tali dati sono stati analizzati per motivare le variazioni di carico idraulico nella falda profonda e per valutare azioni di mitigazione dell'impatto, come la riduzione delle portate emunte nei pozzi più vicini alla terraferma.

Con cadenza mensile, sono stati acquisiti i profili della conducibilità elettrica specifica dell'acqua, un parametro strettamente legato alla sua salinità. In questo modo è stato possibile comprendere le dinamiche stagionali dell'intrusione salina, di cui risente in modo particolare la falda superficiale.

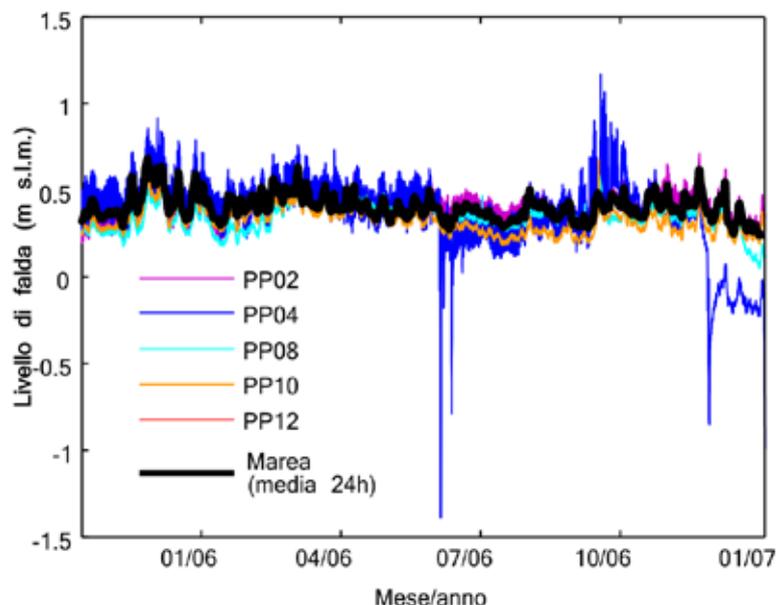
## Risultati

### Cantiere di Punta Sabbioni (Lido)

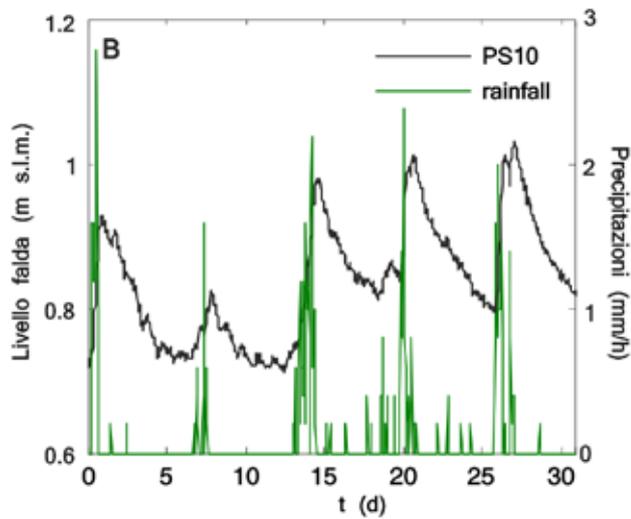
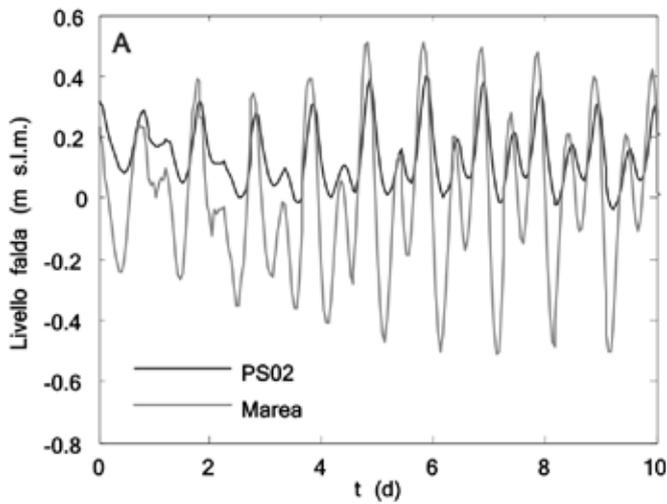
Nella fase *ante operam* (periodo ottobre 2005-dicembre 2006) la distribuzione spaziale dei carichi idraulici osservata nell'acquifero profondo è pressoché uniforme e presenta una dinamica correlata all'andamento medio giornaliero dei livelli di marea (figura 5). Durante questo periodo il sistema di *dewatering* non è stato attivo, ad eccezione di due operazioni di spurgo avvenute a giugno e ottobre 2006 (MAG.ACQUE-CORILA, 2006), per le quali è stato osservato un repentino abbassamento del carico idraulico nel piezometro PP04, posto a ridosso dell'area di cantiere.

Nell'acquifero superficiale, durante la fase *ante operam* sono stati osservati due comportamenti distinti (figura 6):

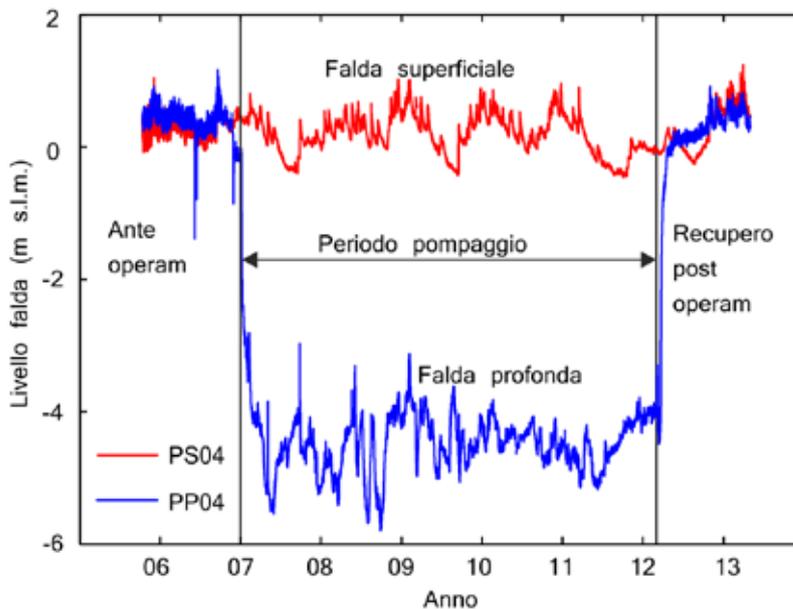
- lungo la linea di costa, i livelli di falda seguono le oscillazioni del livello del mare, con un'influenza trascurabile delle precipitazioni (figura 6A);
- nella parte interna dell'area monitorata, i livelli di falda presentano repentine risalite in seguito agli eventi piovosi e una graduale discesa dovuta all'evapotraspirazione e al flusso verso il mare (figura 6B). L'influenza delle oscillazioni mareali è invece trascurabile.



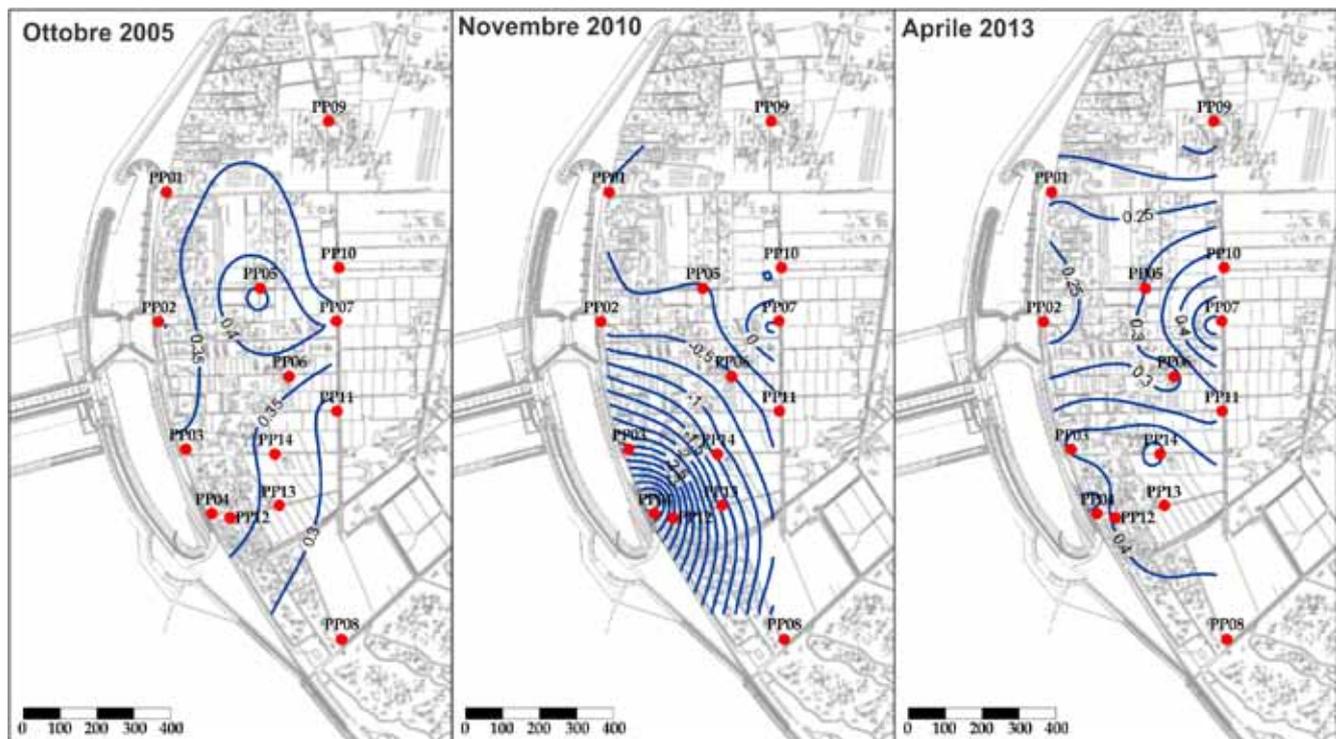
5. Andamento dei carichi idraulici nella fase *ante operam* in alcuni piezometri profondi a Punta Sabbioni.



6. Risposta dell'acquifero superficiale alle forzanti naturali: oscillazioni in fase con la marea (A); innalzamenti dovuti all'infiltrazione delle precipitazioni piovose, seguiti da abbassamenti dovuti all'evapotraspirazione (B). Periodo: gennaio 2009. Rielaborato da: Casasso *et al.* (2014).



7. Andamento dei livelli di falda in una postazione di monitoraggio a ridosso del cantiere di Punta Sabbioni. In rosso è indicato l'andamento dei livelli di falda superficiale (PS04), in blu quelli della falda profonda (PP04).

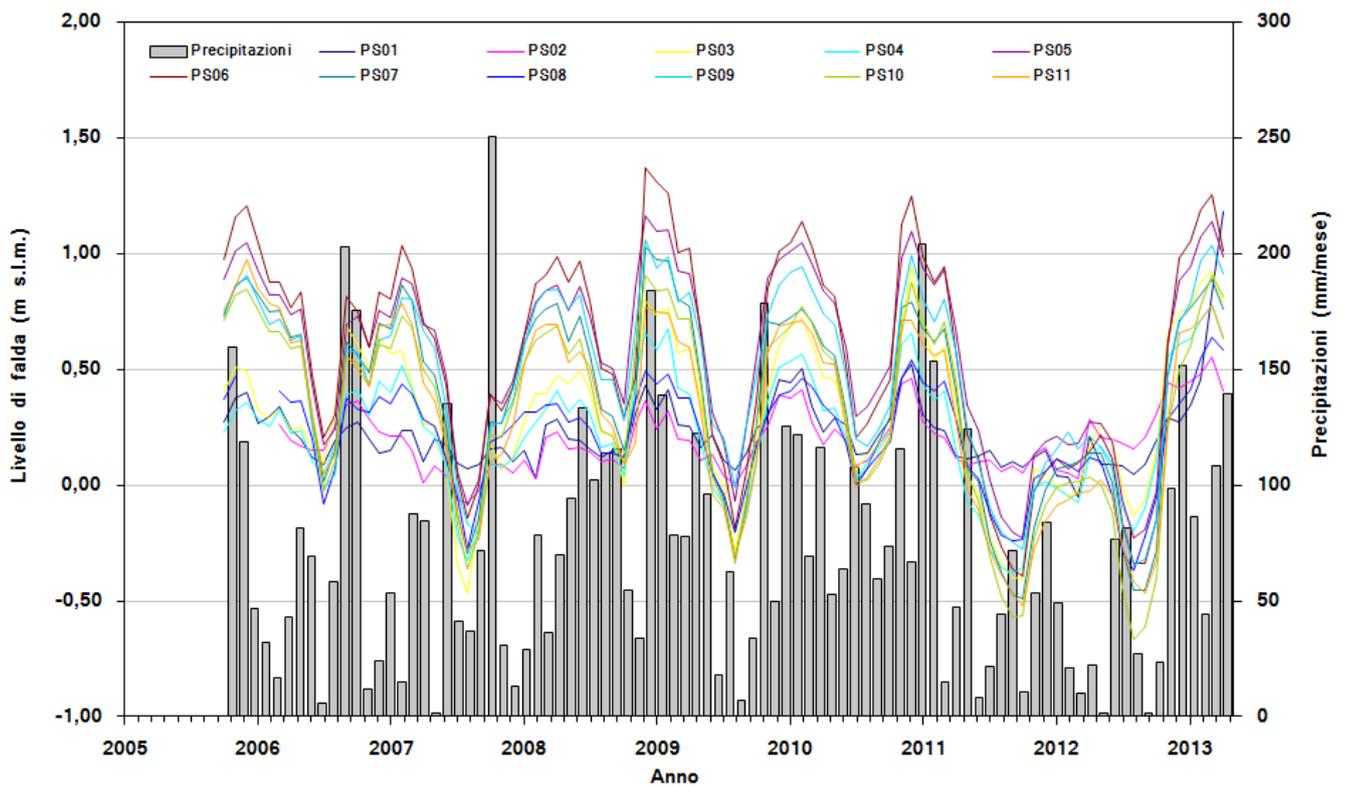


8. Distribuzione spaziale dei livelli di falda profonda durante la fase *ante operam* (Ottobre 2005), durante i lavori (Novembre 2010) e nella fase *post operam* (Aprile 2013). Adattata da Casasso *et al.* (2014).

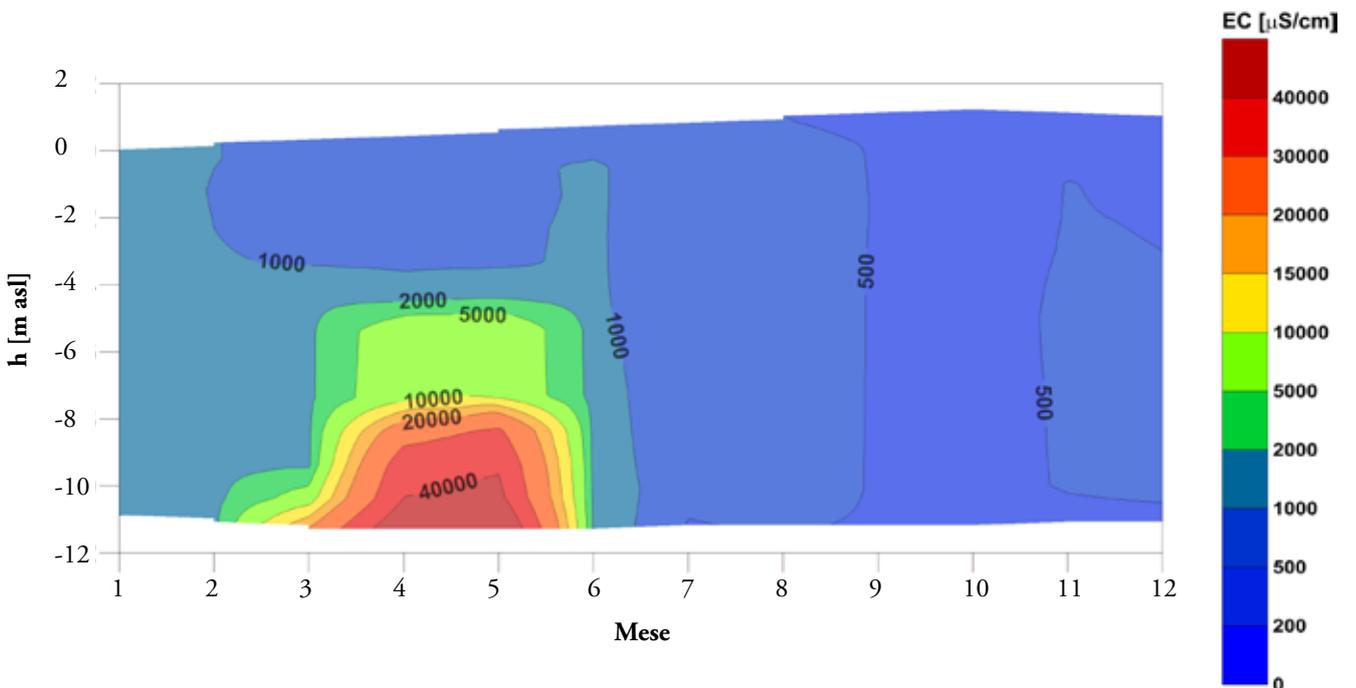
Il pompaggio di *dewatering* è stato effettuato in modo continuo tra gennaio 2007 e marzo 2012. Nei primi 7 mesi (gennaio-luglio 2007) è stato effettuato lo svuotamento della tura, anche attraverso l'utilizzo di idrovore. Dopo questa fase, la portata media prelevata è stata imposta a  $650 \text{ m}^3/\text{d}$ , necessari per mantenere il carico idraulico interno al di sotto di una soglia di sicurezza ( $-11 \text{ m s.l.m.}$ ) rispetto al fondo della tura, posto a  $-8.70 \text{ m s.l.m.}$  (MAG.ACQUE-CORILA, 2013). L'emungimento operato per garantire l'agibilità della tura ha determinato un rapido abbassamento del livello della falda profonda di  $4\div 6 \text{ m}$  a ridosso del cantiere (piezometro PP04, si veda figura 7), più ridotto allontanandosi dal sito (figura 8). Nel mese di giugno 2009, la soglia massimo di carico idraulico all'interno della *tura* è stata innalzata da  $-11 \text{ m s.l.m.}$  a  $-10 \text{ m s.l.m.}$  (MAG.ACQUE-CORILA, 2013). Con successivi aggiustamenti del sistema di pompaggio è stato possibile ridurre la portata totale a  $550 \text{ m}^3/\text{d}$  (ottobre 2009) e, in seguito, a  $450 \text{ m}^3/\text{d}$  (settembre 2011). Durante i lavori è stata inoltre operata una progressiva stabilizzazione delle portate emunte, con conseguente riduzione delle variazioni di livello e degli abbassamenti massimi in falda profonda.

Nell'acquifero superficiale non sono invece stati osservati abbassamenti attribuibili al pompaggio di cantiere. I livelli di falda superficiale presentano infatti una forte correlazione con le precipitazioni mensili (figura 9) e, pertanto, i momentanei abbassamenti misurati in alcune estati (in particolare 2007, 2009, 2011 e 2012) sono dovuti alla siccità. L'unico impatto delle attività di cantiere sull'acquifero superficiale è l'isolamento dal mare di una porzione alle spalle del diaframma plastico della *tura*, come dimostrato dalla scomparsa delle oscillazioni mareali nei due piezometri più prossimi al cantiere (PS03 e PS04).

In fase *post operam*, al termine dell'attività di pompaggio è stata misurata una rapida risalita iniziale del livello della falda profonda. Il recupero dei livelli di falda si è protratto per alcuni mesi fino al raggiungimento dei valori piezometrici misurati in fase *ante operam*, confermando la reversibilità dell'impatto di questa attività di cantiere. Nell'acquifero superficiale non sono state osservate variazioni di carico idraulico durante

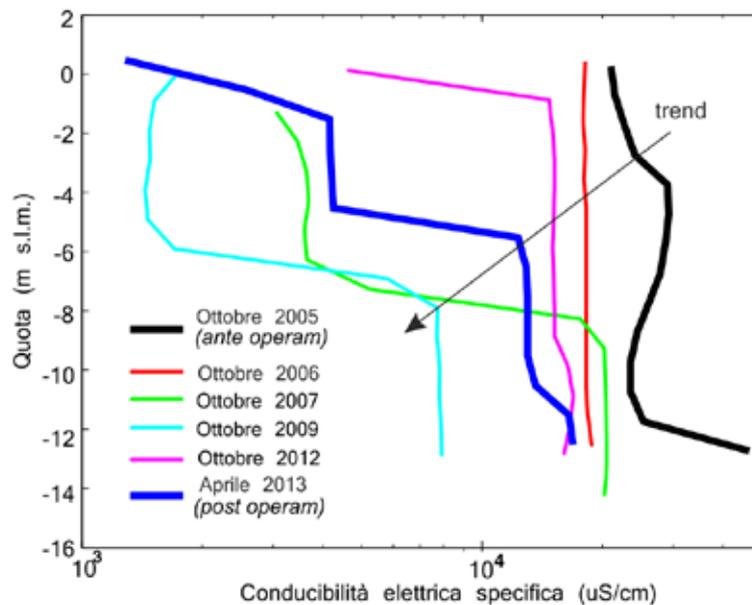


9. Confronto tra precipitazioni piovose e livelli medi mensili della falda superficiale. Adattata da Casasso *et al.* (2014).



10. Esempio di andamento della conducibilità elettrica dell'acqua di falda nel piezometro PS06, nell'anno di monitoraggio maggio 2012-aprile 2013. Da Casasso *et al.* (2014), modificato.

11. Variazione dei profili di conducibilità elettrica nel piezometro superficiale PS04, che evidenziano un trend di riduzione di questo parametro.



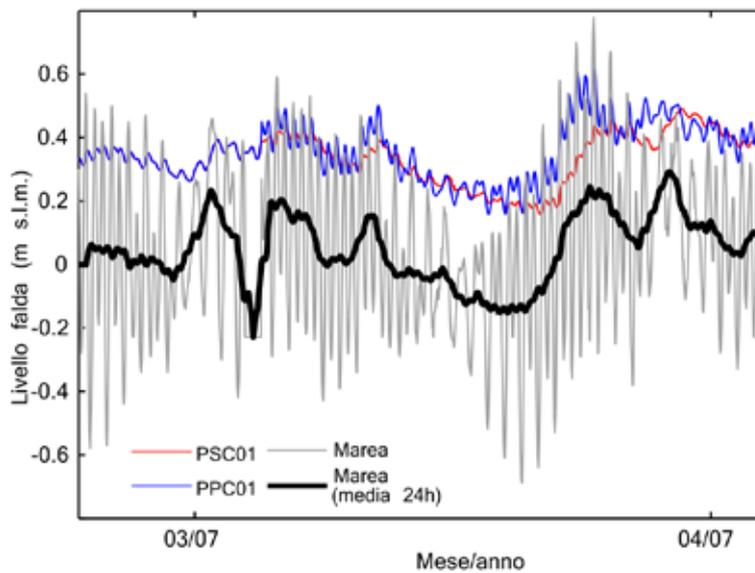
la risalita nell’acquifero profondo mentre, come evidenziato anche in figura 9, i livelli di falda superficiale restano strettamente correlati alle precipitazioni piovose. Per quanto riguarda la caratterizzazione della salinità nei due acquiferi, nell’acquifero superficiale si osserva un incremento durante l’estate: la forte evapotraspirazione e la conseguente riduzione del livello di falda, infatti, causano uno spostamento dell’acqua salata dalla linea di costa verso l’entroterra. Tale fenomeno, detto “intrusione salina”, è legato a una modifica degli equilibri di galleggiamento della lente di acqua dolce posta al di sopra dell’acqua salata proveniente dal mare (Bear, 1999). Le intense precipitazioni che generalmente si verificano al termine dell’estate ristabiliscono la situazione iniziale, come è possibile osservare nel grafico in figura 10. Il confronto tra profili acquisiti nello stesso mese (figura 11) permette di individuare una progressiva riduzione della salinità dell’acqua in alcuni piezometri posti a ridosso del diaframma impermeabile della *tura* (piezometri PS03, PS04). L’andamento osservato è attribuibile all’effetto di isolamento idraulico e alla conseguente interruzione dell’apporto di acqua salata dal mare, come è dimostrato anche dalla scomparsa delle oscillazioni di livello indotte dalla marea.

### Cantiere di Ca’ Roman (Chioggia)

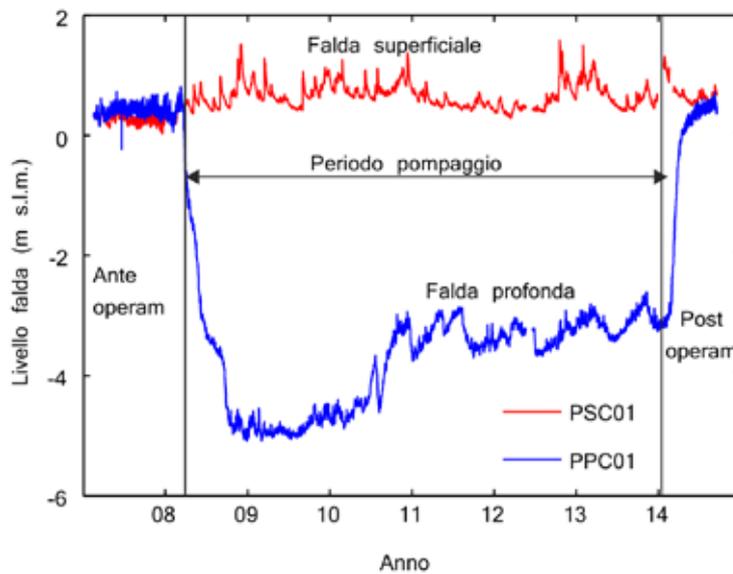
Nel sito di Ca’ Roman si osservano dinamiche dei livelli di falda simili a quelle registrate nel sito di Punta Sabbioni.

Nel periodo *ante operam*, per entrambi gli acquiferi monitorati si osserva un andamento dei carichi idraulici strettamente correlato al livello del mare, come dimostrato dalle oscillazioni in fase con le maree (figura 12). A partire dal mese di gennaio 2008, l’installazione del diaframma plastico della *tura* di Ca’ Roman ha però determinato l’isolamento idraulico di una porzione dell’acquifero superficiale prospiciente al cantiere, come evidenziato dalla scomparsa delle oscillazioni di livello nel piezometro superficiale PSC01 (MAG.ACQUE-CORILA, 2008) e dalla progressiva riduzione della conducibilità elettrica specifica (e quindi, della salinità) dell’acqua di falda superficiale (figura 13).

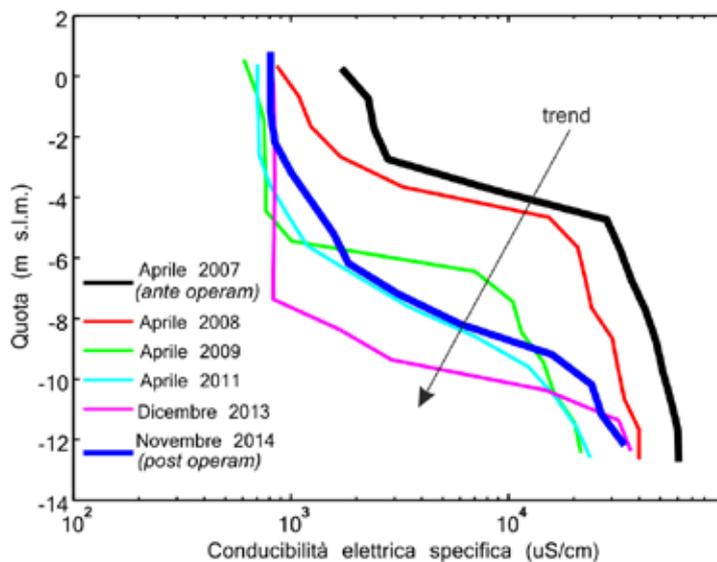
Il pompaggio di *dewatering* è stato effettuato in modo continuo da aprile 2008 a marzo 2014, con l’obiettivo di mantenere il carico idraulico interno alla *tura* a un valore di -12 m s.l.m., inferiore alla quota di fondo bacino (-11 m s.l.m.). Lo svuotamento del-



12. Andamento dei livelli di falda superficiale (PSC01) e profonda (PPC01) nel sito di Ca' Roman, registrati nella fase *ante operam* (febbraio-marzo 2007) e confrontati con il livello del mare registrato dal mareografo "Diga Sud Lido" (ICPSM, 2014).



14. Andamento dei livelli di falda a ridosso del cantiere di Ca' Roman. In rosso è indicato l'andamento dei livelli di falda superficiale (PSC01), in blu quelli della falda profonda (PPC01).



13. Variazione dei profili di conducibilità elettrica nel piezometro superficiale PSC01, che evidenziano un trend di riduzione di questo parametro.

la tura è stato completato a luglio 2008 e, come nel sito di Punta Sabbioni, la portata emunta è stata gradualmente ridotta da 4000 m<sup>3</sup>/d a 3500 m<sup>3</sup>/d (agosto 2009). Il drenaggio ha inizialmente determinato un abbassamento del carico idraulico in falda profonda, che nel piezometro PPC01 è stato pari a circa 6 m. Nel mese di febbraio 2010, grazie alla realizzazione di una ulteriore barriera idraulica con la tecnica del *jet grouting*, è stato possibile ridurre la portata a 2100 m<sup>3</sup>/d. L'effetto combinato di questi due interventi ha portato a una sensibile riduzione dell'abbassamento registrato nel piezometro PPC01, da 6 m a circa 3 m. Dal mese di ottobre 2011 fino al termine del pompaggio, avvenuto nel marzo 2014, è stato necessario abbassare di 1 m la soglia di livello interno alla tura (da -12 m s.l.m. a -13 m s.l.m.) e, per questo motivo, la portata di emungimento è stata incrementata a 3600 m<sup>3</sup>/d. Tale incremento di portata ha determinato un maggiore abbassamento del carico idraulico in PPC01, pari a 4 m circa. Al termine del pompaggio (marzo 2014), sono state recuperate le condizioni *ante operam* della falda profonda, confermando la reversibilità dell'impatto di questa attività di cantiere.

## Conclusioni

La costruzione dei cassoni di alloggiamento delle barriere mobili alle bocche lagunari di Lido (Punta Sabbioni) e Chioggia (Ca' Roman) è stata effettuata in due bacini di fabbricazione, detti *ture*, precedentemente occupati dal mare. L'accessibilità di tali aree è stata resa possibile da sistemi di *dewatering*, per i quali è stato effettuato il monitoraggio dell'impatto sugli acquiferi presenti sulla terraferma.

Il monitoraggio in fase *ante operam* ha permesso di identificare le dinamiche naturali dei carichi idraulici nei due acquiferi, che presentano caratteristiche simili nei due siti monitorati. Nell'acquifero superficiale si distinguono due dinamiche differenti: lungo la linea di costa, si verificano oscillazioni di livello indotte dalla marea, con ampiezza via via più ridotta allontanandosi dal mare; nell'entroterra, le forzanti principali sono le precipitazioni, che provocano repentini innalzamenti di livello, e l'evapotraspirazione, che provoca un graduale abbassamento di livello. Nell'acquifero profondo, il carico idraulico è strettamente correlato con l'andamento medio giornaliero del livello del mare. Nei piezometri più prossimi alla linea di costa (PP01÷PP04 a Punta Sabbioni; PPC01 a Ca' Roman) si osservano deboli oscillazioni di livello indotte dalle maree.

Dall'osservazione delle dinamiche piezometriche in fase *ante operam* sono state stabilite le soglie Soglie di alto Alto e basso Basso livello Livello piezometrico, che permettono di identificare un possibile impatto delle attività di cantiere. A seguito del superamento di queste Soglie, sono stati effettuati approfondimenti per individuarne la cause e, in caso di superamento della soglia riconducibile alle attività di cantiere, è stato inviato il Rapporto di Anomalia ed è stata attivata una procedura di confronto con la Direzione Lavori per implementare azioni di mitigazione dell'impatto. Nell'acquifero superficiale sono stati osservati alcuni superamenti delle soglie Soglie di alto Alto Livello, dovuti alla formazione di pozze d'acqua in seguito a precipitazioni intense, e di Basso Livello, che si sono verificati nelle stagioni estive più siccitose (anni 2007, 2009, 2011 e 2012). Nell'acquifero profondo, il *dewatering* ha provocato un abbassamento del carico idraulico che ha interessato il solo acquifero profondo. Gli abbassamenti massimi sono di 4÷6 m e sono stati osservati nelle postazioni più prossime ai due bacini drenati (PP04 a Punta Sabbioni, PPC01 a Ca' Roman). In questo caso è stata attivata la procedura di confronto con la Direzione Lavori, che ha portato all'implementazione di azioni di mitigazione: in entrambi i siti, infatti, è stata progressivamente ridotta la portata emunta e, nel sito di Ca' Roman, è stata installata una barriera idraulica aggiuntiva con la tecnica del *jet grou-*

*ting*. In seguito all'interruzione del pompaggio, si è verificata la risalita dei carichi idraulici della falda profonda, con completo ripristino della situazione *ante operam*.

Dall'analisi dei profili di conducibilità elettrica specifica dell'acqua di falda si osserva una marcata variazione stagionale nell'acquifero superficiale, con fenomeni di intrusione salina nel periodo estivo, quando i livelli di falda superficiale sono più bassi a causa dell'evapotraspirazione e delle scarse precipitazioni. L'escavazione dei diaframmi plastici nelle due *tute* ha isolato idraulicamente dal mare una parte dell'acquifero superficiale (piezometri PS03-PS04 a Punta Sabbioni; PSC01 a Ca' Roman), come è stato evidenziato sia dalla variazione delle dinamiche piezometriche, con la scomparsa delle oscillazioni indotte dalla marea, sia dall'analisi dei profili di conducibilità elettrica, dai quali è stata dedotta una riduzione della salinità dell'acqua di falda. Non si sono osservati invece incrementi permanenti della salinità, né nell'acquifero superficiale, né nell'acquifero profondo.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano gli ingg. Silvia Delforno, Chiara Santi e Tommaso Baldarelli, che hanno lavorato al programma di monitoraggio nelle sue prime fasi (2006-2008). Si ringrazia inoltre il gruppo di Topografia del DIATI-Politecnico di Torino (proff. Marco Piras e Andrea Lingua, ing. Fabio Giulio Tonolo) per il rilievo topografico della rete piezometrica effettuato nel 2005, e i geol. Francesco Benincasa ed Enrico Fagarazzi per il rilievo topografico svolto nel 2008.

## Bibliografia

- ARPA Veneto (2014) Dati climatici Regione Veneto. Teolo (PD), 15 novembre 2014.
- Bear J (1999) Seawater intrusion in coastal aquifers : concepts, methods, and practices. Kluwer Academic, Dordrecht; Boston.
- Casasso A., Molfetta A., Sethi R. (2014) Groundwater monitoring at a building site of the tidal flood protection system “MOSE” in the Lagoon of Venice, Italy. *Environmental Earth Sciences*, 73, 2397-2408.
- Casasso A., Sethi R., Di Molfetta A. (2011) Monitoring plan of MOSE building sites (Venezia): the hydrogeologic situation around the building sites. In: Scientific research and safeguarding of Venice-Volume VII 2007-2010 results. CORILA, Venezia. pp. 217-225.
- CNR (1999) Controllo di eventuali danni ambientali determinati dagli emungimenti praticati nelle aree di Cavallino, Treporti, Punta Sabbioni e Isola di Sant’Erasmus. Venezia.
- Consorzio Venezia Nuova (2010) Sistema MOSE per la difesa dalle acque alte. Avanzamento lavori (febbraio 2010). Quaderni Trimestrali del Consorzio Venezia Nuova, 1-10, 41-65.
- Da Lio C., Tosi L., Zambon G., Vianello A., Baldin G., Lorenzetti G., Manfè G., Teatini P. (2013) Long-term groundwater dynamics in the coastal confined aquifers of Venice (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 135, 248-259.
- ICPSM (2014) Istituzione Centro Previsioni e Segnalazioni Maree (ICPSM)-Dati stazioni di rilevamento. Venezia.
- Magistrato alle Acque di Venezia (ora Provveditorato Interregionale alle OO. PP. del Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia)-CORILA (2005a) Studi B.6.72 B/1. Attività di rilevamento per il monitoraggio degli effetti prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari. Macroattività: Livelli di falda. Rapporto di caratterizzazione *ante operam*. Prodotto dal Concessionario, Consorzio Venezia Nuova.
- Magistrato alle Acque di Venezia (ora Provveditorato Interregionale alle OO. PP. del Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia)-CORILA (2005b) Studi B.6.72 B/1. Attività di rilevamento per il monitoraggio degli effetti prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari. Macroattività: Livelli di falda. Rapporto di Pianificazione Operativa. Prodotto dal Concessionario, Consorzio Venezia Nuova.
- Magistrato alle Acque di Venezia (ora Provveditorato Interregionale alle OO. PP. del Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia)-CORILA (anni 2007-2013) Studi B.6.72 B/1-B/8. Attività di rilevamento per il monitoraggio degli effetti prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari. Macroattività: Livelli di falda. Rapporti Finali. Prodotto dal Concessionario, Consorzio Venezia Nuova.
- Powers J.P., Corwin A.B., Schmall P.C., Kaeck W.E. (2007) Construction dewatering and groundwater control. New methods and applications. 3rd ed. Wiley, New York.
- Provveditorato Interregionale alle OO. PP. del Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia (ex Magistrato alle Acque di Venezia)-CORILA (anni 2014-2015) Studi B.6.72 B/9-B/10. Attività di rilevamento per il monitoraggio degli effetti prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari. Macroattività: Livelli di falda. Rapporti Finali. Prodotto dal Concessionario, Consorzio Venezia Nuova.

## Summary

The lodging caissons of the MOSE mobile barriers installed at the lagoon inlets of Lido (Punta Sabbioni) and Chioggia (Ca' Roman) were built in two provisional basins (*tura*). Such basins were previously occupied by the sea, and their accessibility was therefore achieved through dewatering pumping by draining pumps and wells. These systems kept water levels below the bottom of the *tura* during the construction works.

In order to assess the impact of the dewatering pumping on the shallow aquifers in the mainland, a monitoring program was conducted from October 2005 to November 2014. Two groundwater monitoring networks were installed in Punta Sabbioni and Ca' Roman, composed respectively of 25 and 2 monitoring wells. Each well was equipped with a water pressure logger to measure hydraulic heads in the unconfined (shallow) aquifer and in the underlying confined (deep) aquifer. Vertical profiles of the specific Electrical Conductivity (EC) of groundwater were also measured to get insights on the evolution of groundwater salinity.

Natural (rainfall, evapotranspiration, tides) and anthropic (underground constructions, dewatering pumping) driving forces were assessed to explain the trends of hydraulic heads and groundwater EC. The dewatering pumping induced a temporary drawdown in the deep aquifer, with a maximum of about 6 m close to the building site. As the construction works were completed, the dewatering pumping was therefore stopped and the hydraulic head in the deep aquifer recovered to the pristine conditions (*ante operam*) in some months. No hydraulic impact was observed on the shallow aquifer, due to the presence of a thick aquiclude. The EC monitoring revealed that the construction works did not induce any permanent increment of groundwater salinity. On the contrary, a portion of the shallow aquifer close to the coastline showed a progressive decrement of groundwater salinity, due to the hydraulic isolation effect of the *tura*.