

# Evolución de la geometría de la interfase agua dulce-agua de mar en un acuífero costero sometido a un intenso bombeo de agua de mar

*Evolution of the geometry of the freshwater-seawater interface in a coastal aquifer affected by an intense pumping of seawater*

Sara Jorroto, Fernando Sola, Ángela Vallejos, Francisco Sánchez-Martos, Juan Gisbert, Luis Molina, Juan Pedro Rigol y Antonio Pulido-Bosch

G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental. C/ Sacramento s/n. Universidad de Almería. 04120-Almería.  
sjorroto@ual.es, fesola@ual.es, avallejo@ual.es, fmartos@ual.es, jgisbert@ual.es, lmolina@ual.es, jprigol@ual.es, apulido@ual.es

## ABSTRACT

The evolution of the geometry of freshwater-seawater interface in the coastal detrital aquifer of Andarax river delta (Almería) has been studied. There, 19 boreholes for abstracting seawater below the interface are supplying a desalination plant. Before starting the pumping, the interface showed a typical geometry for these conditions, although once the pumping started the geometry changed remarkably provoking a generalized refreshing upstream of these boreholes. These results confirm the validity of the seawater abstractions in coastal aquifers as barriers to avoid marine intrusion.

**Key-words:** Marine intrusion, desalination plant, negative hydraulic barrier.

## RESUMEN

Ha sido estudiada la evolución de la geometría de la interfase agua dulce-agua de mar en el acuífero detrítico costero del delta del río Andarax (Almería). En éste, 19 sondeos de extracción de agua de mar por debajo de la interfase abastecen a una planta desaladora. Antes de comenzar los bombeos, la interfase presentaba una geometría característica de este tipo de ambiente, si bien una vez comenzado el bombeo la geometría cambió notablemente produciéndose una dulcificación generalizada aguas arriba de estos sondeos. Estos resultados evidencian la validez de las captaciones de agua de mar en acuíferos costeros como barreras para evitar la intrusión marina.

**Palabras clave:** Intrusión marina, planta desaladora, barrera hidráulica negativa.

Geogaceta, 62 (2017), 87-90  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 1 de febrero de 2017  
Revisión: 15 de marzo de 2017  
Aceptación: 26 de abril 2017

## Introducción

En un acuífero costero que presente una buena conexión con el mar, la geometría de la interfase entre el agua dulce que fluye desde el continente, y la cuña de agua de mar que se introduce en el acuífero bajo ésta debido a su mayor densidad, viene gobernada por la ecuación de Ghyben-Herzberg. Según esta ecuación, la interfase se adentrará en el acuífero desde la línea de costa hacia cotas cada vez más negativas, como consecuencia del incremento del espesor de la franja de agua dulce que se dispone sobre ella. De esta forma, la sumatoria de los pesos de columna de agua en distin-

tos puntos del perfil acuífero debería ser constante (Fig. 1). En teoría, la interfase debería ser una superficie que separase dos fases acuosas de distinta salinidad, si bien en la práctica, ésta puede tener un espesor variable, pudiéndose producir una gradación vertical de la salinidad en el acuífero sin que se reconozca una zona claramente diferenciada. Las causas que provocan esta variación en el espesor de la zona de mezcla serían la heterogeneidad del acuífero, su grado de confinamiento, así como procesos convectivos y dispersivos de las sales en disolución (Oz *et al.*, 2015).

Este sistema natural de flujo puede ser modificado como consecuencia de los bom-

beos. El conoide de depresión piezométrica que produce la extracción de agua dulce provoca que bajo él se genere un domo de agua

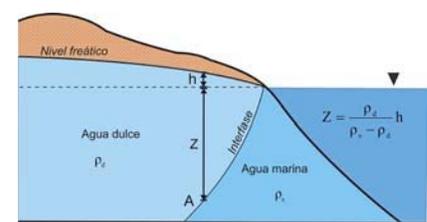


Fig. 1.- Simplificación del contacto agua dulce-agua salada ( $\rho_f$ : densidad del agua dulce;  $\rho_s$ : densidad del agua marina). Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Simplification of freshwater-saltwater contact ( $\rho_f$ : freshwater density;  $\rho_s$ : saltwater density). See color figure in the web.

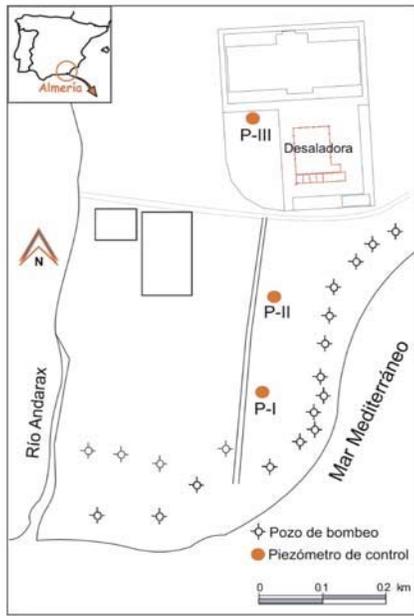


Fig. 2.- Localización de los sondeos de bombeo y enjambres de piezómetros en el área de estudio. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Location of the pumping boreholes and cluster of piezometers in the study area. See color figure in the web.

más salina (*upconing*) para compensar el déficit de peso hidrostático generado por el bombeo. La consecuencia final de estas extracciones será el favorecimiento de la entrada de agua de mar en el acuífero o intrusión marina.

Menos conocidas son las consecuencias que se generarían sobre la geometría de la interfase si lo que se extrae del acuífero es agua de mar. Dada su alta salinidad, y en general poco valor económico de estas aguas, son pocos los ejemplos descritos en los que se bombeen grandes caudales de agua marina en un acuífero costero, estando la mayor parte de éstos vinculados al abastecimiento de plantas desaladoras (Jorreto *et al.*, 2009; Sola *et al.*, 2013; Sola *et al.*, 2014; Stein *et al.*, 2016). En teoría, una manera de evitar la intrusión marina sería creando barreras hidráulicas negativas, que consistirían en extraer mediante bombeo agua de mar en un acuífero costero, limitando la penetración de agua salada al acuífero, por lo que el agua dulce se acumularía aguas arriba de la barrera (Pool y Carrera, 2010).

En este trabajo se estudia la evolución que ha sufrido la zona de mezcla agua dulce-agua de mar a lo largo de un periodo de varios años de extracción de agua salada por parte de la planta desaladora de Almería. Con este estudio vemos qué influencia tiene la perturbación generada por el bombeo cuando lo que se extrae es agua por

debajo de la interfase y la efectividad de estos bombeos como barrera hidráulica negativa frente a la intrusión marina.

### Marco hidrogeológico

El acuífero detrítico del Bajo Andarax se extiende a lo largo de todo el sector central del valle del río Andarax e incluye materiales cuaternarios -aluviales y deltaicos- junto a conglomerados arenoso-limosos fluvio-deltaicos pliocenos (Sánchez Martos, 1997). Los materiales acuíferos en el delta del río Andarax corresponden con formaciones deltaicas,

de clara influencia marina, en continuidad lateral con los materiales aluviales. La base de estos materiales corresponde a limos con intercalaciones de arenas, calcarenitas y conglomerados de edad Plioceno (Aguirre, 1998). El estudio se ha llevado a cabo en la zona apical del delta del río Andarax, Almería. Aquí se sitúa la planta desaladora de Almería, la cual se abastece de agua de mar del acuífero mediante una batería de 19 sondeos con profundidades entre 78 y 154 m, situados entre 30 y 150 m de la línea de costa. Los sondeos se distribuyen paralelos a esta línea de costa, en la margen izquierda del delta (Fig. 2). La

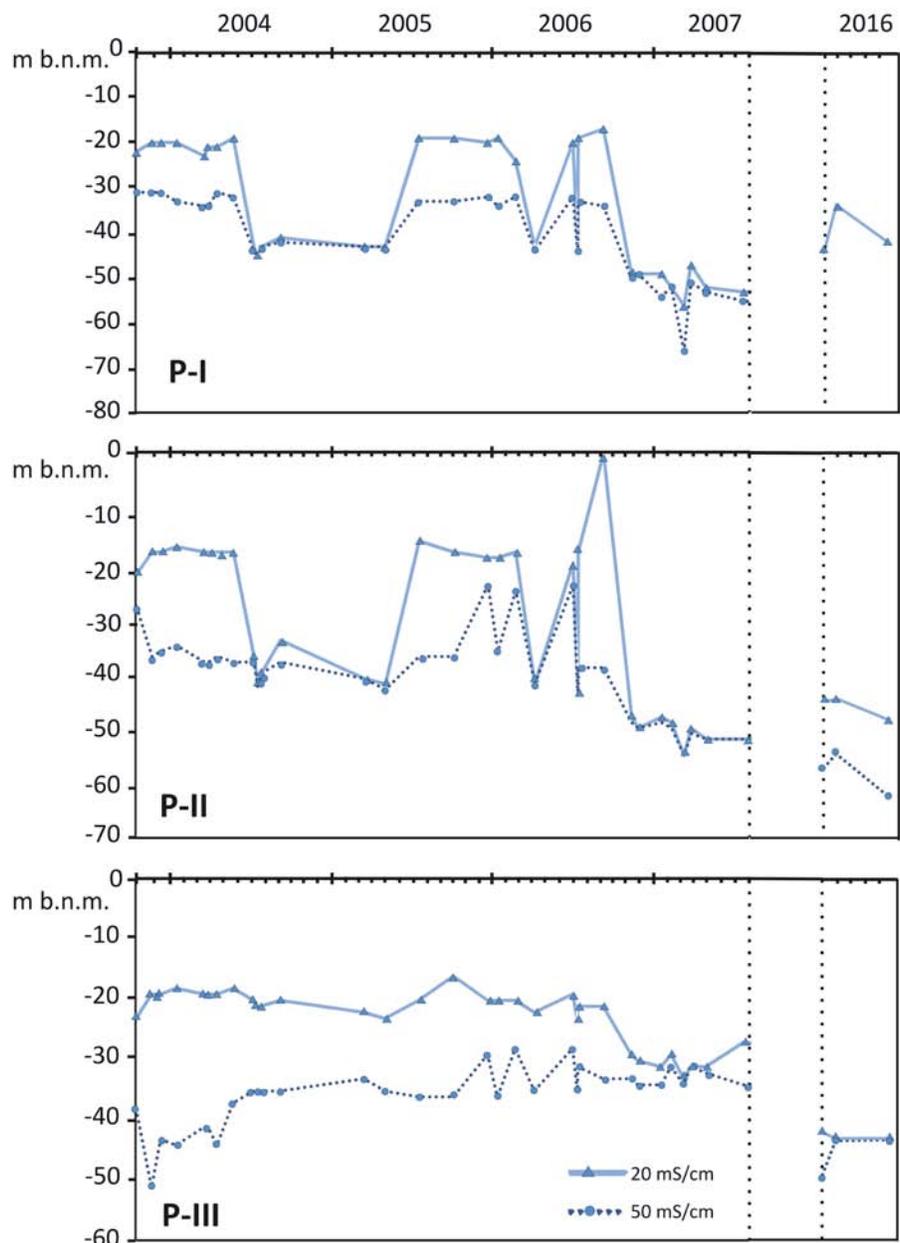


Fig. 3.- Evolución del espesor de la interfase agua dulce-salada durante el periodo de estudio en los tres piezómetros de control (m b.n.m.: metros bajo el nivel del mar). Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Evolution of the freshwater-salt interface thickness for the study period in the three piezometers of control (m b.n.m.: meters below sea level). See color figure in the web.

red específica de control consta de tres grupos de piezómetros, contruidos de manera semejante a los sondeos de captación (Sánchez Martos *et al.*, 2002); la diferencia constructiva más importante reside en el diámetro de la entubación (165 mm con ranura de 1 mm). La planta entró en funcionamiento en 2004, si bien no fue hasta 2007 cuando comenzó con un régimen de bombeo más regular y constante. Éste consiste en bombear fundamentalmente durante la noche, debido a un menor coste energético, con un caudal de hasta 4000 m<sup>3</sup>/h, cesando los bombeos durante el día. Situados perpendicularmente a la costa, y en la dirección principal del flujo subterráneo, se localizan tres enjambres de piezómetros (P-I a P-III; Fig. 2), con profundidades entre 75 y 105 m, realizados para llevar a cabo el seguimiento espacial y temporal de la evolución hidrodinámica de la cuña salina. La distancia a la costa de cada uno de ellos es 200, 500 y 1000 m, respectivamente.

Los pozos de bombeo y piezómetros atraviesan todo el material acuífero, formado por niveles de gravas, arenas y limos plio-cuaternarios con una potencia total de unos 100 m. La base impermeable la conforman unos limos pliocenos. La transmisividad media de estos materiales oscila entre 2000-12000 m<sup>2</sup>/día.

## Metodología

A lo largo del periodo estudiado (2004 a 2007; 2016) se han realizado 37 testificaciones de conductividad eléctrica (CE) y temperatura del agua en cada uno de los piezómetros. No se han realizado testificaciones desde 2007 a 2016. Los registros se han realizado mediante un equipo de testificación de la marca Geovista (GVLogger) con medidas cada 10 cm de profundidad.

Para definir la geometría de la interfase, se han considerado como aguas pertenecientes a esta interfase, aquellas con salinidades comprendidas entre 20 y 50 mS/cm. Este intervalo comprende como extremos, las aguas con carácter claramente marino y las aguas ligeramente salobres. El valor de salinidad del agua de mar en esta zona del Mediterráneo es aproximadamente 55 mS/cm.

## Resultados

En estado natural (hasta mayo 2004, Fig. 3), antes de comenzar las extracciones por parte de la planta desaladora, la geometría de la zona de mezcla ya sufría ciertas

fluctuaciones, probablemente debidas al efecto de la recarga por lluvias así como a la acción de pequeños bombeos de agua dulce para el riego de invernaderos de la zona. En este momento la interfase presentaba un espesor de unos 15 m, y se situaba entre los metros 20 y 35 b.n.m aproximadamente, justo detrás de la batería de sondeos (piezómetro P-I). Por su parte, aguas arriba, en el piezómetro P-III, ésta era más ancha, y se encontraba entre los metros 22 y 48 (Fig. 3). Con el inicio del bombeo por parte de la planta desaladora, entre Julio de 2004 y Mayo de 2005, esta geometría inicial se transformó radicalmente. La interfase se adelgaza hasta presentar un espesor de 1 a 2 metros, y se profundiza, hasta los 45 m en P-I y P-II. Por su parte, en P-III, la reducción de espesor es menos pronunciada, manteniendo un espesor de unos 10 m.

Entre Julio de 2005 y Septiembre de 2006, hay un periodo sin bombeo, o un bombeo con bajo caudal. Esto supuso que la interfase recuperase aproximadamente su geometría inicial, a excepción de en P-III, donde mantuvo un espesor de unos 10 m. A partir de septiembre de 2006, la planta desaladora ha estado bombeando de una manera continuada hasta la actualidad. Con este régimen de bombeo, de nuevo la interfase descendió notablemente, hasta los 55 m de profundidad, y se hizo muy delgada, tanto en P-I como P-II, alcanzando los 36 m en P-III.

Aunque hay un largo lapso de tiempo en el que no se llevaron a cabo medidas, está claro que la interfase ha continuado descendiendo. Las medidas se han retomado en 2016 y muestran cómo en el piezómetro de control P-I no se llegaron a

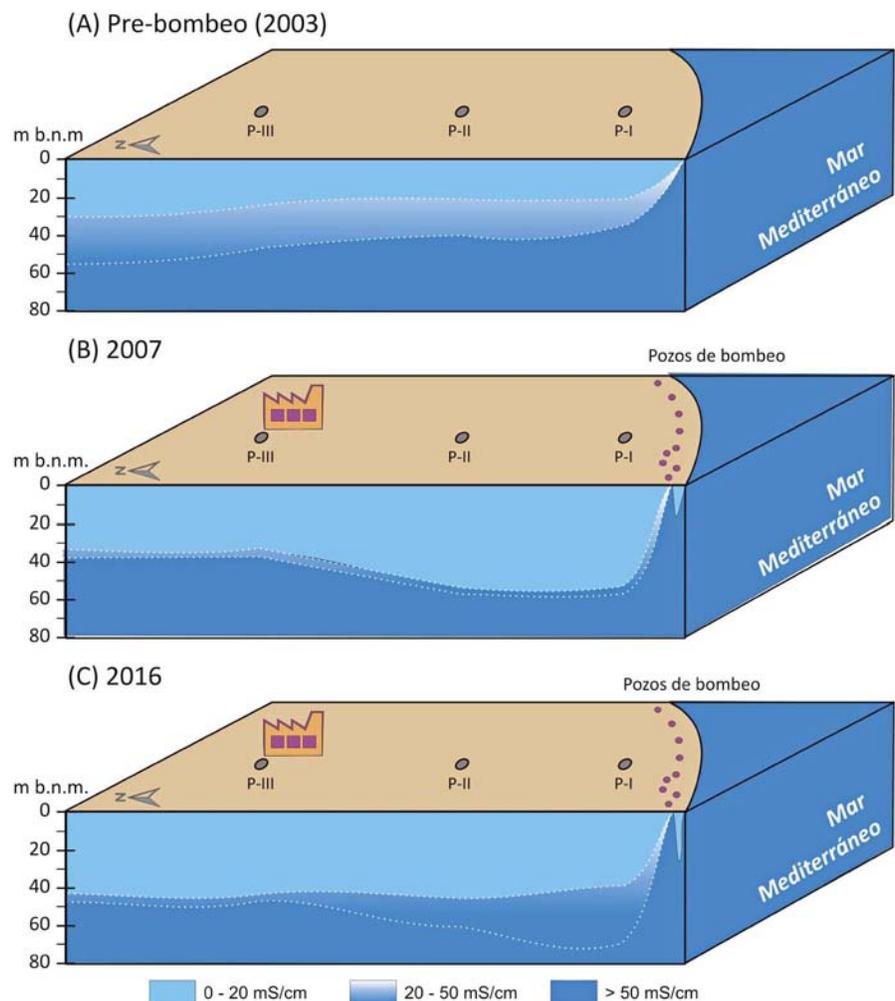


Fig. 4.- Geometría del contacto agua dulce-agua de mar. (A) antes de la puesta en funcionamiento de los sondeos de extracción; (B) situación en 2007; (C) situación en 2016. La localización de la planta desaladora y de los piezómetros de control es indicada en el esquema. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- Geometry of the freshwater-seawater contact. (A) before starting groundwater abstraction; (B) situation in 2007; (C) situation in 2016. The location of the desalination plant and the piezometers for groundwater control is indicated in the diagram. See color figure in the web.

alcanzar los 50 mS/cm en los 78 m de registro. En P-II, esa conductividad se alcanza a los 60 m, y en P-III a los 50. Por su parte, la isolínea de 20 mS/cm es cortada a los 25 m en P-I y P-II; y a los 50 m en P-III.

## Discusión

La puesta en marcha de la planta desaladora ha supuesto una importante perturbación en régimen natural de un acuífero costero (Jorreto *et al.*, 2009). La batería de sondeos que extraen agua de mar por debajo de la interfase genera una serie de *upconings* que elevan el agua salina hasta la superficie freática formando así una barrera al flujo natural de agua dulce hasta el mar. Como consecuencia de la formación de esta barrera negativa, aguas adentro de la batería de extracción, se acumula el agua dulce, lo que fuerza a la interfase a descender (Fig. 4).

El descenso y adelgazamiento de la interfase se produce de manera rápida en los piezómetros próximos a la batería de bombeo, mientras que es más paulatino a cierta distancia aguas arriba de ésta. Por el contrario, pasados varios años de la afección por las extracciones, es en zonas más alejadas a los bombeos donde la interfase se convierte en una superficie muy fina, mientras en una zona próxima a los pozos de explotación se vuelve a ensanchar, aunque los valores de salinidad más altos tienden a desaparecer.

Esta tendencia hace prever, que de continuar los bombeos, el descenso de la interfase progresará tierra adentro produciéndose una dulcificación cada vez más acusada del acuífero. Esto supone que, como se ha estipulado de manera teórica, las barreras hidráulicas negativas generadas por extracción de agua de mar son

una herramienta efectiva para luchar contra la intrusión marina y para la mejora de la calidad del agua, aguas arriba de éstas. El mayor inconveniente que presentan es el elevado coste energético que supone mantener bombeando de manera casi ininterrumpida una batería de sondeos, especialmente si el agua bombeada es de escaso valor económico como lo es el agua de mar. Este tipo de agua sólo tendría un uso rentable si el agua es utilizada para el abastecimiento a una planta desaladora. Así, sería conveniente tener en cuenta a la hora de diseñar y ubicar la planta, que la alimentación de ésta se realice a partir de pozos costeros, ubicados en acuíferos con problemas de intrusión marina, ya que las extracciones de agua de mar a través del acuífero pueden ayudar a controlar la intrusión y mejorar la calidad del agua del acuífero.

## Conclusiones

El bombeo de agua de mar bajo la interfase en un acuífero costero modifica drásticamente la geometría de ésta. Este bombeo genera una barrera hidráulica negativa, provocando una notable mejora de la calidad del agua del acuífero, por lo que ha sido propuesto como un método de control frente a la intrusión marina en acuíferos costeros. De acuerdo con el trabajo aquí presentado, este método es especialmente adecuado en aquellos acuíferos en los que se plantea la instalación de una planta desaladora, ya que el agua extraída por los bombeos podría servir como agua de buena calidad para el abastecimiento a la planta, disminuyendo al mismo tiempo la salinidad del agua, aguas arriba de la pantalla generada por los pozos de abastecimiento a la planta.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente llevada a cabo en el marco de Ceimar y Ceia3 y del proyecto CGL2015-67273-R financiado por MINECO – FEDER. Agradecemos los comentarios y correcciones realizadas por los revisores anónimos.

## Referencias

- Aguirre, J. (1998). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 11 (3-4), 297-315.
- Jorreto, S., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J., Sánchez-Martos, F. y Francés, I. (2009). *Comptes Rendus – Geoscience* 341, 993-1002.
- Oz, I, Shalev, E., Yechieli, Y. y Gvirtzman, H. (2015). *Journal of Hydrology* 530: 734–741.
- Pool, M. y Carrera, J. (2010). *Hydrogeology Journal* 18, 95-105.
- Sánchez Martos, F. (1997). *Estudio hidrogeológico del Bajo Andarax (Almería)*. Tesis Doctoral. Univ. De Granada. 290 p.
- Sánchez Martos, F., Pulido-Bosch, A., Pulido-Leboeuf, P., Vallejos, A. y Gisbert, J. (2002). En: *Acuíferos costeros y Desaladoras* (Pulido Bosch, A., Vallejos, A. y Pulido Leboeuf, P. Eds.) CAS, Almería, 169-184.
- Sola, F., Vallejos, A., Moreno, L., López-Geta, J.A. y Pulido-Bosch, A. (2013). *International Journal of Environmental Science and Technology* 10, 63-76.
- Sola, F., Vallejos, A., Daniele, L. y Pulido-Bosch, A. (2014). *Quaternary Research* 82, 121-131.
- Stein, S., Russak, A., Sivan, O., Yechieli, Y., Rahav, E., Oren, Y. y Kasher, R. (2016). *Environmental Science and Technology* 50, 1955-1963.