

Las diagrfías y la caracterización de la influencia de los bombeos de agua de mar sobre el acuífero del delta del Andarax (Almería)

Jorroto Zaguirre, S.; Pulido-Bosch, A.; Gisbert Gallego, J. y Sánchez Martos, F.

Dpto. de Hidrogeología y Química Analítica. Universidad de Almería 04120.
E-mails: sjorroto@ual.es; apulido@ual.es; jgisbert@ual.es; fmartos@ual.es

RESUMEN

En la ciudad de Almería se ha construido una planta desaladora en la que la captación del agua de mar se realiza mediante sondeos. Ante la explotación tan intensa que se tiene prevista se han construido tres grupos de piezómetros en las proximidades de los sondeos de abastecimiento, con objeto de analizar la evolución espacial y temporal del contacto agua dulce-agua salada en el entorno de la explotación y la influencia de la misma sobre el propio acuífero. Sobre este conjunto de piezómetros se han realizado una serie de registros detallados de temperatura, conductividad y flujo subterráneo en todos los sondeos de observación. El registro conjunto de estos parámetros ha permitido localizar con exactitud la posición de la interfase de agua dulce-agua salada en un estado no influenciado previo a las extracciones. La precisión del equipo de testificación utilizado ha hecho posible detectar notables cambios estacionales en los valores de temperatura y conductividad que no habían sido observados anteriormente con otras técnicas de seguimiento utilizadas. Estos datos han contribuido a analizar e interpretar algunas anomalías detectadas en el área costera del acuífero que están directamente relacionadas con una dinámica estacional.

Palabras clave: acuífero costero, desaladora, testificación geofísica, temperatura, conductividad.

INTRODUCCIÓN

El agua desalada es uno de los recursos hídricos no convencionales que más auge está tomando en los últimos tiempos en zonas áridas y semiáridas, sobre todo en los litorales de las provincias de Almería, Murcia y Alicante, en los que existe un clima mediterráneo, cálido y seco (Rodríguez Estrella *et al.*, 2003). La desaladora de Almería surge como respuesta a esta problemática para garantizar el abastecimiento a la ciudad y, posiblemente, a la comarca del Bajo Andarax. La planta, construida en la margen izquierda del río Andarax, está diseñada para satisfacer una demanda continua de agua de algo más de 1100 L/s, obtenida mediante bombeo de agua de mar por debajo de la interfase agua dulce-agua salada y en la zona deltaica del acuífero detrítico del Bajo Andarax. Por regla general, se trata de captar materiales acuíferos conectados con el mar y especialmente los de porosidad intergranular, dado que filtrarán mejor

el agua captada. En este caso, la elección del lugar venía condicionada por la construcción de la propia planta (Pulido Bosch *et al.*, 2002). El agua de mar será bombeada por 15 sondeos construidos en el delta y muy cercanos a la línea de costa. Además de estos sondeos, se instalaron tres grupos de piezómetros con objeto de poder controlar algunos parámetros del acuífero en el entorno de la explotación y la influencia de la misma sobre el propio acuífero.

LOCALIZACIÓN Y ANTECEDENTES

La cuenca del río Andarax tiene una extensión total de 2188 km² y se encuentra bordeada por las sierras Nevada y Filabres al Norte, de Gádor al Oeste y Sur, y Alhamilla al Este (Figura 1). Es una de las más áridas de España con precipitaciones anuales que varían entre 400 mm y 200 mm dependiendo si se trata del curso alto, medio o bajo del río y con temperatura media en los meses fríos no inferior a 12° C y una media de 2800 a 3000 horas anuales de sol, lo que da lugar a una elevada evapotranspiración.

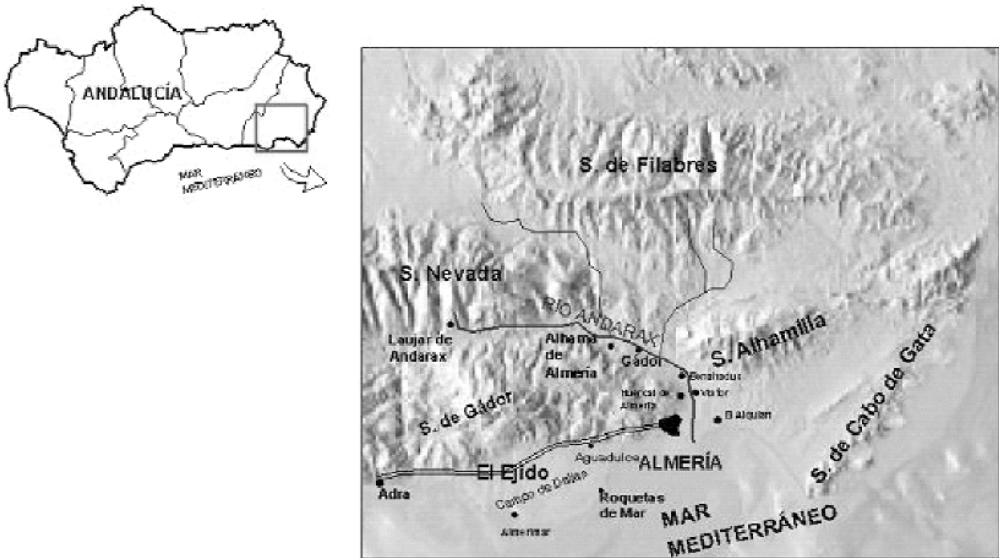


Figura 1. Localización del río Andarax y su cuenca

La desaladora de Almería y los sondeos que la abastecerán se encuentran en el delta del Andarax, concretamente en su margen izquierda, en el Bajo Andarax (Foto 1). De este sector no había mucha información disponible, aunque sí sobre la cuenca del río Andarax (Pulido Bosch *et al.*, 1992; Sánchez Martos, 1997), en donde el Grupo de Investigación "Recursos Hídricos y Geología Ambiental" llevaba varios años trabajando (Sánchez Martos *et al.*, 1999), así como otros organismos de la Administración (Carrasco y Martín, 1988). Con anterioridad a la construcción de los sondeos, fueron estudiados a fondo los aspectos estratigráficos, sedimentológicos, tectónicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos de manera amplia (Pulido Bosch *et al.*, 2002).



Foto 1. Vista aérea del delta: área de estudio y planta desaladora

Tanto los sondeos como los piezómetros fueron construidos sobre el delta, todos ellos situados entre 30 y 150 m de la orilla del mar y con una separación entre ellos no inferior a 50 m (Figura 2). Se construyeron un total de 19 sondeos aunque, 4 de ellos fueron reutilizados como piezómetros dado el escaso caudal obtenido en las pruebas de bombeo que siguieron a su construcción. Está previsto que los 15 sondeos restantes bombeen 24 horas al día, 360 días al año para satisfacer una demanda continua de unos 600 L/s.

Cuando se trata de captar grandes volúmenes de agua de mar en un acuífero costero, es muy conveniente disponer de un dispositivo de control y seguimiento de los parámetros de la formación acuífera (Pulido Bosch *et al.*, 2002). De ahí la construcción de 3 enjambres de piezómetros, P-I, P-II y P-III, de cuatro piezómetros cada uno, situados perpendicularmente a la costa y en la dirección principal del flujo subterráneo, que permitirá llevar a cabo un seguimiento espacial y temporal de la evolución hidrodinámica e hidroquímica de la cuña salina una vez que se ponga en funcionamiento la desaladora.

Desde junio de 2004 se están llevando a cabo las labores previas a la puesta en marcha de la desaladora. Estas labores consisten en pruebas de bombeo realizadas en cada uno de los sondeos destinadas tanto a la limpieza de los mismos como a la extracción del agua necesaria para poner en marcha los siete bastidores de la planta. Para ello es necesario extraer un caudal de al menos 650 m³/hora para cada uno de ellos funcionando durante 5 días. Este caudal se consigue bombeando 3 sondeos al unísono. Cada bastidor se ha probado por separado realizándose sólo una prueba conjunta con dos de ellos. Para esta prueba conjunta se llegó a extraer un caudal máximo de 1400 m³/hora entre 7 sondeos durante 5 días con lo cual, la extracción total de agua no ha llegado en ningún caso a alcanzar la extracción máxima esperada cuando funcionen varios bastidores al mismo tiempo y a pleno rendimiento.

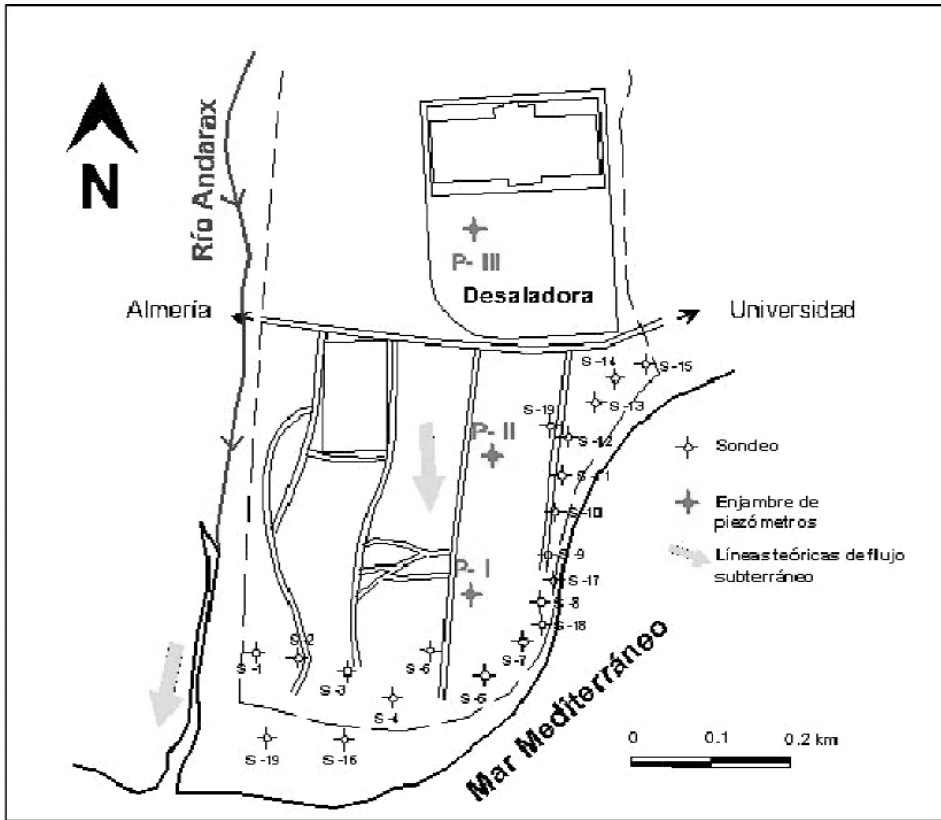


Figura 2. Localización de los 19 sondeos y los 3 enjambres de piezómetros

MÉTODOS

Se ha llevado a cabo la toma de datos periódica desde noviembre de 2003 en los piezómetros de observación y control en el delta utilizando para ello técnicas de testificación geofísica de sondeos. El equipo de testificación geofísica utilizado ha sido el Laboratorio Móvil del Grupo de Investigación "Recursos Hídricos y Geología Ambiental" (Foto 2). Se trata de un equipo de testificación de la marca Geovista que va montado sobre un vehículo todoterreno. Está integrado por un juego de sondas (Foto 3), un cabrestante o torno automático (GV500) con cable de alta resistencia (3/16") de 1500 m de longitud y velocidad regulable hasta un máximo de 38 rpm (Foto 4), un PC portátil, una unidad GVLogger con grabado automático de parámetros y sistemas compatibles de almacenado y procesado de los datos en campo y gabinete y softwares para la captación de los datos (GeoVista Logger 5.4, Foto 5) y el procesado y elaboración avanzada de los mismos en formato LAS (Viewlog 2.3). Las sondas que lo integran son: resistividad normal corta y larga, temperatura y conductividad del agua, caliper, potencial espontáneo, rayos gamma y sonda de inducción, así como videografía en color y giro de 360°.



Foto 2. Equipo de testificación

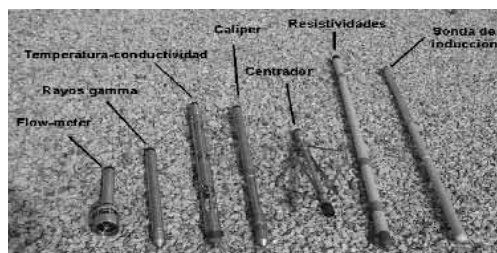


Foto 3. Juego de sondas



Foto 4. GVLogger, PC y cabrestante

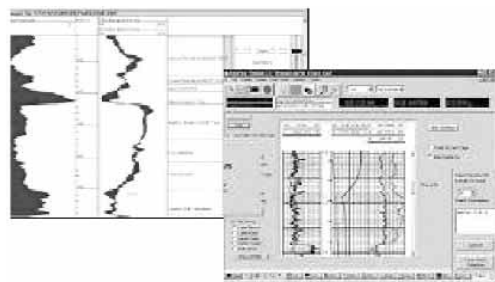


Foto 5. Representación de los datos

Para estudiar la evolución de la interfase agua dulce-agua salada se han realizado registros verticales con la sonda de temperatura-conductividad eléctrica y con la sonda de flujo subterráneo o flowmeter. La sonda de temperatura-conductividad eléctrica dispone de un sensor tipo PT100 y registra la temperatura y la conductividad a intervalos prefijados de 1 cm, 5 cm ó 10 cm, lo que permite obtener resultados de gran precisión. La sonda tiene una longitud total de 1 metro. El rango de conductividad eléctrica oscila entre los 50 y 64000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la resolución es de 0.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la precisión de $\pm 2\%$. El rango de temperatura es de 0-80 $^{\circ}\text{C}$, la resolución es de 0.001 $^{\circ}\text{C}$ y la precisión de ± 0.3 $^{\circ}\text{C}$. El registro de temperatura y conductividad eléctrica deberá hacerse el primero de todos, en caso de querer medir más parámetros, y siempre mientras desciende la sonda para evitar posibles mezclas de aguas de distintas conductividades eléctricas y temperaturas que podrían falsear los resultados. Por ello, estos dos sensores suelen ir acoplados en un mismo dispositivo para realizar estos registros antes de que se produzcan mezclas de aguas. El flowmeter detecta las variaciones de flujo tanto ascendente como descendente dentro del sondeo. Es de gran utilidad a la hora de determinar el funcionamiento del acuífero. Esta sonda está equipada con una hélice que gira en ambos sentidos. Detecta cuándo hay cambios de velocidad en el flujo, asimilables a intercambios de aguas subterráneas entre distintas unidades acuíferas. El registro del flujo subterráneo se puede hacer en la misma pasada que el anterior, ya que las sondas pueden ir acopladas unas con otras. La sonda de flujo subterráneo registra en revoluciones por segundo (rps) en un intervalo de 0-50 rps, tiene una longitud de 0.48 m y una resolución de 0.025 rev.

El estudio de la variación de la conductividad eléctrica en profundidad es uno de los métodos más fiables y utilizados para observar la evolución de la cuña salina en acuíferos costeros. La observación de los

cambios de temperatura permite la identificación de acuíferos, proporcionando una información muy precisa de los puntos o zonas donde hay aportes de aguas de diferentes temperaturas. El registro térmico permite localizar con precisión zonas de afluencia de agua o zonas de pérdida de circulación (Sankar *et al.*, 2000, Fakhry *et al.*, 2004).

El registro de ambos parámetros deberá hacerse mientras desciende la sonda para evitar posibles mezclas de aguas de distintas conductividades eléctricas y temperaturas. Asimismo, estas dos sondas suelen ir acopladas en un mismo dispositivo. El registro del flujo subterráneo se puede hacer en la misma pasada que el anterior, en una configuración de acople de los dispositivos flujo-conductividad-temperatura.

RESULTADOS

Las labores de puesta en marcha de la desaladora se han iniciado con una serie de bombeos discontinuos que comenzaron en noviembre de 2003, iniciándose los registros periódicos con el equipo de testificación geofísica. Estos registros han permitido localizar con precisión la interfase agua dulce-agua salada en unas condiciones naturales del acuífero, es decir, sin estar sometido a la explotación de agua por parte de la desaladora, así como observar la reacción del sistema y el desplazamiento de la interfase cuando se comienzan a bombear distintos caudales de agua salada para abastecer a la planta en las labores de limpieza de la misma. Durante los meses en los cuales la planta permanece parada, se realizan registros verticales de temperatura, conductividad y, en algunos casos, de flujo subterráneo en los piezómetros ranurados P-I, P-II y P-III, con una periodicidad mensual (Figuras 3 y 4).

En el P-I en una situación pseudonatural, el nivel piezométrico se sitúa en 1.5 m s.n.m. En la figura 3 se observa la estabilidad de la interfase cuando el sistema no está sometido a la explotación de la desaladora. En los primeros 15 m, la conductividad eléctrica tiene un valor muy estable en torno a 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Entre 15 y 30 m aumenta gradualmente la conductividad eléctrica hasta 50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (interfase de agua dulce-agua salada), y se mantiene constante hasta el final de la testificación. La temperatura tiende a disminuir en profundidad, coincidiendo el mayor descenso con el tramo de la interfase, y aumentando muy ligeramente a partir de los 40 m. Durante los primeros metros la temperatura del agua está influenciada por la temperatura del propio suelo y se estabiliza a partir de 10 m, en torno a los 21 °C.

Hay que tener en cuenta que estas pequeñas variaciones apenas serían perceptibles con una sonda manual. En el caso de P-I se observa una disminución muy brusca de la conductividad eléctrica entre los 22.7 y 23.8 m de profundidad, que pasa de 37700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de la temperatura, que desciende desde 21.6 °C hasta 20 °C (Figura 3). Además el flujo ascendente, sufre un brusco descenso a esta profundidad (la hélice pasa de girar a 0.4 rps a 0.04 rps). Esto debe tratarse de una entrada de agua subterránea en sentido de flujo descendente en el piezómetro, y a través de un nivel muy localizado. Esta agua es mucho más dulce y algo más fría que en el resto del sondeo.

En los piezómetros P-II y P-III (Figura 4), la tendencia es similar a la descrita en el piezómetro P-I aunque la interfase se localiza ligeramente más profunda a medida que nos alejamos de la costa. La interfase se localiza entre 17 y 38 m de profundidad y, a partir de esta profundidad, se estabiliza la conductividad eléctrica en torno a 50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. También se observa en estos dos piezómetros la anomalía descrita

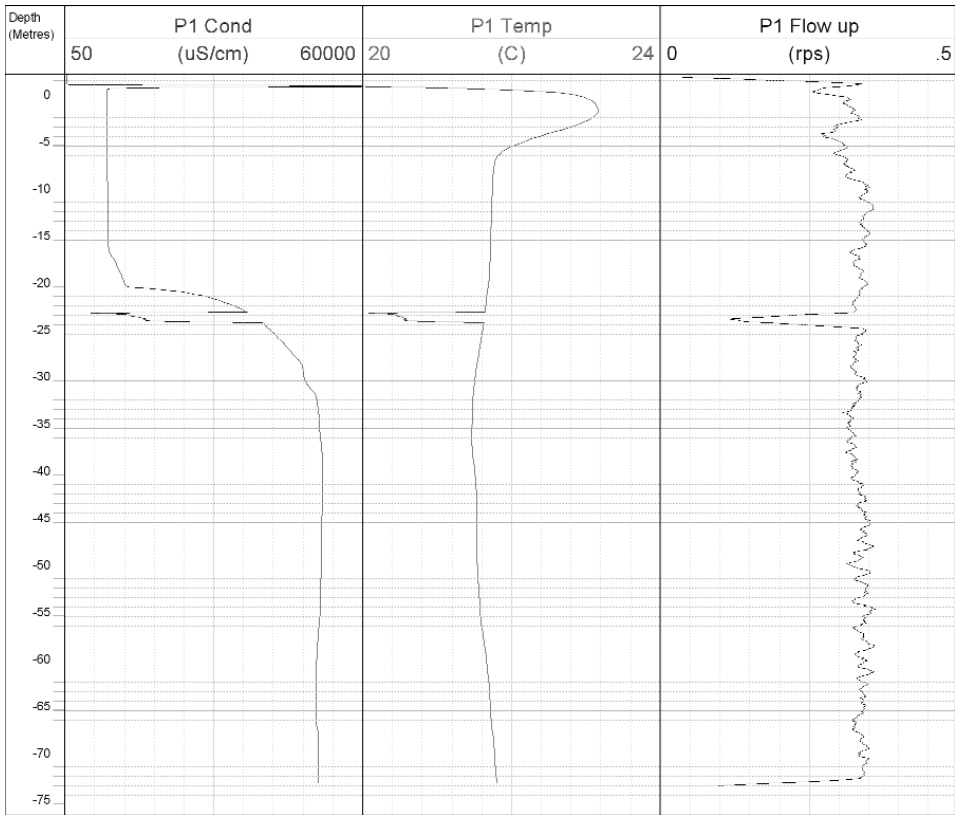


Figura 3. Registros de conductividad, temperatura y flujo ascendente en el piezómetro P-I sin influencia de bombes (noviembre de 2003).

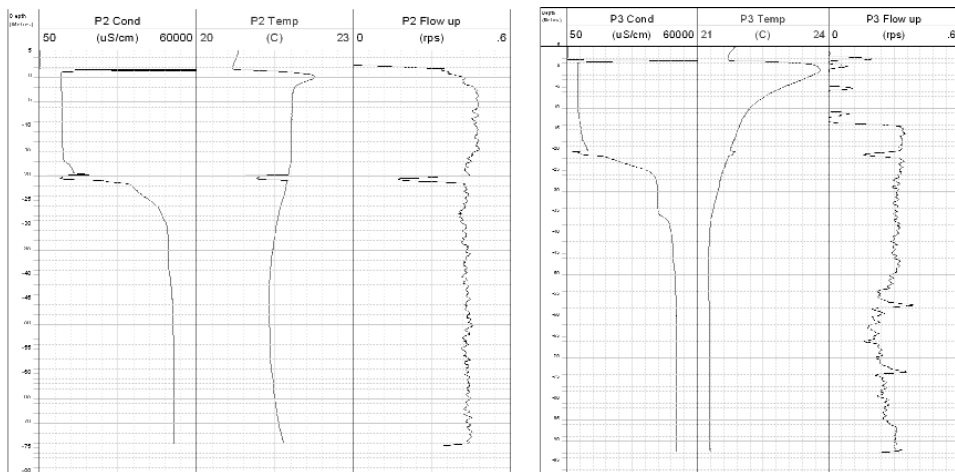


Figura 4. Registros de conductividad, temperatura y flujo subterráneo en los piezómetros P-II y P-III sin influencia de bombes (noviembre de 2003).

anteriormente, aunque a menor profundidad (20 m), encontrando en P-II, al igual que en P-I, un agua más dulce y más fría; sin embargo, en P-III se observa que en noviembre y abril el agua es ligeramente más cálida.

Entre mayo y junio de 2004 comienzan definitivamente las labores de limpieza de los sondeos y las pruebas para la puesta en marcha de la desaladora. Para la limpieza de los sondeos pusieron en funcionamiento, durante el mes de mayo, todos los pozos individualmente, una media de 11 horas diarias. Cada pozo bombeó un caudal variable entre 230 y 400 m³/hora. Durante todo el mes de julio efectuaron pruebas en los diferentes bastidores por separado, para lo cual tuvieron en marcha los sondeos S-6, S-8 y S-16 (Figura 5) hasta el día 20 de julio. El día 21 sustituyen S-16 por S-10, obteniendo siempre el mismo caudal de salida conjunto (650 m³/hora aproximadamente). El día 26 bombearon los sondeos S-8, S-10 y S-16.

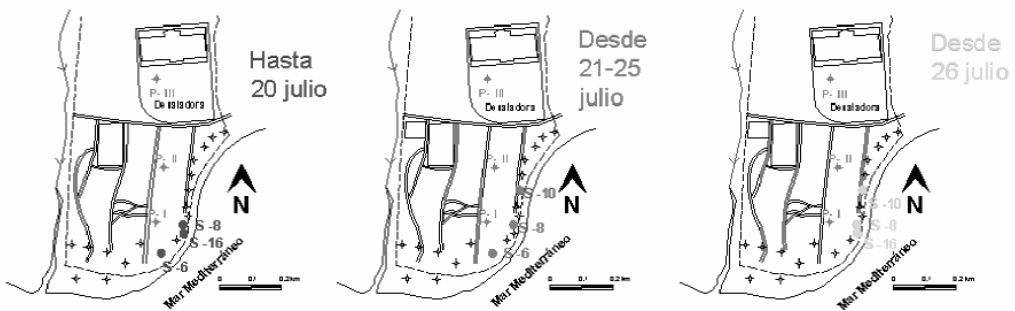


Figura 5. Distribución de los sondeos que bombean durante el mes de julio

Algunos de los registros verticales realizados en P-I en el mes de julio están representados en la figura 6. Como consecuencia del bombeo continuado, el agua dulce se encuentra cada vez a mayor profundidad, es decir se produce un descenso de la interfase, a la vez que se hace más neta. El nivel piezométrico el día 12 de julio es 0.98 m s.n.m., y el día 27 ha descendido a 0.6 m s.n.m. La conductividad eléctrica se mantiene hasta los 20 m de profundidad en torno a los 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A partir de aquí se produce un aumento gradual hasta los 42-43 m con valores máximos de 14000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, profundidad en la que el valor de la conductividad sufre un salto muy brusco pasando a alcanzar los 53000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta el final. Se aprecia con claridad en este registro cómo la interfase durante las extracciones, sufre un descenso considerable (aproximadamente 23 m) y se hace más neta. La temperatura en cambio, permanece casi constante en torno a los 21.8 °C. La anomalía detectada en los registros realizados anteriormente, también se aprecia a los 22.8 m de profundidad: la conductividad eléctrica del agua desciende a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la temperatura se eleva hasta casi los 28 °C.

La evolución de la temperatura y la conductividad eléctrica sigue la misma tendencia en los otros dos piezómetros P-II y P-III (Figura 7), solamente el P-II muestra un claro aumento en los valores de conductividad eléctrica en los registros efectuados los días 21 y 27, probablemente como consecuencia de la puesta en marcha del un sondeo cercano al P-II (sondeo 10).

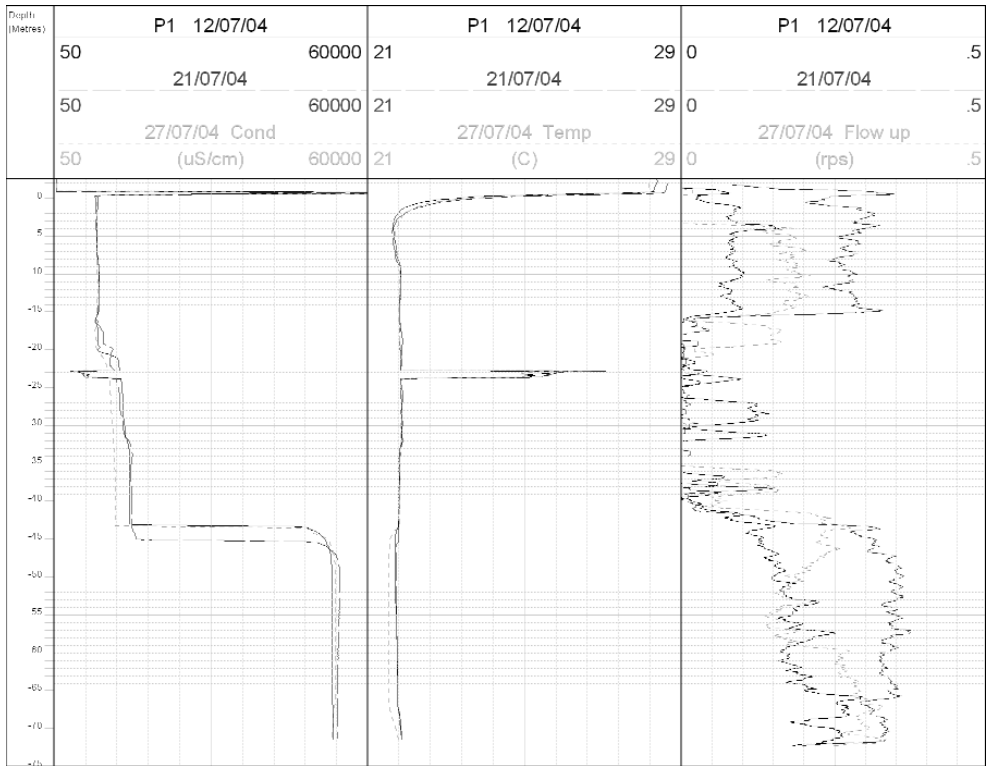


Figura 6. Registros de conductividad eléctrica, temperatura y flujo subterráneo en P-I con tres sondeos bombeando 650 m³/hora (12, 21 y 27 de julio)

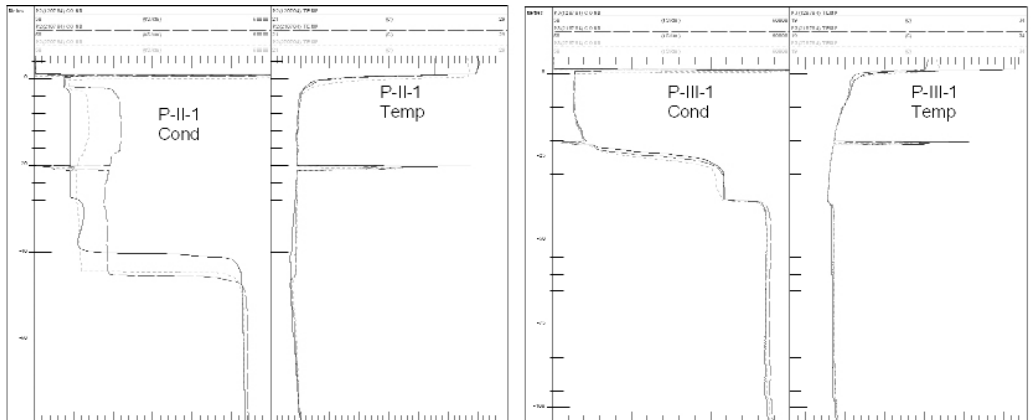


Figura 7. Registros de conductividad eléctrica y temperatura en P-II y P-III cuando tres sondeos bombean 650 m³/hora (— 12, — — 21 y - - - 27 de julio)

CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados muestran cómo la interfase se hace más neta durante las extracciones y se constata el descenso de la misma al aumentar los caudales de bombeo, especialmente en los piezómetros más cercanos a la línea de costa. Esto permitiría presagiar la escasa interferencia que podrían causar las captaciones de agua salada sobre la calidad de los niveles más superficiales del acuífero que son explotados actualmente para uso agrícola. No se podrán emitir conclusiones definitivas en este sentido hasta que la planta desaladora funcione a pleno rendimiento (bombeo de hasta 4300 m³/h). En ese momento, y mediante un seguimiento como el realizado hasta ahora, se podrá analizar con mayor seguridad la respuesta del sistema ante una explotación continuada.

El seguimiento y control de la evolución del contacto agua dulce-agua salada en los acuíferos costeros mediante testificaciones de precisión en enjambres de piezómetros constituye una técnica de gran precisión e insustituible cuando se quiere alcanzar gran fiabilidad. La realización de testificaciones con precisión y la instalación de los sensores de nivel, conductividad eléctrica (parámetro que más fácilmente identifica los fenómenos de intrusión marina) y temperatura del agua en estos piezómetros es imprescindible para el conocimiento de la evolución de las aguas dulce, de mezcla y de mar, como respuesta al bombeo necesario para el suministro de agua a la planta desaladora de agua de mar de Almería. En este sentido, será necesario continuar con las testificaciones de manera periódica una vez se ponga en marcha la planta. La obtención de todos estos datos permitirá en un futuro la elaboración de un modelo matemático del acuífero que sirva como sistema de alerta ante posibles variaciones indeseables en la distribución de salinidades en el acuífero y permita, por tanto, la toma de decisiones en tiempo real.

Se constata que el control preciso de potenciales y de parámetros fisicoquímicos (temperatura y conductividad eléctrica) constituye una herramienta aplicada muy necesaria para la gestión de la captación y explotación del agua de mar en el delta del río Andarax.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha beneficiado de algunos aspectos parciales de los proyectos HID99-0597-CO2-02 (CICYT) y 280602/PI/08 (Fundación Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia).

REFERENCIAS

- Carrasco, A. y Martín, G. 1988. "Hidrogeología de los acuíferos del valle del Andarax (Almería). *TIAC'88*, II: 37-67 Almuñecar (Granada).
- Fakhry A. Assaad, Philip E. LaMoraux, Travis H. Hughes eds. 2004. *Field methods for geologists and hydrogeologists*. Springer. Berlin. 377 p.
- Pulido Bosch, A., Gisbert, J., Pulido Leboeuf P., Sánchez Martos, F. y Vallejos, A. 2002. Problemática de la perforación y terminación de sondeos para bombear agua de mar en acuíferos costeros. *Acuíferos costeros y Desaladoras*. pp: 155-168. Almería.
- Pulido Bosch, A., Sánchez Martos, F., Martínez Vidal, J.L. y Navarrete F. 1992 Groundwaters problems in a semiarid area (Low Andarax River, Almería, Spain). *Environmental Geology and Water Sciences*, 20: 195-204.

- Rodríguez Estrella, T. *et al.*, 2003. Ubicación de sondeos y desaladoras de agua de mar. Experiencias en la cuenca del Segura. *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos*. IGME (TIAC'03). Vol. 1, pp: 701-712. Madrid.
- Sánchez Martos, F. 1997. Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería). Tesis Doct. Universidad de Granada.
- Sánchez Martos, F., Pulido Bosch, A. y Calaforra Chordi, J.M. 1999. Hydrogeochemical processes in an arid region of Europe (Almeria, SE Spain). *Applied Geochemistry*, 14: 735 -745.
- Sankar Kumar Nath, Hari Pada Patra and Shamsuddin Shahid 2000. Geophysical prospecting for Groundwater. Ed Balkema. Rotterdam. 255 p.