

Estimación del tiempo de tránsito en un acuífero detrítico costero sometido a bombeo, delta del río Andarax (Almería)

Estimation of the transit time in a coastal detrital aquifer maintaining continuous pumping, Andarax river delta (Almeria)

Fernando Sola⁽¹⁾, Ángela Vallejos⁽¹⁾, Francisco Díez⁽²⁾, José Juárez⁽³⁾, María Ángeles Fernández Jurado⁽³⁾, Juan Antonio López Geta⁽³⁾, Luís Moreno⁽³⁾, Gerardo Ramos⁽³⁾, Juan José Durán⁽³⁾, Antonio Ordoñez⁽²⁾ y Antonio Pulido-Bosch⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Hidrogeología, Universidad de Almería. 04120-Almería. fesola@ual.es, avallejo@ual.es, apulido@ual.es

⁽²⁾ OHL Medio Ambiente Inima, Madrid. frandiez@inima.com, ordonez@inima.com

⁽³⁾ Instituto Geológico y Minero de España, IGME. Ríos Rosas, 23, 28003-Madrid. j.juarez@igme.es, ma.jurado@igme.es, lopez.geta@igme.es, l.moreno@igme.es, g.ramos@igme.es, jj.duran@igme.es

ABSTRACT

It has been carried out the analysis of physicochemical parameters of samples taken in a pumping well and two piezometers next to the coast during six months. These analyses have been compared with the results obtained from seawater, with purpose to characterize the marine intrusion and to estimate the transit time of groundwater in the aquifer. Moreover a tracer test has been realized in this area to support the observed data. Both techniques would indicate a transit time of groundwater travelling 23 m into the aquifer around a week.

Key-words: Coastal aquifer, marine intrusion, tracer test, Andarax delta.

RESUMEN

Durante seis meses, se han realizado análisis de parámetros físico-químicos en muestras tomadas en un pozo de bombeo y dos piezómetros próximos a la costa. Estos análisis han sido comparados con los resultados obtenidos a partir del agua de mar, con el fin de caracterizar la intrusión marina y estimar el tiempo de tránsito del agua subterránea en el acuífero. Por otra parte, se ha realizado una prueba de trazador en el área para apoyar a los datos observados. Ambas técnicas indican un tiempo de tránsito aproximado de una semana, para recorrer un trayecto de 23 m a lo largo del acuífero.

Palabras clave: Acuífero costero, intrusión marina, prueba de trazadores, delta Andarax.

Geogaceta, 50-1 (2011), 83-86.
ISSN:2173-6545

Fecha de recepción: 10 de Febrero de 2011
Fecha de revisión: 28 de Abril de 2011
Fecha de aceptación: 27 de Mayo de 2011

Introducción

Uno de los principales riesgos a los que están sometidos los acuíferos costeros cuando se explotan son los procesos de intrusión marina. Estos se producen cuando el nivel piezométrico en el acuífero se sitúa por debajo del nivel del mar, lo cual en muchos casos está ligado a la fuerte explotación por bombeo.

Con objeto de conocer los mecanismos de funcionamiento y las consecuencias que tiene el proceso de intrusión marina sobre la calidad del agua, se han realizado numerosos estudios en los que se ha pretendido determinar el origen de la salinidad en un acuífero (Sánchez-Martos *et al.*, 2002), la variación de la química de las aguas en el acuífero como consecuencia de la entrada de agua de mar (Pulido-Leboeuf, 2004), o el porcentaje de agua

de mar en la mezcla (Fidelibus *et al.*, 1993). Algunos trabajos han utilizado estudios isotópicos para reconocer el origen reciente o no del agua de mar (Sivan *et al.*, 2005; Bouchaou *et al.*, 2008; Otero *et al.*, 2011). Otro aspecto interesante de la conexión de los acuíferos costeros con el mar, es su explotación con objeto de obtener agua marina de calidad para abastecer a las plantas desaladoras, las cuales se encuentran en auge en la actualidad, como consecuencia de la política de ahorro y reutilización del agua a la que conduce la implantación de la Directiva Marco Europea sobre el Agua (Unión Europea, 2000).

Este trabajo se enmarca en un proyecto cuyo objetivo es investigar los mecanismos que conducen a que el agua de mar captada en pozos próximos a la costa presente mucha mejor calidad que la filtrada mediante sistemas artificiales, así

como al hecho de que los pozos de captación no se colmatan, evitando los costosos y complejos procesos de lavado, que son imprescindibles cuando se emplean filtros artificiales. El proyecto ha contado con el diseño e implantación de una parcela experimental en campo en la que se ejecutaron y equiparon tres sondeos de investigación. Para conseguir "establecer los procesos físicos, químicos y microbianos que hacen que el agua de mar que se capta en pozos sea de mejor calidad que la que se capta mediante toma abierta" (fin último propuesto en el proyecto) se necesita conocer, como dato fundamental, el tiempo de tránsito del agua en la zona saturada. Este tiempo de tránsito se ha estimado en base a la interpretación de los análisis físico-químicos del agua en muestras tomadas tanto en el mar como en sondeos muy próximos a la línea de costa, y de un ensayo de trazadores empleando uranina.

Marco hidrogeológico

El área en el que se ha realizado la experiencia se sitúa en el margen izquierdo del delta del Río Andarax, más concretamente en las inmediaciones del recinto de la Universidad de Almería (Fig. 1).

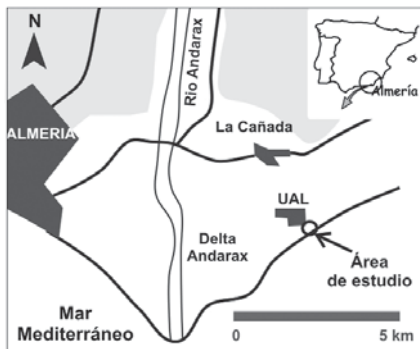


Fig. 1.- Localización del área de estudio (UAL: Universidad de Almería)

Fig. 1. - Location of study area (UAL: University of Almería).

En este área se perforaron dos piezómetros de control y un sondeo, con profundidades de 70 m, cortándose todo el tramo acuífero detrítico plio-cuaternario perteneciente al acuífero Bajo Andarax (Sánchez-Martos, 1997). Las tres perforaciones se realizaron alineadas perpendicularmente a la línea de costa según el esquema que se muestra en la Figura 2. El pozo de bombeo (P-b) se sitúa a una distancia de 27 m del mar, el piezómetro intermedio (P-1) está a una dis-

tancia de 25 m, y el piezómetro más próximo al mar (P-2), a tan sólo 4 m. La columna litológica deducida a partir del material perforado muestra la presencia de un tramo limoso-arenoso holoceno con abundantes restos de bivalvos en los primeros 20 m de acuífero. Bajo éste se cortaron 50 m de gravas, limos y arenas de edad Plio-Cuaternaria, bajo las cuales se encuentra el sustrato impermeable de limos pliocenos. Tanto el pozo de bombeo, como los dos piezómetros, sólo tienen un tramo ranurado entre 60 y 70 m. En conjunto, se trata de un acuífero multicapa, parcialmente confinado por el primer tramo limoso-arenoso. Dada la proximidad a la línea de costa, en condiciones no influenciadas, el nivel piezométrico se encuentra a cota próxima a cero con ligeras variaciones debido a la influencia de las mareas.

Materiales y métodos

Durante seis meses, se ha tomado una muestra semanal de agua en el mar (justo enfrente de la batería de sondeos), en el pozo de bombeo y en los dos piezómetros de control. Durante este tiempo, el pozo de bombeo ha estado extrayendo agua de manera continuada a caudal constante. Los parámetros físico-químicos: conductividad eléctrica (C.E.), temperatura, pH, alcalinidad y potencial redox de las muestras han sido analizados in situ, mientras que el análisis catiónico y aniónico se ha realizado en el laboratorio acreditado del Instituto Geológico y Minero de España.

El ensayo de trazadores consistió en la inyección de 100 litros de agua marcada con 100 g de uranina en el piezómetro más próximo al mar (P-2), utilizando el sondeo P-b como punto de observación (Fig. 2). En el piezómetro P-1, localizado en la línea de flujo teórica para el trazador, se colocó un sensor GGUN-FL2X con objeto de establecer la curva de concentraciones al paso del trazador en su avance hasta el pozo de bombeo. El sensor en P-1 se colocó a una profundidad de 65 m, en una posición intermedia del único tramo ranurado de dicho piezómetro. Además en P-b se instaló un sensor de superficie GGUN-FL30 colocado en la tubería de evacuación del agua bombeada. La inyección del trazador se realizó el día 03/02/2010, dejando caer esta solución por gravedad a través de una manguera hasta una profundidad de 65 m, en el punto intermedio del tramo ranurado. Para asegurar que la disolución entraba en el medio acuífero, se inyectó un volumen adicional de 2.500 L de agua de características similares a las de éste piezómetro, tomada en el pozo de bombeo, de modo que sirviera de empuje a la disolución hacia el acuífero.

El caudal de extracción en el P-b se mantuvo a lo largo de toda la experiencia en $6,8 \pm 0,2$ L/s. El límite de detección del sensor empleado para la uranina es de 2×10^{-11} g/mL. Los fluorímetros fueron programados para realizar medidas con una frecuencia de 10 minutos.

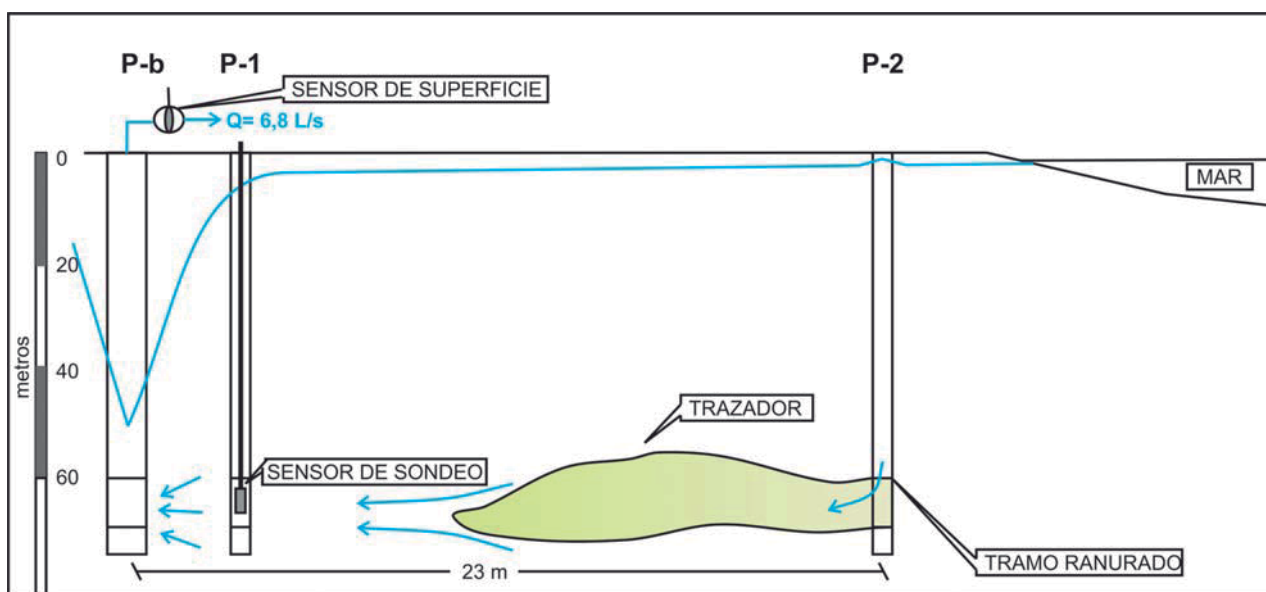


Fig. 2.- Esquema representativo de la prueba de trazador realizada.

Fig.2.- Representative scheme of tracer test.

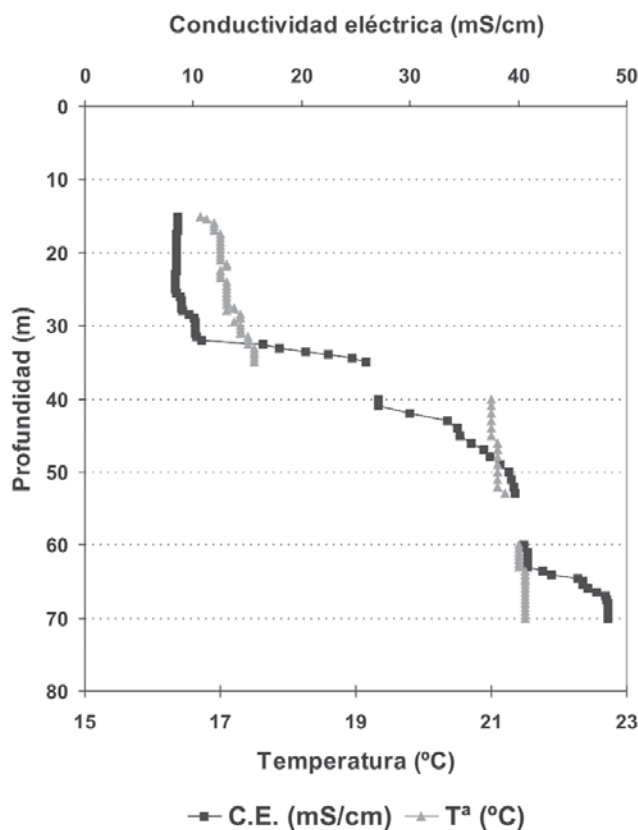


Fig. 3.- Registro vertical de temperatura y conductividad.

Fig. 3.- Electrical conductivity and temperature logs.

Resultados y discusión

Los registros de C.E. y temperatura obtenidos a lo largo del tramo acuífero muestran la existencia de un tramo de agua dulce en los primeros 20 m, y una amplia zona de mezcla a partir de éstos y hasta la base, no llegándose en ningún momento a valores propios del agua de mar (Fig. 3).

Se ha calculado el porcentaje de agua de mar presente en las muestras tomadas. Para ello se ha utilizado la concentración del ión cloruro, por ser un anión conservativo en los procesos de mezcla agua dulce-agua salada. Los valores de porcentaje de agua de mar obtenidos oscilan entre 70 y 90%, en función de si el sistema estaba en régimen natural o influenciado. En este último caso se observa una reducción media del 5% en el porcentaje de agua de mar desde el piezómetro más próximo al mar hasta el pozo de bombeo.

Los datos hidroquímicos tomados a lo largo del periodo de bombeo permiten ver cómo ha ido evolucionando la concentración de los distintos constituyentes químicos en los sondeos y qué diferencias existen entre el agua de los sondeos y el agua de mar. Los resultados obtenidos en la

mayor parte de los parámetros analizados muestran una clara correlación en su evolución temporal. De los parámetros analizados in situ, el único que se sale de esta tendencia es la temperatura, la cual es muy estable con un valor de 21 °C en las muestras tomadas en el pozo de bombeo, mientras en el agua de mar sufre variaciones de hasta 12 °C entre invierno y verano. En el resto de parámetros se reconoce un claro paralelismo, pudiéndose identificar un cierto retardo entre picos registrados en los valores del agua de mar respecto a los registrados en las muestras del pozo de bombeo (Fig. 4).

De igual forma, aquellas fases químicas mayoritariamente aportadas por el agua de mar al agua de mezcla, como serían los iones cloruro y bromuro, muestran este mismo paralelismo. El ión Cl ha mantenido una concentración muy estable tanto en las muestras de agua de mar como en las tomadas en el pozo de bombeo, de ahí que no haya sido incluido en la fig. 4. Por su parte, el ión Br sí muestra oscilaciones en el tiempo en la concentración en el agua de mar, que son seguidas con igual tendencia en las muestras del pozo de bombeo (Fig. 4). Una descripción bastante similar podría

hacerse para el B. Así, estos parámetros podrían ser considerados como unos trazadores naturales que estarían indicando que el tiempo de tránsito del agua de mar en el acuífero sería de aproximadamente una semana.

El ensayo realizado con el trazador ha permitido contrastar este valor estimado. No obstante, al no tener posibilidad de inyectar el trazador directamente en la zona de entrada del agua de mar al acuífero, la inyección se realizó en el piezómetro más próximo a la línea de costa, situado a tan solo 4 m de ésta. El primer registro del trazador se detectó en el sensor de superficie del pozo de bombeo transcurridas 40 horas de la inyección. La llegada del trazador se manifestó con un incremento paulatino en la concentración con el tiempo, hasta alcanzar un máximo al cabo de las 89,6 horas, es decir, 3,7 días después de la inyección. La máxima concentración de trazador medida fue 9,8 ppb (Fig. 5). Tras este pico la cantidad de trazador detectada se redujo progresivamente, registrando una cola de llegada que se alarga hasta las 308 horas, momento en el que deja de registrarse trazador. Durante este descenso se detectaron tres intervalos de oscilación, que se reconocen entre las horas 108 y 125, 175 y 193 y 232 y 248. Estas oscilaciones disminuyeron rápidamente de un intervalo a otro, siendo casi imperceptible en el último de ellos. En el P-1 no se registró en ningún momento presencia de trazador, lo que indicaría que el agua en este piezómetro se encuentra aislada del flujo del acuífero, como consecuencia posiblemente de la gran cantidad de arcillas bentónicas que se utilizaron durante su perforación.

A partir de estos datos se ha calculado el valor de la porosidad media del tramo acuífero investigado. El tiempo de tránsito que ha necesitado el pico de trazador para recorrer la distancia de 23 m que separa el P-2 del pozo de bombeo ha sido de 89,6 horas. El valor medio de porosidad resultante es

$$\phi = \frac{Q \cdot T_{A-B}}{\pi \cdot b \cdot R^2} = \frac{588 \text{ m}^3 / \text{día} \cdot 3,7 \text{ días}}{\pi \cdot 10 \text{ m} \cdot (23 \text{ m})^2} = 0,13$$

Este es un valor de porosidad eficaz media propio de un acuífero con arenas y gravas.

Conocido el caudal de salida y su concentración en trazador en el tiempo, se ha calculado la cantidad de trazador recupe-

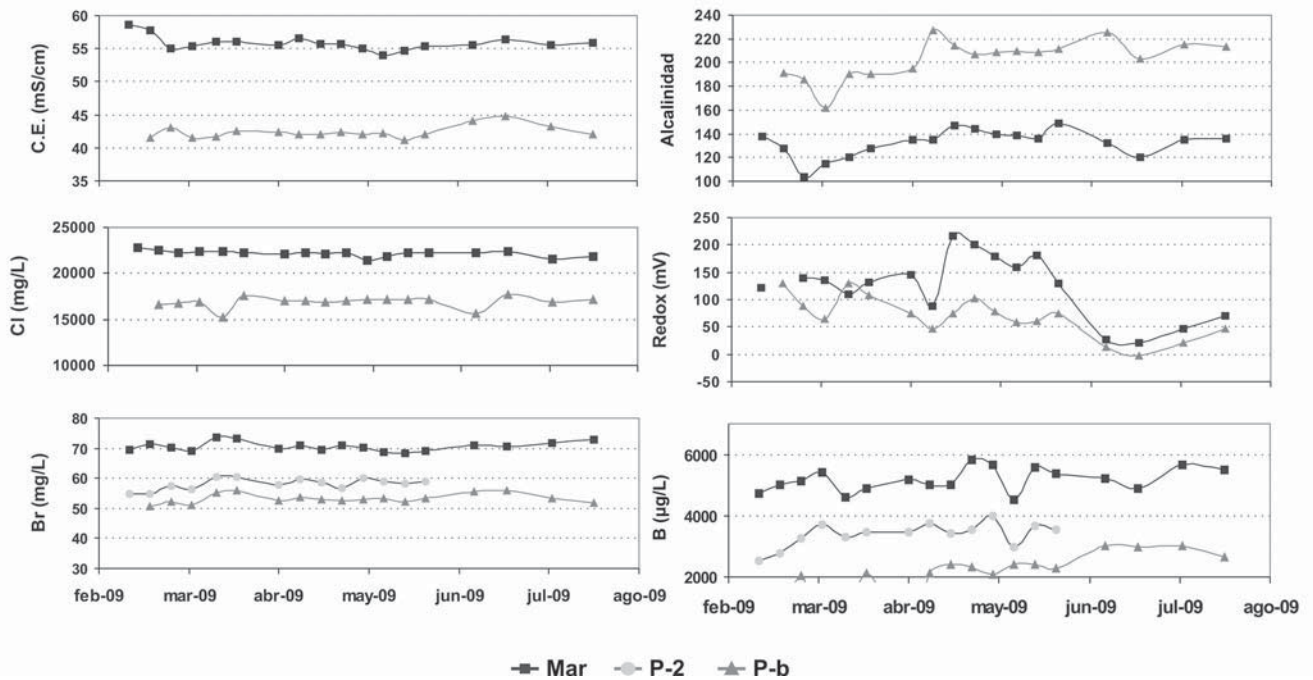


Fig. 4.- Evolución de parámetros físico-químicos.
Fig.4.- Evolution of physicochemical parameters.

rada. Esta ha sido de 16 mg, es decir, un 16% de la cantidad vertida. Este bajo porcentaje de recuperación puede ser debido a procesos de fijación del trazador en el substrato acuífero, y a la existencia de una larga cola con valores de trazador por debajo del límite de detección del sensor, que no habrían quedado registrados.

En ausencia de bombeo, el movimiento del agua en el acuífero se ralentiza enormemente, de modo que esta puede tardar decenas de años en recorrer una distancia de 100 metros (Sivan *et al.*, 2005).

Conclusiones

Tanto los datos aportados por los análisis físico-químicos realizados en el agua de

mar y en muestras del pozo de bombeo, como los resultados obtenidos en el ensayo de bombeo, indicarían que el tiempo de residencia del agua de mar desde que entra en el acuífero hasta que es captada por el bombeo es de aproximadamente una semana. Este periodo de residencia depende de parámetros como el caudal de extracción, la transmisividad del acuífero (estimada en 165 m²/día a partir de un ensayo de bombeo realizado en Noviembre de 2008) y la distancia del pozo de bombeo a la línea de costa. La prueba realizada con el trazador ha permitido también saber que el piezómetro P-1 se encuentra en cierto modo aislado del acuífero, de ahí que los valores físico-químicos medidos en él tengan una difícil interpretación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos 017/SGTB/2007/2.1. del Ministerio de Medio Ambiente. En menor medida, también ha formado parte del proyecto CGL2007-63450/HID financiado por el MICINN.

Referencias

Bouchaou, L., Michelot, J.L., Vengosh A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., Gaye, C.B., Bullen, T.D. y Zuppi, G.M. (2008). *Journal of Hydrology*, 352, 267–287.

Fidelibus, M.D., Giménez, E., Morell, I. y Tulipano, L. (1993). En: *Study and Modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers*. CIMNI, Barcelona, 267–283.

Otero, N., Soler, A., Corp, R.M., Mas-Pla, J., Garcia-Solsona E. y Masqué, P. (2011). *Journal of Hydrology*, 397, 37–46.

Pulido-Leboeuf, P. (2004). *Applied Geochemistry*, 19, 1517–1527.

Sánchez-Martos, F. (1997). *Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería)*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 278 p.

Sánchez-Martos, F., Pulido-Bosch, A., Molina-Sánchez, L. y Vallejos-Izquierdo, A. (2002). *The Science of the Total Environment*, 297, 43-58.

Sivan, O., Yechieli, Y., Herut, B. y Lazar, B. (2005). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 579–592.

UNIÓN EUROPEA (2000). En: *Diario Oficial de la Comunidad Europea*. DO L 327 de 22/12/2000: 1-72.

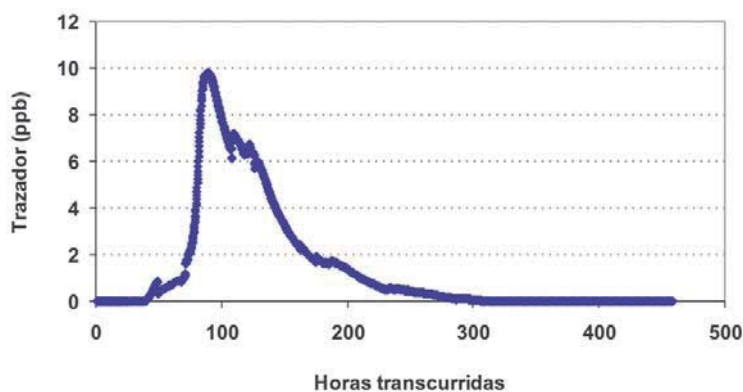


Fig. 5.- Concentraciones en uranina medidas en el pozo de bombeo tras la inyección.
Fig. 5.- Uranine concentration measured in pumping well after injection.