

# Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero carbonático de la sierra de Jarastepar (provincia de Málaga) deducidas a partir de un ensayo de trazadores artificiales

*Considerations on the hydrogeological functioning of the carbonate aquifer of Sierra de Jarastepar (province of Málaga) deduced from a multitracer test*

Beatriz de la Torre Martínez, Matías Mudarra Martínez, Bartolomé Andreo Navarro, Manuel Argamasilla Ruiz, José Manuel Nieto López, Jorge Prieto Mera y José Manuel Gil Márquez

Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29071.deltorrem@uma.es, mmudarra@uma.es, andreo@uma.es, margaruiz@uma.es, nietolopezjm@uma.es, prieto@uma.es, josemgil@uma.es

## ABSTRACT

Results from a tracer test carried out in the carbonate aquifer of Sierra de Jarastepar (Málaga) have permitted to characterize its hydrogeological behaviour. The calculated groundwater flow velocities, around 100-110 m/h, highlight the existence of a NE-SW preferential flow path from the injection points (recharge areas located at the southern and central parts of the massif) toward the overflow springs (Pozancón and Alfaguara) placed at the SW edge of carbonate outcrops. However, the fact that dyes have not been detected in the permanent springs located in the SE border (at lower altitude) it is not a clear evidence for rejecting the hydrogeological connection between these and the Jurassic limestones.

**Key-words:** hydrogeological behaviour, karst aquifer, Southern Spain, tracer test.

## RESUMEN

La realización de un ensayo de trazadores en el acuífero carbonático de la sierra de Jarastepar (Málaga) ha permitido avanzar en el conocimiento de su funcionamiento hidrogeológico. Las velocidades de flujo registradas, del orden de 100-110 m/h, demuestran la existencia un drenaje kárstico preferencial (de dirección NE-SO), entre los puntos de inyección (áreas de recarga situadas en la parte meridional y central de la sierra) y los manantiales de tipo trop plein (Pozancón y Alfaguara) situados en el borde SO de los afloramientos carbonáticos. Sin embargo, el hecho de que no se haya detectado trazador en los manantiales permanentes localizados en el borde SE (a menor cota) no es prueba suficiente para descartar la conexión hidrogeológica entre éstos y las calizas jurásicas.

**Palabras clave:** acuífero kárstico, funcionamiento hidrogeológico, sur de España, trazadores artificiales.

Geogaceta, 61 (2017), 63-66  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 15 de Julio de 2016  
Revisión: 3 de noviembre de 2016  
Aceptación: 25 de noviembre 2016

## Introducción

La sierra de Jarastepar, también llamada del Oreganal, se localiza en la parte occidental de la provincia de Málaga (Fig. 1), en la Serranía de Ronda (9 km al sur de esta ciudad). El área presenta una orografía escarpada en las laderas y más suave en las zonas elevadas, con altitudes que varían entre 400 y 1.427 m s.n.m. El clima es de tipo mediterráneo-continental, con valores medios anuales de precipitación y temperatura de 1.000 mm y 14° C, respectivamente.

Desde el punto de vista geológico, en la región afloran materiales pertenecientes a los tres dominios principales de la Cordillera Bé-

tica: Zona Externa, Zona Interna y Complejo del Flysch del Campo de Gibraltar. Los materiales de la primera, que constituyen la mayor parte de la sierra de Jarastepar, forman parte del dominio Subbético Interno Occidental o Penibético (Martín Algarra, 1987), cuya secuencia estratigráfica presenta cuatro grupos litológicos (Fig. 1): calizas y dolomías del Triásico Medio, arcillas con evaporitas del Triásico Superior, dolomías y calizas del Jurásico (espesor >500 m) y una sucesión de margas y margocalizas de edad Cretácico-Paleógeno. Por su parte, las rocas de la Zona Interna, pertenecientes a la Unidad de Nieves (Martín Algarra, 1987), aparecen al sur, en un estrecho y alargado afloramiento de dirección NE-SO

(Fig. 1). Se trata de dolomías y calizas de edad Triásico, así como brechas calcáreas del Terciario. Entre los materiales de las zonas Externa e Interna se encuentran las arcillas y areniscas del Flysch del Campo de Gibraltar.

La estructura geológica general está definida por la superposición tectónica, con vergencia general hacia el N-NO, de los tres dominios geológicos antes aludidos. Los materiales de la Zona Externa ocupan la posición tectónica inferior, mientras que la Unidad de Nieves aparece en la posición superior. Entre ambos afloran, de manera discontinua e imbricada, las arcillas y areniscas del Flysch (Fig. 1). En detalle, la estructura de la sierra de Jarastepar corresponde a un anticlinorio de dirección NE-SO, cuyo flanco

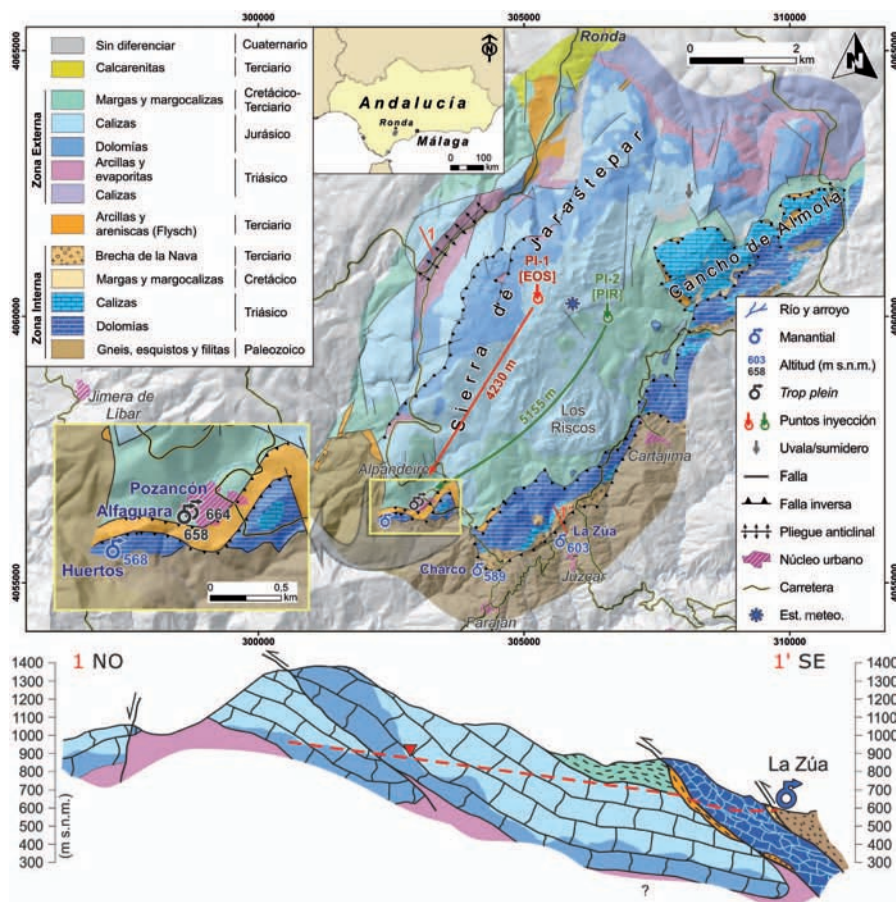


Fig. 1.- Situación del área de estudio, mapa litológico, corte geológico y conexiones hidrogeológicas deducidas a partir del ensayo de trazadores artificiales. Versión en color de todas las figuras en la edición web.

Fig. 1.- Location of the study area, lithological map, cross-section and hydrogeological connections inferred from dye tracer test. Color version from all figures in the article web edition.

SE, con buzamiento moderado (25-35°), cabalga sobre sí mismo y sobre el núcleo mediante fallas inversas desarrolladas a favor de los materiales arcilloso- evaporíticos triásicos. El conjunto de la estructura ha sido posteriormente afectado por fracturas con direcciones predominantes NE-SO y N-S.

Los carbonatos triásicos de la Unidad de Nieves y jurásicos de la sierra de Jarastepar ocupan una superficie de 30 km<sup>2</sup> y son permeables por fisuración y/o karstificación (Guzmán, 1984). Las calizas de la Zona Externa presentan, además, un gran desarrollo de formas exokársticas de absorción preferencial, entre las que destacan campos de lapiaz, dolinas y uvalas.

En este trabajo se presentan los resultados de un ensayo de trazadores artificiales realizado con el fin de obtener información cuantitativa sobre diversos aspectos del funcionamiento hidrogeológico de la sierra de Jarastepar: precisar las áreas de alimentación de los manantiales que drenan el macizo, determinar el orden de magnitud de las velocidades de flujo en el interior del mismo y avanzar en el conocimiento

sobre las relaciones hidráulicas existentes entre las distintas formaciones acuíferas implicadas a uno y otro lado del contacto tectónico entre las zonas Externa e Interna. En esta área se están llevando a cabo investigaciones hidrogeológicas detalladas mediante diferentes métodos (hidrodinámicos, hidroquímicos e isotópicos) por lo que los resultados del ensayo de trazador contribuirán a avanzar en el modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico de la sierra de Jarastepar.

### Características hidrogeológicas

La recarga del acuífero estudiado se produce por infiltración directa del agua de lluvia. El drenaje permanente de agua subterránea tiene lugar por varios manantiales localizados en el borde sur de los afloramientos calcáreos pertenecientes a la Zona Interna (Fig. 1): Huertos de Alpandei (568 m s.n.m.), Charco de Faraján (589 m s.n.m.) y La Zúa (603 m s.n.m.). Además, existen otros dos puntos de descarga no permanentes (sólo surgen en periodos de lluvias abundantes) ubicados en

el extremo meridional de la Zona Externa (en las inmediaciones de Alpandei) y muy próximos al contacto tectónico con los materiales del Flysch y de la Zona Interna: Alfaguara (658 m s.n.m.) y Pozancón (664 m s.n.m.). Ambos puntos están separados entre sí 80 metros (Fig. 1). El manantial de Pozancón corresponde, en realidad, a un conducto kárstico vertical (30 metros de profundidad) conectado con otro horizontal, por el que es posible acceder al nivel piezométrico en condiciones de estiaje, mientras que el nivel asciende hasta surgir agua por la parte superior durante las crecidas. El caudal conjunto de ambos manantiales puede llegar a ser de varios metros cúbicos por segundo.

### Metodología

Para la realización del ensayo de trazadores se seleccionaron dos puntos de inyección identificados previamente en reconocimientos de campo (Fig. 1): un colapso en el interior de una dolina localizada en la parte alta de la sierra (1.392 m s.n.m.), considerado en el presente trabajo como punto de inyección nº1 (PI-1), y un campo de lapiaz desarrollado sobre calizas jurásicas (1.175 m s.n.m.), punto de inyección nº2 (PI-2), hacia el que se dirigía agua de escorrentía procedente de materiales cretácicos adyacentes de baja permeabilidad. La inyección de los trazadores se efectuó el 1 de noviembre de 2015. Entre las 18:15 y las 18:45 horas, se inyectó 1,5 kg de Eosina (*Acid Red 87*, CAS: 173722-87-1) en PI-1. El entorno del colapso se adecuó mediante la excavación de drenes radiales para facilitar la entrada de agua y, por tanto, la infiltración del trazador. Por otra parte, entre las 19:15 y las 19:45 horas, 1,5 kg de piranina (*Solvent Green*, CAS: 63358-69-6) fueron vertidos en el punto PI-2, donde se infiltraba un caudal estimado de 2 l/s.

Durante la realización de la prueba se registró la precipitación horaria en una estación meteorológica situada a 1.317 m s.n.m., sobre los materiales calcáreos (Fig. 1). Los caudales de los manantiales de La Zúa y Alfaguara + Pozancón fueron controlados mediante la realización de aforos químicos puntuales (Madd® Technologies, Salinomadd). Los demás puntos fueron aforados con micromolinet (OTT® C2). Además, las variaciones de nivel de agua en el interior del manantial de Pozancón fueron controladas (con periodicidad horaria) mediante un sensor OTT® EcoLog-800.

La recogida de muestras de agua se inició el 1 de noviembre a las 12:00 horas en los manantiales permanentes situados en la Zona

Interna (para detectar inequívocamente la posible llegada de trazador) y finalizó el 20 de noviembre. A los puntos iniciales de muestreo se añadieron los manantiales de Alfaguara (desde las 06:00 horas del día 2 hasta las 19:00 del día 5) y de Pozancón (desde las 08:00 del día 3 hasta las 15:00 del día 4) mientras éstos estuvieron drenando agua. La periodicidad de muestreo fue de 1 hora en los manantiales localizados en la Zona Externa y de hasta 12 horas en los ubicados en la Zona Interna. En estos últimos puntos se continuó tomando muestras semanalmente, o cada 15 días, durante el invierno y primavera de 2016. El número de muestras recogidas durante el ensayo fue 20 (Huertos de Alpanseire, Charco de Faraján y La Zúa), 30 (Pozancón) y 68 (Alfaguara). Las muestras se transportaron y almacenaron en frascos de topacio de 60 ml, en total oscuridad, para evitar la fotodegradación del trazador. Los análisis se efectuaron en menos de 24 horas tras el muestreo, con un espectrofluorímetro Perkin-Elmer® LS55, en el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. El límite de detección de la eosina fue de 0,05 µg/l y 0,28 µg/l para la piranina.

## Resultados

En la semana del 1 al 8 de noviembre de 2015 se registró una precipitación total de 90 mm en la zona de estudio, con un valor de 32 mm el día 1 de noviembre (día de la inyección, Fig. 2) y 36 mm el día 3 de noviembre. En días sucesivos no se recogieron lluvias significativas; contrariamente a lo ocurrido durante las semanas previas al ensayo, con un máximo de precipitación de 92 mm registrado el 17 de octubre. Ello propició que la inyección de los trazadores se llevara a cabo en un contexto hidrodinámico general de aguas intermedias-altas, con varias crecidas, como se observa en el limnigrama de la surgencia de Pozancón (Fig. 2).

Durante el periodo de control, únicamente se detectaron los trazadores en los manantiales de Alfaguara y Pozancón, cuando éstos estuvieron activos. Los parámetros hidráulicos deducidos a partir del ensayo se recogen en la tabla I y en la figura 3. Tanto la eosina como la piranina se reconocieron en el agua del manantial de la Alfaguara 41 horas después de las correspondientes inyecciones (comparativamente 32 y 33 horas desde que la surgencia comenzara a drenar agua), con valores máximos de concentración (1,04 y 7,52 µg/l) alcanzados 50 (eosina) y 48 horas (piranina)

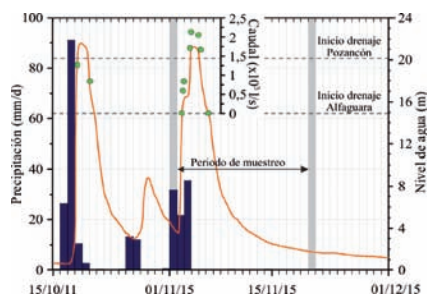


Fig. 2.- Limnigrama del manantial de Pozancón entre el 15/10 y el 15/12 de 2015 (línea). Se muestran, además, las medidas puntuales de caudal efectuadas (puntos) y el registro de precipitación diaria para el mismo periodo (barras).

Fig. 2.- Water level variations recorded at Pozancón spring from October 15th to December 15th, 2015 (line). Single outflow measurements (points) and daily rainfall (bars) data are additionally shown for the same time period.

después de las respectivas inyecciones. La velocidad de flujo más rápida ha variado entre 105 (EOS, PI-1) y 128 metros/hora (PIR, PI-2), con una velocidad modal comprendida entre 86 y 109 m/h. Estas velocidades obtenidas son, en todo caso, valores mínimos de velocidad, en la medida en que cualquier desviación de un trayecto puramente lineal (sinuosidad) conduciría a valores aún superiores. Es más, en acuíferos kársticos de montaña, como el considerado en este trabajo, los espesores de la zona no saturada pueden ser de varios centenares de metros, lo que conlleva la existencia de una componente de flujo vertical en el desplazamiento del trazador.

Por lo que respecta al manantial del Pozancón, la primera detección de los dos trazadores fue prácticamente coincidente en el tiempo: la eosina se detectó a las 46 horas de la inyección, mientras que la piranina se detectó una hora antes. Ello equivale, en ambos casos, a 9 horas desde que comenzara a drenar agua la surgencia. Las concentraciones máximas de los dos trazadores en el agua del manantial de Pozancón fueron 1,04 µg/l (eosina) y 7,42 µg/l (piranina), similares a las registradas en la surgencia de Alfaguara, aunque tuvieron lugar aproximadamente 1-2 horas más tarde.

En cualquier caso, las concentraciones más elevadas de ambos trazadores ocurrieron dos horas después de registrarse el pico máximo de descarga del manantial, como refleja el limnigrama (Fig. 3). La velocidad modal de flujo (entre 83 y 103 m/h) es ligeramente inferior a la calculada en el manantial de Alfaguara, a pesar de que ambas surgencias están separadas 80 m.

1,5 kg eosina (EOS) en PI-1 1,5 kg piranina (PIR) en PI-2	Manantiales donde se detectó trazador				Unidad
	Alfaguara EOS	PIR	Pozancón EOS	PIR	
Distancia punto inyección	4300	5230	4230	5155	m
Tiempo de primera detección	41	41	46	45	horas
Tiempo hasta conc. máx.	50	48	51	50	horas
Máx. concentración	1,04	7,52	1,04	7,42	µg/l
Mayor velocidad de flujo	105	128	92	115	m/h
Velocidad media flujo	86	109	83	103	m/h
Caudal medio manantiales	1393				l/s
Tasa de recuperación	10 (EOS)		92 (PIR)		%

Tabla I.- Principales parámetros hidráulicos deducidos del ensayo de trazadores.

Table I.- Main hydraulic parameters deduced from tracer test.

La tasa de recuperación de trazador ha sido calculada a partir de los valores de concentración obtenidos en el agua del manantial de la Alfaguara y de los caudales medidos en los 8 afloros efectuados durante el periodo de control (Fig. 2). Dicha tasa ha sido variable, entre un 10% para la eosina y un 92% para la piranina (Tabla I, Fig. 3).

## Discusión e interpretación

La detección de la eosina y la piranina en los manantiales de Alfaguara y Pozancón pone de manifiesto que éstos se alimentan de las aguas infiltradas en la parte meridional y central de la sierra de Jarastepar (Fig. 1), donde existe un desarrollo significativo de las formas exokársticas. Ambas surgencias sólo permanecen activas durante un corto periodo de tiempo tras las lluvias, cuando ascienden los niveles piezométricos e intersectan la superficie del terreno. Tales ascensos pueden ser de hasta 21 metros y ocurrir en 42 horas (crecida de mediados de octubre de 2015), de acuerdo con el registro piezométrico obtenido en el manantial de Pozancón (Fig. 2). En primer lugar emerge la surgencia de Alfaguara (cuando el agua alcanza el nivel 1.478 cm en el limnigrama) y, si la recarga es significativa, se eleva aún más el nivel y comienza a drenar agua el manantial de Pozancón (a partir de 2.020 cm). Son, por tanto, surgencias del tipo *trop plein*, localizadas en el borde meridional del acuífero de la sierra de Jarastepar, hacia donde se deben dirigir de manera preferencial los flujos de agua subterránea, al menos en condiciones de aguas altas. Sin embargo, la propia condición de surgencias de tipo *trop plein* evidencia que estos puntos no representan el nivel de base del

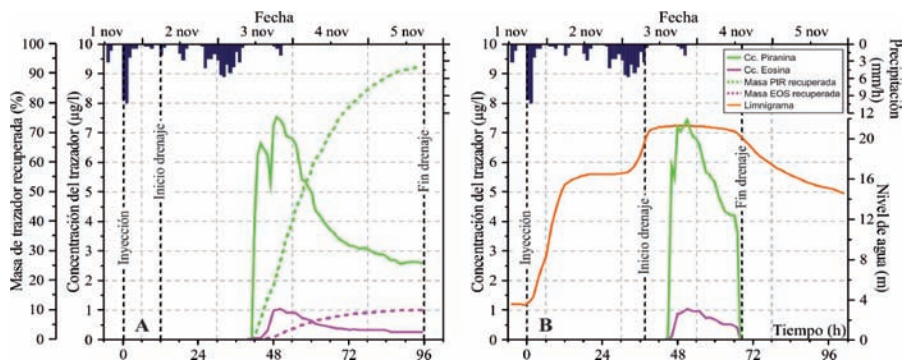


Fig. 3.- Curvas de concentración de piranina y eosina en el agua de los manantiales de Alfaguara (a) y Pozancón (b), junto con la masa recuperada de cada sustancia y la distribución de las precipitaciones durante el ensayo de trazadores.

Fig. 3.- Pyranine and eosine breakthrough curves (BTC) recorded at Alfaguara (a) and Pozancón (b) springs, jointly with recovery rates and rainfall registered during dye test.

acuífero. Es más, una vez cesan las lluvias y el drenaje por la Alfaguara, los niveles piezométricos continúan descendiendo, rápidamente al principio y más lentamente trascurridos varios días, hasta valores en torno a 60 cm. Por lo tanto, el hecho de que no se haya detectado trazador en los manantiales permanentes localizados en la Zona Interna (Fig. 1) no es prueba suficiente para descartar la conexión hidrogeológica entre éstos y las calizas jurásicas localizadas inmediatamente al norte, dado que se encuentran a cota más baja que los manantiales *trop plein*.

Las curvas de concentración de eosina y de piranina en el agua de los manantiales (Fig. 3) muestran, en general, distribuciones propias de acuíferos con el drenaje kárstico bien desarrollado, con ascensos y descensos acusados en los valores de concentración, lo que indica un tránsito relativamente rápido del flujo desde las áreas de inyección (áreas de recarga). Las velocidades de flujo del orden de 80-110 m/h deducidas del ensayo demuestran la existencia de conductos preferenciales de dirección NE-SO, a favor de la estructura, entre los puntos de inyección y los manantiales donde se han detectado los trazadores. Estas direcciones de flujo deben estar relacionadas con el desarrollo de la karstificación funcional a favor de los planos de estratificación y fracturas. No obstante, las condiciones multirecarga pudieron influir en los tiempos de llegada y, consecuentemente, en las velocidades de flujo calculadas. A pesar de encontrarse ligeramente más cerca de los puntos de inyección, en el manantial de Pozancón se han medido menores velocidades de flujo. Ello puede guardar relación con la existencia de zonas de estancamiento (*estagnant zones*) en el conducto vertical, parcialmente alejadas del flujo principal que tiene lugar, a mayor velocidad, varios metros más

abajo, en el fondo de la gruta horizontal. Este contraste amortiguaría la llegada del trazador, incluso cuando el manantial es surgente. Las precipitaciones registradas en días posteriores a la inyección de los trazadores pudieron ayudar a la movilización de los colorantes, de tal modo que las velocidades de flujo reales fueran aun superiores.

El hecho de que sólo se haya recuperado alrededor del 10% de la eosina debe ser interpretado en el contexto de su inyección en el acuífero: en un colapso situado en el fondo de una dolina (a 1.392 m s.n.m), rodeado de arcillas de descalcificación y sin un aporte natural de agua que ayudase a su introducción en el sistema. Además, parte de la masa de trazador pudo quedar igualmente retenida en sectores más fisurados o fracturados de la zona no saturada del acuífero. En cambio, las condiciones de inyección de la piranina fueron más favorables. Ello contribuyó a alcanzar una tasa de restitución mucho mayor para este trazador, la más elevada de las detectadas en acuíferos kársticos del sur de España (Andreo *et al.*, 2004; Mudarra *et al.*, 2010). Esta circunstancia, junto con el hecho de que la piranina llegase antes a ambas surgencias, a pesar de que se inyectó en un punto más lejano (Fig. 1), pone de manifiesto la existencia de un flujo preferencial y por conductos entre el punto de inyección PI-2 y la zona de descarga definida por los manantiales de Alfaguara y Pozancón.

## Conclusiones

El ensayo con trazadores artificiales efectuado en la sierra de Jarastepar ha puesto de manifiesto la existencia de flujos subterráneos preferenciales, de dirección NE-SO, desde las áreas de recarga situadas en el centro del macizo hasta los manantiales localizados en

el borde SO del mismo, muy próximos al contacto geológico entre los materiales de las zonas Externa e Interna de la Cordillera Bética. La morfología de las curvas de concentración de trazador registradas, las elevadas velocidades de flujo calculadas y el hecho de que se haya recuperado alrededor de un 90 % de uno de los trazadores, sugieren un marcado comportamiento kárstico (flujo por conductos) para el sector de acuífero formado por los carbonatos jurásicos de la Zona Externa. Ello está en consonancia con las rápidas y bruscas variaciones del nivel de agua y del caudal medidas en las surgencias de Pozancón y Alfaguara.

Aunque durante el ensayo no se hayan detectado trazadores en los manantiales permanentes localizados en el borde de la Zona Interna, no se debe descartar, *a priori*, la conexión hidrogeológica entre éstos y las calizas jurásicas localizadas inmediatamente al norte, dado que se encuentran a cota más baja que los manantiales *trop pleins* antes citados. La complejidad geológica detectada en el borde sur del acuífero, con marcadas variaciones de permeabilidad asociadas a la imbricación del Flysch del Campo de Gibraltar, puede contribuir a esta heterogeneidad hidrogeológica.

## Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los proyectos CGL2012-32590 y CGL2015-65858R de la DGICYT y al grupo de investigación RNM-308 de la Junta de Andalucía. Se agradece la colaboración prestada por R. Franco. Se agradece también los comentarios constructivos de los dos revisores anónimos.

## Referencias

- Andreo, B., Vadillo, I., Carrasco, F., Neukum, C., Jiménez, P., Goldscheider, N., Hötzl, H., Vías, J.M., Pérez, I. y Göppert, N. (2004). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 17, 187-197.
- Guzmán, J.L. (1984). *Hidrogeología de la Serranía de Ronda*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada. 129 p.
- Martín Algarra, A. (1987). *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Externas de la Cordillera Bética*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 1171 p.
- Mudarra, M., Marín, A.I., Andreo, B., Vadillo, I., Barberá, J.A., Neukum, C., Sánchez, D., Liñán, C. y Pérez, I. (2010). *Geogaceta* 48, 131-134.