

PRECISIONES SOBRE EL FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO Y LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO KÁRSTICO DE LA SIERRA DE LÍBAR (PROVINCIAS DE MÁLAGA Y CÁDIZ, SUR DE ESPAÑA) A PARTIR DE UN ENSAYO DE TRAZADORES

B. Andreo¹, I. Vadillo¹, F. Carrasco¹, C. Neukum³, P. Jiménez¹, N. Goldscheider², H. Hötzl³, J.M. Vías¹, I. Pérez¹ y N. Göppert³

¹Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29071. andreo@uma.es

²Centro de Hidrogeología, Universidad de Neuchâtel, 2007 Neuchâtel, Suiza

³Departamento de Geología Aplicada, Universidad de Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, Alemania

Resumen: Se presentan los resultados de un ensayo múltiple de trazadores llevado a cabo en la Sierra de Líbar (sur de España) para precisar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero carbonático y validar los mapas de vulnerabilidad a la contaminación realizados previamente. Se corrobora el comportamiento de tipo kárstico del acuífero de la Sierra de Líbar, en el cual se llegan a registrar velocidades de flujo superiores a 100 m/h. El desarrollo de los conductos kársticos y, en definitiva, del flujo subterráneo está condicionado por la estructura antiformal de dirección NE-SO con inmersión hacia el NE y por fracturas transversales. Además, se han podido precisar las áreas de recarga de los manantiales de Cueva del Gato, Benaoján, Jimera de Líbar y Charco del Moro.

La Sierra de Líbar presenta una elevada vulnerabilidad a la contaminación, en particular, los sumideros kársticos que se han utilizado como puntos de inyección de los trazadores. Un contaminante, que se infiltrara en estos sumideros, tardaría entre 3 y 5 días en alcanzar los manantiales y permanecería en el acuífero entre 1 y 6 días. Además, el agua del Arroyo de los Álamos, infiltrada en la Sima del Republicano, afectaría a la surgencia de Charco del Moro pero no al resto del acuífero, que se drena por los manantiales de Cueva del Gato, Benaoján y Jimera de Líbar.

Palabras clave: acuífero kárstico, hidrogeología, Sierra de Líbar, vulnerabilidad a la contaminación.

Abstract: A multitracer test was done in the Sierra de Líbar carbonate aquifer (South of Spain) in order to precise its hydrogeological behaviour and to validate previous contamination vulnerability maps. The karstic behaviour was proved and flow velocities above 100 m/h were calculated. The karst conduits and, consequently, the groundwater flow are constrained by a NE-SW trending antiform and by NW-SE fractures. Furthermore, it has been possible to delineate the catchment areas of the Cueva del Gato, Benaoján, Jimera de Líbar and Charco del Moro springs.

The Sierra de Líbar shows a high intrinsic vulnerability to the contamination, mostly in the swallow holes, which have been used like the injection points for this tracer test. A contaminant infiltrated in these swallow holes arrives to the springs in 3 to 5 days and remains for 1 to 6 days in the groundwater. Furthermore, a potential contaminant infiltrated in the sinking stream of Arroyo de los Álamos would affect only to the Charco del Moro spring but no trace of contamination would arrive to the rest of springs of the aquifer (Cueva del Gato, Benaoján y Jimera de Líbar).

Key words: karstic aquifer, hydrogeological behaviour, Sierra de Líbar, vulnerability to contamination.

Andreo, B., Vadillo, I., Carrasco, F., Neukum, C., Jiménez, P., Goldscheider, N., Hötzl, H., Vías, J.M., Pérez I. y Göppert, N. (2004): Precisiones sobre el funcionamiento hidrodinámico y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico de la Sierra de Líbar (provincias de Málaga y Cádiz, sur de España) a partir de un ensayo de trazadores. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 17 (3-4): 187-197

En las regiones donde afloran rocas carbonáticas se suele generar un relieve característico con abundancia de morfologías exokársticas y endokársticas. Las formas exokársticas, entre las que se encuentran los sumideros, favorecen la conexión directa entre la superficie y el subsuelo y, a menudo, una infiltración rápida del agua de escorrentía. Este aspecto es especialmente importante si existen contaminantes en su-

perficie que pueden ser arrastrados hacia la zona saturada de los acuíferos y, con posterioridad, a los puntos de descarga.

Dado que los acuíferos kársticos son especialmente vulnerables a la contaminación, es necesario anticiparse a ella y llevar a cabo estudios hidrogeológicos que permitan simular las condiciones en las que se generaría la contaminación, así como determinar la protección

de los recursos hídricos subterráneos y de las captaciones de abastecimiento. Estos estudios permiten generar mapas de vulnerabilidad a la contaminación, que pueden ser utilizados para desarrollar una buena planificación en el uso del suelo y delimitar perímetros de protección para proteger las fuentes de abastecimiento. En este sentido, un método de investigación interesante consiste en realizar ensayos de trazadores que permiten determinar el tiempo de tránsito del trazador, la concentración máxima del mismo y la persistencia de su concentración en los puntos de descarga (e.g., Antigüedad *et al.*, 1990; Käss, 1998; González-Yélamos, 1999).

En el presente trabajo se recogen los resultados de un ensayo múltiple de trazadores realizado en la Sierra de Líbar (Fig. 1), en el límite de las provincias de Málaga y Cádiz, que constituye uno de los macizos del sur de España con mayor desarrollo del modelado kárstico. En esta área se están realizando investigaciones hidrogeológicas mediante diferentes métodos (hidrodinámicos, hidroquímicos e isotópicos) que indican un funcionamiento típicamente kárstico (Carrasco *et al.*, 2001). Por otra parte, se están llevando a cabo cartografías de vulnerabilidad a la contaminación aplicando diferentes técnicas que permiten catalogar a la Sierra de Líbar como muy vulnerable, especialmente en los sumideros kársticos (Longo *et al.*, 2001; Brechenmacher, 2002; Vías *et al.*, 2002; Andreo *et al.*, 2004; Vías *et al.*, 2004).

Con este trabajo se pretende conocer la conexión hidráulica entre los poljes que forman parte de las áreas de recarga de los principales manantiales y determinar el orden de magnitud de las velocidades de flujo en el interior del acuífero. Estos resultados permitirán precisar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero deducido por otros métodos hidrogeológicos y validar las diferentes cartografías de vulnerabilidad a la contaminación realizadas en la Sierra de Líbar.

Marco geológico

La Sierra de Líbar forma parte de la Zona Externa de la Cordillera Bética, concretamente del denominado Penibético o Subbético Interno occidental. La serie estratigráfica general de este dominio geológico está formada, de muro a techo, por tres conjuntos litológicos (Martín-Algarra, 1987): dolomías negras del Muschelkalk y arcillas con evaporitas del Keuper (Grupo Hidalgo), dolomías y calizas del Jurásico (Grupo Torcal) y margas y margocalizas del Cretácico (Grupo Espartina). En la Sierra de Líbar sólo afloran los materiales jurásicos y cretácicos (Fig. 1). Más al norte afloran arcillas y areniscas del Flysch del Campo de Gibraltar de edades comprendidas entre Paleoceno y Mioceno y, discordantes sobre todos los materiales anteriores, existen arcillas, arenas y gravas del Cuaternario.

La estructura geológica de la Sierra de Líbar está constituida por pliegues en cofre con dirección NE-SO (Martín-Algarra, 1987; Sanz y de Pablo, 1987; Moreno, 1990) que han sido afectados por fracturas de diversas orientaciones (Durán y López-Martínez, 1992). En

las estructuras anticlinales afloran las calizas jurásicas, mientras que los afloramientos de margas y margocalizas cretácicas se encuentran en los bordes de la sierra o en la parte alta de la misma, a favor de sinclinales y fallas normales que generan pequeñas fosas tectónicas. Los ejes de los pliegues presentan una ligera inmersión hacia el nordeste, lo cual provoca el afloramiento de las dolomías del Grupo Hidalgo en la parte suroeste del macizo (Fig. 1).

La coexistencia de litologías solubles, como es el caso de las calizas y dolomías, con una disposición subhorizontal en las charnelas de los anticlinales, la fracturación y la elevada precipitación de la zona (1.500 mm/año de valor medio) han dado lugar a un desarrollo espectacular del modelado kárstico (Delannoy, 1987; Durán, 1996; Gracia *et al.*, 2000). En el área de estudio es posible observar formas exokársticas de todos los tipos, desde campos de lapiaz a poljes, pasando por dolinas de diversos tipos (Fig. 2). Los lapiazes y las dolinas son más frecuentes en los afloramientos de calizas, generalmente desprovistos de suelos. Los poljes de mayor entidad (Llanos de Líbar, Pozuelo y Burfo) se encuentran en la parte central de la sierra y están constituidos por los materiales cretácicos preservados de la erosión en las estructuras sinclinales y en los bloques hundidos por fallas.

También existen abundantes formas endokársticas (Delannoy, 1987; Durán, 1996; Mayoral *et al.*, 2000; Millán y Wieczorek, 2000; Pedroche y Mendoza, 2000), principalmente en la parte alta de la sierra. Se trata de cavidades de desarrollo predominantemente vertical, la mayoría continuación de sumideros kársticos ligados a la infiltración de agua. En el borde nordeste y este del macizo se encuentran cavidades de desarrollo horizontal relacionadas con la descarga del acuífero, como la Cueva de la Pileta, un antiguo dren kárstico con más de 2 km de desarrollo, y el sistema Hundidero-Gato, que constituye la continuación subterránea del río Gaduares a través de la Sierra de Líbar (Fig. 2).

Características hidrogeológicas de la Sierra de Líbar

Las calizas y dolomías que afloran en la Sierra de Líbar son permeables por fracturación y karstificación, por lo que constituyen un importante acuífero. La principal recarga de este acuífero proviene de la infiltración directa del agua de lluvia sobre los afloramientos carbonáticos y del agua que se infiltra a través de los sumideros kársticos de los poljes. Además, existe una aportación de la escorrentía producida en las cuencas del Río Gaduares (43,5 km²) y del arroyo de los Álamos (30 km²), constituidas por materiales arcillosos del Flysch (Fig. 1), que vierten sus aguas hacia sumideros ubicados en las calizas. El agua de escorrentía del Río Gaduares se almacena en el embalse de Montejaque, cuya cerrada se asienta sobre las calizas karstificadas del Grupo Torcal, lo que provoca pérdidas del agua embalsada y, por tanto, la recarga artificial al acuífero.

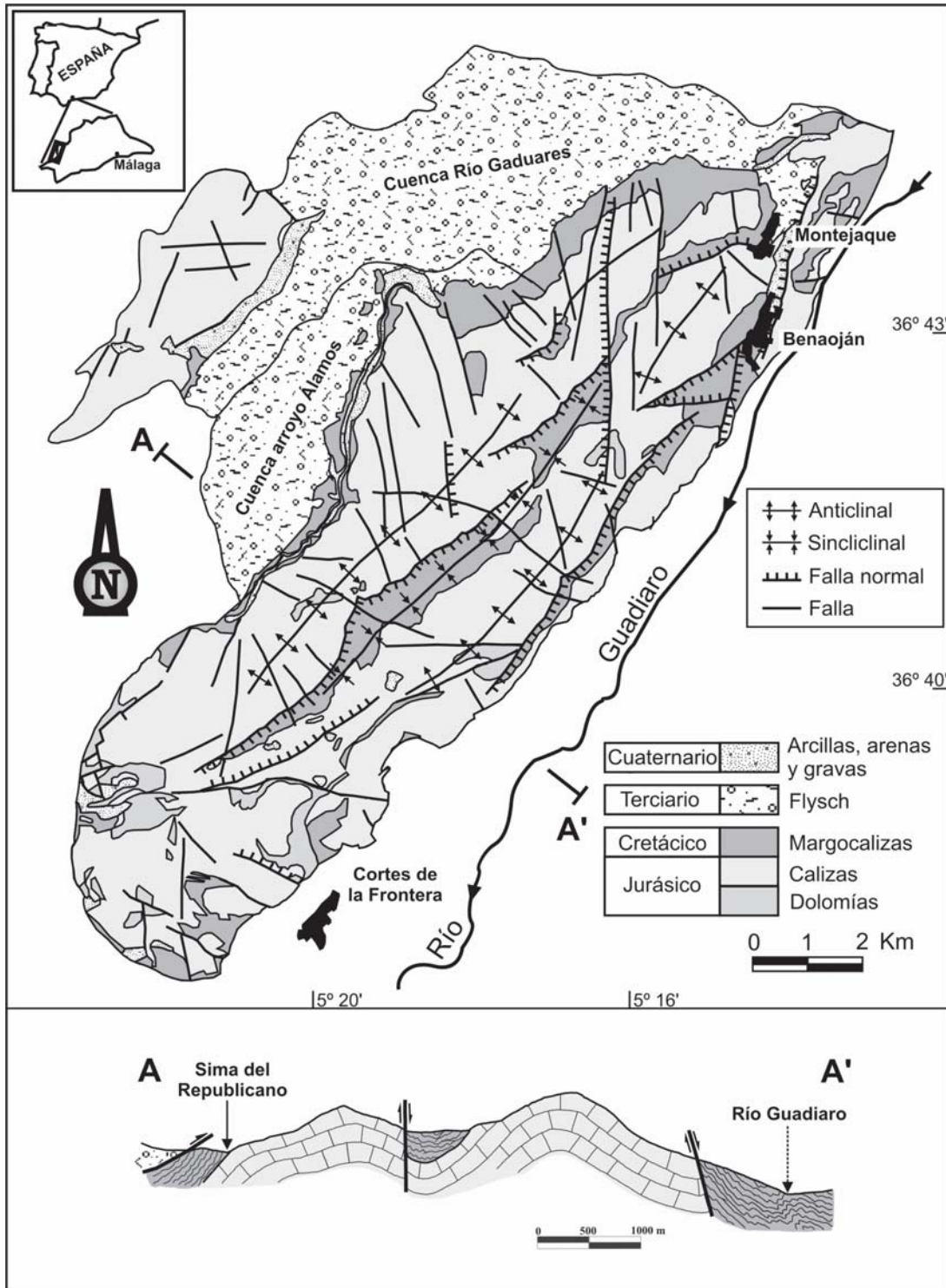


Figura 1.- Esquema geológico, tomado de Martín Algarra (1987).

La existencia de una superficie de recarga muy karsificada, con abundantes formas de absorción, es lo que provoca que el acuífero presente una elevada vulnerabilidad a la contaminación (Longo *et al.*, 2001; Brechenmacher, 2002; Vías *et al.*, 2002; Andreo *et al.*, 2004).

Las descargas se producen en el borde este (Fig. 2) condicionadas por el nivel de base actual del Río Guadiaro, a través de los manantiales de Jimera de Líbar (410 m), Benaoján (450 m) y Cueva del Gato (462

m). En el área conocida como Angosturas del Guadiaro existe el manantial del Charco del Moro (223 m) cuya surgencia aparece en el propio cauce del Río Guadiaro. Tradicionalmente se ha supuesto relacionado con la descarga de la Sierra de Líbar por la importancia de los caudales allí observados y el reducido afloramiento carbonático donde se encuentra.

En cuanto al funcionamiento hidrodinámico, los manantiales responden de forma rápida ante las precipitaciones, generalmente en menos de 2 días, siempre

proporcionales a la magnitud y duración del periodo lluvioso. El análisis correlatorio y espectral de la precipitación y los caudales demuestra que en la Sierra de Lívar se ha generado un sistema kárstico con conductos bien desarrollados (Benavente y Mangin, 1984), que permiten un tránsito rápido del agua de lluvia, por lo que constituye un sistema con baja inercia y escaso poder regulador natural, sobre todo en la parte nordeste drenada por el manantial de la Cueva del Gato. De igual modo, el análisis de los hidrogramas de los manantiales demuestra la existencia de una karstificación funcional en el sistema de Lívar, aunque los agotamientos se producen de forma lenta, como ocurre en otros sistemas acuíferos del sur de España (Carrasco *et al.*, 2001; Jiménez *et al.*, 2002). Durante las crecidas invernales se producen importantes diluciones en la mineralización de las aguas lo que corrobora el comportamiento hidrodinámico del sistema.

Metodología

El método aplicado para llevar a cabo la investigación hidrogeológica ha consistido en un ensayo de trazadores. Durante la realización de la prueba, se ha controlado la precipitación mediante pluviómetros situados en la Cueva de la Pileta y un pluviógrafo situado en el polje de Pozuelo (Fig. 2). Así mismo, se ha obtenido el caudal de los manantiales de la Cueva del Gato y de Benaoján mediante las estaciones de aforo instaladas por la Confederación Hidrográfica del sur de España. Los caudales del manantial de Jimera de Lívar y del Charco del Moro se han calculado a partir de aforos hidroquímicos con NaCl, mediante la medida de conductividad eléctrica en el agua. En el caso del manantial del Charco del Moro, que emerge directamente en el cauce del Río Guadiaro, los valores de caudal se obtuvieron por un aforo diferencial aguas arriba y aguas abajo del punto de descarga.

Los trazadores utilizados para el ensayo han sido *Uranina* (*Acid Yellow 73*, CI: 45 350, CAS: 518-47-8), *Sulforodamina-B* (*Acid Red 52*, CI: 45 100, CAS: 3520-42-1) y *Eosina* (*Acid Red 87*, CI: 45 380, CAS: 17372-87-1). El criterio de elección de los trazadores ha estado condicionado por la posible interferencia con la *Uranina*, trazador indiscutible en este tipo de experimentos, dado que tiene mayor intensidad de fluorescencia y menor interacción con el medio (Käss, 1998). La *Eosina* presenta ligeras interferencias con la *Uranina* (Käss, 1998); sin embargo, las modernas metodologías analíticas permiten diferenciar ambas sustancias en una misma muestra de agua. La *Sulforodamina-B* tiene tasas de adsorción con el medio relativamente bajas y no sufre interferencias con la *Uranina*. Los tres trazadores emiten un pico de fluorescencia en longitudes de onda distintas. Por lo tanto, una posible presencia de los tres trazadores en las aguas a muestrear no presentaría problemas durante la detección y separación por el método analítico.

Se inyectaron 3 kg de cada uno de los trazadores. Los lugares de inyección se seleccionaron teniendo en cuenta los conocimientos geomorfológicos, estructurales e hidrogeológicos disponibles.

La *Uranina* y la *Sulforodamina-B* se inyectaron el día 25 de noviembre de 2002, a las 15:00 y 18:00 horas, respectivamente, aprovechando la existencia de corrientes de agua que se infiltraban en sendos sumideros kársticos. La *Uranina* se vertió en uno de los sumideros donde se filtra el arroyo que circula por el polje de los Llanos de Lívar, con un caudal estimado de 30 L/s, y la *Sulforodamina-B* se inyectó en la Sima del Republicano, donde se filtra el Arroyo de los Álamos, cuyo caudal se estimó en 20 L/s. La inyección de la *Eosina* se realizó el día 26 de noviembre de 2002 de forma artificial (mediante vaciado de una cisterna de agua), al dejar de ser activo el sumidero kárstico del Polje de Pozuelo.

El muestreo de agua en los manantiales más cercanos a los puntos de inyección (Cueva del Gato, Benaoján y Jimera de Lívar) se inició antes de la primera inyección, para caracterizar de forma inequívoca la llegada y el tránsito de los trazadores por el acuífero. En la surgencia de Charco del Moro se empezó a muestrear un día después de la primera inyección, dada la mayor distancia a los puntos de inyección; en este caso fue necesario tomar muestras en el Río Guadiaro aguas arriba y aguas abajo de la surgencia para determinar la cantidad de trazador aportada por el manantial. Por consiguiente, la recogida de muestras comenzó el día 25 de noviembre de 2002 y finalizó el 9 de diciembre de 2002 en los manantiales de la zona de Jimera de Lívar y el día 18 del mismo mes en el resto de manantiales (tabla I). El total de muestras recogidas en el ensayo ha estado comprendido entre 48 (Cueva del Gato y Jimera de Lívar) y 61 (Benaoján).

Las muestras se tomaron en frascos de cristal oscuro de 60 cm³ y se almacenaron en oscuridad y refrigeradas para evitar la fotodegradación del trazador y aminorar la actividad microbiana, procesos causantes de la pérdida de concentración de trazador en el agua. Los análisis de las muestras han consistido en la medida de los espectros de fluorescencia de

	Inicio muestreo	Fin muestreo	Número de muestras
Gato	25-nov-02	18-dic-02	48
Benaoján	25-nov-02	18-dic-02	61
Jimera de Lívar	25-nov-02	9-dic-02	48
Charco del Moro (Aguas arriba)	26-nov-02	18-dic-02	52
Charco del Moro (Aguas abajo)	26-nov-02	18-dic-02	52

Tabla I.- Periodos de muestreo y número total de muestras recogidas en los manantiales controlados durante el ensayo de trazador.

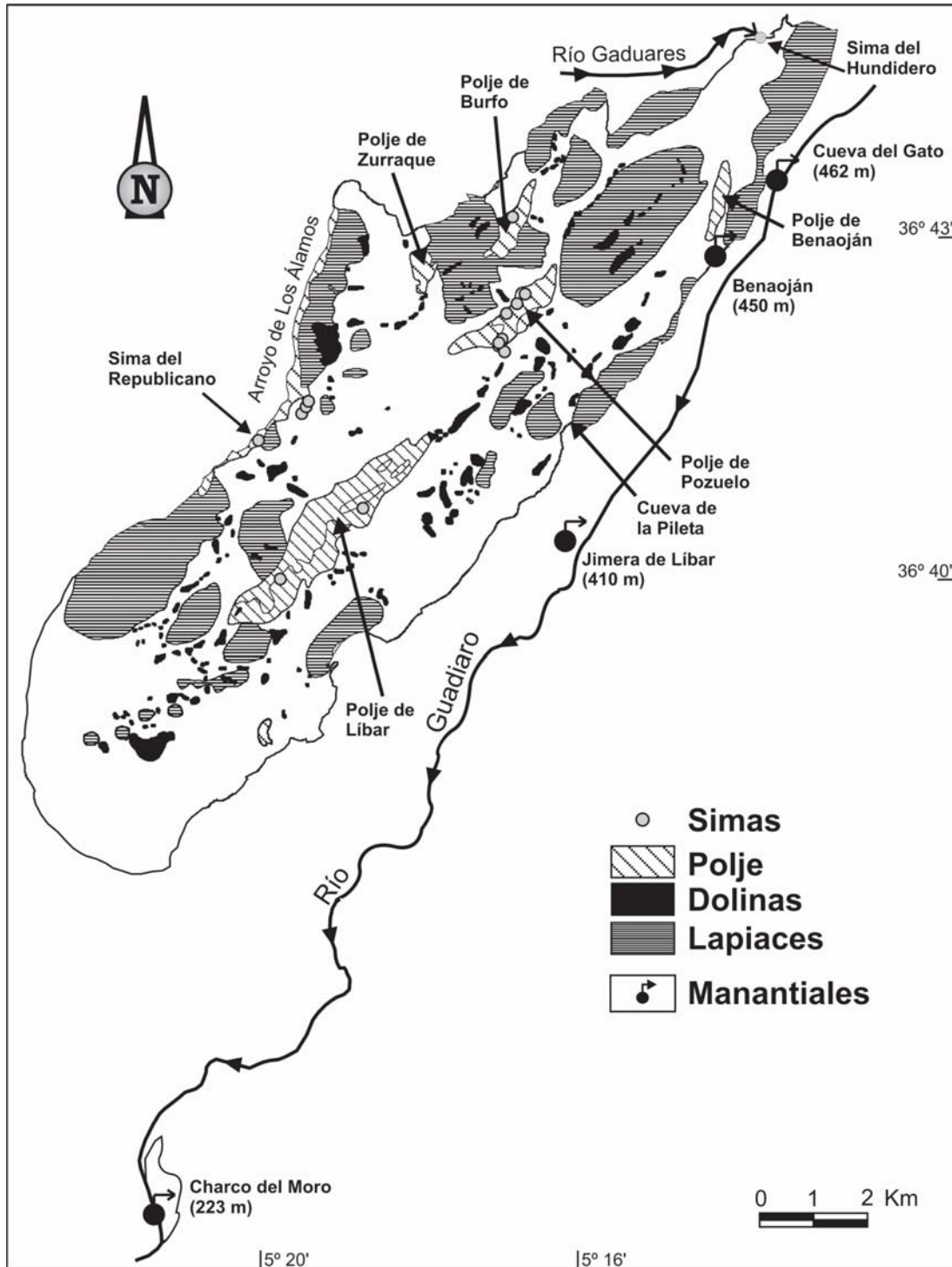


Figura 2.- Esquema geomorfológico e hidrogeológico, simplificado de Delannoy (1987).

los trazadores con un espectrómetro de luminiscencia Perkin Elmer LS-50B, dotado de barrido sincronizado, que ha permitido estudiar de forma conjunta los espectros de excitación y emisión. Los límites de detección para la Uranina, Eosina y Sulforodamina B han sido, respectivamente, de 0,05 mg/L, 0,06 mg/L y 0,03 mg/L. Todos los análisis se han realizado, en un plazo inferior a una semana, en el laboratorio del Departamento de Geología Aplicada de la Universidad de Karlsruhe (Alemania).

Resultados

Pluviometría e hidrogramas de los manantiales durante el ensayo de trazador

Antes de la inyección de los trazadores se registró un periodo de precipitaciones importantes, entre los días 13 y 24 de noviembre de 2002 (Fig. 3). La precipitación total durante ese periodo, en la estación de los Llanos de Pozuelo, fue de 265 mm, con un valor máximo de 75

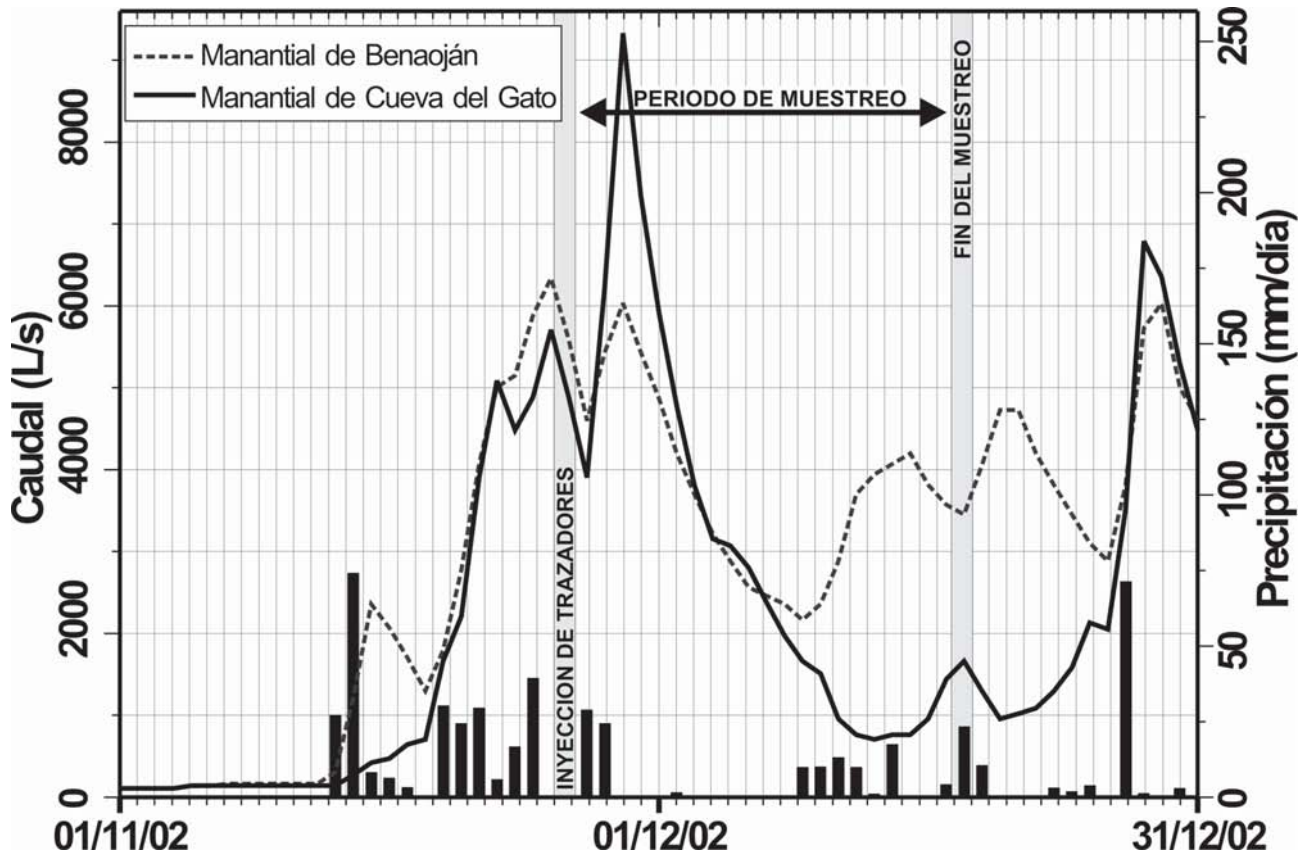


Figura 3.- Hidrogramas de los manantiales de Cueva del Gato y Benaoján e hietograma del pluviógrafo situado en Llanos del Pozuelo, durante el periodo comprendido entre el 1 de noviembre y el 31 de diciembre de 2002.

mm el día 14 de noviembre. Desde la inyección hasta el final del muestreo se registraron dos periodos de precipitación sobre el sistema, el ocurrido durante los días 27 y 28 de noviembre (> 25 mm) y precipitaciones aisladas de menor intensidad entre los días 9 y 14 de diciembre de 2002, siempre inferiores a 20 mm.

La inyección de los trazadores en la Sierra de Lívar se llevó a cabo en un contexto hidrodinámico general de crecida en los manantiales, como se puede observar en los hidrogramas de las surgencias de la Cueva del Gato y de Benaoján (Fig. 3). Estos manantiales presentaban caudales bajos (< 100 L/s) antes del periodo de lluvias y, como consecuencia de éstas, el caudal aumentó progresivamente hasta alcanzar valores por encima de 5.000 L/s. Al comienzo del periodo de muestreo tuvo lugar una importante crecida y durante el resto del periodo se produjo la decrecida, aunque hubo un aumento de caudal en ambos manantiales al final del intervalo de muestreo.

En los manantiales de Jimera de Lívar y del Charco del Moro no existen estaciones de aforo y se realizaron medidas puntuales de caudal mediante aforos químicos. Los tres aforos realizados en el manantial de Jimera de Lívar, entre los días 26 y 28 de noviembre, proporcionaron valores comprendidos entre 0,65 y 0,75 m^3/s , con un caudal medio de 0,70 m^3/s . En el manantial del Charco del Moro, un aforo con 50 kg de NaCl (27 de noviembre de 2002), obtenido por diferencia entre el caudal medido aguas arriba y

aguas abajo del punto de surgencia, arrojó un valor cercano a 9,3 m^3/s ; aunque se trata de un valor estimativo dadas las limitaciones propias del procedimiento de medida y las condiciones de flujo en el cauce del Guadiaro.

Trazadores

Los resultados obtenidos a partir del análisis de los diferentes trazadores en las muestras de agua de los manantiales se resumen en la tabla II y en la figura 4.

En el manantial de la Cueva del Gato, la primera detección de *Eosina* tuvo lugar 58 horas después de la inyección, coincidiendo con la concentración máxima (0,81 mg/L) por lo que la velocidad de flujo más rápida coincide con la velocidad de flujo dominante, siendo ambas de 90 m/h. En este manantial no se detectó la *Uranina* ni la *Sulfurodamina B*.

En el manantial de Benaoján se registraron los trazadores *Eosina* y *Uranina* y no se detectó *Sulfurodamina B*. La primera llegada de *Eosina*, a las 72 horas de la inyección, permite estimar una velocidad máxima de flujo de 53 m/h. La *Uranina* se detectó a las 223 horas y el pico de concentración (0,73 mg/L) se alcanzó a las 262 horas de la inyección. La velocidad de flujo más rápida para este trazador es 43 m/h, con una velocidad de flujo dominante de 36 m/h.

En el manantial de Jimera de Lívar sólo se ha detectado *Uranina* a las 65 horas del inicio de la inyección,

por lo que el trazador se ha trasladado a una velocidad máxima de 77 m/h. Se observó una ligera coloración verdosa en el agua de la surgencia debido a las concentraciones de trazador alcanzadas durante las primeras horas de paso de la nube (> 5 mg/L).

En el manantial de Charco del Moro, las muestras recogidas aguas arriba contenían *Uranina* y *Eosina*, debido al aporte de los manantiales de Cueva del Gato, Benaoján y Jimera de Líbar. Aguas abajo del punto de surgencia, las concentraciones de ambos trazadores pueden ser congruentes con la dilución provocada por un caudal de descarga superior a 9 m³/s (tabla II), por lo que no se ha podido constatar que la *Uranina* y la *Eosina* hayan salido por esta surgencia. Sin embargo, la *Sulforodamina B* sólo se detectó aguas abajo, lo que indica que la salida se ha producido por este manantial. La primera llegada de *Sulforodamina B* se produjo a las 122 horas (Velocidad máxima = 119 m/h), pero no fue hasta las 134 horas cuando se alcanzó la concentración máxima (0,85 mg/L), lo que ha permitido evaluar la velocidad dominante en 108 m/h. Las velocidades de llegada del trazador a este manantial han sido las mayores del ensayo.

Por otra parte, la concentración de *Eosina* que se determinó aguas arriba del manantial del Charco del Moro fue mayor que la analizada en las aguas del manantial de Benaoján o de Cueva del Gato, hecho que sólo puede ser debido a una descarga no controlada ha-

cia el Río Guadiaro, posiblemente aguas arriba del manantial de Jimera de Líbar, en el cual no se reconoció *Eosina* (Fig. 4).

La tasa de recuperación de trazador ha sido variable, entre un 13% para la *Eosina* y un 74% para la *Sulforodamina B*. Este último dato es aproximado dado el carácter estimativo del caudal medido mediante aforo químico en el manantial de Charco del Moro.

Interpretación

La primera interpretación que cabe hacer del ensayo de trazadores realizado es que, en una situación de aguas altas o de crecida hidrodinámica, la mayor parte de los afloramientos carbonáticos de la Sierra de Líbar constituyen el área de recarga de los manantiales que existen en su borde este y que vierten sus aguas al cauce del Río Guadiaro.

Las curvas de *Eosina* en los manantiales de la Cueva del Gato y Benaoján, y de *Uranina* en Jimera de Líbar, muestran, en general, distribuciones propias de acuíferos kársticos, con ascensos y descensos muy acusados de la curva de respuesta, lo que indica un tránsito rápido de un flujo dominante proveniente de las áreas de inyección (áreas de recarga).

En el manantial de Jimera de Líbar se observa un ligero aumento de la concentración de *Uranina*, entre las 75 y 100 horas, lo que debe relacionarse con una interferencia

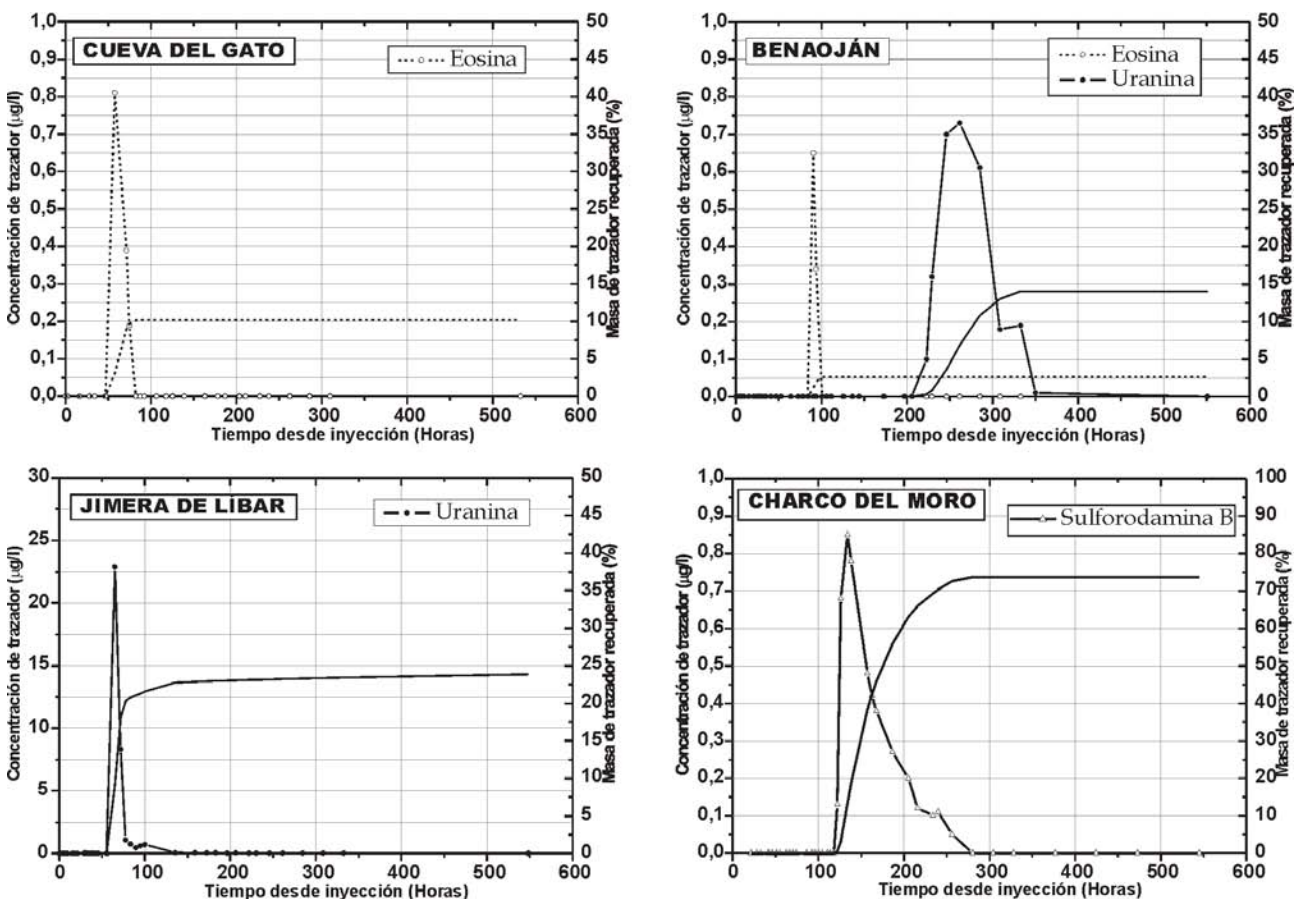


Figura 4.- Curvas de concentración y de masa recuperada de trazador en los principales manantiales controlados durante el ensayo.

3 Kg Eosina [EOS]. Inyección en los Llanos del Pozuelo	Manantiales				Unidad
	Cueva del Gato	Benaoján	Jimera de Líbar	Charco del Moro	
Distancia al punto de inyección	5,2	3,8	4,5	18,5	km
Tiempo de primera detección	58	72	-	-	h
Tiempo hasta conc. max (pico)	58	72	-	-	h
Máxima concentración	0,81	0,65	-	-	µg/L
Mayor velocidad de flujo	90	53	-	-	m/h
Velocidad flujo dominante (pico)	90	53	-	-	m/h
Caudal medio manantiales	4,40	3,45	0,70	9,3*	m ³ /s
Tasa de recuperación	10,2	2,7	-	-	%

3 Kg Uranina [URN]. Inyección en los Llanos de Líbar	Manantiales				Unidad
	Cueva del Gato	Benaoján	Jimera de Líbar	Charco del Moro	
Distancia al punto de inyección	11,5	9,5	5,0	12,2	km
Tiempo de primera detección	-	223	65	-	h
Tiempo hasta conc. max (pico)	-	262	65	-	h
Máxima concentración	-	0,73	22,88	-	µg/L
Mayor velocidad de flujo	-	43	77	-	m/h
Velocidad flujo dominante (pico)	-	36	77	-	m/h
Caudal medio manantiales	4,40	3,45	0,70	9,3*	m ³ /s
Tasa de recuperación	-	14,1	23,8	-	%

3 Kg Sulforodamina B [SRB]. Inyección en la Sima del Republicano	Manantiales				Unidad
	Cueva del Gato	Benaoján	Jimera de Líbar	Charco del Moro	
Distancia al punto de inyección	10,5	9,0	6,0	14,5	km
Tiempo de primera detección	-	-	-	122	h
Tiempo hasta conc. max (pico)	-	-	-	134	h
Máxima concentración	-	-	-	0,85	µg/L
Mayor velocidad de flujo	-	-	-	119	m/h
Velocidad flujo dominante (pico)	-	-	-	108	m/h
Caudal medio manantiales	4,40	3,45	0,70	9,3*	m ³ /s
Tasa de recuperación	-	-	-	73,7**	%

Tabla II.- Principales parámetros hidráulicos deducidos del ensayo de trazador. (* Caudal aproximado, ** Tasa de recuperación aproximada).

de varios flujos subterráneos originados por los periodos lluviosos después de la inyección del trazador.

En el resto de las recuperaciones de trazador (Uranina en Benaoján y Sulforodamina B en el Charco del Moro), se observa un aumento progresivo de la concentración en el tramo ascendente de ambas curvas, asimetría en la forma, aparición de una segunda moda en el tramo de descenso y mayor tiempo de paso de la nube de trazador. Todas estas características coinciden en manantiales situados a mayor distancia del punto de inyección (tabla II), donde el trazador sufre mayor dispersión longitudinal.

La aparición de la *Eosina* en los manantiales de Cueva del Gato y de Benaoján (Fig. 5) indica que el agua infiltrada en el sector del polje de Pozuelo se drena por el sector nordeste. El hecho de que la *Eosina* llegara antes al manantial de la Cueva del Gato que al de Benaoján (tabla II), que se detectara en mayor con-

centración y durante más tiempo y que presente tasas de recuperación cinco veces superior, a pesar de que el primero está más lejos del punto de inyección, implica que la karstificación funcional está más desarrollada hacia la Cueva del Gato.

Por su parte, la presencia de *Uranina* procedente del polje de los Llanos de Líbar, el de mayor tamaño en el área de estudio, indica un drenaje rápido (77 m/h) y de mayor entidad (tasa de recuperación = 24%) hacia el manantial de Jimera y un drenaje más lento (43 m/h), de menor cuantía, hacia el manantial de Benaoján, donde se ha recuperado el 14% del trazador. En el manantial de la Cueva del Gato no se detectó *Uranina*, lo cual podría deberse a dilución del trazador o a que la cota de este manantial es la más alta de los puntos de descarga.

La ausencia de *Uranina* en el manantial de la Cueva del Gato y de *Eosina* en el manantial de Jimera de

Líbar permiten delimitar el flujo subterráneo en el acuífero. Así, las aguas de infiltración del polje de Pozuelo, donde se inyectó *Eosina*, se drenan principalmente hacia el nordeste (manantial de la Cueva del Gato) y de forma secundaria hacia el de Benaoján. El flujo del agua subterránea hacia el nordeste puede estar condicionado por la inmersión hacia el mismo lugar de los ejes de los pliegues que constituyen la estructura de la sierra; es decir, la disposición estructural de los estratos parece haber condicionado la karstificación y el flujo subterráneo actual. En este sentido el manantial de la Cueva del Gato, situado a la cota 462 m, debe ser un punto de descarga del sistema relativamente más antiguo que el manantial de Benaoján (450 m).

El agua infiltrada en el sector del polje de Líbar, donde se inyectó *Uranina*, es drenada hacia el manantial de Jimera de Líbar y, en menor medida, hacia Benaoján (Fig. 5). El flujo de dirección oeste-este parece estar relacionado con el desarrollo de la karstificación a favor de fracturas transversales a los pliegues.

El agua del Arroyo de los Álamos que se infiltra en la Sima del Republicano se drena fundamentalmente por la surgencia de Charco del Moro (Fig. 5) con una velocidad de 108-119 m/h, claramente superior a las velocidades obtenidas en los otros manantiales de la Sierra de Líbar. La diferencia entre el flujo de entrada por la Sima del Republicano (~ 20 L/s) y el de salida por el Charco del Moro (> 9 m³/s), durante el ensayo, permite concluir que el drenaje de dicho manantial proviene, en su mayor parte, del agua de recarga sobre los afloramientos cabonados del borde sudoeste del acuífero. La tasa de recuperación de *Sulforodamina B*, por encima del 70%, junto con la alta velocidad del agua subterránea, indica que el flujo discurre por conductos kársticos bien desarrollados. Esta deducción está en consonancia con las exploraciones subacuáticas realizadas por espeleólogos en el conducto kárstico que alimenta la surgencia del Charco del Moro.

El hecho de que no se haya recuperado el 100% de los trazadores inyectados puede ser interpretado por la existencia de descargas no controladas en el borde este (Fig. 5); sin embargo, se desconoce el valor de la descarga y, por tanto, la masa drenada por estas surgencias. Tampoco se conocen con precisión los caudales de los manantiales de Charco del Moro y de Jimera de Líbar. Otra posible interpretación es que se haya producido dilución y/o retención de los trazadores en el medio. Y, finalmente, otra explicación complementaria puede ser el almacenamiento, de parte del trazador, en las fisuras y pequeñas aberturas de la roca, durante el periodo de aguas altas y posterior drenaje durante la decrecida y el agotamiento, después del periodo de muestreo.

Además de los aspectos propiamente hidrogeológicos, cabe mencionar que la baja recuperación de la *Eosina* ha debido estar relacionada con la inyección artificial, realizada cuando los sumideros kársticos ya no estaban activos, de modo natural, y posiblemente

quedó retenida en el medio y se drenó con posterioridad al periodo de muestreo (en otras crecidas) por los manantiales de Cueva del Gato y Benaoján.

Conclusiones

El ensayo de trazadores que se ha efectuado en el acuífero kárstico de la Sierra de Líbar ha permitido constatar que la mayor parte de sus recursos se drenan hacia el cauce del Río Guadiaro, de forma visible, a través de manantiales como los de la Cueva del Gato, Benaoján y Jimera y posiblemente mediante descargas no controladas en el borde este. A los dos primeros manantiales llega agua del tercio más septentrional del acuífero. El sector central de la sierra se drena prioritariamente por el manantial de Jimera de Líbar con flujos de menor cuantía hacia el de Benaoján. Por su parte, la surgencia de Charco del Moro es el principal punto de descarga del agua que se infiltra en la Sima del Republicano (Arroyo de los Álamos) y de los afloramientos cabonáticos del borde sudoeste del acuífero.

Las direcciones de flujo subterráneo deducidas a partir del ensayo de trazadores indican que la karstificación en el sector más oriental parece haber estado condicionada por la estructura geológica, un antiforame con pequeña inmersión hacia el nordeste, y por fracturas paralelas a los ejes de los pliegues y transversales. Las velocidades de flujo calculadas son propias de acuíferos kársticos con un elevado grado de karstificación funcional, lo cual está en consonancia con la interpretación efectuada previamente a partir de otros métodos hidrogeológicos. Esta karstificación funcional parece que está más desarrollada hacia el manantial de la Cueva del Gato que hacia el de Benaoján.

Las velocidades de flujo obtenidas corroboran la elevada vulnerabilidad intrínseca a la contaminación que presenta la Sierra de Líbar en su conjunto y, en particular, sus sumideros kársticos. Sin embargo, se ha demostrado que un contaminante que se infiltre a través de la Sima del Republicano afectaría a la surgencia de Charco del Moro, pero difícilmente al resto del acuífero de la Sierra de Líbar que se drena por los manantiales de Cueva del Gato, Benaoján y Jimera de Líbar.

Conviene precisar que los trazadores utilizados pueden sufrir algunas reacciones de interacción con el medio kárstico, pero tienen un comportamiento cercano al conservativo, por lo que la atenuación en las concentraciones de trazador es consecuencia, principalmente, de los procesos hidrodispersivos en el medio. Además, la inyección se ha realizado en un periodo de aguas altas, situación durante la cual se produce un tránsito rápido por la zona no saturada, situación poco favorable desde el punto de vista de la protección de recursos hídricos. En una situación hidrodinámica de aguas bajas se produciría un tránsito más lento a través de la zona no saturada y una atenuación del propio contaminante por procesos físico-químicos y reacciones de interacción contaminante-roca.

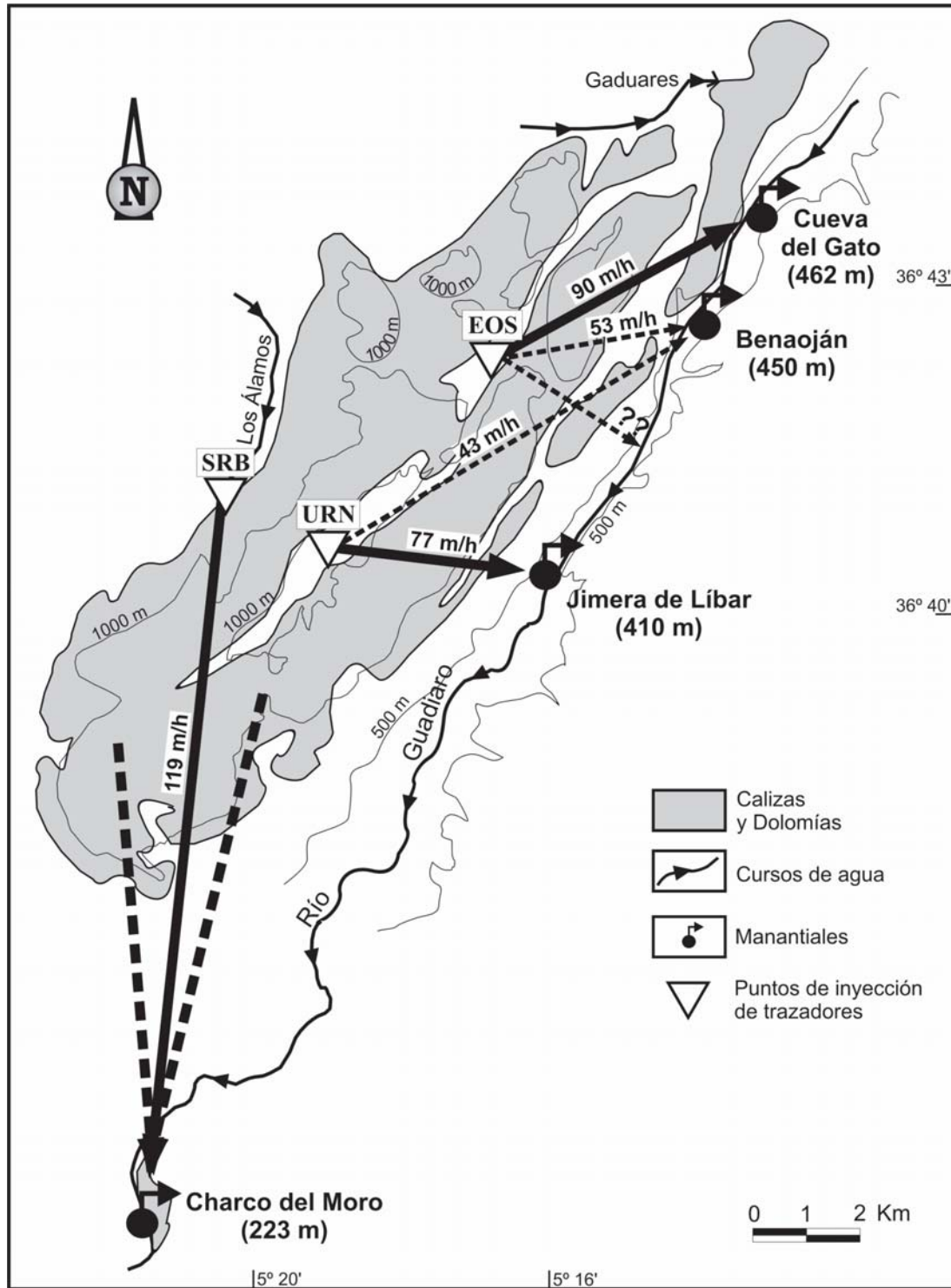


Figura 5.- Conexiones hidrogeológicas entre los puntos de inyección (EOS: *Eosina*, URN: *Uranina* y SRB: *Sulforodamina B*) y los puntos de control, deducidas del ensayo de trazadores.

Por tanto, en las condiciones hidrodinámicas de este ensayo, un contaminante conservativo que se infiltrara en este acuífero tardaría, como mínimo, entre 3 y 5 días en alcanzar las fuentes de abastecimiento, lo cual implica una contaminación previa de la zona saturada y de los recursos hídricos, con tiempos de persistencia en los manantiales entre 24 horas para los flujos rápidos y 6 días para los flujos más lentos.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los Proyectos PB98-1397 y REN2002-01797/HID de la DGI y al Proyecto IGCP-448 de la UNESCO, realizada conjuntamente por miembros del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía) y el Grupo de Geología Aplicada de la Universidad de Karlsruhe (Alemania) en el marco de la Acción COST 620 y de la Acción Integrada HA2002-0128. Se

agradece la colaboración prestada por A.J. Angulo, M.A. Arrojo, A.J. Avilés, V. Casas, A. Cobos, M. Cordero, C. Díaz, D. González, M.A. Guirado, A. Jiménez, P. León, A. Leyva, S. Martín y L. Torres durante el ensayo. También se agradecen las críticas y sugerencias del Dr. Javier González Yélamos, de un revisor anónimo y del editor que han contribuido a mejorar el manuscrito original.

Referencias

- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo I., Vías, J.M., Neukum, C., Brechenmacher, J., Carrasco, F., Hötzl, H., Jiménez, P., Perles, M. J. y Sinreich, M. (2004): Sierra de Líbar, Southern Spain. En: *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, Final Report of COST Action 620* (F. Zwahlen, Ed.). European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development; Brussels, Luxemburg, 183-199.
- Antigüedad, I., Ibarra, V. y Morales, I. (1990): Experiences de traçages des systèmes karstiques en Biscaye (Pays Basque). *Memoires of IAH, XXII* (Part. I): 212-215.
- Benavente, J. y Mangin, A. (1984): Aplicación del análisis de series de tiempo al sistema espeleológico Huididero-Gato. En: *I Congreso Español de Geología*. Comunicaciones, 3: 541-553.
- Brechenmacher, J. (2002): *Application of the PI method for Groundwater vulnerability mapping in the karst aquifer of Sierra de Líbar (Andalusia, Spain)*. Processing and analysis with GIS. Tesis de Licenciatura, Univ. de Karlsruhe, 109 p.
- Carrasco, F., Jiménez, P., Andreo, B., López Chicano, M., Marín, A., Liñán, C. y Vadillo, I. (2001): Estudio comparativo preliminar del funcionamiento hidrogeológico de varios acuíferos carbonatados de la Cordillera Bética. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 23: 381-391.
- Delannoy, J.J. (1987): *Reconocimiento biofísico de Espacios Naturales de Andalucía*. Junta de Andalucía, Casa de Velázquez, 50 p. Madrid.
- Durán, J.J. y López Martínez, J. (1992): Application of geological, hydrochemical and isotopic methods for hydrogeological investigation of selected Spanish karst regions. *International Contributions to Hydrogeology*, 13: 43-60.
- Durán, J.J. (1996): *Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo Occidental*. Tesis doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 409 p.
- González-Yélamos, J. (1999): Ensayos de trazadores en acuíferos kársticos: desarrollo histórico y anecdotario. En: *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico* (Andreo, B., Carrasco, F. y Durán, J.J., Eds.). Patronato de la Cueva de Nerja, 441-451.
- Gracia, F.J., Benavente, J. y Anfuso, G. (2000): Implicaciones endokársticas de la evolución geomorfológica de los poljes de Zurraque y Burfo (Sierra de Líbar, Málaga). En: *Actas del I Congreso Andaluz de Espeleología*, 341-351.
- Jiménez, P., Carrasco, F., Andreo, B., Durán, J.J. y López-Geta, J.A. (2002): Caracterización de acuíferos carbonáticos del sur de España a partir de su respuesta hidrodinámica. En: *Karst and Environment* (F. Carrasco, J.J. Durán, y B. Andreo, B., Eds.). Fundación Cueva de Nerja, 105-113.
- Käss, W. (1998): *Tracing technique in geohydrology*. Rotterdam, Balkema, 581 p.
- Longo A., Andreo B., Carrasco, F., Cucchi, F., Vías, J. y Jiménez, P. (2001): Comparison of two contamination vulnerability maps obtained by the SINTACS method in two carbonate aquifers (S Spain). En: *Proceedings of the 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*, 233-236.
- Martín-Algarra, A. (1987): *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Sector Occidental)*. Tesis doctoral, Univ. Granada, 1171 p.
- Mayoral, J., Huisa, J.A. y Castejón, J. (2000): Prospecciones y exploraciones espeleológicas en la zona de Montejaque y Benaolán (Málaga). En: *Actas del I Congreso Andaluz de Espeleología*, 307-322.
- Millán, J. y Wiczorek, J.C. (2000): Adelanto de las exploraciones espeleológicas en el polje de Líbar (Montejaque, Málaga). En: *Actas del I Congreso Andaluz de Espeleología*, 267-292.
- Moreno, F. (1990): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 1.050 (Ubrique)*. ITGE, Madrid.
- Pedroche, A. y Mendoza, D. (2000): Investigaciones espeleológicas en el sector nordeste del polje del Republicano. En: *Actas del I Congreso Andaluz de Espeleología*, 299-305.
- Sanz, O. y de Pablo, J.G. (1987): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 1.064 (Cortes de la Frontera)*. IGME, Madrid.
- Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. y Jiménez, P. (2002): Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. En: *Karst and Environment* (F. Carrasco, J.J. Durán, y B. Andreo, B., Eds.). Fundación Cueva de Nerja, 75-83.
- Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. y Jiménez, P. (2004): The COP method. En: *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, Final Report of COST Action 620* (F. Zwahlen, Ed.). European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development; Brussels, Luxemburg, 163-172.

Manuscrito recibido el 21 de enero de 2004

Aceptado el manuscrito revisado el 1 de junio de 2004