

Análisis de la respuesta a la recarga en carbonatos alpujárrides mediante el estudio hidrodinámico, hidroquímico e isotópico del manantial del Carcabal (La Peza, Granada)

A. González-Ramón⁽¹⁾, A. Delgado⁽²⁾ y M. Mudarra⁽³⁾

(1) Oficina de Proyectos del IGME en Granada, Urb. Alcázar del Genil, 4, Edf. Zulema bajo, 18006 Granada, Spain. Tel: +34 958 183143/46
antonio.gonzalez@igme.es

(2) Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Estación Experimental del Zaidín, Granada, Spain.
antonio.delgado@eez.csic.es

(3) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, Facultad de Ciencias, Departamento de Geología, Universidad de Málaga, 29071 Málaga, Spain.
mmudarra@uma.es

RESUMEN

Se presenta un estudio sobre las características hidrodinámicas, físico-químicas e isotópicas de un manantial asociado a un modesto acuífero kárstico situado en la ladera norte de Sierra Nevada en la provincia de Granada. El acuífero está constituido por materiales carbonatados del dominio Alpujárride de la Cordillera Bética, y tiene la particularidad de mostrar una elevada karstificación superficial, con presencia de dolinas de gran tamaño, lo que no es común en este tipo de materiales. El estudio se ha realizado a partir de los datos de caudales y climáticos obtenidos entre los años 2006 y 2008 en una estación de aforos y una estación meteorológica construidas por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), y de los datos físico-químicos recopilados durante el año 2008. Del estudio hidrodinámico se concluye que el acuífero se comporta como un acuífero kárstico con una red de conductos bien desarrollada en el invierno, cuando el periodo húmedo previo a la crecida es poco prolongado; en cambio, en la primavera, se comporta como un acuífero kárstico complejo. La información hidroquímica e isotópica permite diferenciar las aguas que circulan con rapidez por el acuífero en periodos de abundante recarga de las aguas almacenadas en la zona saturada. El trabajo aporta importante información en una zona en la que existe un vasto conjunto de acuíferos carbonatados poco estudiados debido a la complejidad de sus descargas, de muy difícil control, y a la inexistencia de datos climáticos previos en su entorno más inmediato.

Palabras clave: Acuífero kárstico, dolinas, hidrograma, isótopos, quimiograma

Analysis of the response to recharge in Alpujárride carbonates via a hydrodynamic, hydrochemical and isotopic study of the Carcabal spring at La Peza, Granada

ABSTRACT

We have studied the hydrodynamic, physical-chemical and isotopic characteristics of a spring associated with a smallish aquifer located in the province of Granada on the northern slope of the Sierra Nevada. The aquifer, composed of carbonate rocks belonging to the Alpujarride domain in the Betic Cordillera, shows considerable surface karstification, with presence of large sinkholes, which is quite unusual in this type of rock. Our study was based on flow and climate data obtained between the years 2006 and 2008 at a gauging station and a weather station built by the Geological Survey of Spain, together with physical-chemical data collected during 2008. The hydrodynamic study concludes that the aquifer behaves as a karstic aquifer during winter, with a well developed pipeline network. In the spring it behaves as a complex karst aquifer. From the hydrochemical and isotopic data it is possible to differentiate the water that flows quickly through the aquifer in periods coinciding with abundant recharge of the water stored in the saturated zone. Our results provide important information about an area where there are a very large number of carbonate aquifers that have hardly been little studied to date due to the complexity of their drainage systems, which are very difficult to monitor, and often a complete lack of meteorological data for their immediate surroundings.

Key words: chemographs, hydrographs, isotopes, karstic aquifer, sinkhole

Introducción

Los carbonatos alpujárrides de la Cordillera Bética no suelen presentar una karstificación superficial importante (Pulido, 1980; Sánchez-Martos *et al.*, 1991;

Andreo, 1997; Pérez-Ramos y Andreo, 2007) debido a su naturaleza fundamentalmente dolomítica y al elevado grado de fracturación que a veces presentan (kakiritización). No obstante, existen zonas en las que se ha descrito la presencia de dolinas de hasta un

centenar de metros de diámetro, como en el entorno del Pico del Puerto, al sur de Játar (Pérez-Ramos y Andreo, 2007), o en las laderas del Dornajo, en la cuenca del río Monachil (Pulido, 1980), ambas en la provincia de Granada.

Los manantiales que se les asocian tienen, en muchas ocasiones, respuestas lentas y amortiguadas a las precipitaciones, indicio de una karstificación poco desarrollada, como en el manantial de Fuente Grande de Alfacar (Jiménez *et al.*, 2004) o los manantiales que drenan la Sierra de Lújar (Cardenal, 1993). Sin embargo, aunque escasos, hay ejemplos de manantiales con una respuesta rápida ante las precipitaciones e importantes picos de caudal de corta duración, como el manantial de la Fájara en el acuífero de Sierra Tejeda (Pérez-Ramos y Andreo, 2007), o algunos de los manantiales que drenan el acuífero de Sierra Blanca, (Andreo, 1997 y 2007). La mayoría de los investigadores que han trabajado en los carbonatos alpujárrides concluyen que éstos se comportan más como acuíferos fisurados que como acuíferos kársticos (Cardenal, 1993; Domínguez, 2000; Jiménez *et al.*, 2004).

Las unidades alpujárrides presentan mayor grado de metamorfismo en los mantos superiores que en los inferiores, y ha sido en los mantos superiores donde se han centrado la mayor parte de las investigaciones hidrogeológicas realizadas hasta ahora. Los mantos inferiores están formados por calizas muy poco metamorfizadas y además suelen encontrarse a cotas elevadas, al menos en el borde septentrional de Sierra Nevada, donde se centra este estudio.

El objetivo del trabajo es contribuir a comprender los procesos de infiltración y el comportamiento hidrogeológico de los carbonatos alpujárrides en la Cordillera Bética en su zona oriental, donde apenas se han realizado estudios en este sentido.

Descripción del acuífero del Carcabal

El cerro del Carcabal es un pequeño acuífero situado unos 25 km al este de la ciudad de Granada definido en Fernández-Chacón *et al.* (2004). Está constituido por carbonatos pertenecientes a la unidad inferior alpujárride o unidad de Padules, según la denominación propuesta por Sanz de Galdeano *et al.* (1995). La litología consiste en un paquete de calizas y, en menor medida, dolomías de unos 150 m de espesor, superpuestas a un conjunto de filitas que constituyen el sustrato impermeable.

El afloramiento de carbonatos tiene extensión en torno a 2 km², a cotas comprendidas entre 1595 m s.n.m. y 1960 m s.n.m.; su estructura es monoclinas con buzamientos entre 20 y 60° hacia el NE (figura 1).

La información existente sobre la posición del nivel piezométrico es la proporcionada por la cota a la que se ubican los manantiales. El manantial principal surge a 1595 m s.n.m. en un afloramiento de brechas que recubren la ladera norte, conectadas lateralmente con los carbonatos. En épocas de intensa recarga aparecen pequeños manantiales en diversos puntos de esta brecha (fotos 1 y 3 de la figura 2). En la ladera oriental se ubica otro manantial, que solo surge en épocas de abundante recarga. Este manantial, situado a 1738 m s.n.m., está directamente relacionado con los carbonatos y constituye el límite superior de las variaciones del nivel piezométrico de la zona de descarga.

En las zonas más elevadas y en la vertiente oriental, a partir de la cota 1720 m s.n.m., se han cartografiado 16 dolinas, alineadas en dirección NE-SO a N-S. El diámetro de las dolinas varía entre 40 y más de 300 m con un tamaño medio superior a 100 m y profundidad mayor de 10 m. En su mayoría se trata de dolinas de disolución, subcirculares, con pequeños relleños de *terra rossa* en su fondo y paredes asimétricas, con el flanco sur más abrupto y elevado, donde la nieve se acumula y aguanta más tiempo (foto 2 de la figura 2). También se observan algunas pequeñas dolinas de colapso de paredes verticales. La dolina de mayor dimensión aparece capturada en su borde nor-oriental por un pequeño cauce. Se han localizado también tres bocas de simas relacionadas con fracturas de dirección N-S y NE-SO.

Metodología

En 2006, el IGME construyó una estación de aforos (foto 1 de la figura 2) a unos 100 m aguas abajo de la zona de surgencia del manantial del Carcabal. Se trata de una estación de canal simple, con vertedero triangular de lámina delgada. La altura de la lámina de agua se mide con una periodicidad horaria gracias a un sensor tipo Thalimedes, la recogida de datos y el mantenimiento del canal se realiza cada mes. A 550 m al este de la estación, se construyó, a 1580 m s.n.m., una estación climatológica automatizada que permite medir la pluviometría y temperatura del aire con una periodicidad horaria. Las medidas en la estación de aforos comenzaron el 9 de septiembre de 2006 y en la estación climática el 16 de marzo de 2007. Los datos pluviométricos comprendidos entre estas dos fechas, han sido restituidos a partir de la estación meteorológica del embalse de Francisco Abellán, controlada por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y situada unos 10 km al NE. La restitución se ha hecho con la correlación

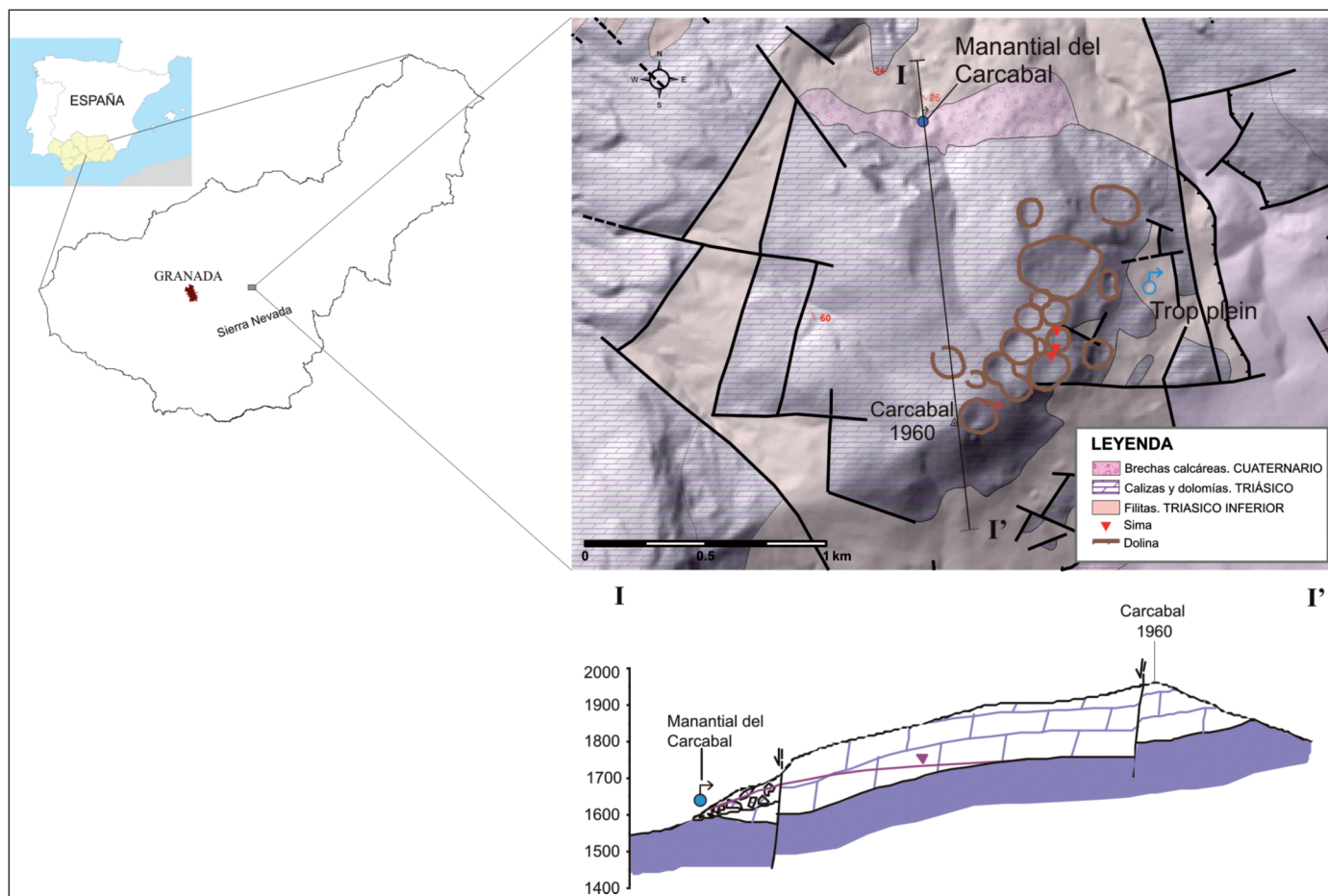


Figura 1. Plano hidrogeológico del acuífero del Carcabal, corte interpretativo y situación geográfica
 Figure 1. Hydrogeological map of the Carcabal aquifer, interpretative cross section and geographical location

entre los datos mensuales de ambas estaciones, y los valores han sido utilizados para el cálculo de la media de la pluviometría del periodo de control a efecto de evaluar la recarga, y para conocer los días en que se produjeron las precipitaciones previas a la crecida de febrero de 2007.

Se han analizado dos crecidas ocurridas en el año 2007 y la crecida principal de 2008 según la metodología propuesta por Mangin (1974-75). Esta metodología es suficientemente conocida y ha sido descrita en multitud de trabajos previos, un resumen de sus fundamentos puede encontrarse en Mangin (1994) y en muchas publicaciones centradas en el territorio español como por ejemplo: Obarti *et al.* (1988); Padilla *et al.* (1993); Jiménez *et al.* (2004).

Se analiza la serie de caudales con los criterios utilizados por Jiménez *et al.* (2002) y se comparan los resultados con los obtenidos por estos autores en otros manantiales del sur de España. El estudio hidrodinámico se completa con el análisis correlatorio y

espectral de toda la serie a partir del método propuesto por Mangin (1981) para su aplicación en acuíferos kársticos.

Entre febrero y septiembre de 2008 se llevó a cabo un muestreo en el agua drenada por el manantial con una periodicidad variable entre quincenal y semanal, 15 muestras en total. En la estación climatológica se ubicó un pluviocaptor para la recogida de muestras del agua de lluvia. La recogida se realizó cada vez que se produjo un evento lluvioso de importancia y como máximo uno o dos días después de haber ocurrido, para tratar de evitar procesos de evaporación. El total de muestras obtenidas fue de 7.

La toma de muestras en el manantial se realizó con medidas *in situ* de conductividad eléctrica, temperatura y pH. Los análisis químicos se llevaron a cabo en el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, y los análisis isotópicos en el laboratorio experimental del Zaidín del CSIC. Las determinaciones químicas realizadas han sido: bicar-



Figura 2. 1. Estación de aforos del manantial del Carcabal. 2. Aspecto de las dolinas del cerro del Carcabal. 3. Pequeño trop-plein asociado a la brecha de ladera en la que surge el manantial del Carcabal
 Figure 2. 1. Gauging station at the Carcabal spring. 2. View of dolines on the Carcabal hill. 3. Small overflow spring in the breccia from which the Carcabal spring flows

bonato, cloruro, fluoruro, nitrato, nitrito, amonio, sulfato, sodio, potasio, calcio, magnesio y carbono orgánico disuelto (DOC); los isótopos analizados han sido: ^{18}O , ^2H y ^{13}C .

Resultados

En la figura 3 se presenta el hidrograma de la evolución de caudales del manantial para el periodo comprendido entre septiembre de 2006 y julio de 2008. Se observan dos lagunas de información debidas a actos de vandalismo. En 2007, se registró una importante crecida en el mes de febrero, en la que el manantial alcanzó su pico máximo para el periodo considerado, 93 l/s, y dos crecidas de menor importancia, pero más prolongadas, entre abril y junio. En 2008, sólo se registró una crecida de importancia a finales de abril y mayo.

El caudal medio para el periodo considerado es de 6,8 l/s, con un máximo ya indicado de 93 l/s y un mínimo de 2,5 l/s. El coeficiente de variación para este

periodo es de 1,33 %. El valor medio de la precipitación fue de 530 mm y el de la temperatura de 12,8°C. La distribución de las precipitaciones es característica del clima mediterráneo, con dos periodos húmedos principales en otoño y primavera, y en menor medida en el invierno, y un periodo muy seco en el estiaje, con casi ausencia total de precipitaciones.

Caracterización hidrodinámica

La primera crecida fue consecuencia de las lluvias ocurridas en enero y febrero de 2007. En la figura 4A se muestra la curva de recesión, en la que se observa un primer agotamiento que comienza a los 12 días y tiene una duración de 24 días; se inicia con un caudal de 9,6 l/s y finaliza con 5,7 l/s. A continuación, se observa un segundo agotamiento de 17 días de duración interrumpido por las lluvias de abril, que finaliza con un caudal de 3,7 l/s.

Durante el mes de abril las lluvias fueron abun-

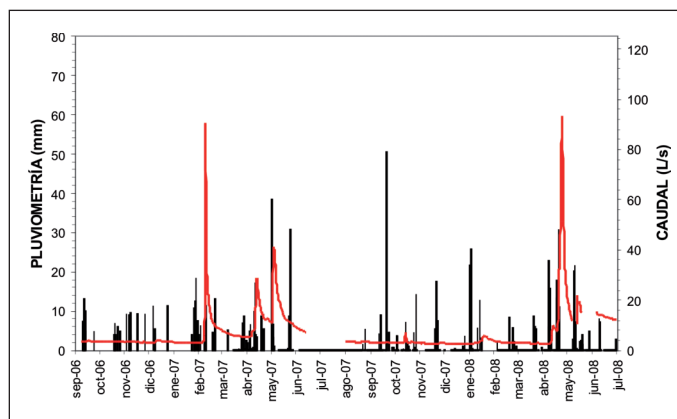


Figura 3. Evolución temporal del caudal del manantial del Carcabal y de la precipitación para el periodo comprendido entre septiembre de 2006 y julio de 2008

Figure 3. Hydrograph of the Carcabal spring and rainfall measurements from September 2006 to July 2008

dantes y generaron otra pequeña crecida, a la que le siguió otra mayor provocada por las primeras lluvias del mes de mayo, tras la que se inició el estiaje. Se ha analizado esta segunda crecida cuya curva de recesión se muestra en la figura 4B. Se observa un primer

agotamiento que comienza a los 14 días y una duración de unos 50 días; el caudal de inicio es de 13,5 l/s y el final de 4 l/s. Del segundo agotamiento se han estudiado 45 días con ausencia total de precipitaciones, el caudal final de este periodo es de 3,25 l/s deducido a partir de la prolongación de las rectas de ajuste en el gráfico.

La tercera crecida está relacionada con las precipitaciones ocurridas en abril de 2008 (figura 4C). Se observa un agotamiento que se inicia aproximadamente a los 12 días con un caudal cercano a 12 l/s, tiene una duración de 7 días y finaliza con algo más de 10 l/s interrumpido por las lluvias de principios de mayo.

En la tabla 1 se muestran los resultados del análisis de las curvas de recesión estudiadas.

Caracterización hidroquímica e isotópica

Agua de precipitación

En la tabla 2 se exponen los valores y parámetros estadísticos de los resultados del agua de lluvia analizada. Los diagramas de Piper y Schöeller-Berkaloff

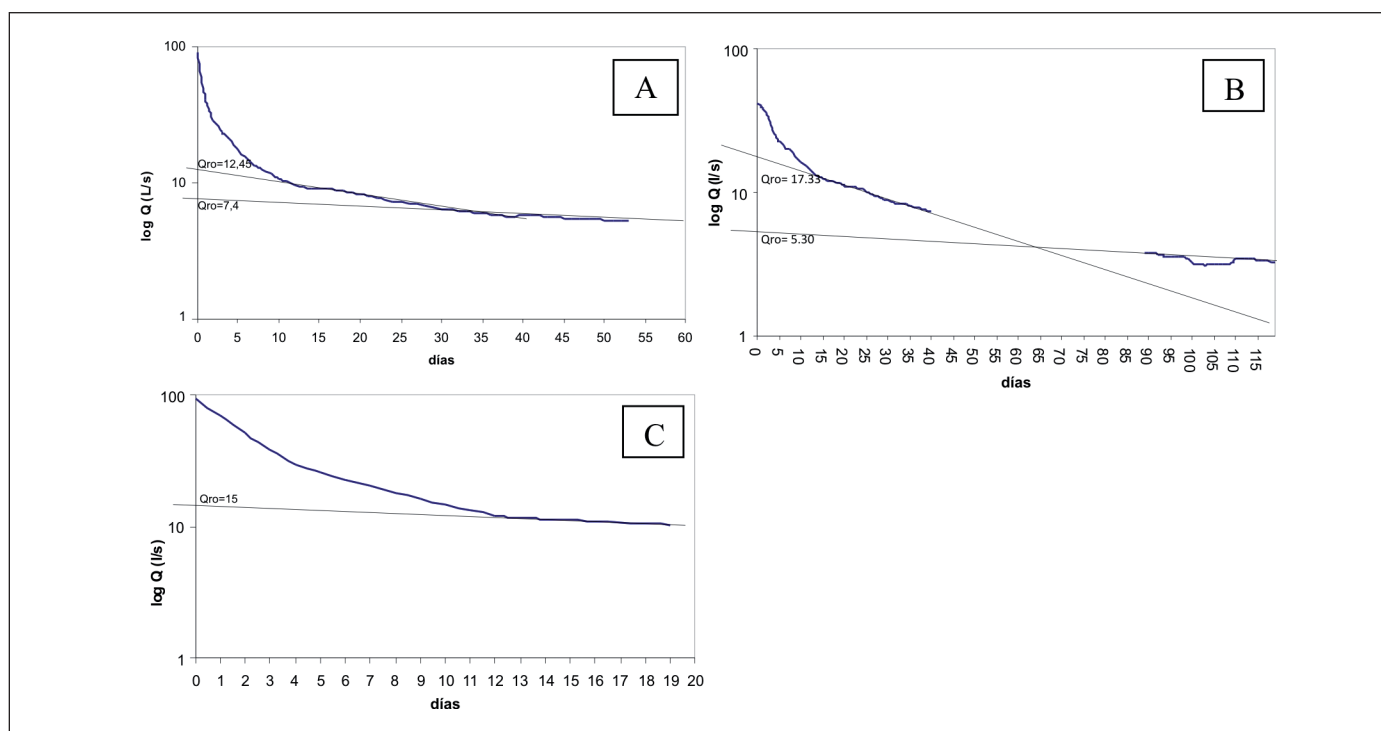


Figura 4. Curvas de recesión de las crecidas ocurridas en febrero de 2007 (A), mayo de 2007 (B) y abril-mayo de 2008 (C) a partir de valores medios diarios de caudal

Figure 4. Recession curves of February 2007 (A), May 2007 (B) and April-May 2008 (C) as recorded from daily average values of flow rate

CRECIDA feb 2007	α (días ⁻¹)	Vd (m ³)	k	i	η (días ⁻¹)	ϵ (días ⁻¹)	Clasf.
1 ^{er} agotamiento	$2,3 \times 10^{-2}$	46769	0,15	0,15	0,071	2,358	Tipo II
2 ^º agotamiento	$6,7 \times 10^{-3}$	86400	0,3	0,18	0,026	1,95	Tipo II
CRECIDA may 2007							
1 ^{er} agotamiento	$2,2 \times 10^{-2}$	69320	0,21	0,72	0,071	0,096	Tipo IV
2 ^º agotamiento	$4,3 \times 10^{-3}$	108356	0,32	0,73	0,015	0,17	Tipo IV
CRECIDA 2008	2×10^{-2}	65787	0,21	0,47	0,077	0,404	Tipo III

Tabla 1. Resultados obtenidos del análisis de las curvas de recesión en el manantial del Carcabal. α coeficiente de agotamiento, Vd Volumen dinámico, k e i parámetros de Mangin, η coeficiente de velocidad de infiltración y ϵ coeficiente de heterogeneidad

Table 1. Results obtained from an analysis of the recession curve of the Carcabal spring: α , depletion coefficient; Vd, dynamic volume; k and i, Mangin parameters; η , infiltration velocity coefficient; ϵ , heterogeneity coefficient

de la figura 5 muestran sus principales características hidroquímicas, e incluyen también las del manantial del Carcabal.

Las muestras de agua de lluvia se concentran, en el diagrama de Piper, en una nube relativamente uniforme. Se trata de agua bicarbonatada o bicarbonatada clorurada y generalmente cálcica. En el diagrama de Schöeller-Berkaloff se observa cómo el anión mayoritario es el bicarbonato, seguido del cloruro y del sulfato y el catión el calcio, seguido del magnesio y del sodio.

La evolución temporal de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ y su relación con los episodios lluviosos se muestra en la figura 6. El contenido en $\delta^{18}\text{O}$ varía entre un mínimo de -11,7 ‰ y un máximo anormalmente elevado de -2,1 ‰, con una media de -7,35 ‰. En cuanto al $\delta^2\text{H}$, el valor mínimo es de -79,3 ‰ y el máximo de -43,6 ‰, con una media de -51,3 ‰.

A pesar de la escasez de datos isotópicos parece observarse un efecto de estacionalidad (Riesenfeld and Chang, 1963a y b), con valores inferiores en los meses de invierno (febrero), frente a los de primavera (abril y mayo). La magnitud de la variación ocasionada por este efecto es similar a la obtenida por Fernández-Chacón (2009) en la depresión de Guadix-Baza y sus bordes, si se exceptúa la muestra correspondiente a mediados de abril, que presenta valores de $\delta^{18}\text{O}$, como ya se ha indicado, anormalmente elevados. Del diagrama que relaciona los valores de $\delta^{18}\text{O}$ con los de $\delta^2\text{H}$ de la figura 7 se deduce que este valor podría deberse a la concentración de isótopos pesados en la muestra por evaporación previa a su recogida, aunque la muestra se recogió el último día del periodo lluvioso de 5 días de duración.

Agua del manantial

En los diagramas de Piper y Schöeller-Berkaloff de la figura 5 se exponen las principales características quí-

Fecha	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	F	18O	2H	13C	DOC
20/02/2008	3.57	0.57	0.79	0.18	1.00	2.25	6.6	0.00	0.00	0.07	0.02	-9.88	-67.95	-24.87	12.9
26/02/2008	3.68	0.34	0.52	0.24	0.59	1.01	3.4	0.00	0.01	0.00	0.01	-11.70	-79.28	-25.16	9.9
26/03/2008	2.54	0.34	0.55	0.00	0.99	1.63	4.1	1.84	0.02	1.43	0.04	-7.34	-39.83	-23.45	6.1
11/04/2008	1.71	0.23	0.43	0.00	1.02	0.51	3.2	0.44	0.02	0.29	0.15	-7.65	-55.60	-23.69	3.3
25/04/2008	1.04	0.24	0.60	0.00	0.64	0.55	2.2	0.45	0.00	0.00	0.01	-2.10	-42.28	-24.37	3.7
13/05/2008	1.96	0.30	0.17	0.00	0.32	1.10	4.0	1.37	0.05	0.48	0.02	-7.30	-43.60	-23.05	4.6
20/05/2008	2.25	0.42	0.62	0.14	0.56	1.20	4.1	1.54	0.00	0.74	0.03	-5.24	-30.25	-22.55	5.8

ESTADÍSTICAS SIGNIFICATIVAS

PARÁMETROS

Mínimo	1.04	0.23	0.17	0.00	0.32	0.51	2.2	0.00	0.00	0.00	0.01	-11.70	-79.28	-25.16	3.3
Mediana	2.25	0.34	0.55	0.00	0.64	1.10	4.0	0.45	0.01	0.29	0.02	-7.34	-43.60	-23.69	5.8
Máximo	3.68	0.57	0.79	0.24	1.02	2.25	6.6	1.84	0.05	1.43	0.15	-2.10	-30.25	-22.55	12.9
Rango	2.64	0.34	0.62	0.24	0.70	1.74	4.4	1.84	0.05	1.43	0.14	9.60	49.03	2.62	9.6
Suma	16.74	2.43	3.68	0.56	5.12	8.24	27.6	5.64	0.10	3.02	0.27	-51.21	-358.79	-167.15	46.4
Media	2.39	0.35	0.53	0.08	0.73	1.18	3.9	0.81	0.01	0.43	0.04	-7.32	-51.26	-23.88	6.6
CV (desviación típica/media)	0.40	0.34	0.37	1.30	0.37	0.52	0.3	0.94	1.22	1.21	1.27	-0.42	-0.34	-0.04	0.5
Varianza de muestra	0.80	0.01	0.03	0.01	0.06	0.32	1.6	0.50	0.00	0.23	0.00	8.20	256.25	0.80	10.7
Desviación típica de muestra	0.89	0.11	0.18	0.10	0.25	0.56	1.3	0.70	0.02	0.48	0.05	2.86	16.01	0.89	3.3

Tabla 2. Principales valores obtenidos y parámetros estadísticos de los muestreos de agua de lluvia recogidas en la estación climática del Carcabal. Los valores de los iones en mg/l, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en ‰ (V-SMOW), $\delta^{13}\text{C}$ ‰ (PDB) y DOC en $\mu\text{g C/ml}$

Table 2. Main values and statistical parameters of rainwater samples collected in the area of the Carcabal weather station. Concentration values of ions in mg/l, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in ‰ (V-SMOW), $\delta^{13}\text{C}$ ‰ (PDB) and DOC in $\mu\text{g C/ml}$

micas del agua muestreada en el manantial. Se trata de agua bicarbonatada cálcico-magnésica con una composición muy uniforme en el valor de sus componentes mayoritarios. Los diagramas permiten observar las modificaciones químicas que sufre el agua de lluvia a su paso por el acuífero. Se produce una homogeneización del contenido en iones del agua de lluvia, con importantes aumentos en el contenido en bicarbonato, calcio y magnesio, y en menor medida también en sulfato. Los valores de cloruro y sodio también se homogeneizan, pero apenas se incrementan, y aún menos los valores en fluoruro. El efecto final del filtrado del agua de lluvia a través del

acuífero es una menor variabilidad temporal en la composición química.

La tabla 3 muestra los datos hidroquímicos obtenidos en el agua del manantial y sus principales parámetros estadísticos. Como se puede observar, el coeficiente de variación (CV) en todos los parámetros es muy bajo, con excepción de los elementos minoritarios como el NO_2^- o el F^- y el caudal (Q). Sin embargo, un estudio detallado de la evolución del agua durante las crecidas muestra cambios apreciables en las variables físico-químicas.

Los quimiogramas de la figura 8 permiten comparar la evolución del caudal del manantial durante la

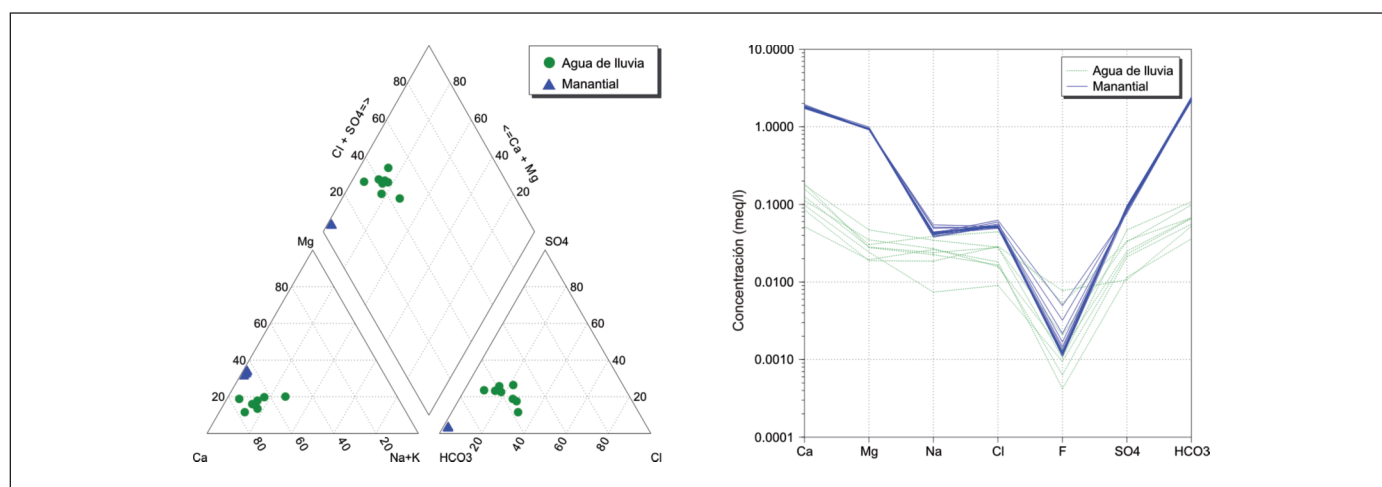


Figura 5. A la izquierda se muestra el diagrama de Piper, en el que se incluyen los análisis de las aguas de lluvia y del manantial del Carcabal. A la derecha el diagrama de Schöeller-Berkaloff para las mismas muestras

Figure 5. Left. Piper diagram showing analyses of the rainwater and Carcabal spring water. Right. Schöeller-Berkaloff diagram of the same samples

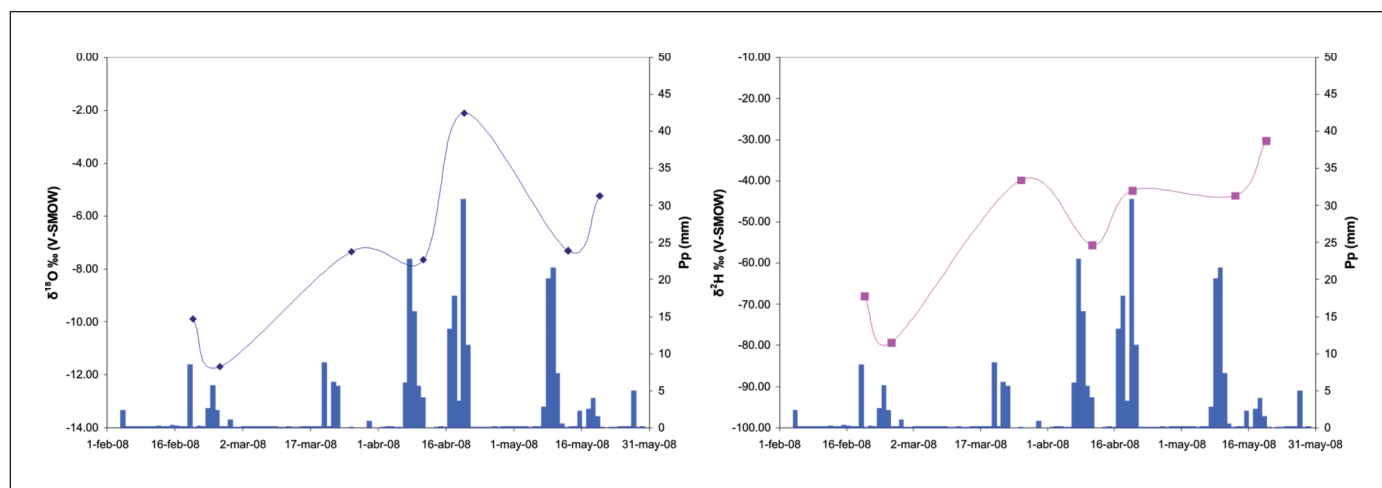


Figura 6. Variación de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en el agua de lluvia

Figure 6. Variation in the values of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the rainwater

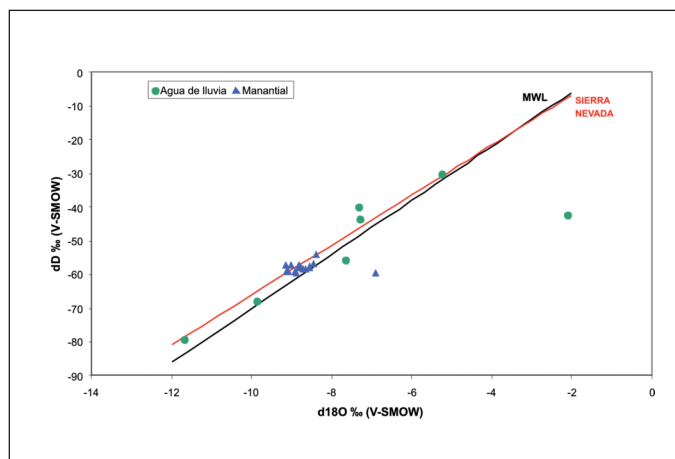


Figura 7. Relación entre los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en las muestras de agua de lluvia y del manantial del Carcabal. La línea negra corresponde a la Línea Meteorológica Mundial (Craig, 1961) y la roja a la obtenida por Raya (2008) para la vertiente septentrional de Sierra Nevada

Figure 7. Relationship between the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in rainwater samples and those from the Carcabal spring. The black line indicates the World Meteorological Line (Craig, 1961) and the red line that obtained by Raya (2008) for the northern slope of the Sierra Nevada

crecida de 2008 con las precipitaciones y con los iones y valores isotópicos más significativos. La crecida se produce entre los meses de abril y mayo y tiene tres picos, el central mucho más pronunciado.

Los contenidos en fluoruro y en cloruro responden al pico principal de la crecida (finales de abril) con un ligero incremento. El sulfato responde con un descenso de su contenido en el pico principal y un crecimiento posterior, lo que sugiere que tiene una procedencia diferente al cloruro y fluoruro.

Los valores de bicarbonato, calcio, PCO_2 y DOC muestran una evolución similar entre ellos, con incrementos rápidos en su contenido relacionados con las puntas de caudal, la evolución del magnesio es contraria, y también la de los Índices de Saturación (IS) en calcita y dolomita.

En cuanto al contenido isotópico del agua drenada, se observa un decrecimiento en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en los momentos de crecida; en cambio, el $\delta^{18}\text{O}$ registra un pico muy pronunciado, que decrece antes de que comience la recesión.

En resumen, los quimiogramas muestran un grupo de componentes cuyos contenidos responden a los incrementos de caudal con subidas rápidas, entre los que se encuentran el bicarbonato, calcio, PCO_2 , DOC y $\delta^{18}\text{O}$; otro grupo que responden con subidas más lentas, fluoruro, cloruro y deuterio; y un tercer grupo que responde con descensos en sus contenidos que incluyen al sulfato, magnesio, $\delta^{13}\text{C}$ y los IS en calcita y dolomita.

En la figura 9 se expone un Análisis de Componentes Principales (ACP) para las muestras estudiadas y para las variables consideradas en el plano de los factores 1-2 y 1-3, que explican el 61,5 %

Nº Orden	Fecha	Temp	Cond	pH	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	DOC	NO3	NO2	F	IS Ca	IS Dol	logPCO2	18O	2H	13C	Q
1	05/02/2008	9.9	225	8.02	35.26	11.58	0.99	0.27	1.86	3.88	136.1	0.9	6.61	0.01	0.04	0.07	-0.23	-2.98	-8.55	-57.80	-26.36	3.53
2	20/02/2008	10.1	253	8.2	34.51	11.25	0.94	0.24	1.98	4.00	134.5	0.9	6.79	0.00	0.06	0.23	0.10	-3.17	-9.10	-59.21	-26.98	3.00
3	26/02/2008	10	225	8.21	35.28	11.23	1.13	0.19	1.80	4.22	133.1	0.8	6.29	0.01	0.02	0.25	0.12	-3.18	-8.92	-59.14	-26.71	2.99
4	06/03/2008	9.4	224	8.16	35.19	11.10	0.97	0.16	1.83	4.20	134.4	0.8	6.62	0.01	0.03	0.19	-0.01	-3.13	-8.72	-58.37	-26.35	2.91
5	26/03/2008	10.1	228	8.19	34.85	11.43	1.02	0.20	1.90	4.16	130.4	0.6	6.78	0.00	0.03	0.21	0.07	-3.17	-8.64	-58.59	-26.62	2.82
6	11/04/2008	10.1	237	8.07	37.06	12.08	0.95	0.16	1.75	4.27	136.7	1.0	5.75	0.00	0.02	0.14	-0.08	-3.03	-9.11	-58.62	-25.91	5.78
7	21/04/2008	10.3	247	7.92	38.88	11.25	0.92	0.24	2.11	3.94	144.5	1.6	7.53	0.03	0.02	0.04	-0.33	-2.85	-6.90	-59.41	-25.46	34.82
8	25/04/2008	10.6	234	7.99	37.74	11.23	0.98	0.12	2.22	3.68	137.9	1.0	7.45	0.00	0.09	0.08	-0.23	-2.94	-9.16	-57.08	-26.28	69.77
9	06/05/2008	10.6	228	8.09	36.21	11.62	0.97	0.18	1.88	4.59	138.5	1.3	7.60	0.00	0.02	0.16	-0.03	-3.04	-8.82	-58.00	-27.05	12.25
10	13/05/2008	10.6	238	7.97	36.87	11.51	0.96	0.24	1.84	4.56	143.1	0.9	7.87	0.00	0.02	0.07	-0.24	-2.9	-8.39	-54.14	-26.48	6.47
11	20/05/2008	10.5	233	8.05	35.43	11.68	1.00	0.29	1.79	4.44	138.5	1.2	7.82	0.00	0.03	0.11	-0.12	-3	-8.44	-56.75	-26.57	3.84
12	28/05/2008	10.6	228	8.05	36.23	11.12	1.25	0.29	1.84	4.61	140.3	1.0	7.64	0.00	0.02	0.13	-0.12	-2.99	-8.80	-57.05	-26.30	3.25
13	03/06/2008	10.6	231	8.06	35.92	11.54	1.17	0.24	1.76	4.30	139.9	0.2	7.07	0.02	0.02	0.14	-0.09	-3.01	-9.00	-57.16	-24.79	3.25
14	17/07/2008		230	8.03	35.17	11.54	0.90	0.22	1.91	4.31	134.7	0.2	6.84	0.00	0.02				-8.40	-58.41	-25.45	1.45
15	03/09/2008	11.1	229	8.07	35.16	11.51	0.87	0.18	1.87	4.42	149.0	0.9	6.94	0.02	0.02	0.17	0.00	-2.99	-8.87	-59.51	-26.71	0.98
ESTADÍSTICAS SIGNIFICATIVAS																						
PARÁMETROS																						
Minimo		9.4	224	7.92	34.51	11.10	0.87	0.12	1.75	3.68	130.4	0.2	5.75	0.00	0.02	0.04	-0.33	-3.18	-9.16	-59.51	-27.05	0.98
Mediana		10.4	230	8.06	35.43	11.51	0.97	0.22	1.86	4.27	137.9	0.9	6.94	0.00	0.02	0.14	-0.09	-3.005	-8.80	-58.37	-26.36	3.25
Máximo		11.1	253	8.21	38.88	12.08	1.25	0.29	2.22	4.61	149.0	1.6	7.87	0.03	0.09	0.25	0.12	-2.850	-6.90	-54.14	-24.79	69.77
Rango		1.7	29	0.29	4.38	0.99	0.38	0.17	0.47	0.92	18.6	1.5	2.12	0.03	0.07	0.21	0.45	0.330	2.26	5.36	2.26	68.79
Suma		144.5	3490	121.08	539.75	171.66	15.03	3.20	28.32	63.59	2071.2	13.3	105.58	0.10	0.49	2.00	-1.20	-42.380	-129.84	-869.25	-394.03	157.11
Media		10.3	233	8.07	35.98	11.44	1.00	0.21	1.89	4.24	138.1	0.9	7.04	0.01	0.03	0.14	-0.09	-3.027	-8.66	-57.95	-26.27	10.47
CV (desviación típica/media)		0.0	0	0.01	0.03	0.02	0.10	0.23	0.07	0.06	0.0	0.4	0.09	1.44	0.62	0.45	-1.60	-0.034	-0.06	-0.02	-0.02	1.76
Varianza de muestra		0.2	63	0.01	1.35	0.06	0.01	0.00	0.02	0.07	21.4	0.1	0.34	0.00	0.00	0.00	0.02	0.010	0.28	1.80	0.36	316.37
Desviación típica de muestra		0.4	8	0.08	1.16	0.25	0.10	0.05	0.12	0.26	4.6	0.4	0.59	0.01	0.02	0.06	0.13	0.099	0.53	1.34	0.60	17.79

Tabla 3. Principales valores obtenidos y parámetros estadísticos de las muestras de agua del manantial del Carcabal. Los valores de los iones en mg/l, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en ‰ (V-SMOW), $\delta^{13}\text{C}$ ‰ (PDB), DOC en $\mu\text{g C/ml}$ y Caudal (Q) en l/s

Table 3. Main values and statistical parameters of water samples collected from the Carcabal spring. Concentration values of the ions in mg/l, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in ‰ (V-SMOW), $\delta^{13}\text{C}$ ‰ (PDB), DOC in $\mu\text{g C/ml}$ and flow rate in l/s

de la varianza. El factor 1 está influenciado por la PCO_2 , calcio, bicarbonato, $\delta^{18}\text{O}$, NO_3^- y DOC de mayor a menor influencia en sentido positivo, y en sentido negativo por los IS en dolomita y calcita con un peso similar. Representa, por tanto, las condiciones de agresividad del agua con respecto a los carbonatos y a los parámetros cuyos valores responden con mayor rapidez a la infiltración, es decir, refleja la señal de aguas de circulación rápida.

El factor 2 está básicamente influenciado por el contenido en SO_4^{2-} y, en menor medida, por el contenido en K^+ , Na^+ y Mg^{2+} en sentido positivo, y por el contenido en F^- y Cl^- en sentido negativo. Este factor parece diferenciar distintas proporciones de mezcla de aguas procedentes de la zona no saturada y de la zona saturada, es decir, aguas con distintos tiempos de residencia. El factor 3 tiene tendencia a diferenciar los iones cuyos contenidos responden con subidas rápidas a los incrementos de caudal (HCO_3^- , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ y DOC) de los que suben más lentamente (F^- , $\delta^2\text{H}$, Cl^-).

El ACP en el plano de los factores 1 y 2 diferencia tres familias de aguas. La familia I, en la que se incluyen las muestras 7 y 8, corresponde al agua drenada por el manantial en los momentos de máximo caudal;

la familia II corresponde a las muestras previas a la crecida, cuando los caudales son mínimos; la familia III caracteriza las aguas posteriores a la crecida, en una situación intermedia. La muestra 1 se encuentra en esta última familia, aunque corresponde a aguas previas a la crecida, la explicación es que el manantial registró una pequeña crecida a final de enero de 2008 (figura 3) y la muestra registra la señal hidroquímica posterior a esta crecida, por lo que se asemeja más a las aguas de la familia III.

Discusión

Caracterización hidrodinámica

El valor de α es similar en el primer agotamiento de febrero y de mayo de 2007 (tabla 1), y en el de abril-mayo de 2008, característico de acuíferos kársticos (Padilla *et al.*, 1993); en cambio, los segundos agotamientos de las dos crecidas analizadas en 2007 muestran un valor de α característico de acuíferos fisurados.

En la figura 10 se expone el gráfico de la función

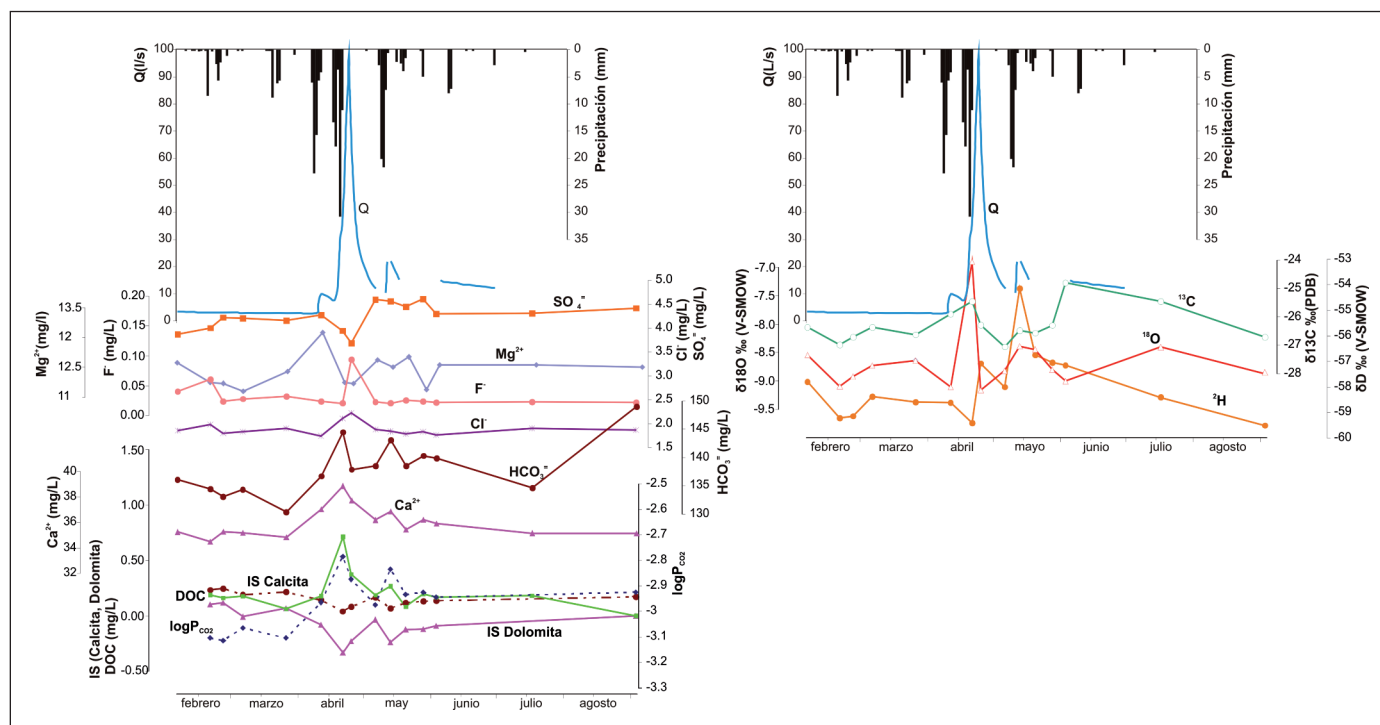


Figura 8. Variación en el contenido de los principales componentes químicos (izquierda) e isotópicos (derecha) en relación con el hidrograma del manantial

Figure 8. Variations in the content of the major chemical components (left) and isotopic components (right) with reference to the hydrograph of the spring

“y” en el que se observa cómo las dos curvas correspondientes a la primera decrecida presentan una mayor concavidad, reflejo del valor más elevado de ε . Esto indica el diferente papel jugado por la franja no saturada en las dos últimas decrecidas, en las que su poder regulador es muy superior al de la primera decrecida. Las diferencias pueden achacarse al periodo previo de precipitaciones. Mientras que la crecida de febrero de 2007 se produce tras las primeras lluvias importantes invernales, las otras ocurren al final de la primavera, después de prolongados periodos húmedos, con lo que la matriz de la roca y las pequeñas fisuras en la zona no saturada han podido almacenar un volumen de agua mucho mayor que en la crecida de febrero, volumen que es drenado más len-

tamente. También la existencia de nevadas invernales puede explicar retrasos en los aportes.

En la tabla 1 y en la figura 11 se muestran los valores obtenidos de los parámetros “k” e “i”. A partir de estos parámetros Mangin (1974-1975) realizó una clasificación de los acuíferos en función del grado de karstificación.

La recesión de febrero de 2007 indica que el manantial drena un acuífero kárstico con una red de drenaje subterráneo muy desarrollada y una zona saturada importante (Tipo II). En cambio, en la recesión de mayo de 2007, el manantial se incluye en el Tipo IV, característico de acuíferos kársticos complejos con diferencias en la velocidad de infiltración. En la recesión de abril de 2008, el manantial se incluye en el

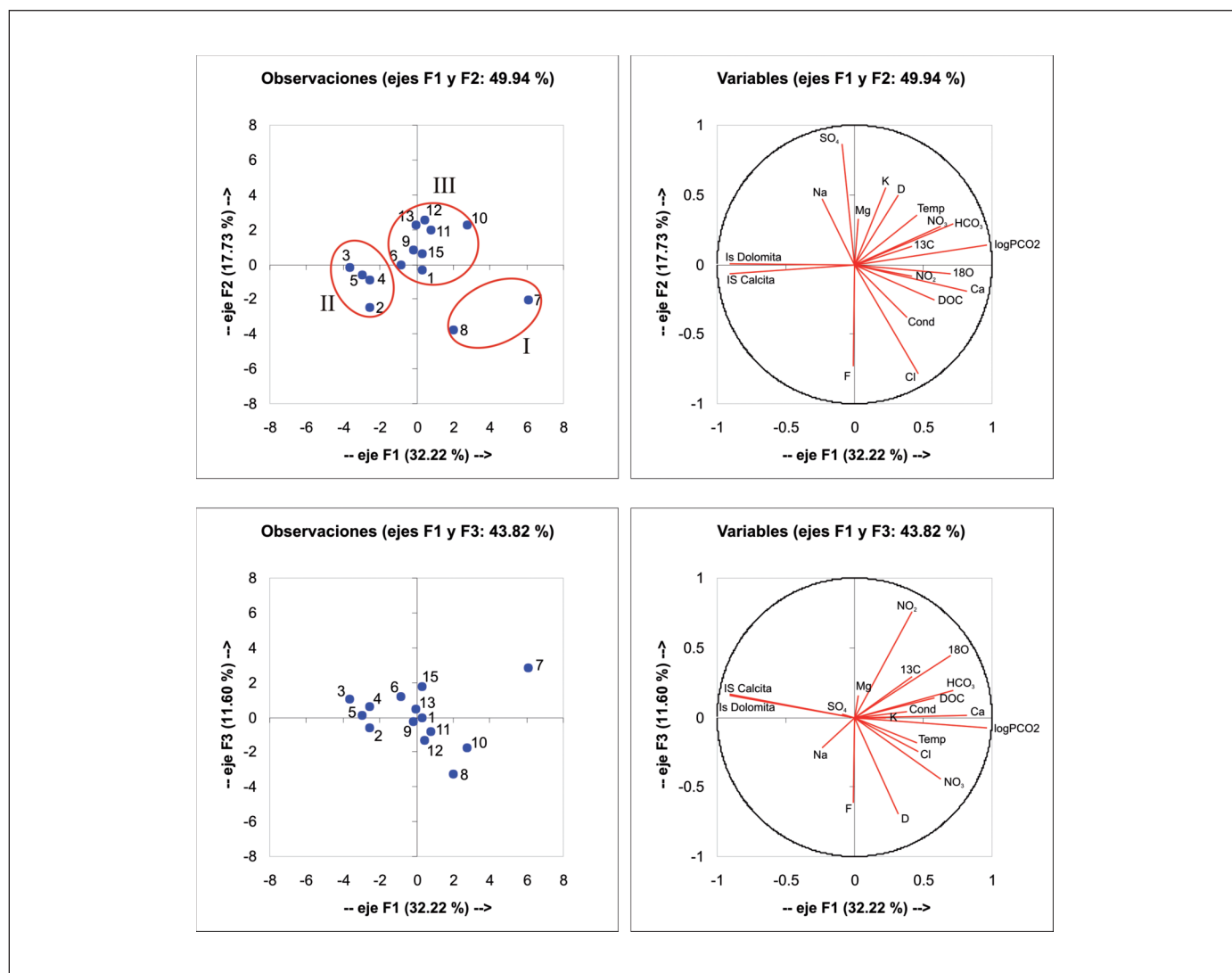


Figura 9. Diagrama de casos y variables consideradas en las muestras obtenidas en 2008 en el manantial del Carcabal
Figure 9. Diagram of cases and variables taken into account for the samples from the Carcabal spring obtained in 2008

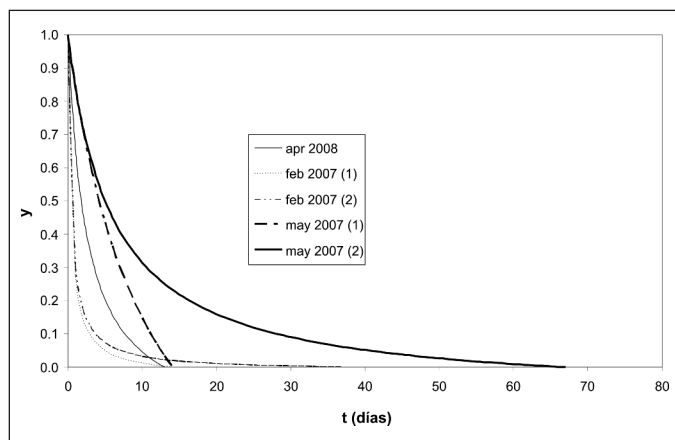


Figura 10. Gráfico de función “y” de los hidrogramas de la serie diaria del manantial del Carcabal
 Figure 10. Graph of the “y” function of the hydrographs drawn from the daily record of the Carcabal spring

Tipo III que implica un acuífero kárstico, pero con retrasos en los aportes. Estas diferencias, como indican Mangin (1981) y Padilla (1990), también pueden atribuirse a la forma y distribución en que se producen las precipitaciones. Una mayor o menor regularidad daría respuestas diferentes, independientemente de la cantidad de agua caída y con poca influencia del estado en que se encuentre la franja no saturada.

Jiménez *et al.* (2002), utilizaron la relación entre $Q_{\max}/Q_{\min}$ y el coeficiente de agotamiento α para caracterizar el comportamiento de diversos manantiales en

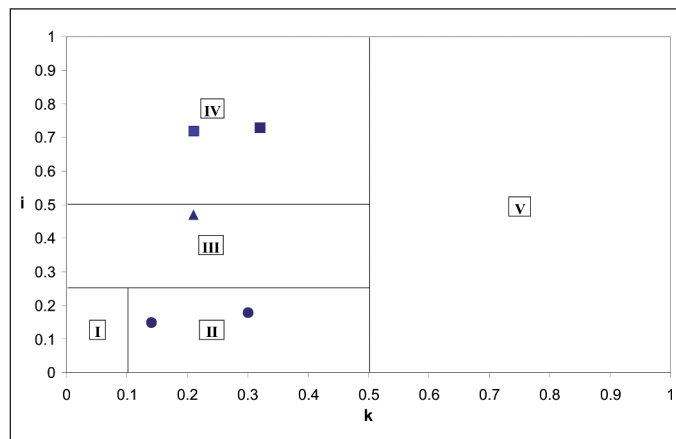


Figura 11. Clasificación del acuífero del Carcabal a partir de las curvas de recesión de febrero de 2007 (círculos), mayo de 2007 (cuadrados) y abril de 2008 (triángulo) según Mangin (1974-75)
 Figure 11. Classification of the Carcabal aquifer deduced from the recession curves of February 2007 (circles), May 2007 (squares) and April 2008 (triangles), according to Mangin (1974-75)

acuíferos kársticos del sur de España. Siguiendo este criterio, el manantial del Carcabal se asemeja más al comportamiento de manantiales como Ojén y Villanueva del Rosario, que tienen valores altos de la relación $Q_{\max}/Q_{\min}$, con hidrogramas agudos y estrechos y con varias crecidas para un año tipo en respuesta a eventos pluviométricos.

El correlograma del manantial, realizado con una ventana de observación de 100 días y paso de un día (figura 12C), muestra que el efecto memoria es de 17 días, inferior a todos los estudiados por Jiménez *et al.* (2002) y similar a los manantiales del Pirineo estudiados por Mangin.

El espectro simple (figura 12D) muestra una anchura de banda de 0,05 que implica que la información de la lluvia aparece filtrada al cabo de 20 días. El tiempo de regulación es de 18 días, lo que sugiere que las reservas son poco importantes. Los picos que se observan son trimestral (83 días), bimestral (55 días), mensual (29 días) y un pico bien marcado a los 22 días. No hay picos a más bajas frecuencias debido al corto periodo de tiempo analizado. El espectro simple para las precipitaciones muestra periodicidades similares (figura 12B). Las altas frecuencias son filtradas y las medias tienen importancia, lo que es coherente con la presencia de una componente de flujo rápido.

Caracterización hidroquímica e isotópica

Del diagrama de Schöeller-Berkaloff (figura 5), puede deducirse que el aporte litológico de cloruros y fluoruros es poco significativo, por lo que ambos iones pueden ser utilizados para caracterizar el agua de infiltración reciente durante las crecidas. La concentración de cloruros y fluoruros es mayor en el agua recién infiltrada como consecuencia del lavado del suelo, donde se produce una concentración de estos iones por evaporación (Schoeller, 1962; Bakalowicz, 1979). El incremento en la concentración de sulfatos en el agua del manantial con respecto al agua de lluvia es un indicio de la existencia de un ligero aporte en el acuífero, que podría ser consecuencia de la disolución de trazas de evaporitas presentes en la serie litológica o por oxidación de sulfuros como la pirita, que también podrían existir en los carbonatos. El agua de infiltración rápida, en este caso, estaría menos concentrada en sulfatos que el agua drenada por la zona saturada en condiciones normales. Esto es lo que se aprecia en los quimiogramas de la figura 8 donde el ligero incremento de cloruro y fluoruro es un indicio de la llegada de aguas de infiltración reciente, que tienen menor concentración en sulfatos que el agua contenida en la zona saturada del acuífero.

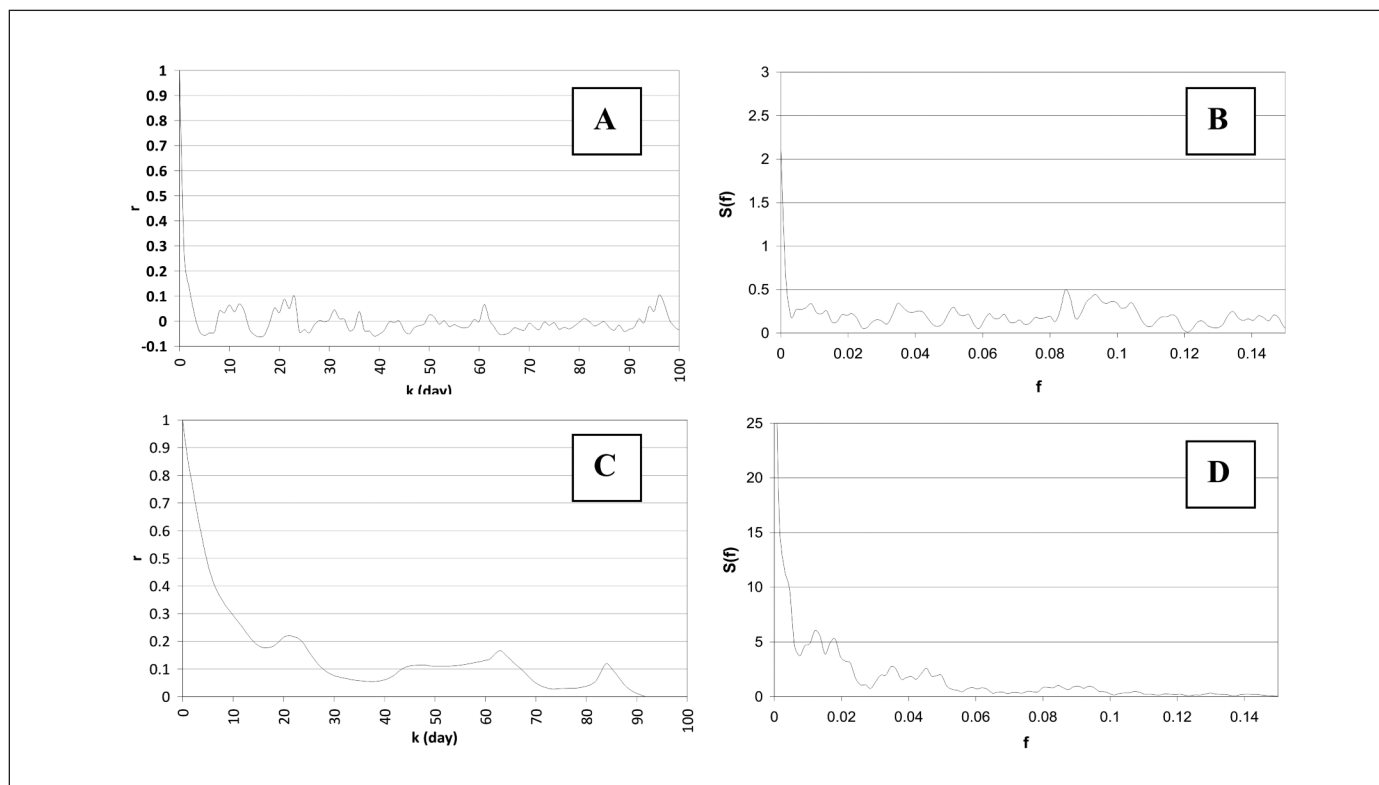


Figura 12. Análisis correlatorio y espectral de los datos diarios de precipitación de la estación del Carcabal (A y B) y de caudales diarios del manantial del Carcabal (C y D) para el periodo sep-2006/may-2008

Figure 12. Correlation and spectral analyses using daily rainfall data from the Carcabal station (A and B) and daily outflow data from the Carcabal spring (C and D) during the period from September 2006 to May 2008

Los valores de calcio y bicarbonato presentan correlación positiva con los picos de caudal, lo que apoya la interpretación sobre la llegada de aguas recientemente infiltradas, más agresivas, que incorporan el exceso de bicarbonato y calcio por disolución de los carbonatos en la superficie del acuífero. El incremento en la PCO_2 y DOC tiene un similar significado ya que se trata de dos componentes que el agua toma en el suelo a partir de la descomposición y respiración de las plantas. El DOC es un marcador muy sensible de aguas de infiltración rápida en acuíferos kársticos (Emblanch *et al.*, 1998; Batiot *et al.*, 2003).

El magnesio procede de la disolución de la dolomita, que se produce con mayor lentitud que la disolución de la calcita; su contenido, por esta razón, debe ser mayor en las aguas de la zona saturada que en las de infiltración reciente. Esto explica el ligero descenso que se observa en relación con los picos de caudal.

La bajada en los IS de calcita y dolomita indica la llegada de aguas con menor tiempo de contacto con la roca. El agua drenada por el manantial previa a la crecida está ligeramente sobresaturada en calcita y en equilibrio en dolomita; durante las crecidas, pasa

a estar en equilibrio con respecto a la calcita y subsaturada en dolomita. La menor velocidad de disolución de la dolomita frente a la calcita, explica esta diferencia.

Los isótopos del agua, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, pueden sufrir modificaciones en la zona no saturada por procesos de evaporación, pero en general, el agua contenida en la zona saturada es equivalente a la media de la aportada por las precipitaciones que producen infiltración. La llegada de aguas de infiltración rápida al manantial puede alterar significativamente el contenido en estos isótopos, esto permite utilizar las variaciones del $\delta^{18}\text{O}$ como trazador de los eventos pluviométricos que producen estas entradas de agua (Bakalowicz, 1979).

La media del $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia muestreada es de -7,32 ‰, la del manantial es más ligera, -8,67 ‰; esto puede explicarse por el efecto altitud, ya que la estación de muestreo de agua de lluvia se sitúa a una cota unos 250 m por debajo de la zona de infiltración preferencial en el acuífero, donde se localiza el campo de dolinas. El gradiente altitudinal en el Carcabal, si se considera que el agua se infiltra mayoritariamente

en los campos de dolinas, estaría entre -0,5 y -0,6 ‰ cada 100 m, similar al obtenido por otros autores (Cruz San Julián *et al.*, 1992; Fernández-Chacón, 2009) en zonas cercanas.

La figura 8 muestra la variación del $\delta^{18}\text{O}$ en función del caudal y de la pluviometría. Se observa cómo al inicio del pico más importante de la crecida de abril de 2008 se produce un enriquecimiento en isótopos pesados por encima de la media, que decrece en los siguientes muestreos. Este pico sugiere la llegada de aguas de infiltración reciente al manantial, con una composición isotópica más pesada que la media del agua almacenada en la zona saturada. Estas aguas más pesadas son las que caracterizan las lluvias de primavera frente a las lluvias invernales (figura 6).

Las variaciones en el contenido en $\delta^{13}\text{C}$ pueden indicar procesos de disolución de carbonatos en el acuífero (hacia valores más positivos) o incorporación de materia orgánica de las plantas del suelo (hacia valores más negativos). La curva de variación muestra la influencia de la crecida, que se traduce en un empobrecimiento del $\delta^{13}\text{C}$ debido a la llegada de aguas enriquecidas en carbono de procedencia vegetal tomado en el suelo del acuífero.

Evaluación de la recarga

La cartografía geológica del acuífero permite definir el área de recarga que alimenta al manantial en 1,9 km². La pluviometría media para el periodo analizado ya se ha evaluado en 530 mm y el caudal medio que surge por el manantial en 6,8 l/s. Esto se traduce en que por el manantial se ha drenado aproximadamente el 22% de la precipitación caída durante el periodo de control. Este valor es demasiado bajo para las características del acuífero estudiado. La explicación puede encontrarse, por una parte, en el periodo analizado, que es indudablemente un periodo seco dentro del régimen normal de precipitaciones de la zona. Sin embargo, la causa principal hay que buscarla en los caudales no controlados que se descargan por el "trop plein" situado en el borde oriental del acuífero cuyo caudal no es registrado por la estación de aforos, y por otros menores que se activan en periodos de aguas altas difíciles de controlar.

El aporte del ión cloruro por el agua de precipitación a los acuíferos se utiliza con frecuencia para el cálculo de la porción de agua infiltrada procedente de esas precipitaciones. La metodología es suficientemente conocida y está descrita, por ejemplo, en Custodio y Llamas, 1983.

El valor medio del contenido en cloruro del agua drenada por el manantial es de 1,89 mg/l y de 0,73

mg/l el del agua de precipitación. Con estos datos se obtiene un valor de la infiltración del 39% de la precipitación, la que se traduce en una recarga media anual de 1 hm³.

Conclusiones

Las características geomorfológicas observadas en el pequeño acuífero del Carcabal muestran una karstificación superficial inusual en los acuíferos alpujárri- des, que se caracteriza por la presencia abundante de dolinas de disolución. Esta importante karstificación puede ser debida a la naturaleza fundamentalmente caliza del acuífero, al bajo grado de metamorfismo existente, y a la elevada cota a la que se encuentran los afloramientos permeables que permiten que las precipitaciones sean a menudo en forma de nieve.

El análisis del hidrograma del principal manantial asociado indica que se comporta como un acuífero kárstico, con una red de drenaje subterráneo bien desarrollada cuando el periodo húmedo previo a la crecida es poco prolongado, en el invierno. En cambio, cuando la crecida se produce tras un periodo húmedo largo, al final de la primavera, el acuífero se comporta como un acuífero kárstico complejo con retrasos en los aportes, que pueden interpretarse por la presencia de un mayor volumen de agua en tránsito por la zona no saturada, que circula más lentamente. También la existencia de copiosas nevadas invernales puede explicar retrasos en los aportes. Según la clasificación de Mangin el acuífero es de Tipo II, si bien, en las crecidas de final de la primavera se comporta como Tipo III o Tipo IV. El hidrograma puede presentar una o varias crecidas anuales, con puntas agudas y estrechas y un comportamiento característico de acuífero kárstico.

Por otra parte, el análisis del correlograma del caudal para el periodo estudiado muestra un efecto memoria de 17 días, inferior a los que suelen observarse en los manantiales andaluces. A partir del estudio del espectro simple se deduce que el volumen de reservas es poco importante, con un tiempo de regulación de 18 días.

La información hidroquímica obtenida permite caracterizar los cambios físico-químicos que sufre el agua desde su infiltración hasta la salida por el manantial. El Cerro del Carcabal constituye un acuífero alpujárride atípico, con una evidente morfología kárstica superficial (dolinas) que favorece la infiltración. La consecuencia es la existencia de aguas que circulan con rapidez por el acuífero en los periodos de abundante recarga.

Los quimiogramas muestran que las crecidas de

caudal quedan marcadas por ligeros ascensos en el contenido del agua en cloruro, fluoruro y especialmente el DOC, que son elementos externos al acuífero, y por ligeros descensos en el contenido en sulfato y magnesio, que son componentes "aportados" por el acuífero. Por otra parte, las aguas de infiltración rápida también se caracterizan por ascensos en el contenido en bicarbonato y calcio que indican la llegada de aguas más agresivas con respecto a los carbonatos.

Los valores isotópicos del agua son coherentes con una zona preferencial de infiltración situada en torno a 1800 m s.n.m, cota a la que se encuentra el campo de dolinas. Las variaciones en el $\delta^{18}\text{O}$ marcan también las aguas de infiltración rápida durante las crecidas de primavera, pues estas lluvias suelen estar más empobrecidas que las almacenadas en el acuífero. El $\delta^{13}\text{C}$ es igualmente un indicador de aguas de infiltración rápida, pues caracteriza la llegada de aguas enriquecidas en carbono de procedencia vegetal tomado del suelo durante la infiltración.

Finalmente, a partir de los datos medios de pluviometría obtenidos en la estación climatológica y de caudal en la estación de aforos se deduce que el caudal que surge por el manantial es del orden del 22% de la precipitación. Mediante el balance de cloruros se obtiene una infiltración de casi el 40 % de la precipitación, estos datos sugieren que las descargas no evaluadas a través de los "trop plein" existentes en el borde oriental del acuífero y en otras zonas son importantes.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en la Unidad Asociada entre el IGME y la Universidad de Málaga, forma parte de los trabajos realizados en el marco del proyecto CICYT CGL 2005-05427 y constituye una contribución al IGCP 513 de la UNESCO.

Referencias

- Andreo, B. 1997. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las sierras Blanca y Mijas. Cordillera Bética, Sur de España*. Tesis doctoral. Univ. de Málaga. Servicio de Publicaciones de la Univ. de Málaga y Confederación Hidrográfica del Sur. 489 pp.
- Andreo, B. 2007. Sierra Blanca. *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga T 2*, 167-172.
- Bakalowicz, 1979. *Contribution de la géochimie des eaux a la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*. Thèse Doct. Sci. Nat., Univ. P. et M. Curie, Paris VI, Géol. Dyn. et Lab. Souterrain CNRS, 269 pp.
- Batiot, C., Emblanch, C. and Blavoux, B. 2003. Carbone organique total (COT) et magnésium (Mg^{2+}): deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique. *C.R. Geoscience*, 335, 205-214.
- Cardenal, F.J. 1993. *Hidrogeología del sector Sierra de Lújar-Albuñol (provincia de Granada). Contribución de la hidrogeoquímica al conocimiento de acuíferos carbonatados fisurados en área mediterránea*. Tesis doctoral. Univ. de Granada. 354 pp.
- Craig 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Cruz Sanjulian, J.J., Araguas, L., Rozanski, K., Benavente, J., Cardenal, J., Hidalgo, M.C., García-López, S., Martínez-Garrido, J.C., Moral, F. y Olías, M. 1992. Sources of precipitation over South-Eastern Spain and groundwater recharge. A isotopic study. *Tellus*, 44b, 226-236.
- Custodio y Llamas, 1983. *Hidrología subterránea*. Ed. Omega (2ª edición). 2 Tomos, Barcelona, 2350 pp.
- Domínguez, P. 2000. *Funcionamiento hidrogeológico y mecanismos de intrusión marina en sistemas carbonatados de estructura compleja: Aplicación al Acuífero Inferior Noreste (AIN) del Campo de Dalías (Almería)*. Tesis doctoral. Univ. Politécnica de Cataluña. Instituto Geológico y Minero de España.
- Emblanch, C., Blavoux, B.; Puig, J. and Mudry, J. 1998. Dissolved organic carbon of infiltration within the auto-genic Karst Hydrosystem, *Geophys. Res. Lett.*, 25(9), 1459-1462.
- Fernández-Chacón, F. 2009. *Contribución al conocimiento hidrogeológico de una depresión interna en clima mediterráneo semiárido (cabecera del Guadiana Menor, Cordillera Bética)*. Tesis doctoral. IGME-Univ. de Granada. 387 pp.
- Fernández-Chacón, F., Rubio-Campos, J.C., Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A. y López-Gutiérrez, J. 2004. Delimitación de acuíferos con funcionamiento independiente en la Unidad Hidrogeológica de la Peza, (05.31). Alto Guadalquivir-Cordilleras Béticas. *VII Simposio de Hidrogeología*. Asociación Española de Hidrogeólogos. IGME. Zaragoza. XXVII, 75-84.
- Jiménez, P., Andreo, B., Durán, J.J., Carrasco, F., López-Geta, J.A., Vadillo, I. y Vázquez, M. 2001. Estudio hidrodinámico del manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cadiz, Sur de España). *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 112, 2, 85-102.
- 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: Carrasco, F., Durán, J.J. y Andreo, B (Eds.). *Karst and Environment*. Nerja, Málaga, 105-113
- Jiménez, P., Andreo, B., Carrasco, F. 2004. Caracterización hidrodinámica e hidroquímica de la Fuente Grande de Alfacar. *Geogaceta* 35, 159-162.
- Mangin, A. 1974-1975. *Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse Doct., Univ. de Dijon. In: *Ann. Spéléol.* 29, 3: 283-332; 29, 4: 495-601; 30, 1: 21-124.
- Mangin, A. 1981. Utilisation des analyses corrélatoire et

- spectrale dans de système hydrologique. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 293, 401-404.
- Mangin, A. 1994. Karst hydrogeology. En: Gibert, J., Danielepol, D.L. y Standford J.A. (eds), *Groundwater Ecology*, Acadmic Press, San Diego, 43-67.
- Obarti, F.J., Garay, P. y Morell, I. 1988. An attempt to karst classification in Spain based on system analysis. *XXI Congreso Internacional de la AIH*, Guilin, China, 328-336.
- Pérez-Ramos, I. y Andreo, B. 2007. Sierra Almjara y Alberquillas. *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga* T 2, 143-148.
- Padilla, A. 1990. *Los modelos matemáticos aplicados al análisis de los acuíferos kársticos*. Tesis Doctoral. Univ. de Granada. 267 pp.
- Padilla, A., Pulido Bosch, A. y Mangin, A. 1993. Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring. *Ground Water*, 32, 267-277.
- Pulido, A. 1980. *Datos hidrogeológicos sobre el borde occidental de Sierra Nevada*. Serie Univ. Fund. March, 123. 51 pp.
- Raya, J. 2008. *Composición isotópica del vapor de agua atmosférico en el sureste de la Península Ibérica*. Tesis doctoral CSIC-Unv. de Granada. 416 p.
- Riesenfeld, E. H., Chang, T. L., 1963a. Über den Gehalt an HDO und H²18O in Reben un Schnee. *Berichte der Chem. Gesellschaft. Jahrg*, 69, 1305-1307.
- Riesenfeld, E. H., Chang, T. L., 1963b. Über die Vertilung der schweren Waserisotopen auf der Erde. *Berichte der Chem. Gesellschaft. Jahrg*, 69, 1308-1310.
- Sánchez-Martos, F., Calaforra, J.M. 1991. Grandes cavidades de La provincia de Almería. *Espeleotemas* 1, 8-21.
- Sanz de Galdeano, C., Delgado, F. y López-Garrido, A.C. 1995. Unidades alpujárrides y maláguides al NE de Granada (Cordillera Bética). *Geogaceta*, 18, 27-29.
- Schoeller, H., 1962. *Les eaux souterraines*. Masson, Paris, 642 pp.
- Recibido: mayo 2010
 Revisado: julio 2010
 Aceptado: septiembre 2010
 Publicado: enero 2011

