

# Caracterización hidrogeoquímica preliminar de las aguas subterráneas del acuífero carbonático de la Sierra de Aracena (Huelva)

*Preliminary hydrochemical characterization of the carbonate aquifer of Aracena Mountain Range (Huelva)*

S Martos Rosillo <sup>(1,3)</sup>, T Bros Miranda <sup>(2)</sup>, M Rodríguez Rodríguez <sup>(3)</sup> y F Moral Martos <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Of. de proyectos de Sevilla, Pz. España, Torre Norte. 41013 Sevilla. s.martos@igme.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Of. de proyectos de Oviedo, C. Matemático Pedrayes, 25. 33005 Oviedo. mt.bros@igme.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales. Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera, km 1. 41013. Sevilla. fmormar@upo.es, mrodrod@upo.es

## ABSTRACT

*The groundwater resources of the aquifer of the Aracena mountain range (Huelva) are being studied in detail by the Spanish Geological Survey. In these studies the hydrochemistry plays a pivotal role and contributes to validate the hypotheses of hydrogeological functioning based on hydrodynamic data. Several sampling campaigns have been made to characterize the groundwater from a hydrochemical point of view and, later, to define the processes of hydrochemical modification that takes place in the direction of the groundwater flow. In this work the spatial distribution of the main water-types is analyzed and a synthesis of the groundwater functioning of the Aracena aquifer is made. The foremost presence of calcium and calcium - magnesium bicarbonate water-types, the low partial pressures of CO<sub>2</sub> and the sub-saturation of the water with respect to calcite and dolomite minerals are the most remarkable features of the hydrochemistry of the Aracena aquifer.*

**Key words:** Aracena, hidrogeochemistry, ground waters, spring.

*Geogaceta*, 44 (2008), 147-150

ISSN: 0213683X

## Introducción

Los recursos hídricos del acuífero carbonático de la Sierra de Aracena, al norte de la provincia de Huelva, mantienen a importantes ecosistemas asociados y abastecen a un elevado número de núcleos urbanos, muy dispersos espacialmente, que suman una población total superior a los 16.600 habitantes (Martos-Rosillo *et al.*, 2004). La próxima construcción de una compleja red de conducciones de agua potable que conectará todas las poblaciones del norte de la provincia de Huelva, con unos 50.000 habitantes, captará las aguas de los embalses superficiales de Aracena y Zufre y del acuífero carbonático de la Sierra de Aracena. La conexión del acuífero a esta red de distribución hace previsible que se produzca un incremento en su explotación por lo que el IGME, en colaboración con la Agencia Andaluza del Agua, ha iniciado una serie de estudios encaminados a mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de este acuífero. En estos estudios la hidroquímica juega un

papel esencial para validar las hipótesis de funcionamiento hidrogeológico basadas en los datos hidrodinámicos.

## Características del área de estudio

El acuífero de la Sierra de Aracena, situado en el corazón del Parque Natural de la Sierra y Aracena y Picos de Aroche, consiste en un conjunto de modestas elevaciones, formadas por rocas carbonáticas, que culminan en el vértice del Castaño (962 m s.n.m.), donde destacan los ecosistemas asociados a amplias zonas de dehesas, alcornocales, y bosques de castaños. Asociados a este acuífero existen dos cauces de caudal permanente, el río Múrtigas y el arroyo de la Fuente del Rey. La precipitación media anual, calculada con las isoyetas del año medio del periodo 1965-2004, es de 1014 mm/año, con 651 mm/año en el año seco y 1243 mm/año en el húmedo (IGME, 2006). El gradiente pluviométrico altitudinal está próximo a los 100 mm/100 m y la temperatura media anual del aire, durante el periodo 1965-2004, está comprendida entre 14 y 15,5 °C.

## Marco geológico

La Sierra de Aracena está formada por rocas metamórficas, afectadas por un metamorfismo de alta temperatura y baja presión, que constituyen parte de lo que Bard (1969) denominó Banda Metamórfica de Aracena. En esta unidad geológica se diferencian dos sectores, en función del grado de metamorfismo de las rocas, separados por una importante zona de cizalla (Crespo-Blanc, 1991). El sector septentrional, menos metamorfozado (Díaz-Azpiroz, 2000) y también conocido como Dominio de Bajo Grado, alberga al acuífero objeto de estudio (IGME, 2006). En la columna litoestratigráfica de este sector se distinguen cuatro formaciones (Apalategui *et al.*, 1984; Crespo-Blanc, 1991): La Umbría, Aracena, Volcanosedimentaria y El Cubito. La formación La Umbría está formada por filitas grafitosas con cuarcitas negras interestratificadas. La formación Aracena la constituyen mármoles dolomíticos y, en menor proporción, calizas de edad cámbrica, con un espesor medio de 400 m, que, en algunos puntos, pueden supe-

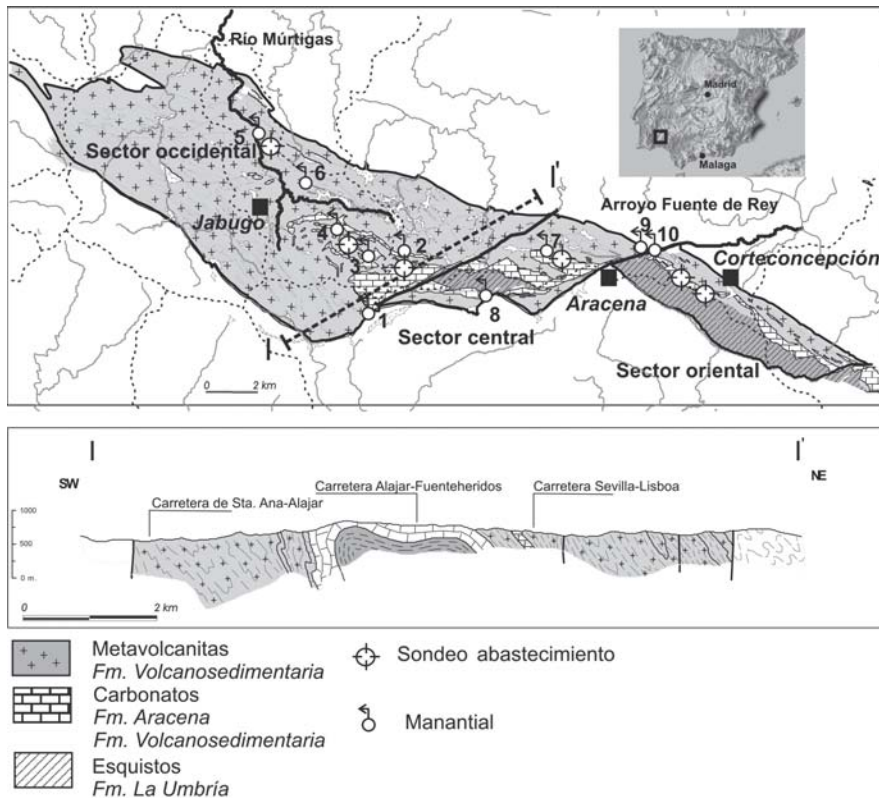


Fig. 1.- Mapa y corte hidrogeológicos simplificados del acuífero carbonático de la Sierra de Aracena (Huelva).

Fig. 1.- Hydrogeological map and cross section of the carbonate aquifer of Sierra de Aracena (Huelva).

rar los 550 m de potencia (ITGE-DPH, 1997). A techo se sitúa la formación Volcanosedimentaria, que comienza con una alternancia de tobas, porfiroides y micaesquistos, de carácter ácido, entre las que se intercalan niveles carbonáticos. En la parte alta de esta formación, de carácter básico, se observan metatufitas y metadoleritas con intercalaciones de filitas y calcoesquistos. Por último, sobre la formación anterior se sitúa la serie de El Cubito, formada fundamentalmente por filitas y cuarzofilitas. De forma discordante a las formaciones descritas afloran materiales cuaternarios, fundamentalmente depósitos aluviales, asociados a los cauces de los ríos y un complejo travertínico, ligado al manantial de la Peña de Arias Montano. La estructura general de la Sierra de Aracena corresponde a la de un gran anticlinal, retocado por una tectónica frágil tardihercínica con, al menos, cuatro familias de fracturas (Crespo-Blanc, 1991), las más importantes de dirección NO-SE a E-O y N60E.

### Marco hidrogeológico

Los materiales poco permeables situados bajo el acuífero carbonático de la Sierra de Aracena consisten en rocas metamórficas de la formación La Umbría, a

la que se superponen dos niveles acuíferos: el inferior, constituido por unos 400 m de mármoles y calizas de la formación Aracena, y el superior, de tipo multicapa, formado por los mármoles dolomíticos y calizas de la formación Volcanosedimentaria. La suma de todos los niveles carbonáticos intercalados entre las metavolcanitas, de carácter acuitado, puede llegar a superar los 300 m de espesor.

Todo el perímetro del acuífero es cerrado al flujo subterráneo. El límite es de tipo mecánico y está definido por dos importantes fracturas. La fractura septentrional, de dirección aproximada E-O, que pone en contacto la formación Volcanosedimentaria con los esquistos de El Cubito y la fractura meridional, de igual dirección, que separa los dominios de Bajo Grado y Alto Grado. El límite oriental del acuífero corresponde a la ruptura en la continuidad geométrica de los materiales acuíferos por desplazamientos provocados por una familia de fallas de dirección N60E. La superficie total de la unidad hidrogeológica es de 166,6 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Afloran 16 km<sup>2</sup> de mármoles dolomíticos y calizas de las formaciones Aracena y Volcanosedimentaria y 7 km<sup>2</sup> de materiales acuíferos detríticos. El resto son afloramientos, mayoritariamente, de metavolcanitas.

Dos fallas, que pertenecen a la familia de fracturas N60E, impiden la conexión geométrica de los materiales permeables del acuífero, de forma que éste queda compartimentado en tres sectores con un funcionamiento hidrogeológico independiente (IGME, 2006): el sector occidental, el central y el oriental.

El sector occidental tiene una superficie total de 120 km<sup>2</sup>, de la que 7 km<sup>2</sup> corresponden a afloramientos carbonáticos permeables y 6 km<sup>2</sup> a materiales detríticos permeables, conectados hidráulicamente entre sí. La geometría de este sector del acuífero está condicionada por la estructura del anticlinal de Fuenteheridos – La Umbría (Fig. 1), que consiste en un pliegue tumbado con inmersión hacia el NO. La superficie axial del pliegue tiene una dirección N130E y está inclinada unos 50° hacia el NE, por lo que el flanco suroeste está invertido. La alimentación del sector occidental del acuífero se produce por infiltración directa del agua de lluvia y, en épocas de estiaje acusado, algunos tramos del cauce del río Múrtigas, pueden recargar al acuífero. La topografía de la zona, condicionada por el relieve positivo de la estructura, la inmersión del pliegue, la existencia de distintos niveles acuíferos en la vertical y el encajamiento del río Múrtigas ocasionan la existencia de numerosos manantiales que surgen en el contacto entre las metavolcanitas y las rocas carbonáticas. Así, manantiales como los de la Peña de Arias Montano (1), Fuenteheridos (2), Fuente del Patrimonio (3) y La Duquesa (4), están asociados al contacto perianticlinal del techo de la formación Aracena. Otros manantiales, situados a menor cota, y con un régimen de funcionamiento independiente, están asociados a los niveles de calizas dolomíticas intercaladas en la formación Volcanosedimentaria (Fte. Santa (5), Fte. del Carmen (6)). El flujo subterráneo tiene componente noroeste en todo el sector acuífero, actuando el río Múrtigas como colector de la descargas, sin embargo, el tramo más meridional drena hacia el sur, hacia el manantial de la Peña de Arias Montano (1).

En el sector central del acuífero (23,8 km<sup>2</sup>) afloran 6 km<sup>2</sup> de materiales acuíferos carbonáticos, fundamentalmente de la formación Aracena, que se reparten en dos afloramientos desconectados geométrica y estructuralmente. El septentrional consiste en el flanco norte del anticlinal de Fuenteheridos, repetido por efecto de un pliegue de segunda fase. El meridional lo forman los afloramientos del flanco sur del anticlinal. La recarga se produce por infiltración del agua de lluvia y el flujo subterráneo, del sector septentrional, se dirige hacia el norte, hacia

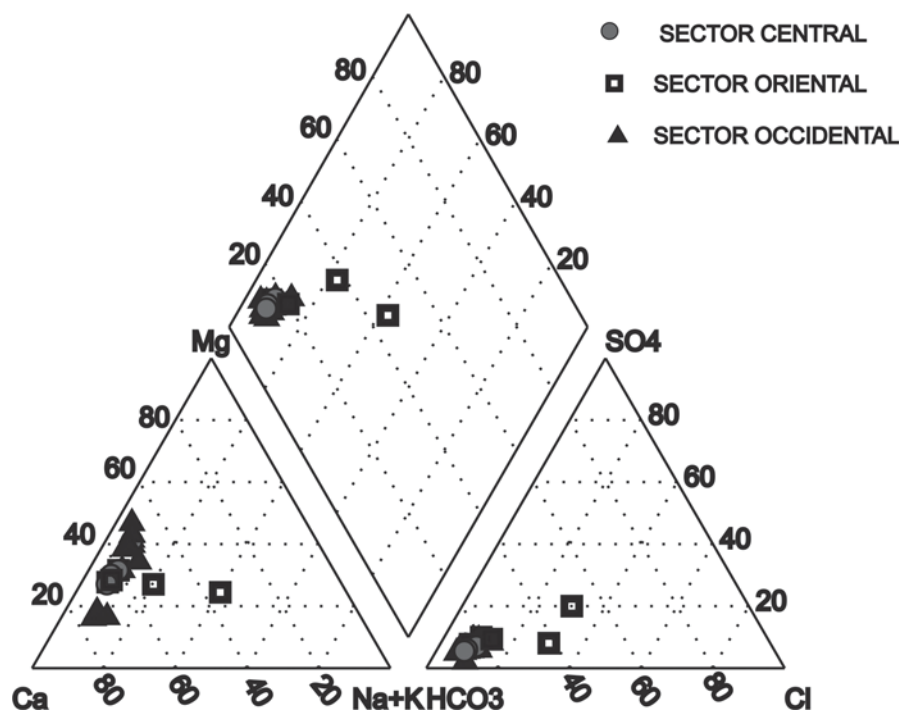


Fig. 2.- Diagrama de Piper con las concentraciones medias de iones mayoritarios que corresponden a los principales puntos de agua de la zona de estudio.

Fig. 2.- Piper diagram showing major ion average concentrations in mains wells and spring of the study zone.

el manantial de la Fuente del Castaño (7), mientras que en la zona meridional el flujo se dirige hacia el sur, hacia el manantial de La Herrería (8).

El sector oriental del acuífero (22,8 km<sup>2</sup>) cuenta con 3 km<sup>2</sup> de materiales acuíferos carbonáticos. Todos los materiales acuíferos buzan hacia el noreste y pertenecen al flanco norte del anticlinal de Fuenteheridos, presentado la formación Aracena un menor espesor por causas mecánicas. El flujo subterráneo se dirige hacia el norte y hacia el oeste, hacia la Fuente del Rey (9) y la zona del Molino del Bombo (10), respectivamente.

La transmisividad media, a partir de los escasos datos disponibles, es de 31 m<sup>2</sup>/día. La recarga media anual que se produce sobre materiales permeables es de 9 hm<sup>3</sup>/año, de los que 3 hm<sup>3</sup>/año son captados mediante tomas directas en los manantiales y sondeos de abastecimiento, 2 hm<sup>3</sup>/año se drenan por manantiales y 4 hm<sup>3</sup>/año lo hacen hacia el río Múrtigas y el arroyo de la Fuente del Rey (IGME, 2006).

#### Características físico – químicas de las aguas subterráneas en la zona de estudio

Para caracterizar hidroquímicamente el agua subterránea, se estableció durante los años 2003-2005 una red de muestreo, distribuida a lo largo de los tres sectores

del acuífero, y constituida por 16 manantiales y 3 sondeos (con profundidades inferiores a 80 m), que incluía la toma de pH, conductividad eléctrica y temperatura en campo. Para los análisis hidroquímicos se han utilizado técnicas espectrofotométricas y cromatográficas (cromatografía iónica). Se dispone de un total de 207 muestras analizadas.

En la tabla I se muestran los valores medios de los parámetros analizados en cada punto, agrupadas según el sector acuífero al que pertenecen. El tratamiento de los datos hidrogeoquímicos se ha realizado con el programa AQUACHEM 4.0 (Waterloo Hydrogeologic, 2003), que incorpora el código de modelización hidrogeoquímica PHREEQC (Parkhurst, 1995) y con el que se han calculado los índices de saturación de calcita y dolomita y la presión parcial de CO<sub>2</sub> de equilibrio.

Las aguas subterráneas del acuífero de la Sierra de Aracena están poco mineralizadas. Presentan conductividades eléctricas comprendidas entre 180 y 550 mS/cm, con un valor medio de 511 mS/cm y una temperatura media anual de 14 °C, que coincide con la temperatura media del aire en las principales zonas de recarga. La facies principales son la bicarbonatada cálcica y bicarbonatada cálcico magnésica. Están subsaturadas en calcita y dolomita y presentan presiones parciales de CO<sub>2</sub>, muy bajas, comprendi-

das entre los valores típicos del agua de lluvia, 10<sup>-3.5</sup> atm, y 10<sup>-2.79</sup> atm, con un valor medio de 10<sup>-3</sup> atm.

En la figura 2 se representa un diagrama de Piper en el que se han diferenciado los resultados analíticos disponibles según el sector acuífero de procedencia.

Las aguas del sector occidental presentan una alta heterogeneidad hidroquímica, sobre todo en lo que a la relación Ca/Mg se refiere. Esta mayor variabilidad se asocia al mayor número de manantiales y a su distinto comportamiento hidrodinámico. Los índices de saturación de calcita y dolomita medios son de -0,33 y -0,9, respectivamente. La presión parcial de CO<sub>2</sub> media es de 10<sup>-3.05</sup> atm. En el sector central las aguas son fundamentalmente bicarbonatado cálcico magnésicas y existe una mayor afección por contaminación que se manifiesta en la existencia de algunas muestras con contenidos altos de cloruros y sulfatos y en la mayor variabilidad del contenido en nitratos y sulfatos. El índice de saturación de calcita es de -0,45 y el de dolomita de -1,18. La PCO<sub>2</sub> media es de 10<sup>-3.07</sup> atm. En este sector existen ciertas diferencias hidroquímicas entre las aguas que se drenan hacia el norte, hacia la Fuente del Castaño y las que lo hacen hacia el sur, hacia el manantial de la Herrería. Las primeras están más subsaturadas en calcita y dolomita, tienen una menor presión parcial de CO<sub>2</sub> y un menor contenido en magnesio que las segundas. En el sector oriental las aguas son de tipo bicarbonatado cálcico magnésicas, aunque, las menos mineralizadas tienen facies bicarbonatado clorurado calcio magnésica. El índice de saturación medio de calcita es de -0,91 y el de dolomita de -1,5. La presión parcial de CO<sub>2</sub> media es de 10<sup>-3.2</sup> atm. En este sector existe una notable dispersión estadística del contenido en sulfatos, magnesio y cloruros, no así en el caso de los nitratos.

#### Discusión y conclusiones

El estudio hidroquímico de los principales puntos de agua del acuífero carbonático de la Sierra de Aracena ha permitido realizar una caracterización hidrogeoquímica preliminar de las aguas subterráneas.

Son aguas de facies bicarbonatada cálcica magnésica y bicarbonatada cálcica, fundamentalmente, con una mineralización media, a excepción de algún manantial con mineralización débil, semejante a la del agua de lluvia, en el sector oriental. Desde el punto de vista térmico, las aguas presentan temperaturas me-

NOMBRE	Nº IGME	Nº	Tipo	CL mg/L	SO4 mg/L	HCO3 mg/L	NO3 mg/L	NA mg/L	MG mg/L	CA mg/L	K mg/L	PH campo	CE mS/cm	Temp °C	I.S. Calcita	I.S. Dolomita	log (PCO2)
<b>SECTOR OCCIDENTAL</b>																	
<i>Fte. Cimbrera</i>	103770006	7	Manantial	8,86	12,57	286,57	6,67	5,57	27,29	56,57	0,71	7,54	540	13	-0,22	-0,51	-3,14
<i>Fte. Nogal</i>	103770020	7	Manantial	8,57	11,28	143	0,5	5,71	11,71	31,86	2,71	7,69	323,43	13,5	-0,89	-1,99	-3,27
<i>Curva Grande</i>	103770039	9	Manantial	13,11	12,55	320,22	0,75	7,67	30,77	67,22	0,89	7,76	612,57	15	-0,09	-0,25	-3,03
<i>Fte. Patrimonio</i>	103770051	10	Manantial	11	13,2	256,5	0,6	4,8	25,3	52,1	1,3	7,2	485,33	14,33	-0,44	-0,93	-3,04
<i>Fte. Pero</i>	103770080	8	Manantial	8,5	10,62	297,25	0,14	7,12	25,87	61,62	0,5	7,5	557,35	13,5	-0,18	-0,49	-3,1
<i>Fte. Santa</i>	103720005	12	Manantial	21,83	18,08	245,67	11,75	13,17	10,17	78,25	1,08	7,75	538,33	15,33	-0,27	-1,20	-3,06
<i>Fte. Carmen</i>	103720006	11	Manantial	15,09	12,63	279,18	11,7	9,45	10,36	85,63	0,36	7,15	490,83	14,6	-0,196	-1,07	-2,98
<i>El Agrión</i>	103730005	1	Manantial	14	3	262	10	9	11	78	0	7	539		-0,22	-0,99	-3,03
<i>La Duquesa</i>	103760010	8	Manantial	10,25	13,5	261	0,5	5	23,25	57,75	1,5	7,26	453	9,5	-0,36	-0,877	-2,97
<i>Pz. Fieheridos</i>	103770005	28	Manantial	10,03	13,14	280,57	3,61	6,11	24,21	60,14	1,14	6,94	501,29	14,27	-0,38	-0,92	-2,93
<i>Arias Montano</i>	103770008	13	Manantial	10,85	15	310,54	1,46	3,77	32,77	60,07	0,54	7,56	549,2	14,75	-0,12	-0,24	-3,07
<i>Manantial La Mina</i>	103770007	11	Manantial	15,27	10,27	215,27	0,5	5,09	19,9	45,9	2,27	7,22	457,2	14,33	-0,63	-1,36	-3,01
<b>SECTOR CENTRAL</b>																	
<i>Fte. Castaño</i>	103780028	23	Manantial	13	10,12	273,62	4,75	7,25	18,37	70,87	0,12	7	552,86	14	-0,64	-1,63	-3,15
<i>La Herreria</i>	103770050	10	Manantial	13,2	13,2	292,2	2,6	7,9	26,7	61,4	0,4	7,15	508,8	17	-0,3	-0,71	-2,98
<i>Sond. Rafael-2</i>	103780074	4	Sondeo	12,5	9	284,75	9	8	17	76,25	0	7,83	554		-0,2	-0,77	-3
<i>Sond. Fie Castaño</i>	103780028	8	Sondeo	13	10,12	273,62	4,75	7,25	18,37	70,87	0,12	7	552,86	13,71	-0,64	-1,63	-3,15
<b>SECTOR ORIENTAL</b>																	
<i>La Madrona</i>	113750037	11	Manantial	12,91	11,9	44,27	6,3	13,73	4,18	9,91	1,09	7,11	180,44	14,33	-2,31	-4,7	-3,43
<i>Abas.Corteconcep</i>	113750020	16	Sondeo	28,69	21,12	350,12	15	13,81	32,75	81,81	1,5	6,83	720,2	16,33	-0,33	-0,74	-2,79
<i>Fte. Rey</i>	103780001	10	Manantial	14,2	15,7	295,3	17,22	8,6	19,3	83,9	0	7,45	597	14	-0,09	-0,55	-3,09

Tabla I.- Resultados analíticos medios de las muestras de agua subterránea analizadas.

Table I.- Average analytical results in the ground water samples.

días en torno a los 14°C, que coinciden con la temperatura media del aire en las principales zonas de recarga de los acuíferos. Las aguas tienen mayores contenidos en magnesio en el sector occidental. En este mismo sector las aguas tienen mayores índices de saturación y mayores presiones parciales de CO<sub>2</sub> que en el resto. Este mayor grado de madurez hidroquímica se relaciona con el mayor tiempo de residencia de este sector del acuífero. Las reducidas dimensiones de los sectores central y occidental y el escaso volumen de reservas implican tiempos de residencia cortos, máxime si tiene en cuenta la importante recarga media de estos acuíferos, asociada a la alta pluviosidad. En el sector central existen ciertas diferencias entre las aguas subterráneas que drenan hacia la margen septentrional y la meridional y hay evidencias de una mayor afección por la contaminación, que se manifiesta con mayores contenidos en nitratos. El sector oriental, el de menores dimensiones, es el que presenta una menor saturación en calcita y dolomita y el que tiene menores contenidos en magnesio y menores presiones parciales de CO<sub>2</sub> y mayor variabilidad de la concentración de sulfatos, magnesio y cloruros, por lo que se deduce una mayor karstificación funcional de este sector.

Los reducidos valores de CO<sub>2</sub> que se miden en la zona investigada contrastan con la abundante vegetación que se instala en los suelos bastante desarrollados que existen sobre las calizas y mármoles que forman los acuíferos investigados y que permiten el cultivo del olivar, muy frecuente en los afloramientos carbonáticos

de la Sierra de Aracena. Sin embargo, según distintos autores (Benavente *et al.*, 2004 y Moral, 2005), este hecho puede estar relacionado con el importante y continuo lavado del CO<sub>2</sub> existente en la atmósfera del suelo y de la zona no saturada en zonas con una importante recarga. En este sentido, la recarga media estimada, mediante distintos métodos en los materiales carbonáticos de este acuífero está comprendida entre 430-440/año (Martos-Rosillo *et al. in pres*).

#### Agradecimientos

El presente trabajo constituye una contribución al IGCP 513 de la UNESCO. Se agradece a Manuel Bruque la realización de algunas figuras incluidas en el artículo.

#### Referencias

- Apalategui, O., Barranco, E., Contreras, F., Delgado, M y Roldán, D.J. (1984). *Mapa Geológico de España 1:50.000 hoja 681 (Aracena)*. IGME
- Bard, J.P. (1969). *Le métamorphisme regional progressif, des Sierras d'Aracena en Andalousie Occidentales*. Tesis Doctoral, Univ. de Montpellier. 397 p.
- Benavente, J. Moral, F. Vallejos, A. y Pulido, A. (2004). En: *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, 139-159.
- Crespo-Blanc, A. (1991). *Evolución geotectónica del contacto entre las zonas de Ossa-Morena y Surportuguesa en las sierras de Aracena y Aroche (Macizo*

*Ibérico Merdional): un contacto mayor en la cadena hercínica europea*. Tesis Doctoral, Univ. de Sevilla. 327 p.

- Díaz-Azpiroz, M. (2000). *Evolución tectono-metamórfica del Dominio de Alto Grado de la Banda Metamórfica de Aracena*. Tesis Doctoral. Univ. de Huelva. 556 pp.
- IGME. (2006). *Aplicación de las aguas subterráneas al sistema de abastecimiento mancomunado de los pueblos de la Sierra de Aracena*. IGME. Madrid.
- Martos-Rosillo, S., Martín-Machuca, M., Bros Miranda, T y Rodríguez, I. C. (2004). En: *IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua*. Comunicaciones, Tortosa.
- Martos-Rosillo, S., Moral, F., Rodríguez, M y Ocaña, A. (2006). En: *III Simposio Internacional del Karst. Karst, cambio climático y aguas subterráneas*. Comunicaciones. Málaga.
- Moral, F. (2005). *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura)*. Tesis Doctoral, Univ. Pablo de Olavide de Sevilla, 458 pp.
- Ocaña, A. (2005). *Modelización de los hidrogamas del río Múrtigas y del río Caliente (Sierra de Aracena) a partir de datos de precipitación*. Tesis de Licenciatura, Univ. Pablo de Olavide, Sevilla. 103 pp.
- Parkhurst, D. K. (1995). *User's guide to PHREEQC - A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations*. US Geological Survey, 143 pp.
- Waterloo Waterloo Hydrogeologic, I. (2003). *AquaChem user's manual*. Waterloo Hydrogeologic Inc., Canada, 184 pp.