

Identificación de la interacción aguas subterráneas-superficiales en la cuenca alta del río Andarax mediante el uso conjunto de parámetros químicos y la relación isotópica $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$

Identification of groundwater-surface water interaction in the upper basin of the Andarax river by joint use of chemical parameters and the $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ isotopic ratio

Francisco Navarro-Martinez¹, Francisco Sánchez-Martos¹ y Alejandro Salas García²

¹ 1G.I Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Dpto. Biología y Geología. Universidad de Almería. Campus Universitario. 04120 Almería.

fnm206@ual.es, fmartos@ual.es

² LARUEX, Laboratorio de Radiactividad Ambiental Dpto. Física Aplicada. Facultad de Veterinaria, Avda. Universidad, s/n, 10003, Cáceres (Spain).

alejandrosalasgarcia@gmail.com

ABSTRACT

Identifying the groundwater-surface water interaction is fundamental to understand the dynamics of rivers in arid and semi-arid environments where river flow is discontinuous. At the head of the Andarax river, the waters are bicarbonated and have low salinity. The influence of groundwater in surface waters has been studied through the joint use of chemical parameters and the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ isotopic ratio, which has allowed the identification of water types to study the mixing of waters. The results suggest the potential to use physico-chemical and isotopic data together as tracers of groundwater-surface interaction in semi-arid areas with the presence of carbonated and detritic aquifers.

Key-words: Groundwater-surface water interaction, hydrochemistry, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, strontium.

RESUMEN

Poder identificar la interacción agua subterránea-superficial es fundamental para comprender la dinámica de los ríos en ambientes semiáridos donde el caudal del río es discontinuo. A partir del análisis de una serie de parámetros químicos y la relación isotópica $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ se ha estudiado la influencia de las aguas subterráneas sobre superficiales identificando los diferentes términos de la mezcla. Los resultados indican la posibilidad de utilizar conjuntamente los datos físico-químicos e isotópicos como trazadores de la interacción agua subterránea-superficial en áreas con presencia de acuíferos carbonatados y detríticos.

Palabras clave: Interacción aguas subterráneas-superficiales, hidroquímica, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, estroncio.

Geogaceta, 63 (2018), 39-42
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 17 de julio de 2017
Revisión: 15 de octubre 2017
Aceptación: 23 de octubre 2017

Introducción

El río Andarax, situado en el SE de España, constituye un buen ejemplo de río semiárido. En su cuenca afloran materiales de litología muy diversa y gran complejidad tectónica. Todo ello unido a la climatología condiciona su dinámica hidrológica, desarrollándose corrientes de aguas permanentes y no permanentes, con gran variabilidad en la cantidad y calidad del agua superficial. Esta variabilidad se manifiesta en la salinidad de sus aguas con una tendencia general ascendente según el sentido de flujo. Sin embargo existen algunas zonas donde la tendencia es diferente, estabilizándose e incluso descendiendo.

A lo largo del trabajo se analiza con detalle la zona de cabecera del río Andarax y se

identifican los procesos que afectan al quimismo de las aguas superficiales y su dependencia de las aguas subterráneas.

Zona de estudio

En la cuenca del río Andarax afloran materiales de origen metamórfico (micaesquistos y filitas) en Sierra Nevada, rocas carbonatadas (calizas y dolomías) en Sierra de Gádor, junto con conglomerados, margas arenosas y depósitos aluviales que afloran en la zona central del valle.

En la zona de cabecera se diferencian dos acuíferos carbonatados y un acuífero detrítico. El acuífero carbonatado de Sierra de Gádor (CSG) está integrado por rocas calizo-dolomíticas aflorantes a lo largo de unos 900 km²

en la Sierra de Gádor. El acuífero carbonatado de Sierra Nevada (CSN) corresponde con un pequeño afloramiento (35 km²) de calizas y dolomías en la vertiente sur de Sierra Nevada. El acuífero detrítico (DLF) incluye a los materiales aluviales y coluviales de pequeño espesor aflorantes en la depresión Laujar - Fondón. Está mayoritariamente compuesto de conglomerados y gravas con abundantes cantos metapelíticos y carbonatados.

A partir de los datos históricos de la estación de aforos situada en el tramo medio de la cuenca, Carrasco y Martín (1988) estiman unos caudales medios de 15 – 19 hm³/año y durante el periodo 1982 - 1992 oscilan entre 2,6 – 43,3 hm³/año (Sánchez Martos, 2001). Ante esta variabilidad hidrológica se han realizado una serie de aforos di-

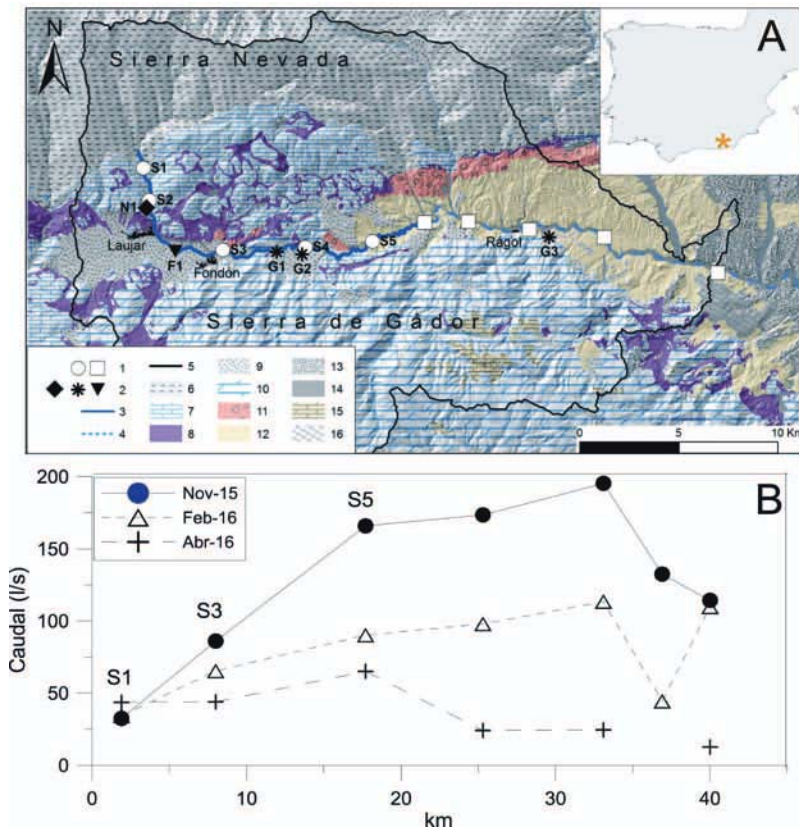


Fig. 1.- (A) Esquema geológico de las cuencas alta y media del río Andarax. 1: puntos aguas superficiales, 2: puntos aguas subterráneas, 3: río con caudal permanente, 4: río con caudal no permanente, 5: limite cuenca hidrográfica, 6: micaesquistos, 7: calizas y dolomías, 8: filitas, 9: conglomerados cuaternarios, 10: dolomías, 11: conglomerados rojos, 12: margas y arenas, 13: conglomerados pliocuaternarios, 14: arenas y gravas aluviales 15: calcarenitas, 16: travertinos. Círculos: área oeste. Cuadrados: área este. B) Caudal del río Andarax (l/s) en los tres muestreos hidroquímicos considerados. Ver figura en color en la web

Fig. 1.- (A) Geological setting of the middle and upper watersheds of the Andarax river. 1: Sampling points surface water, 2: sampling points ground water, 3: river with continuous flow, 4: river with discontinuous flow, 5: catchments, 6: mica-schists, 7: limestones and dolomites, 8: phyllites, 9: quaternary conglomerates, 10: dolomites, 11: red conglomerates, 12: marls and sands, 13: plio-quaternary conglomerates, 14: alluvial sands and gravels, 15: calcarenites, 16: travertines. Circles: western area. Squares: eastern area. B) Flow of the Andarax river (l/s) in the hydrochemical samplings carried out. See color figure in the web.

ferenciales a lo largo de 40 km del río durante el periodo Noviembre 2015 –Abril 2016 (Fig. 1B), coincidiendo con la toma de datos hidroquímicos.

Métodos

Los datos químicos se han obtenido en tres muestreos (Noviembre 2015, Febrero y Abril de 2016) sobre 10 puntos de agua superficial y 5 de agua subterránea (Fig. 1A). La conductividad eléctrica y temperatura se miden *in situ*. El contenido en HCO_3^- se determina en campo mediante valoración. Todas las muestras fueron filtradas mediante filtros de membrana de 0,45 μm , acidificadas a $\text{pH} < 2$ con HNO_3 suprapuro y almacenadas a 4°C. Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y Sr se han determinado mediante un *ICP-Mass Spectrometer*. La actividad de los isótopos del ^{238}U y ^{234}U se ha determinado me-

dante espectrometría alfa en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura.

Resultados y Discusión

De acuerdo con las características hidroclógicas de la cuenca y los datos hidroquímicos del río pueden separarse dos zonas con características físico - químicas diferentes.

En el tramo este, el río se comporta como no permanente, especialmente aguas abajo de Rágol, y las aguas tienen una salinidad comprendida entre 724 y 1850 $\mu\text{S}/\text{cm}$. (Fig. 2A). Su facies es sulfatada, con un predominio de los iones Cl^- y SO_4^{2-} con respecto al HCO_3^- (Fig. 2B). En el diagrama Durov (Fig. 3) se observa que los puntos están muy alineados, con una evolución homogénea directamente relacionada con el aumento de salinidad.

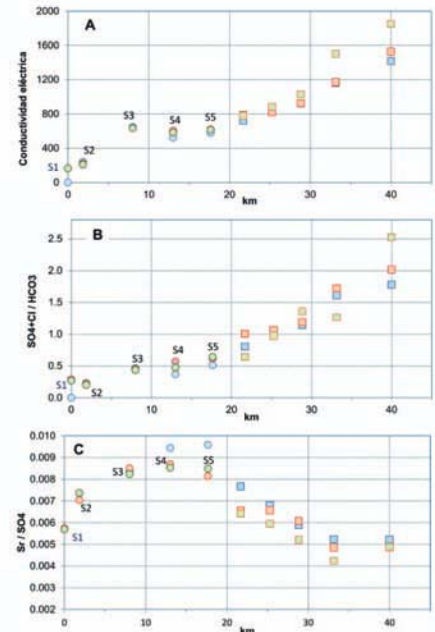


Fig. 2.- Evolución longitudinal de la Conductividad Eléctrica, relación $\text{SO}_4 + \text{Cl} / \text{HCO}_3$ (meq/l) y Sr/SO_4 (mg/l). Círculos: área oeste. Cuadrados: área este. Los colores corresponden a los tres muestreos. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Longitudinal evolution of Electrical Conductivity, $\text{SO}_4 + \text{Cl} / \text{HCO}_3$ ratio (meq/l) and Sr/SO_4 ratio (mg/l). Circles: western area. Squares: eastern area. The colors indicate the three samplings. See color figure in the web.

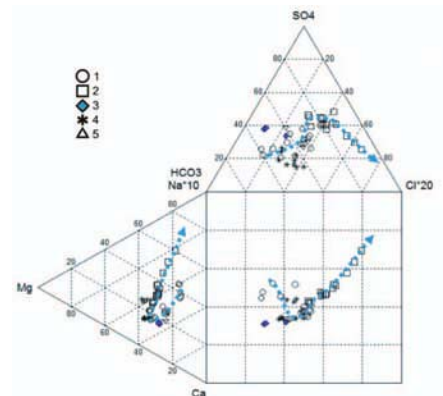


Fig. 3.- Diagrama de Durov. Aguas superficiales (1: área oeste, 2: área este). Aguas Subterráneas (3: CSN, 4: CDG, 5: DLF). La flecha representa la dirección de la corriente en las aguas superficiales. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Durov Diagram. Surface water (1: western area, 2: eastern area). Groundwater (3: CSN, 4: CDG, 5: DLF). The arrow represents the direction of surface water flow. See color figure in the web.

En la zona oeste el caudal es continuo a lo largo del periodo muestreado, la conductividad tiene valores relativamente bajos, oscila entre 163 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 645 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Especialmente presenta un incremento hasta el punto S3, aguas abajo se mantiene muy estable, incluso con un ligero descenso entre los puntos S3 y S5 (Fig. 2A). Las aguas tienen facies bicarbonatada cálcica y evolucionan según el sentido

de la corriente hacia bicarbonatada cálcico-magnésica con una variabilidad química notable. En el diagrama de Durov (Fig. 3) los puntos se disponen muy dispersos.

Para discriminar con precisión los procesos que pueden afectar al quimismo de las aguas superficiales se ha considerado el Sr, un elemento minoritario que está ligado a los procesos de disolución de rocas carbonáticas (Díaz Puga *et al.*, 2016). En la cuenca del río Andarax se ha detectado una relación entre el contenido en Sr en las aguas y la presencia de depósitos evaporíticos en los materiales detríticos aflorantes en la cuenca media (Sánchez Martos, *et al.*, 1999). La distribución longitudinal de la ratio Sr/SO₄ en las aguas superficiales (Fig. 2C) muestra la separación entre la zona este y la zona oeste. En esta zona se observa que en el tramo del río comprendido entre los puntos S3 y S5 alcanza los valores más elevados (0,008-0,010), mientras que en los puntos situados en el borde sur de Sierra Nevada (S1 y S2) los valores son inferiores (0,006-0,008).

Ante la variabilidad del quimismo de las aguas superficiales en la zona Oeste, se plantea conocer la influencia que pueden ejercer

las aguas subterráneas sobre la evolución química de las aguas superficiales. Para ello se ha muestreado agua de cuatro puntos representativos de los tres acuíferos: CSN (punto N1) CSG (puntos G1, G2 y G3) y DLF (punto F1). Su situación se representa en la figura 1A y un resumen estadístico de los datos hidroquímicos se incluye en la tabla I.

Al considerar la relación Mg/HCO₃ (Fig. 4) se observa que las aguas superficiales de la zona oeste muestran una tendencia ascendente según el sentido de la corriente. Los valores más bajos se alcanzan en el punto S1, situado a cotas más elevadas y en un entorno de rocas mayoritariamente metapelíticas. Los máximos se alcanzan en el punto S5, situado en el tramo final de la zona donde el río circula muy cercano al afloramiento carbonatado de Sierra de Gádor. Esta evolución puede interpretarse asociada con el desarrollo de procesos de disolución relacionados con aguas que circulan sobre rocas calizo-dolomíticas, lo que favorece el incremento del Mg²⁺ con respecto al HCO₃⁻. La representación de la relación Ca/Sr con respecto a la relación Mg/HCO₃ muestra una alineación de las aguas superficiales según el sentido de flujo (Fig. 4).

Al considerar las aguas subterráneas del CSG se observan algunas diferencias entre los puntos G1 y G2 (manantiales asociados con flujos más superficiales) y el punto G3 (sondeo). La diferencia más significativa está relacionada con el aumento de la relación Mg/HCO₃ en el G3. Este punto representa un flujo más profundo, con mayor tiempo de contacto agua/roca, lo que permite que se desarrollen los procesos hidrogeoquímicos descritos en este acuífero en Díaz Puga *et al.* (2016). En los puntos G1 y G2, la relación Ca/Sr es más elevada y la relación Mg/HCO₃ es menor que en el punto G3. Todo ello probablemente se asocia a los procesos de disolución de rocas carbonatadas, que poseen algunos niveles con mayor proporción de calizas donde el efecto de la disolución de las dolomías es menos significativo, lo que favorece la disminución de la relación Mg/HCO₃. En esta figura 4 el manantial N1 (CSN), que descarga el acuífero carbonatado (CSN) aflorante en Sierra Nevada, se dispone alejado de las aguas del CSG. Las aguas del N1 tienen baja salinidad (350 µS/cm) y representan un flujo rápido en relación con la recarga directa asociada a la escorrentía en el borde de la Sierra Nevada. Por otro lado las aguas del acuífero detrítico DLF (F1) corresponden a una descarga difusa en la zona más baja de la depresión y se disponen (Fig. 4) muy cercanas a las aguas superficiales (S3). En esta zona, el río es permanente y sus aguas experimentan un incremento salino significativo con respecto al S2 (Fig. 2A), lo que muestra la influencia significativa de las aguas subterráneas del DLF sobre las aguas superficiales.

Para analizar con más detalle todos estos procesos se ha considerado conjuntamente el uranio total y la relación isotópica ²³⁴U/²³⁸U (Fig. 5). Las aguas superficiales de la zona oeste tienen los contenidos en U más bajos (<2,06 µg/l) y el punto S5 alcanza la relación isotópica ²³⁴U/²³⁸U (1,10-1,92) más elevada de las aguas superficiales. Riottte y Chabaux (1999) indican la dependencia entre los valores de la relación isotópica ²³⁴U/²³⁸U del agua superficial y los diferentes tipos de rocas, alcanzándose valores elevados de ²³⁴U/²³⁸U en ríos que fluyen sobre rocas carbonatadas, como el caso del tramo permanente del río Andarax, especialmente aguas arriba del punto S5 (1,59-1,92). Los valores más altos de la relación isotópica ²³⁴U/²³⁸U (2,31-2,80) se alcanzan en el punto G2 (manantial del acuífero carbonatado CSG) con los contenidos más bajos de U (0,98-1,05), datos coherentes con Kronfeld *et al.* (1994) que describe algunos ejemplos de altos valores en la rela-

	CE	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Sr	²³⁴ U/ ²³⁸ U		
Aguas subterráneas	Zona Oeste (14)	645	311,1	126,0	11,0	92,9	36,0	12,2	1026	1,92	Max
		459	224,4	72,2	5,6	64,3	22,4	7,7	609,6	1,44	Med
		163	91,5	18,0	1,0	20,9	5,2	5,4	102	1,10	Min
		204	86,2	42,3	3,7	27,8	12,8	2,1	381	0,32	D. St.
	Zona Este (15)	1850	427,0	603,0	109,0	182,7	94,5	114,7	2734	1,38	Max
		1089	321,7	332,8	31,8	131,8	63,2	35,7	1808,0	1,26	Med
		724	244,0	174,0	10,0	97,9	44,6	14,1	1290	1,10	Min
		340	46,3	140,9	28,1	30,3	18,6	27,8	495,2	0,10	D. St.
	DLF (3)	707	311,1	111,0	10,0	105,5	28,4	11,9	946	1,10	Max
		642	288,7	99,0	7,7	97,1	26,0	9,9	922	1,03	Med
		573	250,1	90,0	4,0	84,9	22,2	7,2	881	0,99	Min
		67	33,6	10,8	3,2	10,8	3,3	2,4	36,2	0,06	D. St.
Aguas superficiales	CSG (5)	1028	536,8	141,0	13,0	120,2	73,7	9,2	1599	2,80	Max
		650	348,4	75,3	7,4	81,1	41,4	6,1	851,3	2,28	Med
		461	250,1	36,0	4,0	57,0	25,0	4,0	443	1,84	Min
		264	134,1	45,9	3,5	29,1	21,2	2,2	523,8	0,37	D. St.
	CSN (3)	354	176,9	54,0	3,0	55,1	16,7	3,8	797	Sin datos	Max
		351	168,8	51,0	1,7	50,6	15,8	3,6	742,7		Med
		347	158,6	48,0	1,0	47,9	15,3	3,4	693		Min
		4	9,3	3,0	1,2	3,9	0,8	0,2	52,3		D. St.

Tabla I.- Parámetros estadísticos básicos de los datos hidroquímicos. CE: Conductividad eléctrica (µS/cm); contenidos iónicos en mg/l, excepto Sr y U en µg/l. Max: máximo, Med: media, Min: mínimo; Des. St.: Desviación estándar. En paréntesis se indica el número de datos utilizados.

Table I.- Summary of the hydrochemical data statistics. CE: Electrical Conductivity (µS/cm); ionic contents mg/l, except Sr and U in µg/l. (Max: minimum values; Min: maximum values; Med: mean values; Desv. St.: standard deviation). The number of data used is indicated between parentheses.

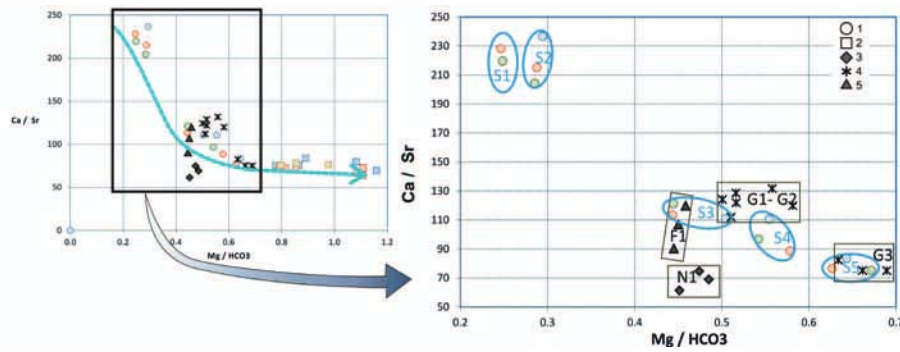


Fig. 4.- Relación Ca/Sr (mg/L) con respecto a Mg/HCO₃ (meq/l). Aguas superficiales (1: área oeste. 2: área este). Aguas subterráneas (3: CSN, 4: CSG, 5: DLF). La flecha representa la dirección de la corriente en las aguas superficiales. Los colores corresponden a los tres muestreos. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- Ca/Sr (mg/L) versus Mg/HCO₃ (meq/l). Surface waters (1: western area 2: eastern area). Groundwater (3: CSN, 4: CDG, 5: DLF). The arrow represents the direction of surface water flow. The colors indicate the three samplings. See color figure in the web.

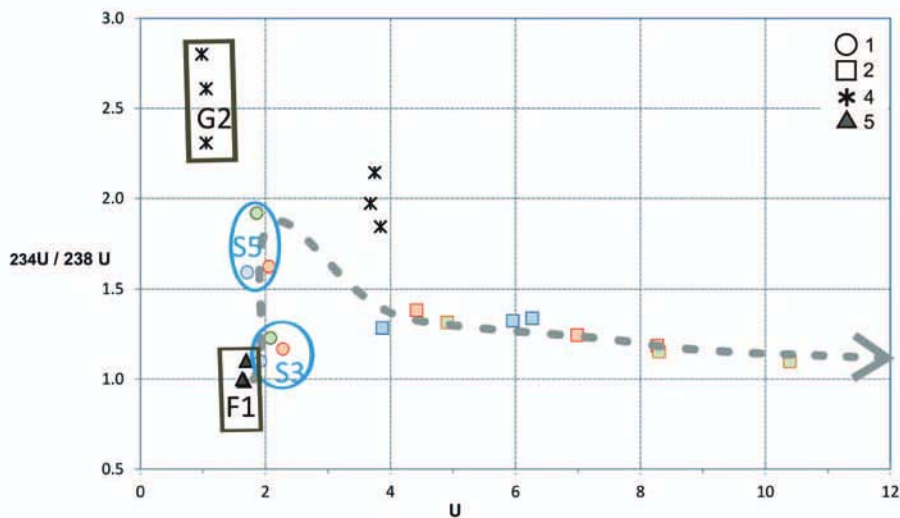


Fig. 5.- Relación isotópica ²³⁴U/²³⁸U con respecto al contenido uranio (µg/L). Aguas superficiales (1: área oeste. 2: área este). Aguas subterráneas (4: CSG y 5: DLF). La flecha representa la dirección de la corriente en las aguas superficiales. Los colores corresponden a los tres muestreos. Ver figura en color en la web.

Fig. 5.- Isotopic ratio ²³⁴U/²³⁸U versus total uranium in the waters (µg/L). Surface waters (1: western area 2: eastern area). Groundwaters (4: CDG) and 5: DLF. The arrow represents the direction of surface water flow. The colors indicate the three samplings. See color figure in the web.

ción isotópica ²³⁴U/²³⁸U en zonas de infiltración rápida sobre rocas dolomíticas.

Todo esto induce a plantear el uso de la relación isotópica ²³⁴U/²³⁸U como trazador del movimiento del agua en zonas carbonatadas. En la figura 5 se observa que el agua superficial del punto S5 se dispone en posición intermedia entre el S3 (aguas superficiales) y el G2 (acuifero carbonatado, CSG), lo que puede interpretarse asociado a la influencia de las aguas subterráneas que drenan el CSG sobre las aguas superficiales del río, representadas por S3. En el punto S5 el río Andarax posee un caudal permanente todo el año y su salinidad experimenta siempre un descenso relativo con respecto al punto S3, situado aguas arriba. Estos resultados son coherentes con las interpretaciones que se obtienen a partir de datos

hidroquímicos (Sánchez-Martos *et al.*, 2016) y la evolución hidrológica del caudal del río (Navarro-Martínez, *et al.*, 2016). Además se muestra la similitud entre las aguas del acuifero detrítico (DLF) representadas por el punto F1 y las aguas superficiales del río en el punto S3, tal y como se ha señalado al considerar la relación Sr/Ca con respecto Mg/HCO₃ (Fig. 4). Todo ello refleja la influencia de las aguas subterráneas sobre las superficiales en el tramo final de la depresión de Laujar-Fondón.

Consideraciones finales

El uso de la relación isotópica ²³⁴U/²³⁸U conjuntamente con otros parámetros hidroquímicos y elementos minoritarios (Sr y U) muestra una buena resolución para identificar la inter-

acción aguas subterráneas – superficiales en la zona de cabecera del río Andarax. De acuerdo con estos datos se identifica la influencia de las aguas subterráneas (CSG) sobre las superficiales en la zona situada aguas arriba del punto S5. Esta influencia es la responsable de los altos contenidos en la relación isotópica ²³⁴U/²³⁸U que presentan las aguas superficiales del río, que mantiene un caudal continuo durante todo el ciclo hidrológico y muestra una salinidad más estable, con respecto a la zona de Fondón, situada aguas arriba. Además permite detectar la influencia que ejercen las aguas subterráneas del acuifero detrítico en la depresión de Laujar-Fondón sobre el río Andarax, lo que favorece que el río en el entorno del punto S3 posea una corriente permanente, cuando aguas arriba se han detectado en el verano algunos tramos con una corriente discontinua.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto P11-RNM-8115 financiado por la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía. Es una contribución del Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3). A los revisores que con sus comentarios y sugerencias han mejorado la calidad final del trabajo

Referencias

- Carrasco, A. y Martín, G. (1988). En: *Tecnología sobre la Intrusión en Acuíferos Costeros*. TIAC'88, II, 37-67.
- Díaz Puga, M.A. Vallejos, A. Sola, F. Daniele, L. Molina, L. y Pulido-Bosch, A. (2016), *International Journal of Environmental Science and Technology* 13, 2579–2596.
- Kronfeld, J. Vogel, J.C. y Talma, A.S. (1994). *Earth and Planetary Science Letters* 123(1–3), 81–93.
- Navarro-Martínez, F., Sánchez-Martos, F., Gisbert, J., Molina, L. y Rigol, J.P. (2016). En: *Las aguas subterráneas y la planificación hidrológica*, 187–192.
- Riotte, J. y Chabaux, F. (1999). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63(9), 1263–1275.
- Sánchez Martos, F. (2001). *Las aguas subterráneas en el Bajo Andarax (Almería)*. Tesis doctoral, Universidad de Almería, 278 p.
- Sánchez-Martos, F., Pulido-Bosch, A. y Calaforra, J.M. (1999). *Applied Geochemistry* 14, 735-745.
- Sánchez-Martos, F., Navarro-Martínez, F., Gisbert, J., Gallego, J., Molina Sánchez, L. y Vallejos Izquierdo, A. (2016). *Geogaceta* 59, 35–38.