

# Aspectos hidrogeoquímicos sobre la relación aguas subterráneas-aguas superficiales en el río Andarax (Almería)

*Hydrogeochemical aspects about the interaction groundwater-surface water in the Andarax river (Almería)*

Sánchez-Martos F., Pulido-Bosch A., Vallejos A., Gisbert J. y Molina L.

Departamento de Hidrogeología y Química Analítica, Universidad de Almería. Campus Universitario, 04120 Almería. fmartos@ual.es

## ABSTRACT

*The Andarax river is characterized by the variability of its flow, which is dependent upon the rainfall regime of the area. This work presents a study of the chemical composition of the surface waters of the Andarax river over an annual cycle. It analyses the relationship between ground water and surface waters using a hydrogeochemical methodology. The ground water-surface water interactions was found to be more intense in two areas: the north of Almócita and north of Santa Fe. North of Almócita local discharges of good quality water arise, which leads to the chemical stabilization of the surface water. In this stretch, electrical conductivity, temperature and ion concentrations are constant, and lower than at adjacent sampling points. At north of Santa Fe, in the mid-section of the river, a contrasting effect is observed with an increase in salinity and seasonal variability. Concentrations of  $Cl$  and  $SO_4^{2-}$  become elevated, and there is a marked increase in salinity – especially during low flow periods when the majority of the surface flow derives from groundwater drainage.*

**Key words:** ground water/surface water interactions, hydrochemistry, Andarax.

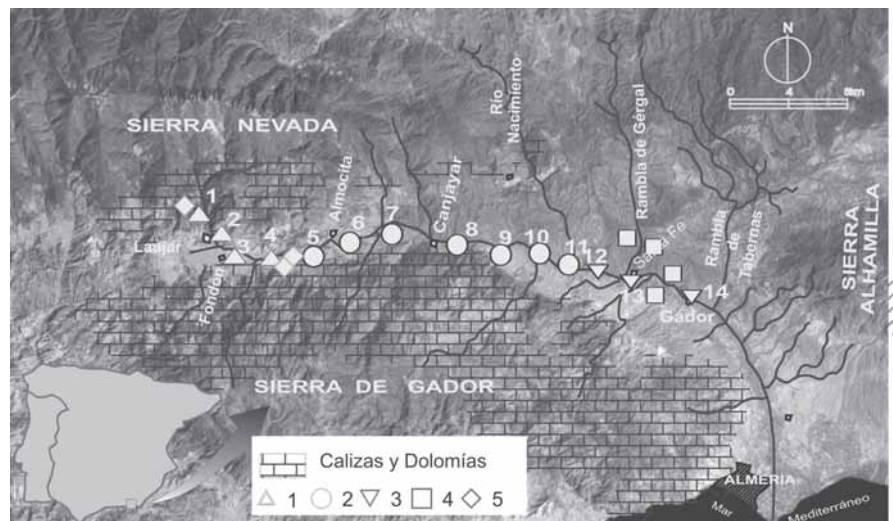
*Geogaceta*, 37 (2005), 91-94  
ISSN:0213683X

## Introducción

La cuenca del río Andarax, situada en el SE de España (Fig.1), posee una tectónica muy compleja y amplia diversidad litológica. En las estribaciones de Sierra Nevada afloran mayoritariamente materiales metapelíticos: micasquistos y cuarcitas fundamentalmente y en Sierra de Gádor los materiales son mayoritariamente calizodolomíticos. A lo largo del área central del valle afloran depósitos postorogénicos: margas de edad miocena con intercalaciones arenosas y algunos niveles de yeso; discordante sobre estos materiales se dispone una formación regresiva de edad plioceno compuesta por arenas y limos arenosos con algunos niveles conglomeráticos. La serie se completa con un conjunto de formaciones detríticas cuaternarias de reducido espesor y gran extensión superficial (Voermans *et al.* 1983a, Voermans *et al.* 1983b). Los dos acuíferos más significativos del área corresponden con el acuífero carbonatado de Sierra Gádor y el acuífero detrítico que se extiende en el Bajo y Medio Andarax (Fig. 1). El caudal del río Andarax posee una gran variabilidad interanual puesto que las aportaciones medias se han estimado entre 15 - 19 hm<sup>3</sup>/año (Carrasco *et al.* 1988) y durante

el periodo 1982-1992 oscilan entre 2.6 y 43.3 hm<sup>3</sup>/año (Sánchez-Martos 1997), manteniendo el cauce totalmente seco durante los meses estivales en Canjajar, donde se encuentra la única estación de aforos. Esto no permite la ejecución de aforos diferenciales con el objeto de

cuantificar las posibles descargas subterráneas hacia el río, puesto que en el área de cabecera existen una serie de manantiales (Nacimiento de Laujar, Fuente de Godoy, Los Naranjos) que drenan el acuífero carbonatado. Además en el Medio Andarax, al norte de Santa Fe, el cau-



**Fig. 1.- Esquema geológico de la cuenca del río Andarax donde se sitúan los puntos de muestreo en las aguas superficiales (1: área de cabecera, 2: área central, 3: área final) y en las aguas subterráneas (4: acuífero detrítico, 5: acuífero carbonatado).**

*Fig. 1.- Geological situation of the River Andarax. Sampling points: Surface water (1: river headwater, 2: middle basin, 3: middle-lower basin). Groundwater (4: detrític aquifer, 5: carbonated aquifer).*

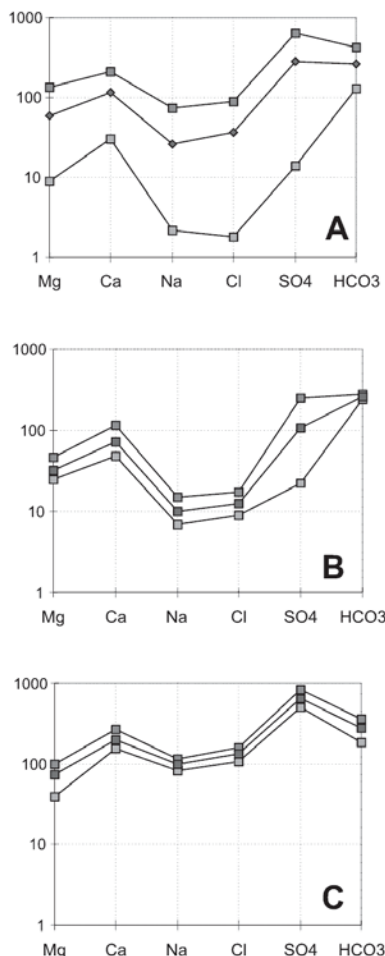


Fig. 2.- Diagrama de Schoeller-Berkaloff correspondiente a los valores máximos, medios y mínimos. (A): Aguas superficiales, (B): Acuífero Carbonatado del Alto Andarax y (C): Acuífero Detrítico en el Medio Andarax.

Fig. 2.- Schoeller-Berkaloff diagram corresponding to the maximum values, means and minima. (A): Surface water, (B): Carbonated Aquifer of the River Andarax upper basin and (C): Detritic Aquifer River Andarax middle basin.

ce presenta en algunas épocas del año una pequeña circulación superficial, a pesar de estar totalmente seco aguas arriba. Dada la ausencia de varias estaciones de aforo se han caracterizado químicamente las aguas superficiales del río Alandarax, efectuándose una serie de consideraciones sobre la influencia hidrogeoquímica de la descarga subterránea en las aguas del río Andarax.

Datos

Los datos de las aguas superficiales corresponden a 14 puntos de control distribuidos a lo largo de 35 kilómetros so-

bre los que se han realizado cuatro muestreos durante un ciclo anual. Un resumen de estos datos se muestra en la Tabla I. También se han considerado los datos de aguas subterráneas en los acuíferos próximos al río Andarax: el acuífero carbonatado de la Sierra de Gádor, en el Alto Andarax y el acuífero detrítico, en el Bajo y Medio Andarax. En el acuífero carbonatado del Alto Andarax se han seleccionado tres puntos de muestreo correspondientes a los manantiales del Nacimiento de Laujar, fuente de Godoy y los Naranjos. Sus aguas tienen baja salinidad (305 – 441  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y facies bicarbonatada-sulfatada cálcica (Tabla I y Fig. 2). En el acuífero detrítico del Bajo y Medio Andarax se han seleccionado cuatro puntos situados en el entorno de Santa Fe; sus aguas son más salinas (1510 – 2010  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y tienen facies sulfatada cálcica (Tabla I y Fig. 2). Las aguas superficiales del río experimentan un incremento continuado en su conductividad eléctrica a lo largo de su recorrido. La evolución espacial de este parámetro (Fig. 3) permite distinguir tres sectores: área de cabecera, central y final. El área de cabecera corresponde a la depresión de Laujar – Fondón entre los puntos 1 y 4, donde el agua muestra un rápido incremento de conductividad, hasta alcanzar 650  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y sus aguas son bicarbonatadas cálcicas. En el área central (entre los puntos 5 y 11) la salinidad oscila entre 500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y 1000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y su facies es sulfatada-bicarbonatada cálcica. En el área baja (entre los puntos 12 y 14) aumenta en la conductividad que oscila entre 1000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y 1600  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y su facies es sulfatada cálcica (Tabla I).

Discusión

El enriquecimiento salino que experimentan las aguas superficiales a lo largo del cauce corresponde a una evolución sulfatada (Fig. 3). Esta evolución no es gradual, sino que existen algunas variaciones significativas de diferente signo. En el área de cabecera (1 - 4) las aguas tienen baja salinidad, aunque localmente experimentan un rápido incremento de la conductividad (650  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y los contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$  (109  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y  $\text{NO}_3^-$  (14  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). El aumento del contenido en  $\text{NO}_3^-$  es muy elevado, considerando especialmente su valor medio (4.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y la baja salinidad de las aguas (la conductividad media de esta zona es 385  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) Los contenidos en  $\text{NO}_3^-$  de todas las aguas del río Andarax están

directamente correlacionados con la salinidad de las aguas ( $r^2 = 0.78$ ) tal y como se observa en la figura 4a, donde se representa la línea de este ajuste. Sin embargo existen tres datos correspondientes al entorno de Fondón que están por encima de ésta línea, por lo que debe existir alguna influencia local que favorece el incremento del contenido en  $\text{NO}_3^-$ . El área de Fondón es una pequeña depresión rellena de materiales detríticos medios-gruesos, donde existe una intensa actividad agrícola tradicional. Estos máximos valores pueden relacionarse directamente con el lavado del  $\text{NO}_3^-$  parcialmente fijado en la zona no saturada y/o infiltrado en el acuífero como consecuencia de las actividades agrícolas, que posteriormente se moviliza hasta alcanzar las aguas superficiales del río Andarax (Duff y Triska 2000).

El aumento continuado de la salinidad de las aguas superficiales se altera bruscamente en el punto nº 5, donde la conductividad eléctrica del agua disminuye con respecto a los puntos situados en su entorno más inmediato. (Fig. 3). Entre los puntos 4 y 5 el río discurre en contacto directo con los materiales carbonatados de Sierra de Gádor que

		Cond.	SO4	NO3	SO4/Cl
Area Cabecera		650	109.0	14.0	14.4
	Max	113	14.0	0.0	3.5
	Med	385	66.6	5.3	8.3
	D.Std.	192	34.1	5.5	3.6
Area Central		1186	501.0	16.0	9.4
	Max	480	76.0	6.0	5.6
	Med	819	253.0	10.5	8.1
	D.Std.	218	123.3	2.5	1.0
Area Baja		1594	634.0	21.8	5.4
	Max	1016	400.0	15.0	4.5
	Med	1367	535.8	19.1	5.1
	D.Std.	212	90.0	2.2	0.3
Acuífero detrítico		2010	820	30.0	4.3
	Max	1510	504.0	9.0	2.7
	Med	1767	644.3	21.7	3.7
	D.Std.	185	130.0	8.5	0.6
Acuífero Carbonatado		441	50.1	0.0	5.3
	Max	305	22.0	0.0	1.5
	Med	384	39.3	0.0	3.6
	D.Std.	70	15.1	0.0	2.0

Tabla I.- Parámetros estadísticos básicos de los datos hidroquímicos correspondientes a las aguas superficiales y subterráneas. Cond: Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ); contenidos iónicos en  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  en  $\text{meq/l}$ . Max: máximo, Min: mínimo, Med: media; D.Std: desviación estándar.

Table I.- Summary of the hydrochemical data statistics corresponding to the surface water and groundwater. Cond: Electrical Conductivity ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ); ionic contents in  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  ration in  $\text{meq/l}$ . (Min: minimum values; Max: maximum values; Med: mean values; D.Std: standard deviation.

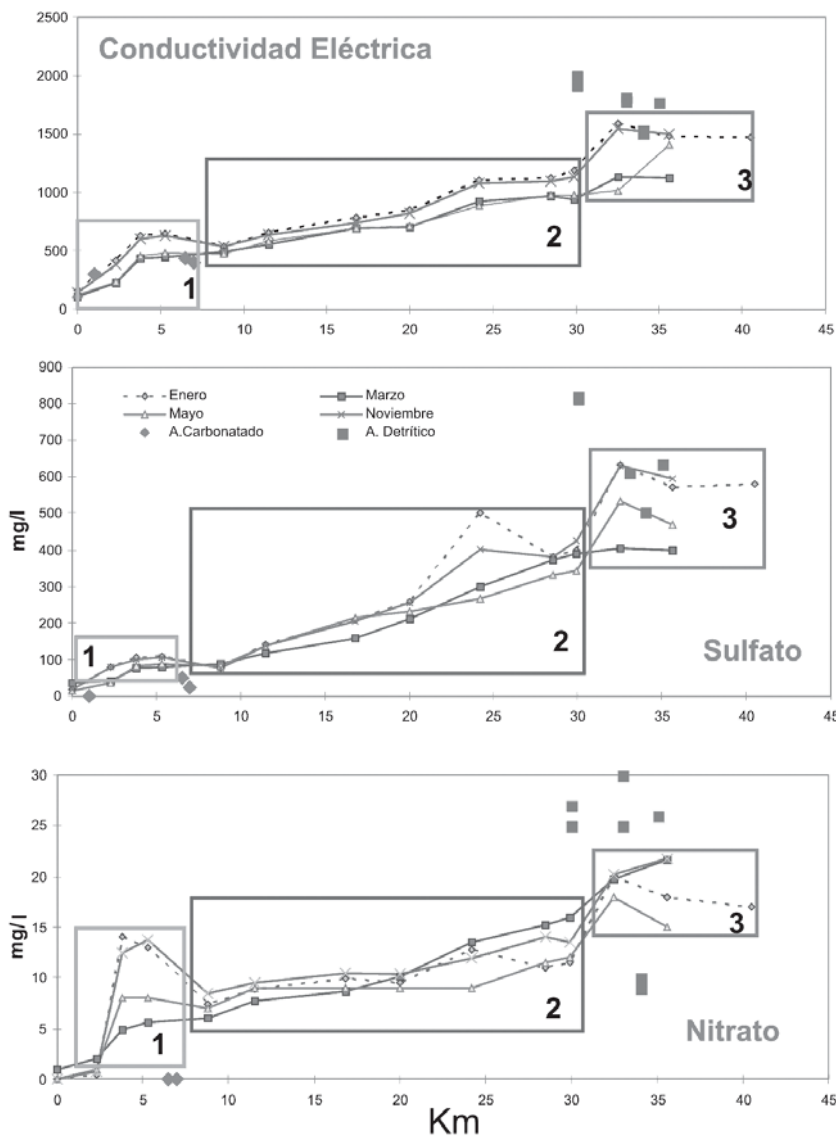


Fig. 3.- Evolución longitudinal de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) de las aguas superficiales y subterráneas. Se han señalado los tres sectores definidos a lo largo del texto (1: área de cabecera, 2: área central, 3: área final) y los datos correspondientes a las aguas subterráneas del acuífero carbonatado y detrítico.

Fig. 3.- Electrical conductivity values along River Andarax ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) and content of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NO}_3^-$  ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) of surface water and groundwater. Sampling points: Surface water (1: river headwater, 2: middle basin, 3: middle-lower basin). Groundwater (4: detritic aquifer, 5: carbonated aquifer)

constituyen un acuífero de importancia regional y cuyas aguas tienen baja salinidad (aproximadamente  $600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Por tanto, el flujo subterráneo desde el acuífero carbonatado hacia el propio río puede favorecer la disminución de la salinidad señalado en el punto nº 5 que mantiene una homogeneidad muy notable a lo largo de todo el periodo de muestreo.

La situación en el área baja (puntos 12, 13 y 14) es inversa a la anterior: la conductividad se eleva notablemente, presenta un amplio rango de variación y se alcanzan los contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$

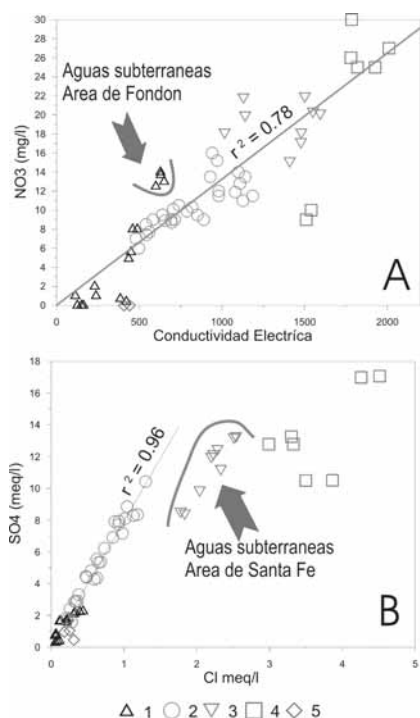
más altos (Fig. 3). Para analizar esta anomalía sobre el modelo general se han utilizado conjuntamente los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  (Fig. 4). Los puntos de las áreas de cabecera y central muestran una buena relación ( $r^2=0.96$ ) y la ratio  $\text{SO}_4^{2-}/\text{rCl}^-$  tiene valores medios similares (8.3 y 8.1) con una mayor dispersión en el área de cabecera, donde los contenidos son más bajos (Tabla I). En el área, la ratio  $\text{rSO}_4^{2-}/\text{rCl}^-$  disminuye, su valor medio es 5.06 y oscila entre 4.5 y 5.4, unos valores cercanos a los que posee el agua subterránea del acuífero detrítico en este área (3.7). Por lo tanto

en el área baja debe existir algún proceso que modifique la evolución hidroquímica de las aguas superficiales que favorezca un aumento del contenido en  $\text{Cl}^-$  con respecto al aumento del  $\text{SO}_4^{2-}$ , con el consiguiente descenso de la relación  $\text{rSO}_4^{2-}/\text{rCl}^-$ , que presenta una tendencia cercana a las aguas del acuífero detrítico.

Las aguas superficiales correspondientes al área baja se disponen en una posición intermedia entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales del río en el área central, como se observa en la figura 4b donde se incluyen los datos correspondientes a las aguas subterráneas del acuífero detrítico en el entorno de Santa Fe. Las aguas del acuífero detrítico presentan un mayor contenido en  $\text{Cl}^-$ , como consecuencia de la presencia de materiales margosos miocenos con abundantes niveles evaporíticos, que constituyen la base del acuífero detrítico en esta zona y están en contacto directo con los materiales aluviales. Estos materiales margosos se encuentran tectónicamente elevados y favorecen el flujo de aguas más profundas y algo más salinas hacia los niveles más superficiales del acuífero detrítico. Esta influencia es más visible durante el estiaje, cuando el caudal del río disminuye, elevándose notablemente la salinidad, que alcanza unos valores próximos a la salinidad media de las aguas subterráneas del acuífero detrítico (Tabla I).

### Consideraciones finales

La interacción aguas subterráneas-aguas superficiales en el valle del río Andarax favorece la diversidad de las aguas del río que presentan un amplio rango de salinidad y variedad de facies hidroquímicas. La influencia de las aguas subterráneas sobre la dinámica superficial del río Andarax es más intensa en las áreas de cabecera y final. En el área de cabecera la descarga subterránea a través de los materiales detríticos de la depresión de Fondón influye sobre el quimismo de las aguas superficiales elevando el contenido en  $\text{NO}_3^-$ . Desde esta zona hasta Almócita, el cauce discurre en contacto directo con los materiales carbonatados de Sierra de Gádor y se produce una descarga subterránea con aguas de buena calidad lo que estabiliza las aguas del río, reflejado por la constancia en los valores de conductividad eléctrica, temperatura y contenidos iónicos en esta zona. En el área final, al norte de Santa Fe, las aguas alcanzan



los mayores contenidos salinos de todo el río con los incrementos más significativos, en relación con los materiales margosos miocenos sobre los que se asientan los depósitos aluviales.

**Agradecimientos**

Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos 280602/PI/08 (Fundación Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia) y del proyecto REN2002-04517-C02-01 del MCYT

**Referencias**

Carrasco, A. y Martín, G. (1988). En: *Los Acuíferos Costeros de Andalucía*

*Oriental. TIAC'88*, (R. Fernández-Rubio, J. López-Geta y G. Ramos-González Eds.). Vol II, 37-67.

Duff, J.F. y Triska, F.J. (2000). En: *Streams and Groundwaters*, (J.B. Jones y P.J. Mulholland Eds.). Academic Press, 197-217.

Sánchez Martos, F. (1997). *Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería)* Tesis Doctoral, Univ. Granada. 290 p.

Voermans, F.M. y Baena, J. (1983 a) *Mapa Geológico de España 1:50000, hoja nº 1045 (Almería)*. IGME..

Voermans, F.M. y Baena, J. (1983 b) *Mapa Geológico de España 1:50000 hoja geológica nº 1043 (Alhama de Almería)*. IGME.

**Fig. 4.-** Distribución de los contenidos en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> con respecto a la conductividad eléctrica de las aguas y Cl<sup>-</sup> con respecto a los contenidos en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Se han separado los grupos señalados en el texto, correspondientes a las aguas superficiales (1: área de cabecera, 2: área central, 3: área final) y a las aguas subterráneas (4: acuífero detrítico 5 acuífero carbonatado).

**Fig. 4.-** NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - electrical conductivity and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Cl<sup>-</sup> (meq L<sup>-1</sup>) scatter plots. Groups of samples are divided as mention in the text, corresponding to surface water (1: river headwater, 2: middle basin, 3: middle-lower basin) and groundwater (4: detritic aquifer, 5: carbonated aquifer).