

Composición isotópica de las aguas de la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves (Provincia de Málaga)

Isotopic composition of the waters in the Hydrogeological Unit Yunquera-Nieves (Province of Malaga)

C. Liñán Baena^(*), C. Jiménez de Cisneros Vencelá^(**), E. Caballero Mesa^(**), F. Carrasco Cantos^(*) y B. Andreo Navarro^(*)

(*) Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos. 29071 Málaga.

(**) Laboratorio de Isótopos Estables. Estación Experimental del Zaidín (CSIC). C/ Profesor Albareda 1. 18008 Granada.

ABSTRACT

The isotopic composition of the waters sampled in the Hydrogeological Unit Yunquera-Nieves are from Mediterranean and Atlantic origin. The ^{18}O and ^2H contents define a local meteoric water line with lower slope than mundial meteoric water line, because of the evaporation process. The mineralization and isotopic composition of the waters decreases with the altitude, which allow us delimitate the recharge surface of the main springs of the Unit. The mineralization and the isotopic composition of rainwater vary inversely to the amount of precipitation. The springwaters deplete their mineralization and isotopic content in response to the outflow increase because of the important winter precipitations. Anyway, the responses are quick, which probe the karstic behaviour of the springs.

Key words: Deuterium, Oxygen-18, catchment area, karstic aquifer, Sierra de las Nieves.

Geogaceta, 25 (1999), 127-130
ISSN: 0213683X

Introducción

La Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves ocupa una superficie de 170 km² y forma parte de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Nieves y su Entorno, en el sector occidental de la provincia de Málaga (Fig.1). La Unidad Hidrogeológica queda limitada en sus bordes por materiales de baja permeabilidad y está formada, a su vez, por dos unidades tectónicas: la de Nieves, en posición inferior y, encima, la de Yunquera. La unidad de Nieves se encuentra muy laminada bajo la de Yunquera, aunque aflora en la mayor parte del área de estudio y está constituida por una potente formación dolomítico-caliza, de edad triásico-liásica, involucrada en una estructura sinclinal de dirección axial N40-60E y vergente al NO (Martín Algarra, 1987). La unidad de Yunquera aflora localmente en las inmediaciones del pueblo del mismo nombre; se trata de una escama tectónica cuya secuencia litológica está formada por metapelitas del Paleozoico y mármoles triásicos. La estructura geológica del macizo ha sido truncada por fracturas transversas, de dirección N130E (Fig. 1), que compartimentan la Unidad Hidrogeológica en varios bloques (ITGE *et al.*, 1995).

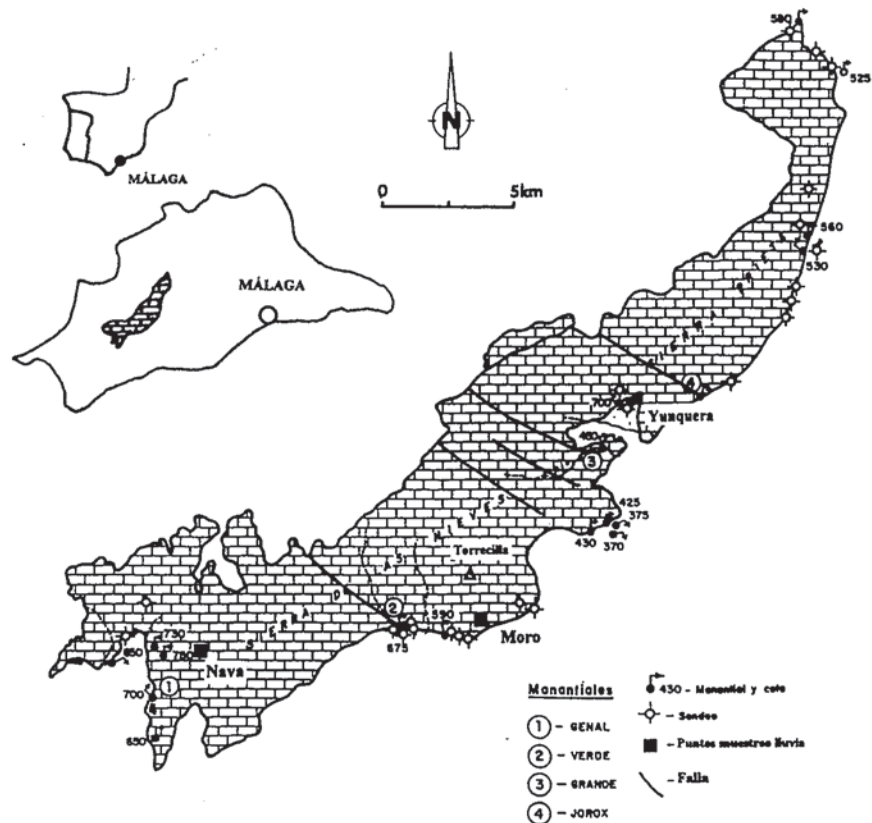


Fig. 1.- Situación geográfica y esquema hidrogeológico de la Unidad Yunquera-Nieves.

Fig.1.- Location and hydrogeologic sketch of the Hydrological Unit Yunquera-Nieves.

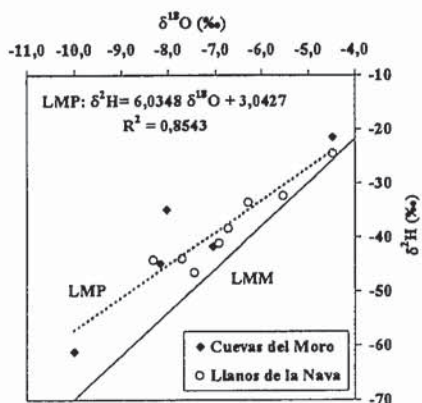


Fig. 2.- Diagrama $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de precipitación. (LMM) línea meteórica mundial, (LMP) línea meteórica local.

Fig. 2.- $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ plot of the precipitation waters. (LMM) mundial meteoric water line, (LMP) local meteoric water line.

La recarga se produce por la infiltración del agua de lluvia y de nieve. La descarga se realiza, fundamentalmente, a través de manantiales situados en el borde sur (Fig.1). Los manantiales más importantes están relacionados con el drenaje de la unidad tectónica de Nieves (IGME, 1983): Río Grande, surge a la cota más baja del macizo (450 m.s.n.m.) y constituye el principal punto de descarga de la Unidad con un caudal medio del orden de 700 l/s, Río Verde (situado a 675 m.s.n.m. y con un caudal medio de 400 l/s), Genal (700 m.s.n.m. y 300 l/s) y Jorox (530 m.s.n.m. y 150 l/s). La unidad tectónica de Yunquera se drena, principalmente, por el manantial del Plano, a cota 700 m.s.n.m. y con un caudal medio de 100 l/s.

En este trabajo se pretende dar a conocer la composición isotópica y el origen de las aguas drenadas por los principales manantiales del área de estudio, tratar de delimitar la superficie de recarga de los mismos y hacer algunas consideraciones sobre su comportamiento hidrogeológico.

Aguas de precipitación

Desde Noviembre de 1995 hasta Septiembre de 1997, se han recogido muestras de agua de lluvia en dos puntos de la Unidad Hidrogeológica, situados a diferente cota (Fig.1 y Tab.1): Cuevas del Moro (660 m.s.n.m.) y Llanos de la Nava (1060 m.s.n.m.). Las aguas recogidas en la estación de Cuevas del Moro presentan valores medios de conductividad más elevados (56 $\mu\text{S/cm}$) que las recogidas en la estación de Llanos de la Nava (33 $\mu\text{S/cm}$), al igual que ocurre con el contenido en isótopos estables ($\delta^{18}\text{O} = -6,68$ y $-7,55$ ‰, $\delta^2\text{H} = -38,21$ y $-40,94$ ‰), debido al efecto altitud (Dansgaard, 1964).

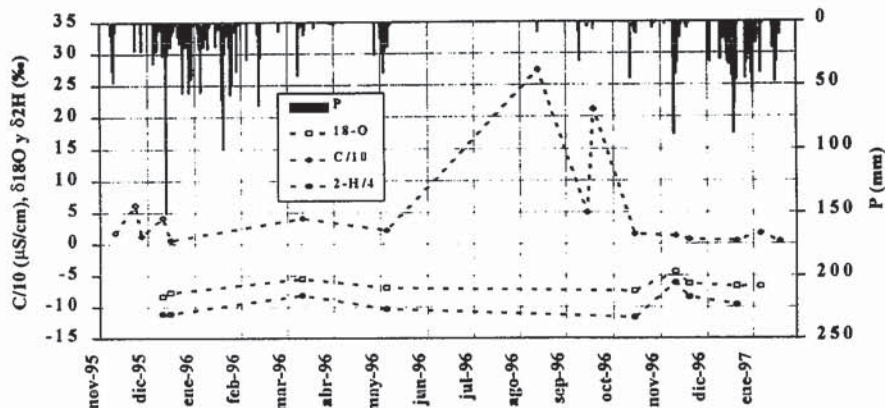


Fig. 3.- Evolución temporal de la conductividad eléctrica y de los contenidos en ^{18}O y ^2H del agua de lluvia muestreada en la estación de Cuevas del Moro.

Fig. 3.- Temporal evolution of the electrical conductivity and ^{18}O and ^2H contents in rainwater sampled in Cuevas del Moro station.

El gradiente del contenido en ^{18}O según la altitud, es de $-0,22$ ‰/100m, ligeramente inferior a los determinados por otros autores en la Cordillera Bética (Benavente *et al.*, 1990; Cruz Sanjulián *et al.*, 1992; Andreo, 1997), aunque queda comprendido entre $-0,2$ y $-0,3$ ‰/100m, como sucede en la mayor parte de la Península Ibérica (Plata, 1994; Yélamos y Sanz Pérez, 1998).

Al representar las muestras analizadas en un diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 2), definen una línea meteórica local de menor

pendiente que la línea meteórica mundial de Craig (1961), debido a que han sufrido procesos de evaporación antes de su llegada a la superficie (Plata, 1994). Los valores de exceso en deuterio de las dos estaciones son de 15,17 ‰ en Cuevas del Moro y 19,46 ‰ en Llanos de la Nava, indicativos de la existencia de lluvias de origen mediterráneo y atlántico. El aumento del exceso en deuterio con la altitud, puede deberse a que los procesos de evaporación antes mencionados disminuyen conforme aumenta la altitud del pun-

Período muestreado	CUEVAS DEL MORO (660 m.s.n.m.)				LLANOS DE LA NAVA (1060 m.s.n.m.)			
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	C ($\mu\text{S/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	C ($\mu\text{S/cm}$)
9 al 12/11/95				18				
25/11/95				62				
29/11/95				13				
6 al 12/12/95	-8,32	-44,40	22,16	12				
14 al 20/12/95	-7,70	-44,20	17,40	6				
22/12/95 al 20/3/96	-5,53	-32,40	11,84	41				
29/4 al 9/5/96	-6,92	-41,20	14,16	12				
14/08/96				274				
10 al 16/9/96				50				
17 al 20/9/96				212				
13 al 17/10/96	-7,44	-46,70	12,82	16	-7,06	-41,90	14,58	13
28/10 al 12/11/96	-4,46	-24,60	11,08	13	-4,48	-21,60	14,24	16
13 al 21/11/96	-6,29	-33,70	16,62	6	-8,04	-35,00	29,32	11
3 al 22/12/96	-6,72	-38,50	15,26	5	-10,00	-61,20	18,80	8
28/12 al 8/1/97	-6,75			9	-8,17	-45,00	20,36	9
15 al 20/1/97				4				5
15 al 24/5/97				21				13
31/5 al 5/6/97				30				18
20/8 al 4/9/97				258				188
5 al 22/9/97				67				45
n	9	8	8	20	5	5	5	10
media aritmética	-6,68	-38,21	15,17	56	-7,55	-40,94	19,46	33

Tabla 1.- Composición isotópica de las muestras de agua de precipitación recogidas. (n) número de muestras, (d) exceso en deuterio.

Table 1.- Isotopic composition of the rainwater samples. (n) number of samples, (d) deuterium excess.

to de muestreo (Gat y Carmi, 1970; Cruz Sanjulián *et al.*, 1992).

La evolución temporal de la conductividad eléctrica y de los datos disponibles de la composición isotópica (Fig. 3), muestran valores más elevados en los períodos con menor cantidad de precipitación, normalmente durante el período estival o a principios de año hidrológico, mientras que los valores mínimos corresponden a períodos de mayor pluviometría de la época invernal. Este hecho pone de manifiesto el efecto estacionalidad (Dansgaard, 1964; Plata, 1994).

Aguas subterráneas

Desde Febrero de 1996 hasta Enero de 1997, se han tomado muestras de agua de los cuatro manantiales principales de la Unidad Hidrogeológica, para determinar su conductividad eléctrica y composición isotópica (Tab. 2). Las aguas menos mineralizadas son las de Río Grande, con un valor medio de conductividad de 320 $\mu\text{S/cm}$ y las más mineralizadas son las del manantial de Jorox, con una conductividad media de 422 $\mu\text{S/cm}$. Las aguas de los manantiales de Genal y Río Verde tienen unos valores de conductividad media de 340 y 335 $\mu\text{S/cm}$, parecidos a los de las aguas de Río Grande.

Los contenidos isotópicos de las aguas subterráneas durante el período de estudio están comprendidos entre -6,90 y -8,85 ‰ para el ^{18}O y entre -39,90 y -52,10 ‰ para el ^2H . El exceso en deuterio varía entre 20,08 y 12,66 ‰, con valor medio global de 16,43 ‰, indicativo de

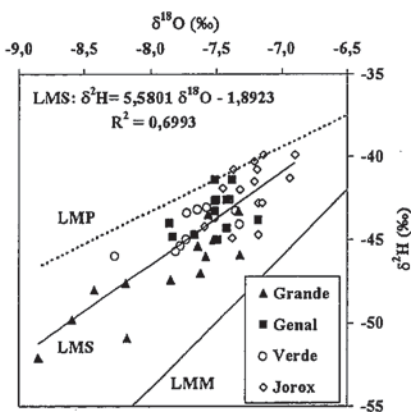


Fig. 4.- Diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua subterránea. (LMM) línea meteórica mundial, (LMP) línea meteórica local, (LMS) línea local de las aguas subterráneas.

Fig.4.- $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ plot of the groundwater samples. (LMM) mundial meteoric water line, (LMP) local meteoric water line, (LMS) local groundwater line.

FECHA	GENAL (700 m.s.n.m.)				VERDE (675 m.s.n.m.)				GRANDE (450 m.s.n.m.)				JOROX (530 m.s.n.m.)			
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	C ($\mu\text{S/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	C ($\mu\text{S/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	C ($\mu\text{S/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	C ($\mu\text{S/cm}$)
5/2/96	-7,51	-41,40	18,68	334	-7,72	-43,40	18,36	328	-8,42	-48,00	19,36	329	-7,45	-41,90	17,70	403
6/3/96	-7,67	-44,70	16,66	327	-7,77	-45,40	16,76	329	-8,18	-47,60	17,84	305	-7,19	-40,80	16,72	451
28/3/96	-7,42	-44,30	15,06	337	-7,57	-43,10	17,46	338	-8,59	-49,80	18,92	283	-7,21	-40,30	17,38	443
8/5/96	-7,83	-44,80	17,84	300	-7,81	-45,70	16,78	328	-8,17	-50,90	14,46	252	-6,94	-41,30	14,22	426
28/5/96	-7,51	-42,70	17,38	344	-7,64	-43,20	17,92	336	-7,85	-47,40	15,40	338	-7,38	-44,90	14,14	412
8/7/96	-7,18	-43,80	13,64	352	-7,67	-44,60	16,76	341	-7,62	-47,00	13,96	367	-6,90	-39,90	15,30	433
29/7/96	-7,40	-42,60	16,60	352	-7,73	-45,00	16,84	342	-7,58	-46,00	14,64	373	-7,32	-42,00	16,56	432
22/8/96	-7,38	-41,40	17,64	354	-7,35	-43,30	15,50	342	-7,52	-45,00	15,16	378	-7,18	-42,80	14,64	431
17/9/96	-7,42	-42,60	16,76	352	-7,32	-44,10	14,46	338	-7,32	-45,90	12,66	370	-7,37	-40,80	18,16	424
1/10/96	-7,51	-43,30	16,78	353	-7,51	-43,70	16,38	340	-7,66	-45,40	15,88	377	-7,21	-41,50	16,18	424
22/10/96	-7,50	-42,60	17,40	358	-7,40	-42,50	16,70	340	-7,56	-43,50	16,98	351	-7,18	-44,70	12,74	428
13/11/96	-7,49	-45,00	14,92	362						-46,90		228	-7,15	-42,80	14,40	422
2/12/96	-7,13			321	-7,54			326	-7,33	-43,30	15,34	299	-7,14	-39,90	17,22	424
26/12/96		-44,90		325					-8,85	-52,10	18,70	254	-7,59	-44,20	16,52	354
15/1/97	-7,86	-44,00	18,88	333	-8,26	-46,00	20,08	325		-51,90		302	-7,69			429
n	14	14	13	15	13	12	12	13	13	15	13	15	15	14	14	15
media aritmética	-7,49	-43,44	16,79	340	-7,64	-44,17	17,00	335	-7,90	-47,38	16,10	320	-7,26	-41,99	15,85	422

Tabla 2.- Composición isotópica de las muestras aguas subterránea. (n) número de muestras, (d) exceso en deuterio.

Table 2.- Isotopic composition of the groundwater samples. (n) number of samples, (d) deuterium excess.

que las aguas de salida son mezcla de frentes lluviosos mediterráneos y atlánticos (Gat y Carmi, 1970; Plata, 1994).

En la figura 4 se han representado las muestras de agua subterránea sobre un diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ junto con las líneas meteóricas mundial y local. Las aguas

subterráneas analizadas definen una línea ligeramente oblicua a la del agua de lluvia. Las muestras de Río Grande se agrupan en el extremo izquierdo de la nube de puntos (Fig. 4), ya que son las más empobrecidas isotópicamente, mientras que las del manantial de Jorox se sitúan hacia el

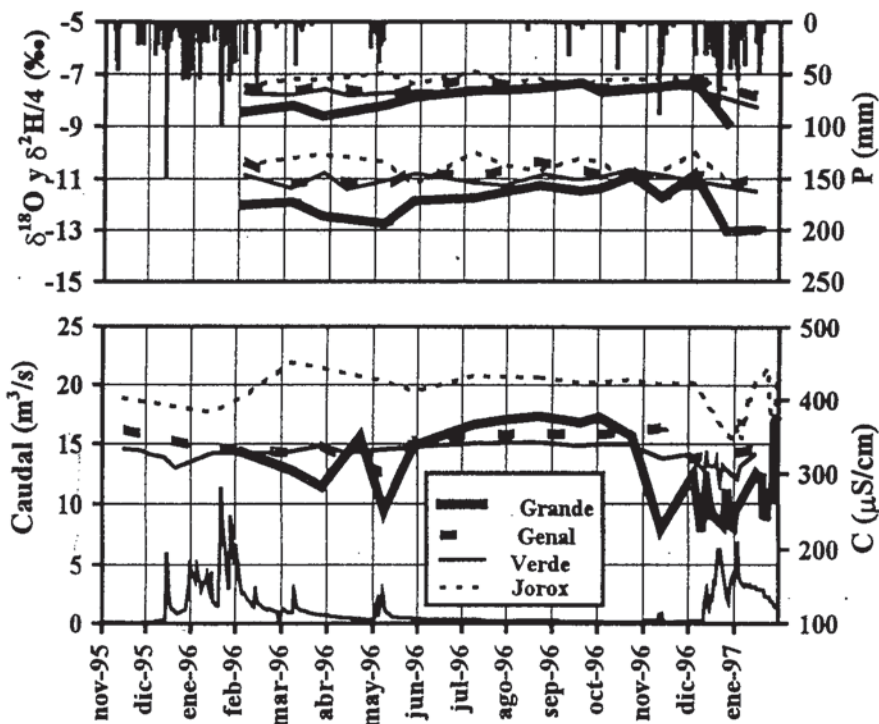


Fig. 5.- Evolución de la conductividad eléctrica y de los contenidos en ^2H y ^{18}O de las aguas subterráneas drenada por los principales manantiales de la Unidad Yunquera-Nieves. El hidrográfico corresponde a Río Verde spring, cuyas variaciones pueden considerarse representativas de los restantes manantiales.

Fig.5.- Evolution of the electrical conductivity and ^{18}O and ^2H contents of groundwater from the main springs of the Unit Yunquera-Nieves. The hydrograph corresponds to Río Verde spring, whose variations can be representatives of the others springs.

extremo derecho, al estar más enriquecidas en ^{18}O y ^2H . Las aguas drenadas por los manantiales de Genal y Río Verde, con composiciones isotópicas intermedias, se sitúan en una posición central (Figs. 4 y 5).

A partir de la composición isotópica de las aguas subterráneas (Tab.1) y teniendo en cuenta otros factores como la situación geográfica, la estructura geológica y la cota de surgencia de los manantiales (Fig.1) pueden distinguirse dos sectores principales en la Unidad. El sector occidental, se drena por los manantiales de Genal, Verde y Grande; siendo éste último el principal punto de descarga. Dentro de dicho sector, la parte occidental, desde la falla que pasa por Río Verde hacia el Oeste, se drena por las surgencias del Genal y del Verde, cuyas composiciones isotópicas son muy similares (Fig. 5), mientras que desde la citada falla hacia el Este se drena por el manantial de Río Grande. La composición isotópica más ligera de las aguas de Río Grande, está en consonancia con la mayor altitud de su superficie de recarga, donde se encuentra el vértice Torrecilla (1919 m), el más alto de la provincia de Málaga, en cuyo entorno las precipitaciones suelen ser en forma de nieve durante el invierno. No obstante, la falla de Río Verde puede que no constituya una barrera hidrogeológica propiamente dicha, sino que permita el flujo hacia el Este, hacia el manantial de Río Grande. En sentido contrario, el flujo parece no tener lugar, según los ensayos de trazadores realizados por Durán y López-Martínez (1992).

El sector oriental de la Unidad se drena por el manantial de Jorox y otros de menor importancia situados en el borde del afloramiento carbonatado. En concreto, el manantial de Jorox constituye el principal punto de descarga de Sierra Prieta; los mayores contenidos en isótopos estables de sus aguas, pueden estar relacionados con una altitud de recarga ligeramente menor pero, muy posiblemente, también con una disminución de las precipitaciones de Oeste a Este en la Unidad Hidrogeológica, tal como se ha constatado en las Sierras Blanca y Mijas (Andreo, 1997) situadas inmediatamente al sureste.

En lo referente a la evolución temporal (Fig. 5), se observa que las aguas dre-

nadas por los manantiales a principios de 1996 eran menos mineralizadas y con menor contenido isotópico, por la importante recarga producida en diciembre de 1995 y enero de 1996. A lo largo del año 1996 se producen un aumento de los parámetros analizados, hasta que las importantes lluvias de diciembre de 1996 y enero de 1997 dan lugar a una nueva disminución generalizada de los parámetros controlados. Por tanto, ante las precipitaciones importantes, los manantiales responden con rápidos aumentos de caudal y disminuciones bruscas de la conductividad eléctrica y del contenido isotópico, lo que traduce un comportamiento kárstico de los manantiales, deducido previamente a partir de las respuestas hidrodinámica e hidroquímica de los mismos (Liñán *et al.*, 1996).

Conclusiones

Las aguas de lluvia muestreadas en la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves, son de origen mediterráneo y atlántico. Dichas aguas son más mineralizadas y más pesadas isotópicamente, cuanto menor es la altitud y menor la cantidad de precipitación, hecho éste que suele ocurrir en los periodos lluviosos estivales o de principios de año hidrológico. El gradiente de ^{18}O según la altitud es de -0.22‰ por cada 100 m. Los contenidos en ^{18}O y ^2H de las aguas de lluvia analizadas, definen una línea meteórica local de menor pendiente que la mundial.

Las aguas subterráneas analizadas presentan una composición isotópica propia de un origen mixto mediterráneo y atlántico. En el diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$, las muestras recogidas definen una línea de pendiente similar a la línea meteórica local. Los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas subterráneas, junto con la información hidrogeológica disponible, permiten distinguir dos grandes sectores en la Unidad. En el sector occidental, la descarga se produce, principalmente, por Río Grande y, en menor medida, por los manantiales de Genal y Río Verde; éstos últimos drenan la parte occidental del sector, mientras que el manantial de Río Grande drena la parte oriental. Las precipitaciones importantes dan lugar a rápidos aumentos de caudal

acompañados de diluciones y disminuciones del contenido en ^2H y ^{18}O , lo cual pone de manifiesto un comportamiento kárstico de los materiales acuíferos.

Agradecimientos

A la Mancomunidad de Municipios de la Sierra de las Nieves y su Entorno, al Grupo de Investigación RNM-0126 de la Junta de Andalucía y al Proyecto PB97-1267-CO3-CO2 de la DGES.

Referencias

- Andreo, B. (1997): *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Málaga)*, SPU-MA-CHS, 489 p.
- Benavente, J., Cardenal, J. Cruz-Sanjulián, J.J., García López, S., Araguás, L. y López Vera F. (1990): *International Congress, Waters Ressources in Mountainous Regions*. IAH Mem. 22(1): 415-424.
- Craig, H. (1961): *Science*, 133: 1702-1703.
- Cruz Sanjulián, J., Araguás, L., Rozanski, K., Cardenal, J., Hidalgo, M.C., García López, S., Martínez Garrido, J.C., Moral, F. y Olfías, M. (1992): *Tellus*, 44B:226-236.
- Dansgaard, W. (1964): *Tellus*, 16: 567-584.
- Durán, J.J. y López Martínez, J. (1992): In: *Hydrogeology of Selected Karst Regions* (Back, Herman y Paloc, eds.). IAH Publ. 13: 43-60.
- Gat, J.R. y Carmi, I. (1970): *J. Geophys. Res.*, 75: 3039-3048.
- IGME (1983): *Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España (Sector Occidental)*. Informe técnico n° 1, 86 p. (inédito).
- ITGE, CEDEX, DGOH y DGPA (1995): *Captaciones de agua subterránea en la Sierra de las Nieves. Análisis medioambiental y plan de investigación*, 30 p. (inédito)
- Liñán, C., Carrasco, F. y Andreo, B. (1996): *IV Simposio Agua Andalucía*, 1:271-280.
- Martín Algarra, A. (1987): *Tesis Doct.* Univ. Granada, 1171 p.
- Plata, A. (1994): *Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica*. CEDEX, 139 p.
- Yélamos, J.G. y Sanz Pérez, E. (1988): *Rev. soc. Geol. España*, 11(1-2): 151-167.