

Análisis del exceso de deuterio de las aguas subterráneas al sureste de Sierra Nevada (Almería)

Deuterium excess analysis in groundwaters to the southeast of Sierra Nevada (Almería)

S. García-López (*), J. Benavente (**) y J.J. Cruz-Sanjulián (**)

(*) Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría; Universidad de Jaén, Avda. de Madrid, 35; 23071 Jaén.

(**) Instituto del Agua; Universidad de Granada, c/Rector López Argüeta, s/n; 29071 Granada.

ABSTRACT

The analysis of the deuterium excess values found in samples from 43 springs and wells to the southeast of Sierra Nevada shows: (a) a relatively scarce seasonal variability, when compared to the precipitation data, and (b) a positive correlation with the average altitude of the recharge areas. From (a) can be deduced an important integrating and mixing effect in the carbonate alpujarride aquifers, as well as a flow system nearer to the diffuse type than to the karstic «sensu stricto» one. The (b) effect illustrates on the importance of evaporation processes previous to the infiltration; mainly affecting the precipitations of mediterranean origin.

Key words: environmental stable isotopes, deuterium excess, carbonate aquifers, SE Spain.

Geogaceta, 21 (1997), 109-112
ISSN: 0213683X

Introducción

El área estudiada se sitúa al SE de la vertiente meridional del macizo meta-pelítico de Sierra Nevada (provincia de Almería). Desde el punto de vista hidrogeológico, el principal acuífero corresponde a los materiales carbonáticos triásicos del Complejo Alpujarride que constituyen la Sierra de Gádor (Fig. 1). El interés de este acuífero deriva de sus características geométricas, con importantes espesores saturados, así como de la notable extensión de afloramientos a cotas relativamente altas (1500-2000 m) que favorecen la recarga en un contexto climático marcadamente semiárido.

En trabajos previos (Benavente *et al.*, 1990; Cruz Sanjulián *et al.*, 1992; Cardenal *et al.*, 1992) se han presentado datos relativos a los contenidos en Oxígeno 18 (^{18}O) y Deuterio (D) en aguas de precipitación, de ríos y subterráneas (manantiales y sondeos) en este área y sectores adyacentes.

En el presente trabajo se exponen los principales resultados del análisis de los contenidos de los dos isótopos ambientales estables de la molécula del agua antes citados, a partir de un muestreo más amplio que los que han sustentado los trabajos previos referidos. Los datos aquí analizados co-

rresponden únicamente a aguas subterráneas; los relativos a los otros tipos de aguas (precipitaciones, ríos) se tratan con detalle en García López (1996). Concretamente, se tratará aquí del parámetro denominado «exceso de deuterio» (d), definido por Dansgaard (1964) como $d = \delta\text{D} - 8d^{18}\text{O}$, cuya magnitud está controlada entre otros aspectos por la intensidad de los procesos de evaporación (Merlivat y Jouzel, 1979). Valores de «d» cercanos al 10‰ se observan en la mayoría de las aguas continentales meteoricas de origen oceánico, mientras que en precipitaciones originadas en mares cerrados o con comunicación restringida con el océano se llega a superar el 30‰, como sucede, por ejemplo, en el Mediterráneo Oriental (Rindsberger *et al.*, 1983).

El muestreo realizado

La red de muestreo de isótopos estables en las aguas subterráneas consta de 23 manantiales y 20 sondeos (Fig. 1). Prácticamente, todos los manantiales significativos del área, con un caudal superior a 5 l/s, han sido muestreados, además de algunos manantiales de pequeño caudal que drenan pequeños acuíferos colgados. La mayor parte de los ma-

nantiales se localizan en el borde occidental de Sierra de Gádor, único sector donde persiste la descarga natural tras la explotación intensiva de las aguas subterráneas de la sierra. Destacan por el número de muestras analizadas los manantiales de Fuentes de Marbella (M1: 22 análisis de ^{18}O , 5 de D), Nacimiento de Laujar, (M17: 7 análisis de ^{18}O , 4 de D), Alcaudique y Celná (M5 y M8: 4 análisis de ^{18}O y 3 de D).

En cuanto a los sondeos, sólo se han analizado 1 ó 2 muestras en cada uno, realizándose en todos los casos determinaciones de ^{18}O y D. Nueve de ellos captan el acuífero de Turón-Peñarrodada (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S8, S11, S12), seis se localizan en el Campo de Dalías, próximos al relieve de la Sierra de Gádor (S94, S95, S96, S98, S97 y S99) y cinco sondeos se encuentran en otros sectores, principalmente en el borde N de la sierra (S51, S71, S86, S90, S93).

Excepto en las Fuentes de Marbella (M1), punto en el que se realizó un muestreo bimensual a lo largo de 4 años, en el resto de los puntos se ha pretendido tomar muestras en épocas contrastadas (recarga-estiaje). Con ello se ha perseguido conocer el rango de variación estacional del contenido isotópico y, de esta forma, comprobar

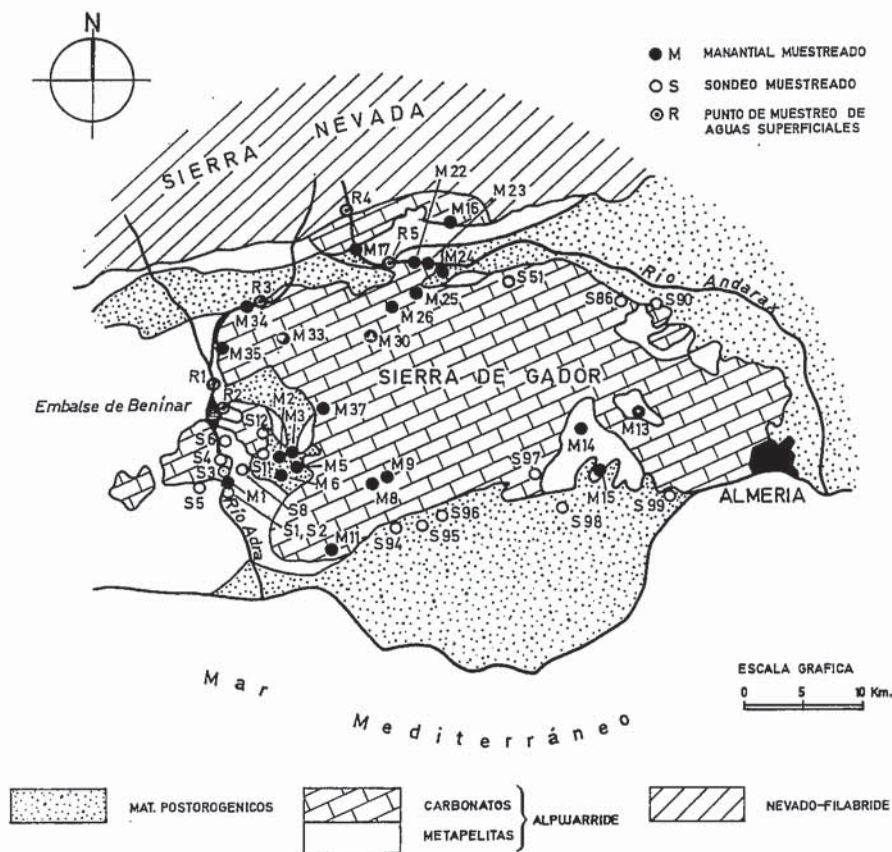


Fig. 1.- Situación de los puntos de muestreo. M: Manantiales; S: Sondeos; R: Ríos.

Fig. 1.- Situation of sampling points. M: Springs; S: Wells; R: Streamwaters.

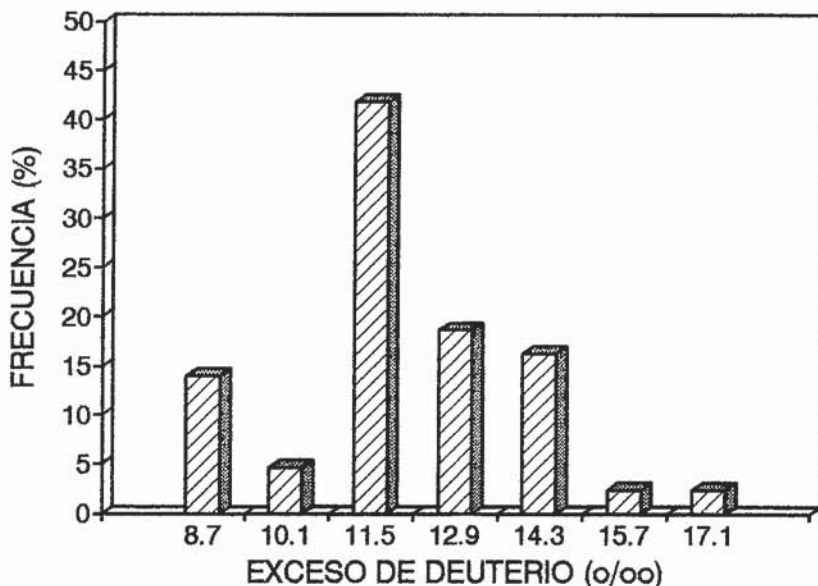


Fig. 2.- Distribución de frecuencias de los valores de exceso de deuterio.

Fig. 2.- Frequency distribution of the deuterium excess values.

la representatividad de datos analíticos aislados.

En total, se dispone de 96 determinaciones de ¹⁸O y 63 de D realizadas sobre 43 puntos de aguas subterráneas.

El muestreo fue llevado a cabo entre 1989 y 1992. Los análisis se han realizado en el Laboratorio de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de la Energía Atómica (ONU), con sede

en Viena (Austria). Los errores analíticos estimados son: ±0.1‰ (¹⁸O) y ±1‰ (D).

Resultados

Para cada uno de los puntos estudiados, la diferencia en el contenido isotópico de las muestras de invierno y verano ha sido inferior, en todos los casos, a 0.5‰ para el ¹⁸O y 5‰ para el D, es decir, inferior a 5 veces el error analítico estimado para ambos isótopos. Más del 75% de los manantiales muestreados en sucesivas ocasiones presentan rangos de variación inferiores a 0.3‰ en el ¹⁸O y 3‰ en el D. Los sondeos, en general, han mostrado menores diferencias aún. Teniendo en cuenta los errores analíticos inherentes a las determinaciones, resulta difícil identificar en las aguas subterráneas los importantes cambios isotópicos observados en la precipitación (García López, 1996).

El parámetro «d» presenta un valor medio para las aguas subterráneas de 11.9‰. Su rango de variación es de 8.5‰ (entre 8.0‰ y 16.5‰) y su coeficiente de variación es de 15.3%. Su distribución de frecuencias es bimodal asimétrica (Fig. 2), con un máximo absoluto en el intervalo 10.8 a 12.2‰ (42% de los puntos) y un máximo local en el intervalo 8 a 9.4‰ (14% de los puntos). Si se compara esta distribución con la del conjunto de muestras de agua de precipitación sobre el área, se comprueba una notable diferencia entre ambas (Fig.3).

Para el conjunto de los manantiales y sondeos se detecta, además, una correlación positiva entre el parámetro exceso de deuterio y la altitud media de la cuenca de alimentación (Fig. 4). Esta última variable ha sido determinada previamente en función del contenido en ¹⁸O de las muestras, una vez establecida la función lineal que relaciona ambas variables a partir de manantiales cuya área de recarga es conocida (Benavente et al, 1990).

En el cálculo de la recta de regresión representada en dicha figura, de ecuación $d(‰)=0.0066h(m)+3.5$ y coeficiente de correlación $r=0.84$, no se han tenido en cuenta M15 y S5, por encontrarse desplazados del conjunto de puntos. En la citada figura también se incluye la recta obtenida para las aguas de precipitación, $d(‰)=0.0040h(m)+10.3$, a

partir de datos medios ponderados por la cantidad de precipitación en seis estaciones pluviométricas del área durante los años 1990-91.

Discusión

En primer lugar y de manera general, se pone de manifiesto el efecto integrador y de mezcla de los acuíferos alpujárrides, que, frente a una recarga de gran variabilidad isotópica, descargan aguas de composición isotópica relativamente constante, independientemente de la época y del subsistema de que se trate. En particular, en la distribución de «d» de las aguas subterráneas, no se hallan representados los valores bajos, indicadores de procesos intensos de evaporación. La mayoría de las muestras (65%) se agrupan en el intervalo 12.5 a 15.5‰, evidenciando con ello la influencia mixta, atlántica y mediterránea, en la procedencia de las masas nubosas responsables de la recarga.

De hecho la variabilidad del parámetro «d» en las aguas subterráneas está condicionada, más que con la variabilidad de la recarga, con la altitud. La disminución de «d» con la cota media del área de recarga se ha detectado tanto en las aguas de lluvia (efecto pseudoaltitud), como en las aguas subterráneas, aunque las pendientes de las relaciones lineales que caracterizan dicho fenómeno son diferentes en cada caso (Fig. 4).

Estos hechos hay que interpretarlos en relación con los fenómenos de evaporación a los que está sometida el agua de recarga con anterioridad a su infiltración, en un clima semiárido como el que nos ocupa. En efecto, las gotas de lluvia, en su recorrido desde la base de la nube hasta el terreno, sufren evaporación, tanto mayor cuanto más largo es el trayecto, es decir, cuanto menor es la altitud del terreno. Este fenómeno sería responsable de la disminución de «d» con la disminución de la altitud del punto de recogida de las muestras de lluvia. A este efecto hay que añadir la evaporación inmediatamente antes de su infiltración en el acuífero sufrida por el agua precipitada. Esta es tanto más intensa cuanto mayor es la temperatura (y, por tanto, menor la altitud), y tiene lugar mientras el agua es interceptada por la vegetación (aumentando la superficie de eva-

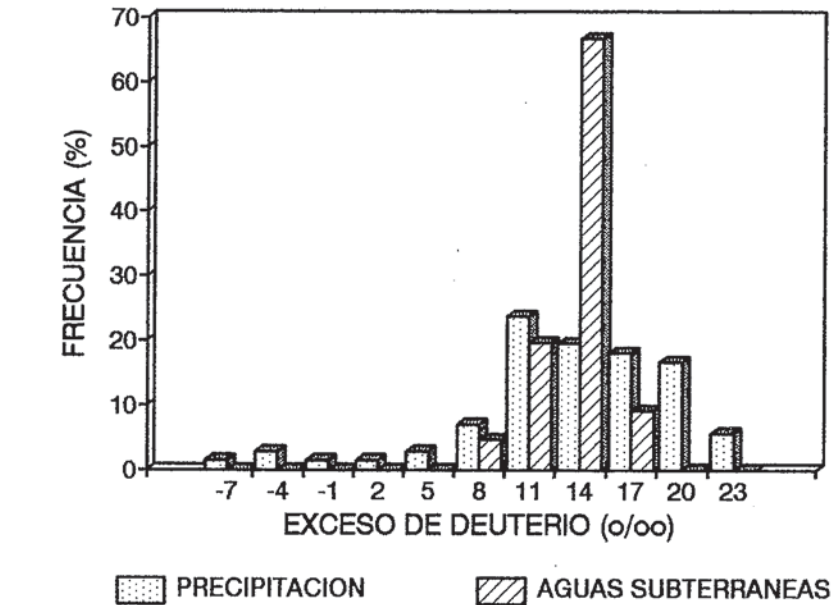


Fig. 3.- Comparación entre la distribución de frecuencias de los valores de «d» de las aguas subterráneas y de las muestras de aguas de precipitación (72 datos: García-López, 1996).

Fig. 3.- Comparison between the frequency distribution of the «d» values from groundwater and precipitation samples (72 data: García-López, 1996).

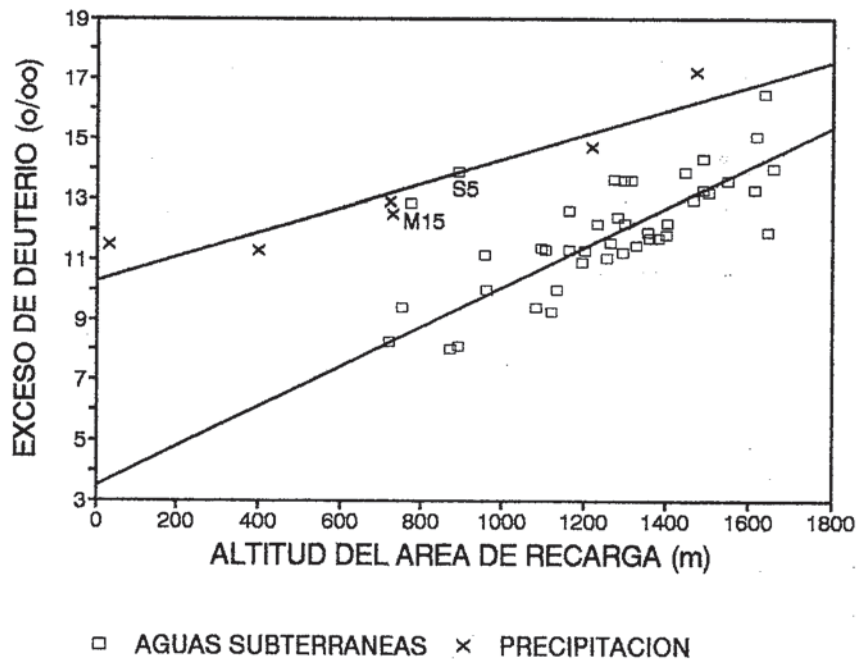


Fig. 4.- Relation entre «d» y la altitud del área de recarga de las aguas subterráneas (ver texto para más detalles).

Fig. 4.- Plot of «d» values versus the altitude of the recharge area of groundwaters (see text for more details).

poración), se humedece la zona edáfica y se almacena en charcos y pequeñas depresiones de la superficie del terreno de manera previa a su percolación en los materiales permeables.

Conclusiones

La escasa variación temporal registrada en los contenidos isotópicos de

las aguas subterráneas, al contrario de lo observado en las aguas de precipitación que recargan los acuíferos, estaría de acuerdo con el tipo de circulación subterránea predominante, que no es típicamente kárstica, a través de drenes y conductos, sino de tipo difuso, semejante a la existente en un medio poroso. Los acuíferos carbonatados alpujárrides presentan un gran poder de re-

gulación y almacenamiento, como se pone de manifiesto también mediante otras metodologías hidrogeológicas.

Por otra parte, no toda la precipitación debe de contribuir de igual modo a la recarga. En general, cuando ésta se produce en periodos cálidos (finales de primavera-principios de otoño), el agua precipitada es devuelta a la atmósfera prácticamente en su totalidad, con lo que las aguas más pesadas no llegan a infiltrarse. Asimismo, a cotas bajas (inferiores a 600-800 m) los fenómenos de evaporación previos a la infiltración son muy intensos, reduciendo a la mitad el valor del parámetro «d» de las aguas subterráneas y enmascarando con ello la procedencia de las masas nubosas que contribuyen a la recarga.

El mar Mediterráneo constituye una fuente importante de humedad de cara a la alimentación de los acuíferos costeros alpujárrides del sudeste andaluz. Genera una parte

muy importante de las masas nubosas responsables de las precipitaciones sobre estos acuíferos, aunque la importancia hidrogeológica de tales precipitaciones se ve influida, a cotas medias y bajas, por los fenómenos de evaporación, antes de la llegada del agua al suelo y durante las primeras etapas de la infiltración. Estos procesos producen un enriquecimiento isotópico y reducen el valor del parámetro «d» característico de este tipo de precipitaciones.

Agradecimientos

Al Dr. Luís Araguás (Sección de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de la Energía Atómica) que realizó parte de los análisis isotópicos y prestó una inestimable ayuda durante una estancia en el citado Centro del primer firmante de este trabajo.

Referencias

- Benavente, J., Cardenal, J., Cruz Sanjulián, J.J., García-López, S., Araguás, L. y López-Vera, F. (1990): *Memoires of the XXIIInd Congress of IAH. Lausanne*, Vol. XXII, Part. 1: 415-424.
- Cardenal, J., Benavente, J., Cruz-Sanjulián, J.J. y García-López, S. (1992): *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, T. XVII: 421-432.
- Cruz-Sanjulián, J.J., Araguás, L., Rozanski, K., Benavente, J., Cardenal, J., Hidalgo, C., García-López, S., Martínez-Garrido, J.C., Moral, F. y Olías, M. (1992): *Tellus*, 44B: 226-236.
- Dansgaard, W. (1964): *Tellus*, 16: 436.
- García-López, S. (1996): *Tesis Doctoral* Univ. Granada.
- Merlivat, L. y Jouzel, J. (1979): *Journal Geophys. Res.*, Vol. 84: 5029-5033.
- Rindsberger, M., Magaritz, M., Carmi, I. y Gilad, D. (1983): *Geophys. Rev. Lett.* 10: 43-46.