

Caracterización físico-química e isotópica del agua subterránea relacionada con acequias de careo. Cuenca del río Bérchules (Sierra Nevada, Sur de España)

Physical-chemical and isotopic characterisation of groundwater related to acequias de careo. Bérchules river basin (Sierra Nevada, south of Spain)

Ana M. Molina Rojas¹, Antonio González Ramón², Barberá, J.A.³, Manuel Peregrina del Río⁴, A. Beatriz Villagómez Antequera⁴, Miguel Ángel Díaz Puga⁴ y Sergio Martos Rosillo²

¹ Torres Bermejas, 12. 18110 Híjar (Granada). anamolinarojas@hotmail.com

² Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. 18006 Granada (España). antonio.gonzalez@igme.es; s.martos@igme.es

³ Centro de Hidrogeología (CEHIUMA), Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, s/n, 29071 Málaga, España. jabarbera@uma.es

⁴ Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. manuel.pelegrina@juntadeandalucia.es, antoniab.villagomez@juntadeandalucia.es, miguel.diaz.puga@juntadeandalucia.es

ABSTRACT

The "acequias de careo", an ancestral surface water management technique, play a relevant role in the hydrological functioning of Sierra Nevada (South of Spain). In this study, hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the high mountain basin of Bérchules is carried out. For this study, data from 45 samples of springs, collected between July and September of 2019, has been used. From these data, groundwater samples can be classified under three main aspects: hydrochemical facies, lithology of the water upwelling points and its relationships with the acequias de careo. Different arguments are provided in favor of the influence of the acequias de careo on the composition of most of the groundwater in the Bérchules river basin.

Key-words: Acequias de careo, groundwater, hydrochemical, stable isotopes high mountain basin.

Geogaceta, 71 (2022), 39-42
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

El manejo del agua juega un papel muy importante para los habitantes de la Alpujarra, comarca situada en la vertiente meridional de Sierra Nevada, en Granada. Sus ríos se caracterizan por presentar un régimen pluvio-nival (Jódar et al., 2017), estando alimentados por una compleja red de drenaje fluvial, esencial para el abastecimiento de la población y la actividad agrícola. Desde hace siglos se ha desarrollado un sistema que aúna el uso y manejo de las aguas superficiales y subterráneas, mediante las denominadas acequias de careo. Estos canales artificiales transportan el agua del deshielo, desde la cabecera de los ríos hasta zonas más bajas, y permiten una infiltración lenta en zonas de alteración permeables de los afloramientos de rocas metamórficas que constituyen las cuencas fluviales (Pulido-Bosch y Ben Sbitih, 1996). El agua in-

filtrada alimenta manantiales aguas abajo que aumentan el caudal de los ríos y el de las acequias de riego, permitiendo el desarrollo de la actividad agrícola en época de estiaje.

Los objetivos de este trabajo son establecer la caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas de la cuenca del río Bérchules, identificar los principales procesos geoquímicos que tienen lugar y estudiar el comportamiento hidrológico y la influencia ejercida por las acequias de careo en la zona de estudio.

Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Bérchules se localiza en la vertiente sur de Sierra Nevada, y en ella se encuentra el término municipal de Bérchules (Granada). Presenta una morfología alargada de dirección norte-sur, y una superficie de 67,6 km². La altitud media de la cuenca es de 1970 m s.n.m, con cotas

RESUMEN

Las acequias de careo son una parte esencial del funcionamiento hidrológico de Sierra Nevada (sur de España). En este estudio se lleva a cabo una caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas de la cuenca de alta montaña del río Bérchules. El estudio se ha realizado con datos procedentes de 45 muestras recogidas entre julio y septiembre de 2019 en manantiales de la cuenca. Tras el análisis de datos se obtiene como resultado una clasificación de las muestras según tres aspectos principales: sus facies hidroquímicas, la litología de las zonas de surgencias, y encontrarse o no bajo la influencia de acequias de careo. Se aportan argumentos a favor de la influencia ejercida por las acequias de careo en la composición de la mayoría de las aguas subterráneas de la cuenca del río Bérchules.

Palabras clave: acequias de careo, agua subterránea, hidroquímica, isótopos estables, cuenca de alta montaña.

Fecha de recepción: 15/07/2021
Fecha de revisión: 29/10/2021
Fecha de aceptación: 26/11/2021

entre 1000 m s.n.m en la parte meridional y 2900 m s.n.m en el norte de la cuenca.

El río Bérchules tiene un régimen pluvio-nival, con caudales máximos entre enero y mayo y mínimos entre julio y septiembre. Su caudal medio anual es aproximadamente de 13,1 hm³/año, de modo que la contribución de las aguas subterráneas supone hasta el 90% del total del caudal (Jódar et al., 2017).

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se localiza en la Zona Interna del orógeno Bético-Rifeño, en el complejo Nevado-Filábride. Está formado por una secuencia metasedimentaria con un basamento Paleozoico recubierto por una cobertera, de edad Mesozoica y más reciente, con intercalaciones de rocas ígneas y sedimentarias metamorizadas de edad Jurásica. Todos estos materiales están afectados por un metamorfismo que llega a ser de alta presión y temperatura intermedia desde el Eoceno al Mioceno (Puga et al., 2017).

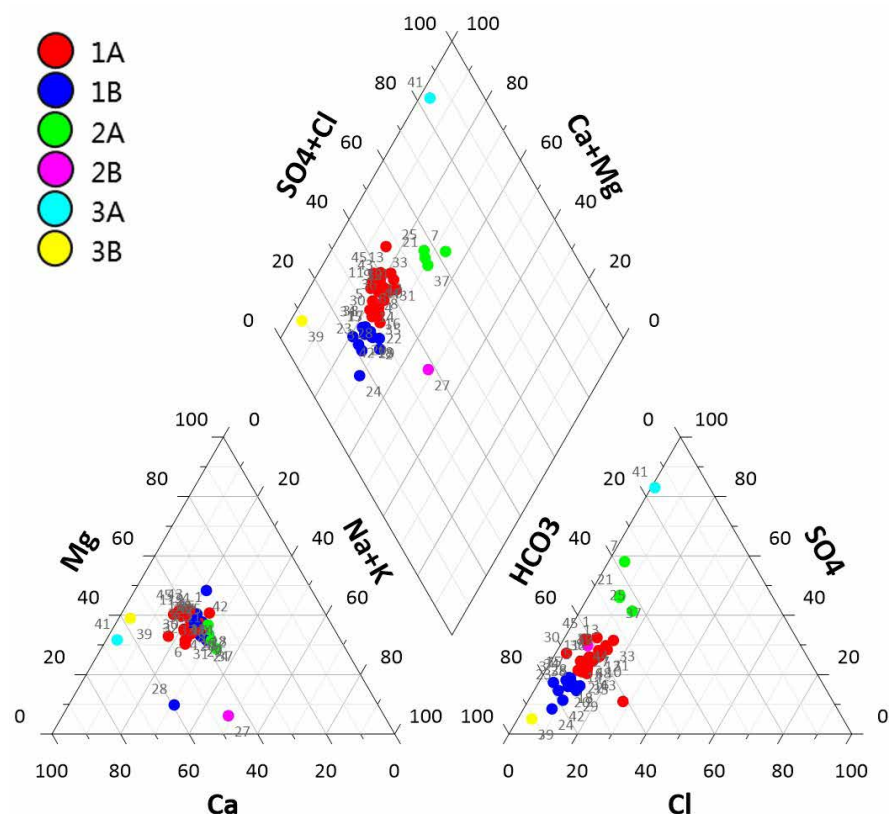


Fig. 2.- Diagrama de Piper de las 43 muestras de agua estudiadas. Ver figura en color en la web.
 Fig. 2. - Piper diagram showing water types of sampled groundwater. See color figure in the web.

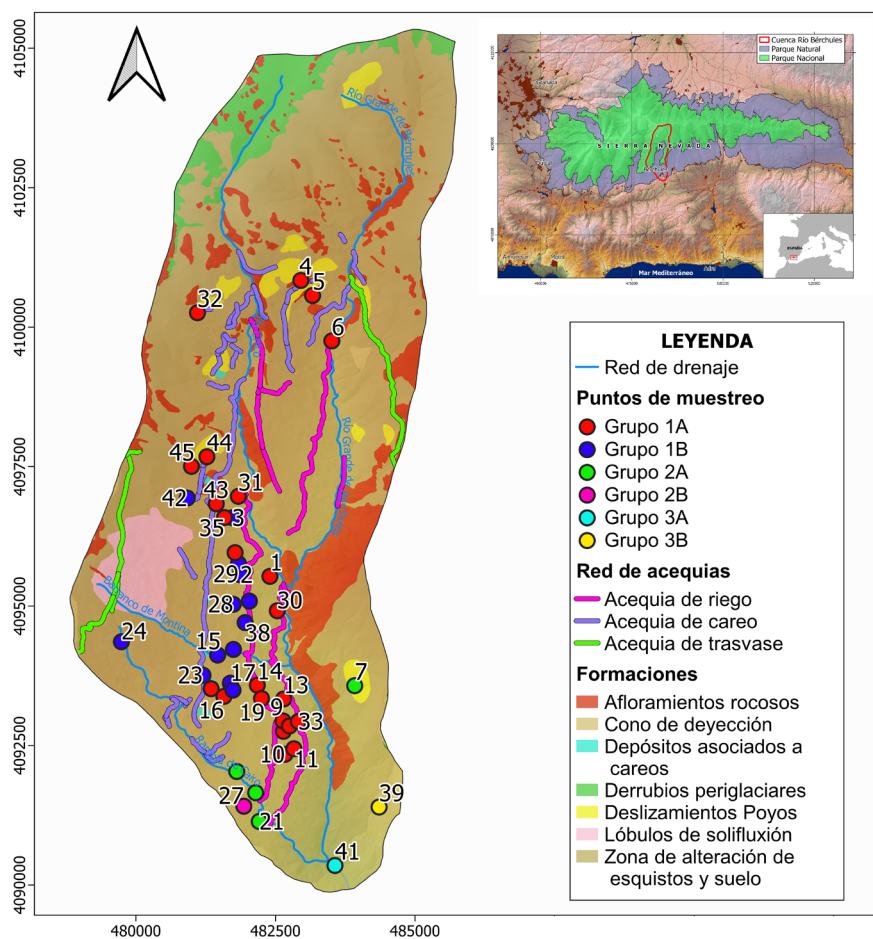


Figura 1.- Mapa de formaciones superficiales de la cuenca del río Bérchules. Modificado de Martos-Rosillo et al., 2019. Ver figura en color en la web.
 Figure 1.- Hydrogeologic map of the Bérchules watershed. Modified from Martos-Rosillo et al., 2019. See color figure in the web.

El complejo Nevado-Filábride tiene unos 1000 m de espesor y está formado en su mayor parte por esquistos grafitosos feldespáticos con intercalaciones de cuarcitas. La principal estructura de deformación consiste en una foliación muy penetrativa con un buzamiento general hacia el N-NE, que condiciona la suave inclinación de las laderas occidentales de los valles, paralelas a la esquistosidad (González-Ramón et al., 2015).

La cuenca del Bérchules se encuentra casi por completo sobre micaesquistos del Nevado-Filábride, aunque al sur, en la parte baja, afloran materiales cuaternarios superpuestos a filitas y cuarcitas y rocas carbonatadas del complejo Alpujárride.

El horizonte más superficial de los esquistos y los depósitos de formaciones recientes que se acumulan sobre la zona de alteración dan lugar al acuífero superficial de Bérchules (Martos-Rosillo et al., 2015). En la mayor parte de la cuenca (51,3 km²), los micaesquistos están recubiertos por una zona de alteración con una permeabilidad media, en la que se favorece la formación de suelo. También cuenta con zonas de mayor permeabilidad constituidas por afloramientos de derrubios periglaciares (3,4 km²) y de depósitos asociados a deslizamientos de ladera (2 km²), localmente denominados "poyos" (Fig. 1). Una vez infiltrada en estos terrenos, el agua pasa a almacenarse en la zona de esquistos alterada (Martos-Rosillo et al., 2017) o surge por pequeños manantiales que favorecen la formación de "borreguiles", zonas utilizadas para pastos del ganado ovino.

Las acequias de careo presentes en la zona se encargan de dirigir el agua desde la cabecera de los ríos hasta áreas más permeables con el fin de recargar los acuíferos (Pulido-Bosch y Ben Sbihi, 1996), y favorecer su salida en puntos de interés. Entre los meses de marzo y julio, cuando tiene lugar el deshielo de las nieves en cotas altas, el agua es transportada por estas acequias hasta descargar de manera intencionada en lugares de infiltración preferencial o simas (Espín et al., 2010). El agua comienza a circular en profundidad y se produce la recarga artificial de los acuíferos de la zona, permitiendo el afloramiento de aguas a menor altitud para abastecimiento humano o uso agrícola, evitando así la sequía estival.

Metodología

La campaña de recogida de muestras se realizó entre los meses de julio y septiembre de 2019. Se recogieron 45 muestras de agua en la cuenca del Bérchules.

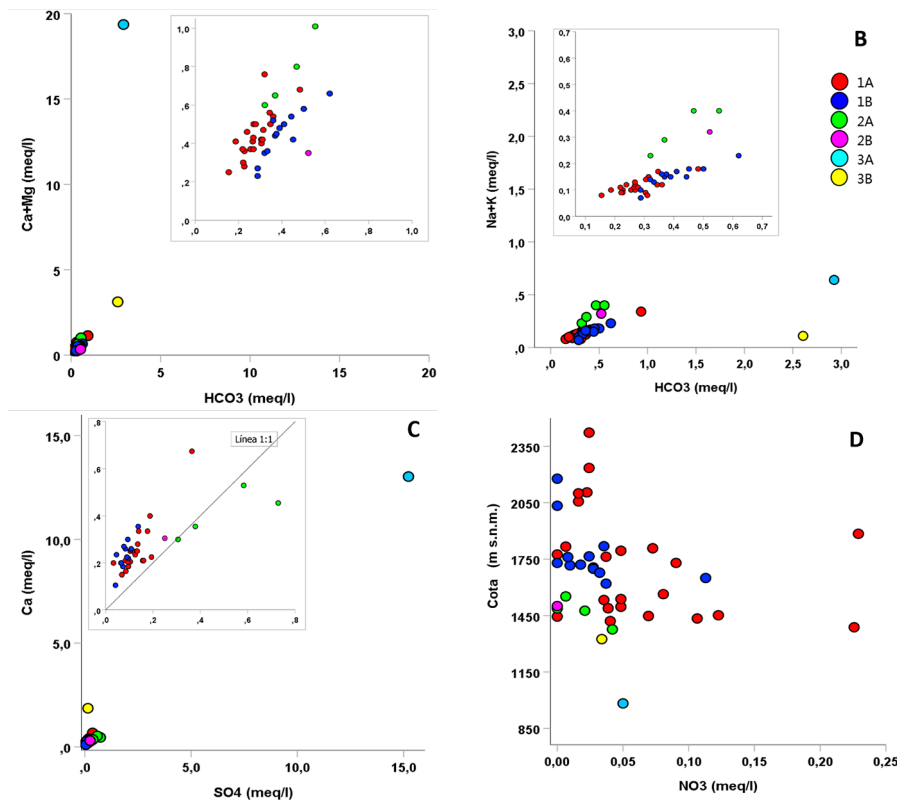


Fig. 3.- Representación de relaciones iónicas estudiadas. A) $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ vs. HCO_3^- . B) $Na^+ + K^+$ vs. HCO_3^- . C) Ca^{2+} vs. SO_4^{2-} . D) Cota vs. NO_3^- .
 Fig. 3. - Representation of the studied molar relationships. A) $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ vs. HCO_3^- . B) $Na^+ + K^+$ vs. HCO_3^- . C) Ca^{2+} vs. SO_4^{2-} . D) altitude vs. NO_3^- .

chules, en puntos de descarga de aguas subterráneas. Los análisis hidroquímicos e isotópicos han sido realizados en el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA) en el marco de la Unidad Asociada entre dicha universidad y el IGME.

Resultados y discusión

Caracterización hidroquímica

Las aguas de la cuenca del río Bérchules presentan una mineralización débil, con valores de conductividad eléctrica (CE) inferiores a 250 $\mu S/cm$, a excepción de las muestras n° 41 de Fuente Narila (354 $\mu S/cm$) y n° 39 de Minilla (1990 $\mu S/cm$) que se encuentran en cotas bajas de la cuenca.

En la figura 2 se representa la distribución de facies hidroquímicas en un diagrama de Piper. De las 43 muestras, 38 tienen hidrofacies bicarbonatada cálcico-magnésica y las 5 restantes sulfatada o clorurada cálcico-magnésica. Se observa una evolución, especialmente bien marcada en el contenido de aniones, que ha servido de base para su diferenciación en grupos.

A partir de análisis bivariantes se han estudiado las variables de mayor interés y que mejor correlación entre sí presentan.

Se observan relaciones positivas entre el HCO_3^- y los cationes Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Fig. 3A y 3B). La evolución de estos iones parece relacionarse con un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo y la roca, lo que provoca un incremento general de la mineralización. El Mg^{2+} procedería de la disolución de filosilicatos (biotita y clorita), mientras que el Na^+ y Ca^{2+} estarían relacionados con la disolución de plagioclasas sódicas y cálcicas. Se encuentran valores bajos de HCO_3^- en todas las muestras (9-57 mg/l), a excepción de las n° 39 y 41 (grupo 3). En estas últimas se observa un aporte extra de HCO_3^- procedente de la disolución de las rocas carbonatadas del complejo Alpujárride. Se puede interpretar que, en general, el HCO_3^- procede de la oxidación de materia orgánica, lo que justifica las bajas concentraciones observadas en la mayoría de las muestras.

También se ha analizado la relación entre el SO_4^{2-} y el Ca^{2+} (Fig. 3C). Existe cierta linealidad entre ambos iones, aunque se observa un exceso de Ca^{2+} .

El contenido en SO_4^{2-} provendría en su mayoría por el aporte de agua de lluvia y su posterior concentración en el suelo debida a la evaporación. La interacción con sulfuros metálicos que rellenan fracturas puede ser otra de las fuentes. Además, también podría haber aportes por su uso

en agricultura intensiva. El subgrupo 3B, tiene un contenido en SO_4^{2-} similar a la mayoría de muestras, aunque presenta una concentración de Ca^{2+} seis veces mayor, procedente de la disolución de carbonatos alpujárrides. Por el contrario, el subgrupo 3A presenta niveles de SO_4^{2-} y Ca^{2+} extremos, comparados con el resto de las muestras debido a su relación con yesos presentes en los tramos de filitas alpujárrides.

La creciente concentración de NO_3^- al disminuir la altitud (Fig. 3D) puede tener su origen en la descomposición de materia orgánica en las zonas bajas, donde existe un mayor desarrollo del suelo. Sin embargo, se alcanzan mayores concentraciones de las producidas naturalmente, por lo que ese exceso de nitrato debe proceder del aporte producido por los fertilizantes usados en las actividades agrícolas. Las muestras con las concentraciones más altas se sitúan en la zona meridional de la cuenca, justo donde se localizan las áreas de cultivos de regadío y secano cercanas a los núcleos urbanos de Bérchules y Alcútar.

Caracterización isotópica

Los isótopos ambientales tienen valores para el $\delta^{18}O$ comprendidos entre -10,73 y -8,26 (‰ VSMOW); y entre -71,42 y -54,41 (‰ VSMOW) para el δ^2H . Estos valores se han representado junto a la línea meteórica mundial (LMM), la línea meteórica del Mediterráneo Occidental (LMWM) y la línea meteórica local (LML) (Barberá et al., 2018) (Fig. 4).

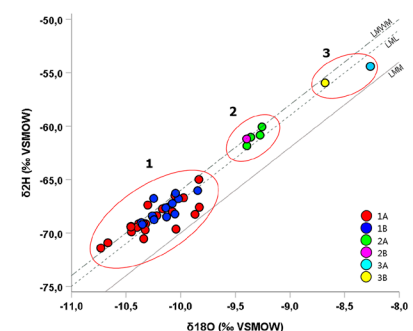


Fig. 4.- Relación entre el contenido de $\delta^{18}O$ y δ^2H de las muestras de agua de la cuenca del río Bérchules (‰ VSMOW). Línea meteórica mundial (LMM): $\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 10\text{‰}$. Línea meteórica local (LML): $\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 12,4\text{‰}$. Línea meteórica del Mediterráneo Occidental (LMWM): $\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 14\text{‰}$.
 Fig. 4.- Relationships between $\delta^{18}O$ and δ^2H (‰ VSMOW) in groundwater samples in Bérchules watershed. Global Meteoric Water Line (LMM): $\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 10\text{‰}$. Local Meteoric Line (LML): $\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 12,4\text{‰}$. Western Mediterranean Meteoric Line (LMWM): $\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 14\text{‰}$.

Se han diferenciado 3 grupos de aguas según sus valores isotópicos, de forma similar a los diferenciados a partir del diagrama de Piper (Fig. 2). El grupo 1 incluye el 84% de las muestras y se caracteriza por tener el contenido isotópico más ligero, con valores inferiores a $-9,8\text{‰}$ de $\delta^{18}\text{O}$ y -65‰ de $\delta^2\text{H}$. Corresponden a las aguas muestreadas a las cotas más altas y a los manantiales de cotas inferiores localizados por debajo de las acequias de careo y de los puntos de descarga de estas acequias (simas) en la margen derecha del río Bérchules. El grupo 2, está formado por aguas más pesadas, con valores isotópicos que varían entre $-9,40\text{‰}$ y $-9,26\text{‰}$ para el $\delta^{18}\text{O}$, y entre $-61,85\text{‰}$ y $-60,07\text{‰}$ para el $\delta^2\text{H}$. Se incluyen en este grupo aguas de manantiales con una cota media de 1480 m s.n.m. que no se ven influenciados por las acequias de careo.

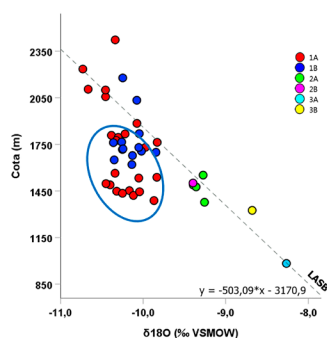


Fig.5- Relación entre la cota (m) y el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW). La envoltura ovalada indica las muestras de agua influenciadas por la recarga artificial provocada por las acequias de careo.

Fig. 5.- Altitudinal variation of $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW) in groundwater samples. Samples within the ellipse show waters influenced by acequias de careo.

El grupo 3 lo componen aguas con el contenido isotópico más pesado, superiores a $-8,68\text{‰}$ de $\delta^{18}\text{O}$ y $-55,96\text{‰}$ de $\delta^2\text{H}$. Se trata de manantiales situados a cotas bajas, inferiores a 1350 m s.n.m., no influenciados por acequias, y que se localizan en materiales alpujárrides en la zona próxima a la salida de la cuenca. Representarían aguas cuya composición isotópica no ha sido alterada por la influencia de las aguas infiltradas en las acequias de careo.

En condiciones naturales, existe una

fuerte relación entre el $\delta^{18}\text{O}$ y la cota (Fig. 5), de modo que la composición isotópica disminuye con la altitud. Esto se atribuye a la progresiva condensación del vapor atmosférico, que se produce cuando las masas de aire ascienden por las laderas y se enfrían como consecuencia de la expansión adiabática. Los isótopos pesados del vapor de agua se condensan y precipitan antes, en cotas bajas. El vapor residual que sigue ascendiendo, apenas contiene isótopos pesados y son abundantes los más ligeros, que son los que precipitan con las lluvias a mayores altitudes.

Se puede determinar el origen de las aguas según su contenido isotópico mediante la observación de la diferenciación de las muestras por grupos. El grupo 1 reúne muestras, que a pesar de estar recogidas a distintas cotas, tienen un contenido isotópico similar y más ligero que el resto, lo que indica que son aguas precipitadas en cotas más elevadas, en buena parte transportadas e infiltradas en cotas más bajas por las acequias de careo. Este proceso de recarga artificial tiende a homogenizar el contenido isotópico.

Los grupos 2 y 3 muestran los valores isotópicos más pesados, ya que quedan fuera de la zona de influencia de los careos y se relacionan con aguas precipitadas a menor altitud. Las aguas no influenciadas por las acequias (Fig. 14) son las únicas que se alinean con la Línea Isotópica de las Aguas Subterráneas para la cuenca del Bérchules (LASB), definida por Barberá et al. (2018) que indica un gradiente isotópico altitudinal de $-0,17\text{‰}/100\text{ m}$ para las aguas subterráneas de la cuenca del Bérchules.

Conclusiones

Los resultados hidroquímicos e isotópicos han permitido clasificar las aguas en tres grupos principales.

Se han identificado los principales procesos que actúan en las aguas subterráneas de la cuenca, y que determinan su comportamiento hidroquímico, como son la interacción agua-suelo-roca, el efecto de la altitud y la contaminación agrícola.

Se ha comprobado la influencia que las acequias de careo tienen sobre las aguas subterráneas de la cuenca del río Bérchules, a partir del efecto homogeneizador en la composición de las aguas

analizadas. Las muestras recogidas en cotas altas presentan una gran similitud en su composición a aquellas aguas de altitudes medias en la margen derecha, debido a la mezcla de aguas infiltradas por las acequias de careo.

Agradecimientos

Los datos utilizados forman parte de una asistencia técnica del IGME al Parque Nacional de Sierra Nevada. Nuestro agradecimiento a Rosario Jiménez Espinosa y Antonio Pulido Bosch por la revisión del artículo y por sus constructivos comentarios.

Referencias

- Espín, R., Ortiz, E., Guzmán, J.R. (2010). *Manual del acequero: parques nacional y natural de Sierra Nevada*.
 González-Ramón, A., Martos, F.M., Marín, C., Martos Rosillo, S., Pedrera, A., Ruiz Constán, A., Durán Valsero, J.J. (2015). *El Agua en Andalucía. El agua clave medioambiental y socioeconómica, Serie Hidrogeológica y Aguas Subterráneas*, pp. 2832-94.
 Jódar, J., Cabrera, J.A., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Lambán, L.J., Herrera, C., Custodio, E. (2017). *Science of the Total Environment* 593-594: 760-772.
 Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Marín-Lechado, C., Cabrera, J., Guardiola-Albert, C., Jódar, J., Navarrete, E., Ruiz Constán, A., Moral, F., Pedrera, A., Navas, R., López, M. Durán J.J. (2017). En *Manejo de la Recarga de Acuíferos*, pp. 527-563.
 Martos-Rosillo, S., Guardiola-Albert, S., Marín-Lechado, S., González-Ramón, A., Villagómez, B., Peregrina, M., Fernández, L., Durán J.J., Navarrete, E., López Rodríguez, M., Pedrera, A., Ruiz Constán, A. y Cabrera, J.A. (2015). En *El Agua en Andalucía. El agua clave medioambiental y socioeconómica, Serie Hidrogeológica y Aguas Subterráneas*, pp. 623-634.
 Puga, E., Díaz de Federico, A., Fanning, M., Nieto, J. M., Rodríguez Martínez-Conde, J. Á., Díaz Puga, M. Á. Lozano, J.A., Bianchini, G. Natali, C. y Beccaluva, L. (2017). *Geosciences*, 7(2), 31.
 Pulido-Bosch y Ben Sbith, (1996). *Environmental Geology* 26: 57-63.