

Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de la cuenca de alta montaña del río Alhorí (Sierra Nevada, Sur de España)

Hydrogeochemical and isotopic characterisation in the high mountain watershed of the Alhorí River (Sierra Nevada, southern Spain)

Edison Steven Morales Sotaminga¹, Ana Fernández Ayuso^{2,6}, Blas Ramos³, Juan Antonio Barberá Fornell⁴, Antonio González Ramón⁵, Thomas Zakaluk⁵, José María Martín Civantos³, Sergio Martos Rosillo⁵

¹ Profesional libre. C/Enrique Tierno Galván, 26. Mengíbar. Jaén. 23620. stebeltturner@gmail.com

² Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera km 1. 41704. Sevilla. anafdezayuso@gmail.com

³ Universidad de Granada. Campus de la Cartuja, C/Profesor Clavera, s/n, 18011 Granada. blasramos@ugr.es, civantos@ugr.es

⁴ Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, s/n, 29071 Málaga. jabarbera@uma.es

⁵ 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, thomas.zakaluk@gmail.com

⁶ Universidad Autónoma de Madrid. Campus de Cantoblanco. C/Francisco Tomás y Valiente, 7. 28049 (Madrid). ana.fernandez@uam.es

ABSTRACT

The Careo ditches, hydraulic elements of an ancestral water management system, play an essential role in the hydrological functioning of watersheds in Sierra Nevada (South of Spain). This study seeks to characterize the hydrochemical and stable isotope compositions of surface water and groundwater in the high mountain watershed of the Alhorí river. For this purpose, 46 samples from springs and surface streams were collected in June 2020 and their content in major ions, hydrogen and oxygen isotopes was analysed. The results show that altitude is clearly influencing the characteristics of the sampled waters. Furthermore, artificial groundwater recharge with careo ditches favours evapoconcentration. Overall, this research proves the existence of short-distance flows in the groundwater of the Alhorí river basin.

Key-words: careo ditches, major ions, stable isotopes, high mountain basin

RESUMEN

Las acequias de careo, elementos hidráulicos de un sistema ancestral de gestión del agua, juegan un papel esencial en el funcionamiento hidrológico de las cuencas de Sierra Nevada (sur de España). En este estudio se lleva a cabo una caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, de la cuenca de alta montaña del río Alhorí. El estudio se ha realizado con datos procedentes de 46 muestras tomadas en junio de 2020. Tras el análisis de datos se evidencia un marcado patrón altitudinal que rige las características hidrogeoquímicas e isotópicas del agua. Además, procesos como la evapoconcentración, provocados por las acequias de careo, quedan claramente identificados. Por último, queda demostrada a partir de esta investigación la existencia de flujos de corto recorrido en las aguas subterráneas de la cuenca del río Alhorí.

Palabras clave: acequias de careo, elementos mayoritarios, isótopos estables, cuenca de alta montaña.

Geogaceta, 73 (2023), 15-18

<https://doi.org/10.55407/geogaceta95514>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 10/07/2022

Fecha de revisión: 28/10/2022

Fecha de aceptación: 02/12/2022

Introducción

La cuenca hidrológica del río Alhorí, situada en Jérez del Marquesado (Granada), en la vertiente septentrional de Sierra Nevada, es un ejemplo de cuenca de alta montaña desarrollada sobre rocas duras y en la que se dan unas condiciones semiáridas, que la hacen de especial interés para su investigación hidrológica e hidrogeoquímica. Por encima de los 2000 m s.n.m., la reciente deglaciación ha dejado expuestos en superficie un importante conjunto de materiales producto de la alteración glacial y periglacial, que son muy permeables, que permiten unas altas tasas de recarga y que dan lugar a manantiales, de gran caudal en el pie de algunas morrenas. Por debajo de los 2000 m s.n.m., el periglaciario ha sido menos intenso, pero la mayor parte de los afloramientos de los esquistos nevadofilá-

brides, que dominan en esta cuenca, están alterados y dan lugar a un extenso acuífero de poco espesor, pero que cubre la mayor parte de la cuenca hidrológica. A las citadas particularidades, se añaden otras, que inciden de forma notable en el funcionamiento hidrológico del río Alhorí. Por un lado, la intensa reforestación de coníferas que tapiza la parte baja de la cuenca y por otro, la presencia de acequias de careo. Estas acequias, manejadas por los ganaderos y por la comunidad de regantes de Jérez del Marquesado, permiten infiltrar en las laderas el agua de escorrentía generada en la época de deshielo para retrasar su salida de la cuenca y para generar pastos. El agua infiltrada alimenta manantiales aguas abajo y hace que el río tenga un mayor caudal de base en verano. Este caudal es aprovechado por los regantes, que tienen sus principales tomas de riego en el propio río, aguas abajo de la estación de aforos. El objetivo principal

de este trabajo ha consistido en contribuir a mejorar el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico de esta cuenca de alta montaña, mediante la aplicación de técnicas de investigación hidrogeoquímicas e isotópicas. Para ello, se realizó una campaña de muestreo del agua superficial y subterránea y se procedió al análisis e interpretación de la información generada.

Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Alhorí se localiza en la vertiente norte de Sierra Nevada, en el término municipal de Jérez del Marquesado. Tiene una superficie de 24 km², la cual presenta una morfología elongada con dirección suroeste-noreste. Su longitud es de 10 km y su anchura media de 2,4 km. La cuenca tiene una altitud máxima de 3090 m s.n.m., (Picón del Jerez), mínima de 1213 m s.n.m., y media de 1925 m s.n.m.

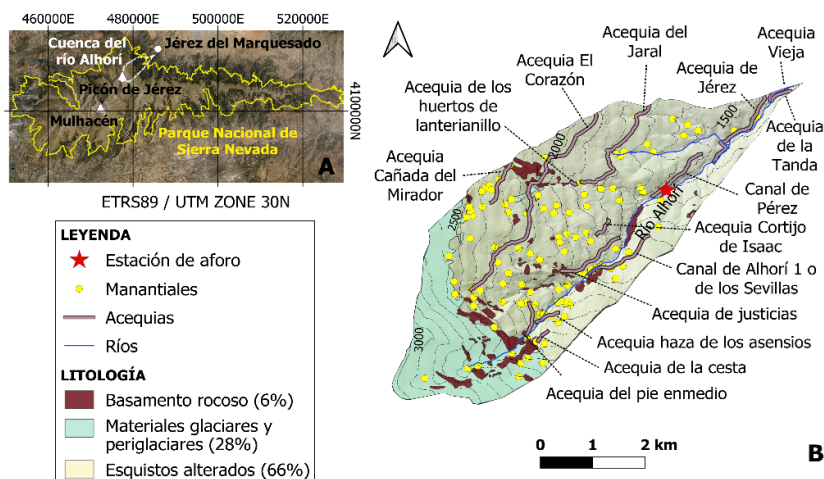


Figura 1.- (A) Localización de la zona de estudio en el Parque Nacional Sierra Nevada. (B) Mapa hidrogeológico de la cuenca del Alhorí. Ver figura en color en la web.

Figure 1.- (A) Location of the study site within the boundaries of the Sierra Nevada National Park. (B) Hydrogeological map of the Alhorí river basin. See color figure in the web.

Geológicamente, el área de estudio está formada por rocas metamórficas precámbricas-paleozoicas del Complejo Nevado-Filábride. El conjunto tiene dos unidades superpuestas tectónicamente en la zona (Martín-Martín et al., 2008): i) unidad inferior, denominada Veleta, constituida por micaesquistos oscuros y cuarcitas, ii) unidad superior, conocida como Mulhacén. Está formada por una sucesión de rocas metamórficas con micaesquistos y cuarcitas oscuras en la base, superpuestas por micaesquistos y cuarcitas claras y mármoles.

En la cuenca del río Alhorí la vegetación presenta una marcada distribución espacial en función de la altitud. Las áreas por debajo de los 2000 m s.n.m., se encuentran intervenidas antrópicamente. Desde los años 40, se ha producido una importante actividad repobladora con pinos y algunas encinas para luchar contra la erosión. Por encima de los 2000 m s.n.m. dominan los pastizales de alta montaña entre los que destacan los borreguiles, matorrales y las comunidades rupícolas.

El río Alhorí está situado en la cabecera del río Fardes, afluente del Guadalquivir. Tiene un régimen nival, con caudales máximos entre abril y junio y mínimos entre agosto y marzo. Su aportación media anual es aproximadamente de 8,56 hm³/año, con una alta contribución de agua subterránea, atendiendo al alto caudal de base del hidrograma medio anual (Morales-Sotaminga, 2021).

En la Figura 1 se representa el mapa hidrogeológico de la cuenca del río Alhorí. Un 94% de los afloramientos de la cuenca son materiales permeables, debido a los

procesos de disgregación y alteración de los esquistos metamórficos (22,6 km²). El área restante (1,4 km²) engloba a los afloramientos de rocas metamórficas sin alterar (Martos Rosillo et al., 2020).

La recarga del acuífero superficial se produce tanto por recarga natural, debida a la infiltración de la precipitación en forma de lluvia y el agua de deshielo, como por recarga artificial, asociada a las acequias de careo. El agua que se infiltra recarga al acuífero superficial en pendiente, de poco espesor, y descarga a través de numerosos manantiales existentes a media ladera y a través de los cauces superficiales de primer orden, siguiendo el modelo conceptual descrito en otras cuencas de alta montaña de Sierra Nevada con acequias de careo operativas (Martos-Rosillo et al., 2019). En la Figura 1 se observa una alta densidad de manantiales, fundamentalmente en la zona de alteración superficial de los esquistos y de forma secundaria en el límite entre los materiales periglaciares y los esquistos alterados, debido al contraste de permeabilidad existente entre ambos tipos de materiales. Hacia las cotas más bajas la densidad de manantiales se reduce, coincidiendo con la presencia de una densa cubierta de masa forestal.

Las acequias de careo activas en la cuenca del río Alhorí se encuentran en su margen izquierda (Cañada del Mirador, El Corazón y Jaral). Funcionan en la época de deshielo (marzo-junio), recargando el acuífero desarrollado en la zona de alteración de los esquistos. Contribuyen a que el río sea ganador todo el año y a que existan manantiales de caudal permanente en los que se desarrollan un gran número de borreguiles y pastizales aprovechados por el ganado. El resto de acequias que aparecen

en la figura, exceptuando las acequias de riego Vieja, la Tanda y Jérez, están abandonadas, desde la segunda mitad del siglo pasado. A diferencia de otras acequias de careo como las de Bérchules o Mecina, en la cara sur de Sierra Nevada (Martos-Rosillo et al., 2019), en las acequias del Alhorí se vierte poca cantidad de agua en muchos puntos. A estas derivaciones se les conoce localmente como "chorreras" y desde estas se vierten pequeños caudales (0,1-3 l/s) hacia amplias zonas de pastizal. Se generan así borreguiles y pastos con una delgada lámina de agua que también es aprovechada por el ganado, fundamentalmente vacuno, como agua de bebida.

Metodología

La campaña de recogida de muestras de agua se realizó en junio de 2020. Se recogieron 46 muestras de aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río Alhorí. En cada punto de muestreo se midió *in situ*, la conductividad eléctrica, el pH y la temperatura del agua. Los análisis hidroquímicos e isotópicos han sido realizados en el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIU-MA) en el marco de la Unidad Asociada entre dicha universidad y el IGME-CSIC.

Resultados y discusión

Caracterización hidroquímica

Las aguas de la cuenca del río Alhorí presentan una mineralización débil, con valores de conductividad eléctrica (CE) medios de 30 µS/cm. La temperatura media del agua superficial (11,2 °C) es mayor que la del agua subterránea (8,7 °C) y las temperaturas más bajas se registran en estas últimas (3,5 °C). Los valores medios de pH son similares para ambos tipos de agua (7,49 para aguas superficiales y 7,5 para aguas subterráneas), no obstante, el agua subterránea presenta un rango de pH mayor (0,02 en aguas superficiales y 0,59 en aguas subterráneas).

Es posible realizar una diferenciación de dos tipos de agua subterránea en la cuenca del río Alhorí. Los manantiales situados aguas abajo de las acequias de careo, en el sentido del flujo subterráneo, presentan ciertas diferencias en su composición hidrogeoquímica y, especialmente, en su composición isotópica con respecto al resto de manantiales. Por estos motivos, en este trabajo se distinguen tres tipos de agua: agua superficial, agua subterránea sin influencia de careos y agua subterránea con influencia de careos.

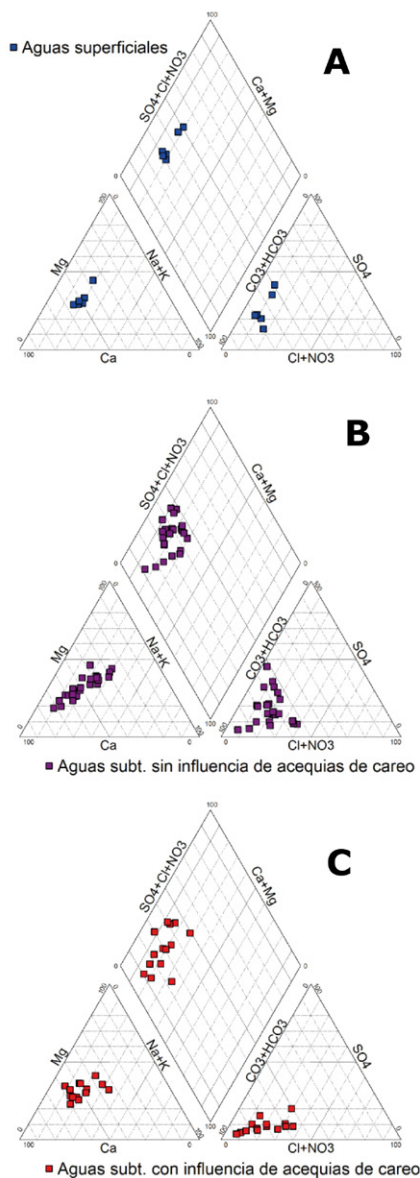


Fig. 2.-Diagramas de Piper de muestras de agua superficial, aguas subterráneas sin influencia de acequias de careo y aguas subterráneas con influencia de acequias de careo.

Fig. 2. - Piper diagrams of surface water samples, groundwater without the influence of the careo ditches and groundwater with the influence of the careo ditches.

El agua superficial (Fig. 2A) presenta facies bicarbonatadas cálcicas, cálcicas-magnésicas, magnésicas-cálcicas y sulfatada cálcica-magnésica.

El agua subterránea sin influencia de careos (Fig. 2B) presenta facies bicarbonatadas cálcicas, cálcicas-magnésicas, magnésicas-cálcicas, y magnésicas-sódicas. En el diagrama de Piper, estas aguas presentan un contenido aniónico heterogéneo, con una transición desde muestras con una alta proporción en bicarbonatos hacia muestras con un aumento en la proporción del contenido en sulfatos.

El agua subterránea influenciada por

careos (Fig. 2C) presenta facies hidroquímica bicarbonatadas cálcicas, cálcicas-magnésicas, magnésicas-cálcicas y cálcicas-sódicas. Las muestras presentan un enriquecimiento en cloruros más intenso que en el grupo de las aguas subterráneas no influenciadas por el careo.

Caracterización isotópica

En la Figura 3 se representa una gráfica con la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δ^2H de todas las muestras de agua analizadas, en las que se han diferenciado las aguas superficiales y ambos tipos de aguas subterráneas. Las muestras de agua superficial y subterránea no influenciadas por acequias presentan una alineación respecto a las líneas meteóricas del mediterráneo occidental (WMMWL, Jiménez-Martínez y Custodio., 2010) y Meteorica Global (GMWL, Gat., 2000), mientras que las muestras de agua subterránea influenciadas por los careos presentan un enriquecimiento anómalo en $\delta^{18}O$ respecto a δ^2H , y se alinean en torno a una recta de condiciones de evaporación que se rige por la ecuación de la recta $\delta^2H = 5.5131 \cdot \delta^{18}O - 12.857$. La existencia de numerosos puntos de vertido de aguas desde las acequias de careo para su infiltración en extensas zonas de pastizales favorece la evaporación del agua en este proceso, cuestión que queda reflejada en la marca isotópica de los manantiales ubicados aguas abajo. Este tipo de infiltración lenta es totalmente diferente al que se produce en las acequias de la cuenca del río Bérchules (Barberá et al., 2018), donde grandes caudales de aguas isotópicamente muy ligeras son recargados en zonas de alta permeabilidad.

Variabilidad altitudinal

Como se puede observar en la Figura 4A, existe un incremento progresivo de la CE conforme se desciende de cota, la cual es significativamente más acentuada en las aguas subterráneas. Se distinguen dos muestras que presentan valores anómalos: una de ellas es la tomada en la Fuente los Ladrones, la cual se localiza en un área con afloramientos de esquistos con mineralizaciones ricas en hierro, presenta el valor máximo de CE (103 $\mu S/cm$) y la otra, la muestra tomada en la Toma del Jaral, que posee un valor apreciablemente bajo (11 $\mu S/cm$) a pesar de localizarse en una cota relativamente baja.

En la misma figura (Fig-4B) se muestra que las aguas localizadas a mayor cota son más frías. El agua superficial presenta una temperatura mínima cuyo valor es mayor que la temperatura mínima del agua subterránea. No obstante, conforme se desciende de cota el agua subterránea experimenta un mayor incremento de temperatura. Se obtienen los siguientes gradientes de temperatura: aguas superficiales 4,4 $^{\circ}C/km$, y aguas subterráneas 8 $^{\circ}C/km$. La variación altitudinal de la temperatura y la existencia de numerosos manantiales a media ladera pone de manifiesto que a lo largo de la pendiente topográfica hay flujos de recorrido corto en el acuífero, como corresponde a los acuíferos en ladera o en pendiente desarrollados sobre zonas de alteración en rocas duras (Barberá et al., 2018).

En cuanto a los nitratos, se observa que el agua superficial presenta una concentración media baja (0,8 mg/L) que altitudinalmente se mantiene constante, a excepción de una de las muestras. El agua subterránea no influenciada por careos presenta una

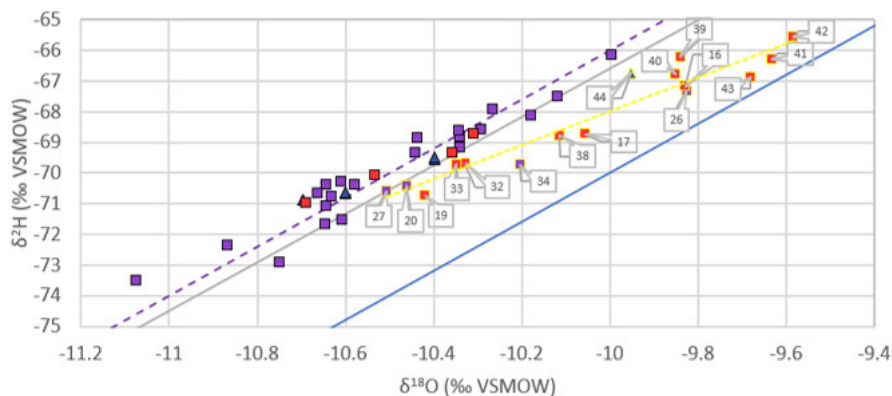


Fig. 3.-Composición de $\delta^{18}O$ y δ^2H de las muestras de agua superficial y agua subterránea con y sin influencia de acequias de careo. Las muestras bordeadas en amarillo son aquellas que se alinean con una recta de tendencia a procesos de evaporación. Datos expresados en tantos por mil (‰). Ver figura en color en la web.

Fig. 3. - Composition of $\delta^{18}O$ and δ^2H of surface water and groundwater samples with and without the influence of the careo ditches. Samples bordered in yellow are those that align with a trend line of evaporation processes. Data are expressed in terms of rates per thousand (‰).

concentración media de 1,7 mg/L, dentro de un rango de 0,1-4,4 mg/L. En cambio, el agua subterránea influenciada por careos tiene una concentración media algo mayor, de 2 mg/L, dentro de un rango de 0-6 mg/L. Los valores máximos de concentración de ambas suelen ocurrir en el rango de cotas comprendido entre los 2000 y 3000 m s.n.m. En la cuenca del Alhorí no se realiza ninguna actividad industrial ni hay asentamientos humanos, por lo que el aumento de este ión se asocia a la ganadería extensiva, que se concentra en las zonas donde se encuentran los borreguiles y los pastizales.

Por último, también la Figura 4, permite observar que las aguas subterráneas presentan una mayor tendencia al enriquecimiento en $\delta^{18}\text{O}$ con el descenso de cota topográfica, en comparación con el agua superficial. Las muestras de agua subterránea con influencia de careos experimentan una tendencia de enriquecimiento más acentuada. En la gráfica se han etiquetado las muestras de agua que se disponían siguiendo una tendencia de evaporación en el diagrama $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 3).

Conclusiones

Los datos hidrogeoquímicos e isotópicos generados con motivo de este trabajo confirman un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de un acuífero en pendiente, desarrollado en una zona de alteración de rocas duras.

Los numerosos puntos de vertido de las acequias de careo, en amplias zonas de pasto, provocan procesos de evaporación durante la infiltración del agua, proceso que ha permitido identificar a los manantiales relacionados con estas acequias.

Las mayores concentraciones de nitratos, medidas entre los 2000 y 3000 m de altitud, están relacionadas con los desechos fecales ganaderos que se producen en las zonas de pasto.

La recuperación de las acequias de careo y la reducción de la densidad de la masa forestal contribuirían a aumentar el caudal del río Alhorí y a que este sea mayor durante los periodos de estiaje y durante los periodos de sequía.

Contribución de los autores

B. Ramos, A. González, T. Zakaluk y J.M. Martín Civantos y S.Martos adquirieron los datos de campo. J. A. Barberá llevó a cabo los análisis e interpretó los datos. S. Morales Sotaminga elaboró las figuras e interpretó los datos. Todos los autores colaboraron en la discusión de los resultados. S. Morales Sotaminga, S. Martos y A. Fernández Ayuso redactaron el manuscrito.

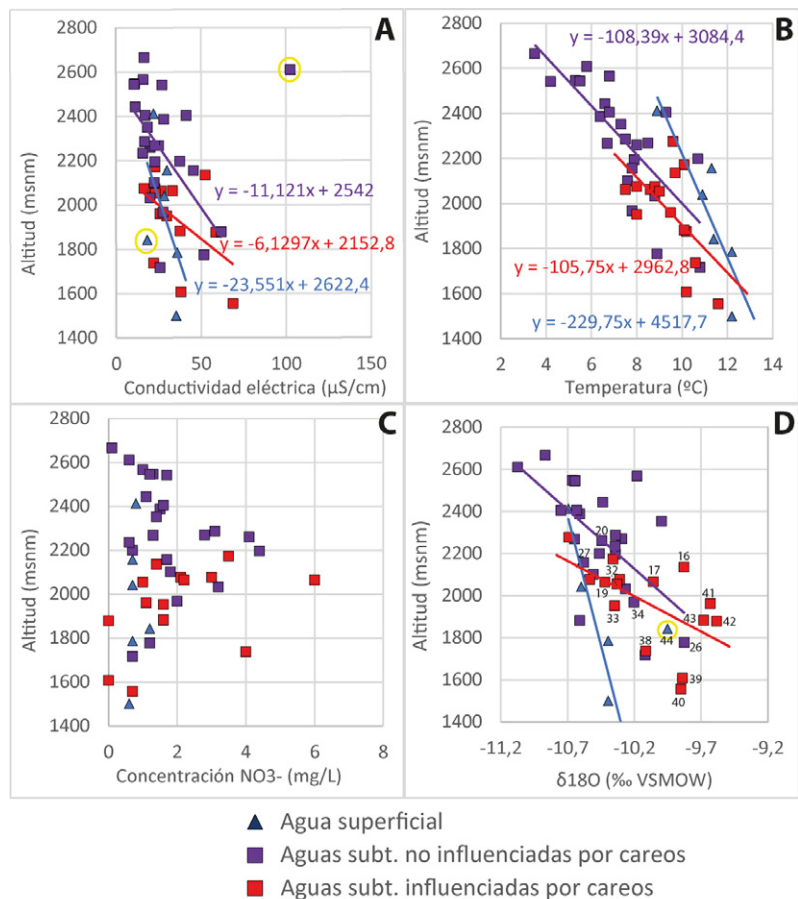


Fig. 4.- Gráficos de dispersión entre la altitud (m s.n.m.) y la Conductividad Eléctrica (µS/cm)(A), la temperatura (°C) (B), la concentración de nitratos (mg/l) y (C) y la composición de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW) (D). Las muestras "Toma del Jaral" y "Fuente de los ladrones", comentadas en el texto, están rodeadas con un círculo amarillo. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- Scatterplots between altitude m a.s.l.) and Electrical Conductivity (µS/cm)(A), chloride concentration (mg/l) (B), nitrate concentration (mg/l) (C) and $\delta^{18}\text{O}$ composition (‰ VSMOW). "Toma del Jaral" and "Fuente de los ladrones" samples, commented in the text, are surrounded by a yellow circle.

Agradecimientos y financiación

Este trabajo es una contribución a la Red "Siembra y Cosecha del Agua (419RT0577) del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), al Convenio IGME-DPG, al proyecto SPIP2021-02741 (Proyectos de Investigación Científica en la Red Parques Nacionales), los proyectos P18-RT-3836 (I+D+ PAIDI, 2018) y BHUM-436-UGR18 (FEDER 2018) y el Grupo de Investigación de Recursos Hídricos (PAIDI RNM126). Esta publicación ha sido financiada por la Unión Europea "NextGenerationEU", por el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y por el Ministerio de Universidades, en el marco de las ayudas "Margarita Salas" para la Recualificación del Sistema Universitario español 2021-2023 convocadas por la Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla.

Referencias

Barberá, J.A., Jódar, J., Custodio, E., González-Ramón, A., Jiménez-Gavilán, P.,

Vadillo, I., Pedrera, A., Martos-Rosillo, S. (2018). *Science of the Total Environment*. 640-641, 874-893.
 Gat J.R., (2000). *Hydrol. Process.* 14, 1357-1369.
 Jiménez-Martínez J., Custodio E., (2010). *Bol. Geol. Min.* 119 (1), 21-32.
 Martín Martín, J. M., Braga Alarcón, J. C., & Gómez Pugnaire, M. T. (2008). *Itinerarios Geológicos por Sierra Nevada: Guía de campo por el Parque Nacional y Parque Natural de Sierra Nevada*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 267 pp.
 Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J. M., Martínez-Moreno, F. J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A. & Durán, J. J. (2019). *Journal of Hydrology*, 578, 124047.
 Morales-Sotaminga, E.S. (2021). *Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de la cuenca de alta montaña del río Alhorí (Jérez del Marquesado, Granada)*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Málaga. 72 pp.