

Caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas de Lanjarón (Sierra Nevada, Granada)

Hydrochemical and isotopic characterization of Lanjarón groundwater (Sierra Nevada, Granada)

Manuel Rodríguez del Rosario¹, Manuel López Chicano^{1,2} y María Luisa Calvache Quesada^{1,2}

¹ Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Avenida Fuente Nueva s/n. manurquezdelrosario@gmail.com, mlopezc@ugr.es, calvache@ugr.es

² Instituto Universitario de Investigación del Agua. Universidad de Granada. C/ Ramón y Cajal, 4, Granada.

ABSTRACT

The specific characteristics of the rocks present in the southern slope of Sierra Nevada determine the great compositional and quality variability of groundwater. This study carries out a hydrochemical and isotopic analysis of groundwater and surface water in the Lanjarón area. The study has analyzed 20 samples collected in October 2021 in order to distinguish different types of water according to their hydrochemical facies, find out if they share a common origin and establish at what height the recharge occurs.

Key-words: hydrochemistry, stable isotopes, fractured aquifer, groundwater, water recharge height.

RESUMEN

Las características hidrogeológicas existentes en la ladera sur de Sierra Nevada vertiente a la zona de Lanjarón, condicionan la presencia de aguas subterráneas con una gran variabilidad composicional y de calidad. En este estudio llevamos a cabo un análisis hidroquímico e isotópico de las aguas subterráneas y de algunas superficiales del área de Lanjarón. Se han analizado 20 muestras recogidas en octubre de 2021 con el fin de diferenciar distintos tipos de agua según sus facies hidroquímicas, conocer si comparten un origen común y a qué cota preferente se produce la recarga.

Palabras clave: hidroquímica, isótopos estables, acuífero fisurado, agua subterránea, altura de recarga.

Geogaceta, 73 (2023), 7-10

<https://doi.org/10.55407/geogaceta95517>

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

Las aguas subterráneas de Sierra Nevada son, en su mayoría, aguas frías, de débil mineralización y algo ácidas, que discurren en muchos casos de forma subsuperficial, habida cuenta de la baja permeabilidad de los materiales metamórficos que predominan, lo que les otorga una excelente calidad física y química; también son, en general, de buena calidad microbiológica, dado que son aguas de alta montaña donde apenas existen focos importantes de contaminación y se encuentran protegidas bajo la figura de Parque Nacional. No obstante, también se observan aguas más mineralizadas, ferruginosas y gaseosas, a causa de la existencia de yacimientos minerales diversos y, sobretodo, por la existencia de flujos profundos y lentos que se corresponden con aguas relativamente calientes (Rodríguez Gordillo et al., 1981). Lanjarón constituye uno de los ejemplos más representativos de esta diversidad hidrogeológica de Sierra Nevada.

Los objetivos del estudio son obtener información sobre las características hidrogeoquímicas generales de las aguas subterráneas, profundizar en el origen de

las mismas y establecer la cota de recarga preferente a partir del contenido en $\delta^{18}\text{O}$.

Área de estudio

La cuenca del río Lanjarón se sitúa en la vertiente suroccidental de Sierra Nevada, incluida dentro de los municipios de Lanjarón y el Valle de Lecrín. Presenta una morfología alargada de dirección aproximada NNE-SSE, una superficie de 54 km² y unas cotas máxima y mínima de 3.180 y 230 m s.n.m., respectivamente. El río Lanjarón recorre en dirección suroeste unos 21 km desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Dúrcal.

Desde el punto de vista geológico, en el área de estudio afloran materiales de la Zona Interna de las Cordilleras Béticas. La cuenca del río Lanjarón está ubicada casi en su totalidad sobre el complejo Nevado-Filábride, compuesto mayoritariamente de micaesquistos, rocas cristalinas que, en general, presentan una baja permeabilidad. Los materiales de comportamiento acuífero se encuentran fundamentalmente en la capa de alteración subsuperficial, aunque el agua también puede circular en profundidad a través de la red de fracturas que afectan a las metapelitas (Martos-Ro-

sillo et al., 2019). Al sur del área de estudio, en el pueblo de Lanjarón y por debajo del mismo, afloran materiales cuaternarios (depósitos de travertinos) superpuestos a filitas, cuarcitas y rocas carbonatadas del complejo Alpujárride.

Se reconocen accidentes tectónicos de mayor envergadura (detachment) como el contacto entre los materiales del Nevado-Filábride y del Alpujárride de dirección E-W y la falla NNW-SSE del arroyo Salado, ambos relacionados con surgencias de mayor contenido salino, termales y con presencia de CO₂. Estas fallas, de rango cortical y con ascenso de CO₂ de origen en parte mantélico (Lix et al., 2018), hacen de colector de buena parte de la descarga de las aguas subterráneas de los esquistos Nevado-Filábrides y de su capa de meteorización, también gracias a la barrera que constituyen los afloramientos de filitas Alpujárrides (Castillo et al., 1999). También existen otras fracturas de dirección NW-SE a NNW-SSE y NE-SW con importancia en el flujo del agua subterránea.

Metodología

El estudio hidroquímico e isotópico realizado consistió en una campaña de

muestreo de 20 puntos, principalmente de aguas subterráneas, entre surgencias naturales (salida de agua subterránea sin modificaciones humanas), manantiales (salida de agua subterránea con algún sistema de captación), sondeos horizontales y acequias (Fig. 1), seleccionados intentando cubrir toda el área de estudio y el rango de cotas de la misma (600 a 1.800 m s.n.m.), respetando la diversidad geológica, hidroquímica e hidrogeológica existente. Las muestras fueron tomadas en periodo de estiaje avanzado, durante los días 3 y 5 de noviembre de 2021.

Los análisis químicos de agua se llevaron a cabo en los laboratorios de la planta de envasado de Aguas Danone S.A. Se determinaron los siguientes parámetros: Dureza ($^{\circ}$ F), HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe total, Mn^{2+} y F. Los análisis isotópicos fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Isótopos Estables (Centro de Instrumentación

Científica de la Universidad de Granada). También se realizaron mediciones in situ de pH, potencial redox, temperatura, conductividad eléctrica (25 $^{\circ}$ C), Total de Sólidos Disueltos y O_2 disuelto.

Resultados y discusión

Caracterización hidrogeoquímica

Se han establecido rangos limitantes de los parámetros analizados para la clasificación de los distintos tipos de agua presentes en el área de estudio. Existe un grupo de puntos de agua subterránea que se diferencia claramente por su alta mineralización, con CE por encima de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dureza superior a 20 $^{\circ}$ F, pH ácido (< 7), potencial redox negativo o de valores inferiores a 50 mV y con bajas concentraciones en O_2 disuelto (< 4 mg/L), y concentraciones altas en: HCO_3^- (> 200 mg/L), SO_4^{2-} (> 30 mg/L), Ca^{2+} (> 60 mg/L), Mg^{2+}

(> 20 mg/L), Fe total (> 1 mg/L), Mn^{2+} (> 400 $\mu\text{g}/\text{L}$) y F⁻ (> 0.2 mg/L). Fonteforte (65), Capuchina (70), Baños (12), Fuente del Cura (88) y Hoya del Grillo (93) se encuentran en las cotas más bajas del área de estudio, a la altura del pueblo de Lanjarón y siempre ligados a zonas de falla importantes. La mayoría de los puntos muestra también altas concentraciones en Cl^- (> 200 mg/L), Na^+ (> 80 mg/L) y K^+ (> 10 mg/L), salvo el punto Hoya del Grillo (93). Los valores bajos de pH muchas veces están ligados a burbujeos de gas CO_2 y aguas ferruginosas, aunque no siempre son perceptibles in situ.

Otro grupo de aguas, claramente distinto al anterior, está constituido por las aguas de menor mineralización (CE < 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$), pH en torno a 8 o superior, potencial redox alto (> 100 mV) y altas concentraciones en O_2 disuelto (> 8 mg/L), cercanas a la saturación. Las temperaturas medidas son bajas (5 – 12 $^{\circ}$ C), en consonancia con la alta elevación de los puntos de agua. Corresponden a este grupo las aguas derivadas del río Lanjarón en las acequias Nueva (157) y Secarta (136), pero también algunos manantiales como el de Ballesteros (160) y Cercedillo-Lastra (146), que deben estar ligados a flujos muy poco profundos y rápidos.

El resto de puntos de agua muestra unas características intermedias entre los dos grupos anteriores, con quimismo más o menos evolucionado en función del tiempo de contacto agua-roca.

En la figura 2 se representa la distribución de facies hidroquímicas en un diagrama de Piper. La mayor parte de las aguas muestreadas presenta una facies bicarbonatada cálcica-magnésica de mineralización débil, que se corresponde con aguas frías o intermedias. Excepciones son las muestras obtenidas en Fonteforte (65), Baños (12) y Capuchina (70), con facies clorurada sódica-cálcica, con una mayor mineralización. La muestra de Ballesteros (160) tiene una facies poco definida, entre bicarbonatada y clorurada mixta, algo muy común en las aguas de lluvia. En el caso de Fuente del Cura (88) correspondería a aguas de mezcla, con facies bicarbonatada cálcica a clorurada sódica. Se observa que desde los puntos caracterizados con facies hidroquímica bicarbonatada cálcica-magnésica hasta la muestra del manantial Capuchina (70), y exceptuando el manantial Ballesteros (160) y las muestras de acequias, de facies menos definidas, se produce una alineación clara de puntos intermedios que incluyen -de izquierda a derecha- las muestras de Fuente del Cura (88), Fonteforte (65) y Baños (12). Estos tres puntos, y probablemente tam-

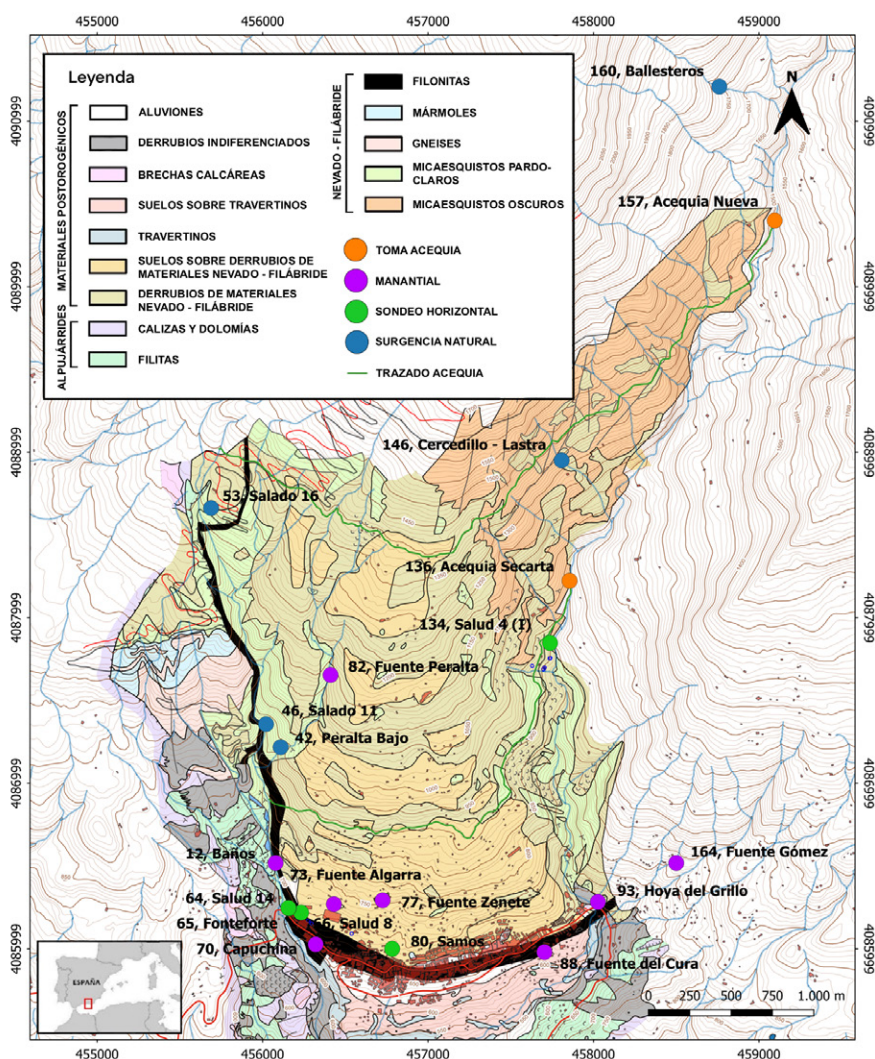


Fig. 1.- Mapa geológico y localización de los puntos de muestreo para la caracterización hidroquímica. Cartografía modificada de Aguas Municipalizadas de Alicante, 1988. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Geological map and location of sampling points for hydrochemical characterization. Modified cartography of Aguas Municipalizadas de Alicante, 1988. See color figure in the web.

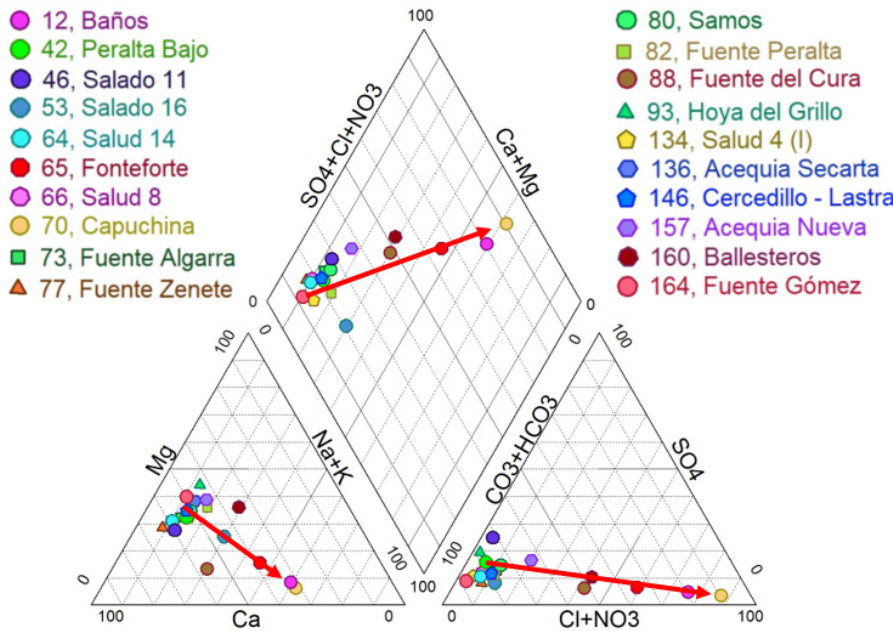


Fig. 2.- Diagrama de Piper de las 20 muestras. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Piper diagram of 20 samples. See color figure in the web.

bién Capuchina, muestran distintos grados de mezcla entre las aguas propias de los esquistos de Sierra Nevada y aguas termales, muy mineralizadas, que ascienden a la superficie en la zona de falla donde se encuentra la localidad de Lanjarón.

Caracterización isotópica

Los resultados muestran que las aguas subterráneas y las superficiales tienen señales isotópicas muy parecidas y oscilan dentro de intervalos bastante estrechos: -58.54‰ a -65.54‰ para $\delta^2\text{H}$; -8.92‰ a -10.08‰ para $\delta^{18}\text{O}$; 12.82‰ a 15.22‰ para d (exceso de Deuterio, determinado como $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$). Esta homogeneidad en los datos isotópicos, especialmente para las aguas subterráneas (rangos de variación totales de 5.61‰ para $\delta^2\text{H}$, 0.98‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y 2.23‰ para d), nos habla en principio de un origen común para las mismas.

En la figura 3 se muestran las líneas meteóricas global (GMWL) obtenida por Craig (1961) y la línea meteórica del Mediterráneo Occidental (WMMWL) obtenida por Gat y Garmi (1970), así como la línea local (LMWL) obtenida por ajuste lineal de nuestros datos experimentales ($R^2 = 0.91$). Los excesos de Deuterio y la proyección de las muestras en el gráfico reflejan que la mayoría de estas se sitúan entre ambas líneas meteóricas, más próxima a la WMMWL que a la GMWL. Esta distribución nos indica que las precipitaciones que recargan los terrenos acuíferos del área de Lanjarón parecen proceder indistinta-

mente de masas nubosas que se originan en el Océano Atlántico o en el sector occidental del Mar Mediterráneo.

El agrupamiento más numeroso contiene la mitad de los puntos muestreados, e incluye todos los sondeos horizontales y manantiales del sector noroccidental del pueblo de Lanjarón, por lo que podría invocarse una razón de proximidad para explicarlo; no obstante, también incluye surgencias más alejadas y a mayor cota situadas en el Barranco Salado y afluentes, y Fuente del Cura (número 88). Muy cerca del anterior, otro pequeño grupo de cuatro puntos, incluye los manantiales de Capuchina (70) y

Baños (12), de características hidroquímicas parecidas, pero también otros dos totalmente distintos, como son los manantiales Salado 11 (46) y Fuente Gómez (164). A pesar de la abundancia de CO_2 en los manantiales termales de Baños y Capuchina, este último incluso con gas en un 18 % de origen mantélico (Lix et al., 2018), las muestras no parecen exhibir efectos de fraccionamiento isotópico por intercambio geotérmico del O_2 .

El punto 146 (Cercedillo-Lastra) es un manantial situado varias decenas de metros bajo la Acequia Nueva. Sus variaciones de caudal parecen estar estrechamente ligadas a la puesta en funcionamiento de la acequia, y por tanto a pérdidas por infiltración en el lecho de la misma; por ello sus características isotópicas bien podrían derivar del efecto de evaporación del agua de la acequia desde el punto de inicio donde esta se muestreó (nº 157).

Tanto la "anomalía" que muestra la Acequia Secarta como su gran diferencia con la composición isotópica de la Acequia Nueva (puntos de muestreo del río Lanjarón, a menos de 3 km de distancia) son bastante llamativas. La primera consecuencia que se deriva es que este canal apenas tiene efecto en la recarga del acuífero, pues, de otro modo, los manantiales deberían haber mostrado relaciones isotópicas más negativas. Aunque cabe la posibilidad de que el agua del río sufra una fuerte evaporación a lo largo del tramo que separa ambos puntos de muestreo, el cual está jalonado de cascadas, saltos y pozas. La diferencia de temperatura entre los dos puntos en el momento de la toma de muestras también fue notable: 4.8°C en Acequia Nueva y 10.63°C en Acequia Secarta.

Las muestras más empobrecidas en isótopos pesados son los puntos 157 (Acequia Nueva) y 160 (Manantial de Ballesteros). Este último es el punto de aguas subterráneas muestreado a mayor cota (1.770 m s.n.m.), el de agua más fría y menos mineralizada. Sus características bien podrían ser las propias de las aguas de alta montaña procedentes de la fusión de la nieve y con una circulación subterránea de muy escaso tiempo de residencia en el subsuelo. La Acequia Nueva, muestreada unos 300 m más abajo del manantial anterior, muestra valores isotópicos algo más pesados, aunque más ligeros que el resto de manantiales y sondeos muestreados. Es por ello que cabe la posibilidad de que esta acequia esté recargando de forma significativa el sistema acuífero. De hecho, la gran homogeneización de los datos isotópicos de las aguas subterráneas podría ser un efecto secundario de dicha recarga, tal y como ocurre en la cercana cuenca del

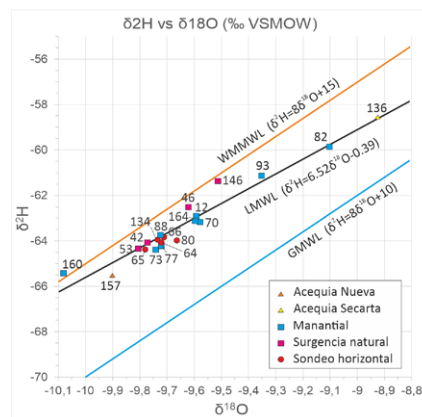


Fig. 3.- Representación de los datos de $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ para las muestras. Se muestran también las líneas meteóricas global (GMWL) y del Mediterráneo Occidental (WMMWL), así como la línea local (LMWL). Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Relationships between $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ in samples. The global (GMWL) and Western Mediterranean (WMMWL) meteoric lines are also shown, as well as the local line (LMWL). See color figure in the web.

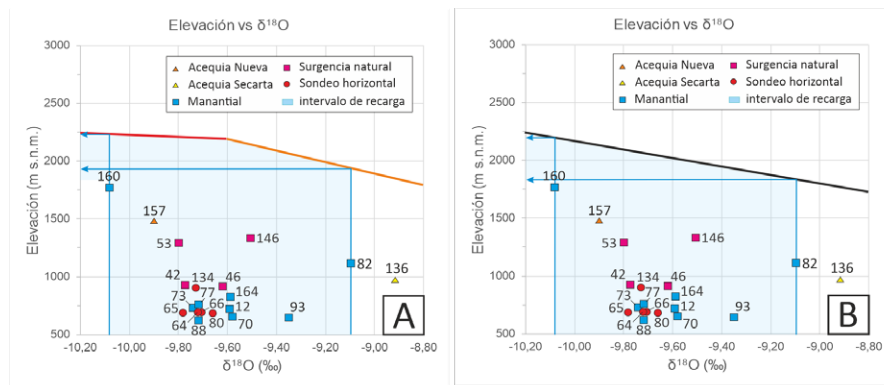


Fig. 4.- Cálculo de elevaciones de recarga para los puntos de agua subterránea. A) a partir de los gradientes altitudinales de Raya Garrido (2003) para las precipitaciones (según el procedimiento de Kohfahl et al., 2008). B) a partir de los gradientes altitudinales de Barberá et al. (2018). Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- Calculation of recharge elevations for groundwater points. A) from the altitude gradients of Raya Garrido (2003) for rainfall (according to the procedure of Kohfahl et al., 2008). B) based on the altitudinal gradients of Barberá et al. (2018). See color figure in the web.

río Bérchules (Barberá et al., 2018).

Estimación de la altitud de recarga

Al no disponer de datos isotópicos de lluvia se han utilizado los obtenidos por otros autores en zonas cercanas. Siguiendo los mismos pasos que Kohfahl et al. (2008), se ha realizado el cálculo de la elevación media para la recarga de los distintos puntos de agua subterránea estudiados (Fig. 4A), utilizando el valor medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ para las lluvias de invierno registradas y analizadas por Raya Garrido (2003) en la estación pluviométrica Generalife (845 m s.n.m.). Los datos de elevación de la recarga oscilan dentro de un rango bastante estrecho, entre 1.945 m (82 Fuente Peralta) y 2.235 m (160 manantial de Ballesteros), con un valor medio de 2.181 m s.n.m. No obstante, podemos utilizar el valor medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ para todas las lluvias registradas por Raya Garrido (2003) en el mismo Lanjarón, a 708 m de cota. En este caso, las altitudes de recarga que se obtendrían se incrementarían aproximadamente entre 100 y 300 m, con un valor medio para el conjunto de puntos de 2.311 m s.n.m.

Si utilizamos el gradiente ajustado por Barberá et al. (2018) para la cuenca del Bérchules, las elevaciones de recarga que se obtienen oscilan entre 1.839 m (82 Fuente Peralta) y 2.202 m (160 manantial de Ballesteros), con un valor medio de 2.045 m s.n.m (Figura 4B). Si aplicamos el gradiente anterior al valor medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ para las lluvias registradas por Raya Garrido (2003), las altitudes de recarga que se obtendrían se incrementarían sistemáticamente en 313 m.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, la elevación media de las zonas de alimentación de la mayoría de las aguas subterrá-

neas que hemos estudiado se produce en una franja bastante estrecha, entre 2.050 y 2.350 m s.n.m. La recarga preferente en la franja altitudinal estimada se podría explicar por la presencia en la zona de la acequia de careo Prados Colorados (2.440 m s.n.m.), también por la existencia de una pendiente relativamente baja del terreno (aterrazado artificialmente para antiguas labores de reforestación), del orden del 11 % en comparación con hasta el 28 % de los relieves situados aguas abajo y por la abundancia de depósitos cuaternarios y afloramientos rocosos metamórficos intensamente fracturados, todo lo cual favorece la recarga por fusión de nieve o por infiltración de lluvia.

Conclusiones

La mayor parte de las aguas presentan facies bicarbonatada cálcica-magnésica. En cambio, las aguas más mineralizadas situadas en Lanjarón o sus proximidades muestran facies clorurada sódica o de mezcla entre esta y la bicarbonatada cálcica-magnésica.

El análisis de isótopos estables, indica que tanto las aguas superficiales como las subterráneas tienen señales isotópicas similares, lo cual muestra un origen común, a pesar de sus características físico-químicas tan diferentes. Los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de la mayoría de las muestras quedan incluidos entre las líneas meteóricas global (GMWL) y la del Mediterráneo Occidental (WMMWL), manifestando la influencia de las precipitaciones procedentes del Atlántico o del Mar Mediterráneo, y se ajustan bien a una línea meteórica local (LMWL).

La estimación de la altura media de recarga utilizando distintas relaciones $\delta^{18}\text{O}$ -altitud para las lluvias suministra valo-

res que oscilan entre 2.050 y 2.350 m s.n.m.

Contribución de los autores

Los tres autores han contribuido en la adquisición y análisis de muestras, en la elaboración de las figuras y en la edición y redacción del artículo.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por la empresa Aguas Danone SA en el marco de un estudio hidrogeológico del sector próximo a la población de Lanjarón. Se agradece la información aportada por el Ayuntamiento y la Comunidad de Regantes de Lanjarón.

Referencias

- Aguas Municipalizadas de Alicante. (1988). *Estudio hidrogeológico y propuestas de gestión de los manantiales de Lanjarón*. Informe inédito para Aguas de Lanjarón S.A. 95 p.
- Barberá, J.A., Jódar, J., Custodio, E., González-Ramón, A., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo, I., Pedrera, A. y Martos-Rosillo, S. (2018). *Science of the Total Environment*, 640–641: 874–893. <https://doi.org/h34g>
- Castillo, A., Cruz-Sanjulián, J.J. y Benavente, J. (1999). *Balneario de Lanjarón, Granada*, 35–64.
- Craig, H. (1961). *Science* 133: 1702–1703.
- Gat JR, C.I. (1970). *Journal of Geophysical Research* 75; 3039–3048.
- Kohfahl, C., Sprenger, C., Herrera, J. B., Meyer, H., Chacon, F.F. y Pekdeger, A. (2008). *Applied Geochemistry*, 23(4), 846–862. <https://doi.org/cq52fm>
- Lix, C., Zuddas, P., Inguaggiato, C., Guichet, X., Benavente, J. y Barbier, M. (2018). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 4945–4956. <https://doi.org/h34h>
- Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C., Guardiola-Albert, C., Moral-Martos, F., Jódar, J. y Pedrera, A. (2019). *Boletín Geológico y Minero*. 130. 729–742. <https://www.researchgate.net/publication/339358986>
- Raya Garrido, J. (2003). *Composición isotópica del vapor de agua atmosférico en el sureste de la Península Ibérica*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 416 p. <http://hdl.handle.net/10481/1756>
- Rodríguez Gordillo, J., Velilla, N. y Fernández Rubio, R. (1981). *I Simposio sobre el Agua en Andalucía*. Granada.