

Análisis fisicoquímico e isotópico de tres manantiales del nacimiento del río Guardal (Sierra Seca, SE de España)

Physicochemical and isotopic analysis of three springs of Guardal River sources (Sierra Seca, SE Spain).

Antonio González-Ramón^{1*}, Carmen Martín Ruiz², Antonio L. Morales González³, Jorge Jódar Bermúdez¹, Francisco Moral Martos⁴ y Rosario Jiménez Espinosa³

¹ Instituto Geológico y Minero de España-CSIC; antonio.gonzalez@igme.es; jjodar@igme.es

² Estudiante de Master Univ. de Granada e Instituto del Agua; mc.carmen.fly@gmail.com

³ Universidad de Jaén, lmorales@ujaen.es; respino@ujaen.es

⁴ Universidad Pablo Olavide, Sevilla, fmormar@upo.es

*Corresponding author

ABSTRACT

Three springs discharge on the eastern slope of the Sierra Seca karst aquifer, which, despite being in the same environment, have different characteristics. Based on physicochemical and isotopic data, these characteristics are studied to highlight the differences between them. The one located at the highest elevation, Fuente Alta, has the highest average flow and less mineralized waters and is related to Lower Cretaceous carbonates. The one with the lowest flow, Fuente de Enmedio, is at the lowest elevation with less mineralized waters than the one with intermediate flow, La Natividad, despite the fact that both drain the same aquifer formed by Upper Cretaceous carbonates. In addition, its physicochemical and isotopic characteristics suggest that it drains mixtures of waters from the two Cretaceous aquifers. The Natividad drains the most mineralized waters and with heavier isotopic values, at the onset of floods due to the "piston effect", which is not observed in the other two springs. The lightest isotopic values are observed in the two springs with the highest flow associated with an episode of sudden snowmelt. The data suggest that the surface of the recharge area outcrops at similar average elevations, although slightly higher in Fuente Alta.

Key-words: karst aquifer, isotopes, piston effect, recharge elevation, water mixtures.

RESUMEN

En la ladera oriental del acuífero kárstico de Sierra Seca descargan tres manantiales que, pese a localizarse en un mismo entorno, presentan características diferenciadas. A partir de datos fisicoquímicos e isotópicos se estudian estas características para resaltar las diferencias entre ellos. El situado a mayor cota, Fuente Alta, es el de mayor caudal medio y aguas menos mineralizadas y se relaciona con carbonatos del Cretácico inferior. El de menor caudal, Fuente de Enmedio, también es el que surge a menor cota con aguas menos mineralizadas que el de caudal intermedio, la Natividad, pese a que ambos drenan un mismo acuífero formado por carbonatos del Cretácico superior. Además, sus características fisicoquímicas e isotópicas sugieren que drena mezclas de aguas procedentes de los dos acuíferos cretácicos. La Natividad drena las aguas más mineralizadas y con valores isotópicos más pesados, al inicio de las crecidas por "efecto pistón", que no se observa en los otros dos manantiales. Los valores isotópicos más ligeros se observan en los dos manantiales de mayor caudal asociados a un episodio de brusco deshielo. Los datos sugieren que la superficie del área de recarga aflora a cotas medias similares, aunque ligeramente más elevadas en Fuente Alta.

Palabras clave: acuífero kárstico, isótopos, efecto pistón, cota de recarga, mezclas de aguas.

Geogaceta, 76 (2024), 63-66

<https://doi.org/10.55407/geogaceta104480>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 09/02/2024

Fecha de revisión: 19/04/2024

Fecha de aceptación: 07/06/2024

Introducción

Los manantiales de las Fuentes del Guardal se sitúan en la ladera oriental de Sierra Seca (Moral 2005; González-Ramón *et al.*, 2022). La sierra se localiza al NE de la provincia de Granada (Fig. 1) y sus crestas se alinean en dirección NE-SO, formando la línea divisoria del valle del río Castril (parte O) y del río Guardal (parte E). Los puntos más elevados superan los 2100 m; a una altitud de 1139 m, se localiza la Fuente Alta (FA). A cotas inferiores se encuentran La Natividad (Nat) (1088 m) y la Fuente de Enmedio (FeM) (1081 m). El manantial localizado

a cota superior es el de mayor caudal medio anual, FA, con 493 L/s (oct 2019/oct 2022), mientras que el menos caudaloso es el localizado a cota inferior, FeM, con 36 l/s, Nat presenta un caudal similar (430 l/s), pero algo inferior a FA.

El área de recarga de los manantiales de FA y Nat se relaciona con carbonatos del Cretácico inferior y del Cretácico superior, respectivamente (García-Hernández, 1979). Ambas formaciones constituyen sendos acuíferos separados por un paquete poco potente de margas y margocalizas (Fig.1). Los ensayos de trazadores indican que en el manantial de FeM surgen aguas infiltradas en

el lecho del río por donde circula el agua drenada por FA mezclada con agua infiltrada en el tramo de carbonatos del Cretácico superior (Morales-González *et al.*, 2021; 2023).

Los tres manantiales estudiados, aunque surgen en un contexto hidrogeológico similar, presentan unas características diferenciadas y singulares que pueden ser rastreadas a partir de las especies químicas disueltas en el agua y de sus valores isotópicos. Por tanto, los objetivos de este artículo son identificar las similitudes y diferencias entre los manantiales y tratar de evaluar las cotas de las áreas de recarga a cada manantial.

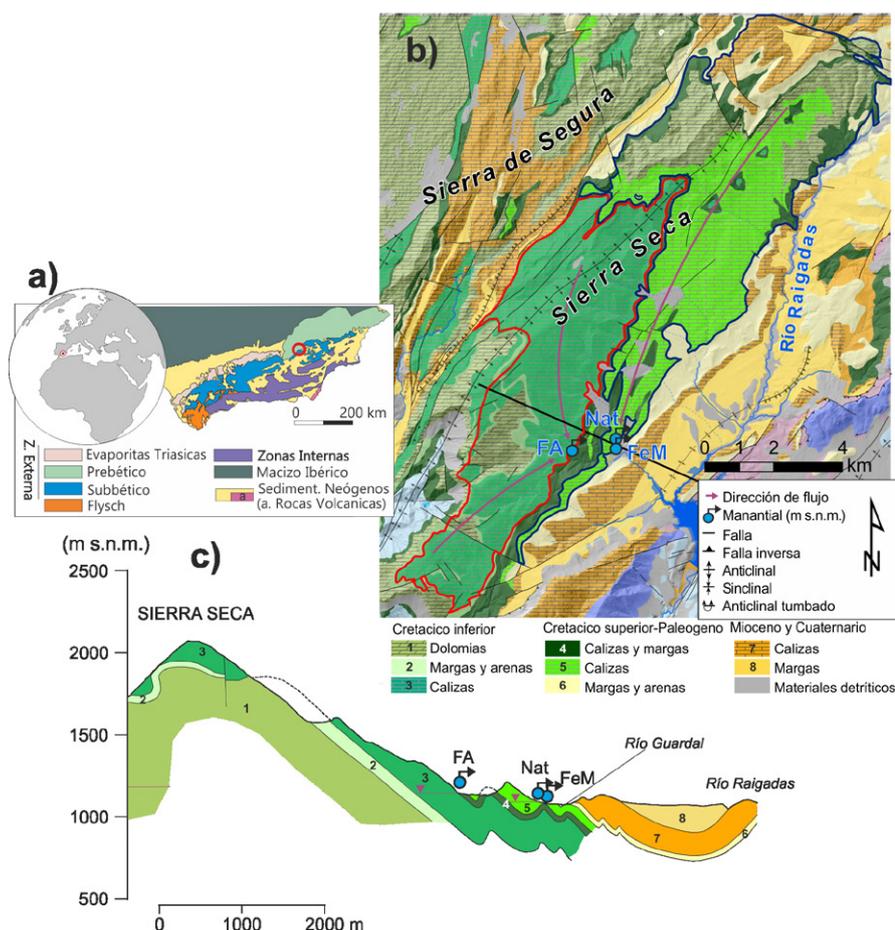


Fig. 1.- Contexto geográfico y geológico de las Fuentes del Guardal. Cartografía GEODE (www.igme.es). Abajo: Corte hidrogeológico. Modificado de González-Ramón *et al.*, 2022. Ver figura en color en la web.

Figure 1: Geographical and geological context of the Fuentes del Guardal. Cartography GEODE (www.igme.es). Down: Hydrogeological cross section. Modified from González-Ramón *et al.*, 2022. See color figure in the web.

Materiales y métodos

Entre enero y mayo de 2021 se realizaron 8 campañas de muestreos en los tres manantiales con una periodicidad de unos 15 días.

El análisis de las muestras de agua se realizó en los laboratorios de la Universidad de Jaén. Las concentraciones de los componentes químicos mayoritarios (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-}) disueltos en las aguas, se determinaron por cromatografía iónica (METROHM® 50Professional IC 850), con una precisión de $\pm 2\%$.

El estudio isotópico se ha realizado a partir de 56 muestras recogidas entre 2018 y 2021. Los isótopos ambientales $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas se realizaron en la Universidad de Almería usando un analizador láser de isótopos: PICA-RRO™ CRDS L2120-i para isótopos O y H. Los datos de isótopos para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se refieren al estándar V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water), de la

Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA). La precisión de las medias de isótopos fue de $\pm 0,1\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 1\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$.

Resultados y discusión

Características fisicoquímicas

Todas las aguas analizadas tienen facies bicarbonatada cálcica (Fig. 2A) con valores de HCO_3^- comprendidos entre 225 mg/L y 335 mg/L, de Ca^{2+} entre 56 mg/L y 87 mg/L y con un menor contenido en Mg^{2+} entre 6 mg/L y 16 mg/L. Presentan contenidos muy bajos en Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ y K^+ , lo que sugiere que son aportados principalmente por la precipitación y su posterior concentración en el suelo.

Las principales variaciones aparecen en el HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} (Fig. 2). En Nat se observa la mayor concentración de todos los iones a excepción del SO_4^{2-} , que presenta mayor concentración media en FeM (5,07 mg/L frente a 4,99 mg/L

en Nat y 4,55 mg/L en FA) si bien el máximo aparece en Nat (10,4 mg/L). Las concentraciones más bajas las presenta FA.

La variación que se observa en el Mg^{2+} (Fig 2B) puede estar ligada a los episodios de descarga de aguas con distintos periodos de retención en el acuífero. El pico de 16,13 mg/L de Mg^{2+} recogido en mayo en Nat puede deberse a la salida de aguas con mayor tiempo de residencia tras un episodio súbito de recarga, debido al empuje de las aguas de circulación rápida que provocarían primero la expulsión de aguas almacenadas en zonas profundas del acuífero (efecto pistón) (Morales-González, *et al.*, 2023).

Las variaciones de SO_4^{2-} (Fig. 2C) se asocian a la variabilidad del caudal (Q), con valores más elevados en aguas bajas y menores en las crecidas. Las diferentes relaciones entre las variaciones del caudal y de los compuestos iónicos muestran la existencia de diferencias en el comportamiento de los acuíferos asociados a cada uno de los manantiales.

La figura 3A muestra el ACP de casos y variables en el plano de los factores I y II, que explican más del 60% de la varianza, con un peso del 41% para el factor I y del 22% para el factor II. El factor I representa la mineralización total, con todas las variables con pesos parecidos excepto Q y SO_4^{2-} , que son explicados por el factor II. Los dos factores permiten diferenciar claramente el manantial Nat, con aguas más mineralizadas, de los otros dos. En el primer caso, se observa como las muestras de Nat se encuentran dispersas en la parte derecha del gráfico mientras los valores de los otros manantiales predominan en el lado izquierdo. El factor II permite diferenciar aguas con bajo contenido en SO_4^{2-} y elevado Q, que representa la llegada a los manantiales de aguas de circulación rápida por los acuíferos y, por tanto, corto tiempo de residencia en contacto con las rocas.

En la figura 3B se muestra el ACP en el plano de los factores I y III, este último explica el 13,5% de la varianza y está influenciado especialmente por Q y SO_4^{2-} , por un lado, y Na^+ por otro. Explica, por tanto, la presencia de aportes litológicos de Na^+ en Q bajos, posiblemente debidos a la presencia de sales sódicas o feldspatos en los niveles de arenas intercalados entre las formaciones carbonatadas cretácicas.

Por último, en la figura 3C, se muestra el ACP en el plano de los factores I y IV, este último explica un 10% de la varian-

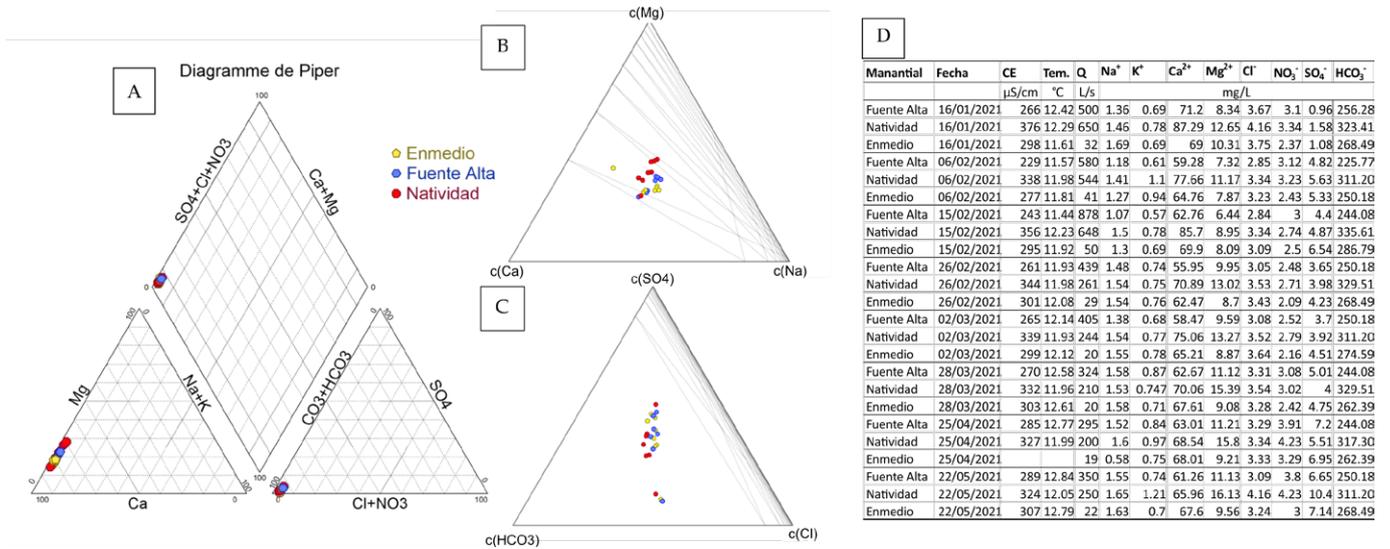


Fig. 2.- A) Diagrama de Piper de las muestras estudiadas. B) Diagrama ternario de cationes con ejes logarítmicos. C) Diagrama ternario de aniones con ejes logarítmicos. D) Tabla de datos físico-químicos de los manantiales muestreados. Ver figura en color en la web.
 Fig. 2.- Piper diagram of the samples studied. B) Ternary diagram of cations with logarithmic axes. C) Ternary diagram of anions with logarithmic axes. D) Table of physico-chemical data of the sampled springs. See color figure in the web.

za total y está influenciado casi exclusivamente por Q, lo que permite una clara diferenciación entre los tres manantiales. Por una parte, agrupa a las aguas de FA, menos mineralizadas y de mayor Q que el resto, por otra a las aguas de Nat con un Q ligeramente inferior, pero con mayor mineralización y finalmente que las aguas de FeM, cuyo Q es el más bajo, pero con una mineralización similar a la de las aguas de circulación lenta de FA.

Isótopos

En la figura 4 se han representado las muestras de los tres manantiales junto a las líneas meteóricas mundial (LMM) del Mediterráneo occidental (LMWM)

y del Guadiana Menor (LMGM) (Fernández Chacón, *et al.*, 2010). Respecto a FA, los valores de δ¹⁸O se encuentran entre -8.29‰ y -9.46‰, mientras que, en el caso de δ²H, el contenido isotópico varía entre -53.77‰ y -60.58‰. En el caso de FeM esas variaciones están comprendidos entre -8.45‰ y -8.96‰ para el δ¹⁸O, y entre -55.72‰ y -57.92‰ para δ²H.

Los datos muestreados se alinean con la LMWM, Con excepción de aquellos que presentan los valores más ligeros en Nat y FA, que se alinean con la LMGM y con los más pesados en Nat que se acercan a la LMM. Estos últimos corresponden a datos muestreados durante una crecida registrada en febrero de 2021 y

representan aguas almacenadas en el acuífero con un largo periodo de residencia expulsadas por "efecto pistón". En cambio, las aguas más ligeras analizadas en Nat y FA se muestrearon en una crecida generada por un brusco deshielo en las cumbres de Sierra Seca. En general las aguas de Nat y FA se agrupan en una misma zona, aunque con una tendencia a valores más pesados en Nat, lo que indica que las cuencas de recepción presentan cotas ligeramente inferiores en la que alimenta a la Nat.

Los valores isotópicos de FeM son más uniformes y similares a los de Nat, al contrario de lo que ocurre con su quimismo, que se asemeja más al de FA. Presenta pues similitudes con ambos manantiales.

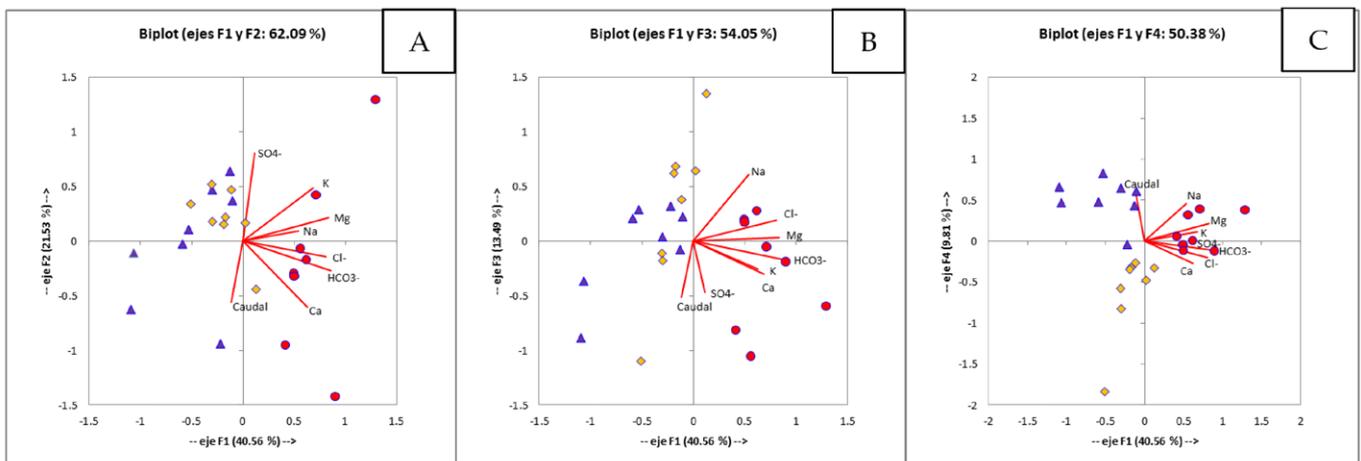


Fig. 3.- Análisis de Componentes Principales de las variables y casos considerados. Fuente Alta: triángulos azules; Natividad: círculos rojos; Enmedio rombos amarillos. Ver figura en color en la web.
 Fig. 3.- Principal Component Analysis of the variables and cases under consideration Fuente Alta: blue triangles; Natividad: red circles; Enmedio: yellow diamonds. See color figure in the web.

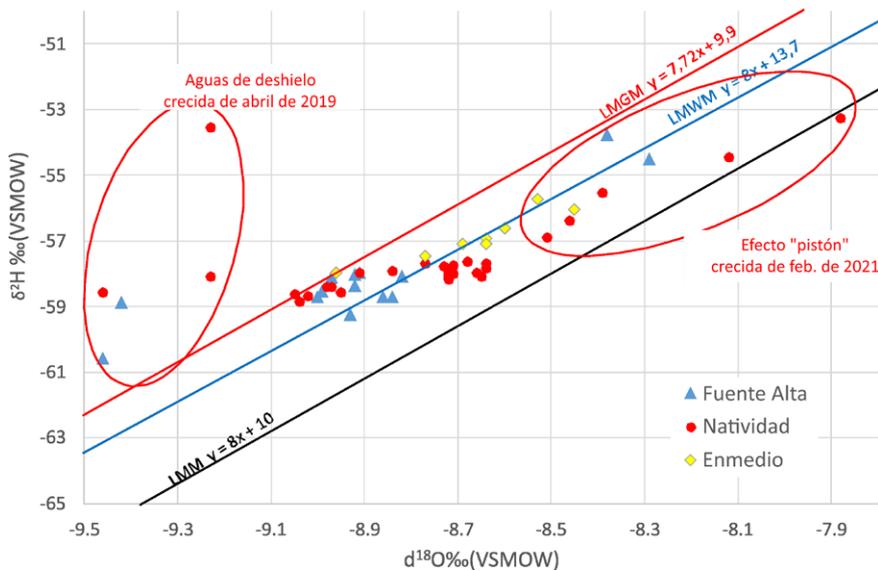


Fig. 4.- Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ para las muestras procedentes de Fuente Alta, Natividad, Enmedio.
Fig. 4.- Ratio $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ for samples from Fuente Alta, Natividad, Enmedio.

Conclusiones

Los tres manantiales estudiados, pese a encontrarse en un entorno cercano, presentan unas características fisicoquímicas e isotópicas bien diferenciadas. FA, es el de mayor Q, de menor mineralización y donde los valores isotópicos son más ligeros. Nat es el más mineralizado, más incluso que FeM, que surge en los mismos carbonatos, a escasa distancia y a menor cota. Esto se explica porque drena una mezcla de aguas infiltradas en el propio acuífero en el que surge, junto a otras infiltradas en el cauce del río proveniente de FA. Por esta razón ambos manantiales presentan una mayor similitud fisicoquímica. Los isótopos muestran una mezcla entre las aguas drenadas por ambos acuíferos.

En Nat se observa un marcado efecto pistón, no tan evidente en FA, pese a existir un contexto hidrogeológico similar en la tipología de ambos manantiales. Esto se debe a que, en FA, durante las crecidas se activan *trop pleins* por donde surge agua, justo antes de alcanzar el nivel saturado, por conductos que son

cavidades penetrables (González Ramón *et al.*, 2022), lo que enmascara la posible existencia de ese efecto pistón en el manantial permanente.

Los datos isotópicos también ponen de manifiesto una cota del área de recarga similar en los dos manantiales principales, aunque ligeramente superior en FA.

Contribución de los autores

El artículo ha sido escrito por AGR y CMR con la colaboración del resto de autores. Los datos de campo han sido recopilados por AGR y AMG. Las figuras 1, 3 y 4 han sido realizadas por AGR y la 2 por CMR.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del TFM realizado por CMR en el Máster Universitario en Técnicas y Ciencias de la Calidad del Agua (IDEA). Parte de la información utilizada procede del Convenio de Colaboración entre el IGME y la Diputación Provincial de Granada, y la Universidad

de Jaén a través de la tesis doctoral sobre los acuíferos actuales, que se está realizando dentro del proyecto NMR-306. Este trabajo también ha sido apoyado por las becas extraordinarias de excelencia «Severo Ochoa» IGME-CSIC (AE-CEX2021). Nos gustaría agradecer a los Proyectos FEDER-UJA 2020 ref.1380934, PAIDI JA P20-0090 y PAIDI JA RNM 325 por su apoyo económico. Un agradecimiento especial a la piscifactoría de Las Fuentes y a sus trabajadores, y a Fernando Gázquez de la Universidad de Almería por los análisis isotópicos

Referencias

- García-Hernández, M., 1978. *El Jurásico terminal y el Cretácico inferior en las Sierras de Cazorra y Segura (Zona Prebética)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 344 p.
- Fernández-Chacón F., Benavente J., Rubio-Campos J.C., Kohfahl C., Jiménez J., Meyer H., Hubberten H., Pekdeger A. (2010). *Hydrol Process* 24(10),1343–1356. <https://doi.org/10.1002/hyp.7597>
- González-Ramón, A., Morales-González, A.L., Martos-Rosillo, S., Moral-Martos, F., Gea-López, D.R., Pérez-Martínez, P., Molina Molina, I., Peinado, T. y Alcaín, G. (2022). *18th International Congress of Speleology*. Vol. III - Karstologia Mémoires n°23, 57-60.
- Moral, F., (2005). *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura)*. Tesis Doctoral, Univ. Pablo de Olavide, Sevilla, 580 p.
- Morales-González, A.L., Jódar, J., González-Ramón, A., Jiménez-Espinosa, R. y Moral-Martos, F., (2021). *Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas Comunicaciones*, 107-108.
- Morales-González, A.L., González-Ramón, A., Jiménez-Espinosa, R., Jódar, J., Moral-Martos, F., López-Chicano, M., (2023). XI Simposio del agua en Andalucía. Granada. 1341-1354.