

Turbidez y distribución del tamaño de partículas en el agua subterránea como parámetros de alerta temprana frente a la contaminación fecal en un manantial kárstico

Turbidity and particle size distribution in groundwater as early-warning parameters against fecal contamination in a karst spring

Jaime Fernández Ortega^{1*}, Juan Antonio Barberá¹, José Francisco Martín Rodríguez¹ y Bartolomé Andreo¹

¹ Centro de Hidrogeología y Departamento de Geología de la Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias. 29071, Málaga
jaimeortega@uma.es; jabarbera@uma.es; josefranciscosmr@uma.es; andreo@uma.es

*Corresponding author

ABSTRACT

In the present work we examined in detail a flooding event in a karst spring intended for drinking water supply of Ubrique municipality (Cádiz province). Thus, an approach focused on the characterization of sediment transport and the presence of *Escherichia coli* as an indicator of fecal contamination has been applied. The results show the temporal variations of physico-chemical parameters, particle distribution and its direct implications on bacterial transport in a karst spring during a heavy rain episode. In addition, the usefulness of continuous monitoring strategies of such parameters for the development of a telemetry/remote system to prevent the contamination in springs intended for human consumption is analyzed.

Key-words: karst, turbidity, early-warning, drinking water, Ubrique.

Geogaceta, 74 (2023), 63-66
<https://doi.org/10.55407/geogaceta98625>
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

Los acuíferos kársticos se han aprovechado históricamente para el suministro de agua potable (Stevanović, 2019). Este tipo de formaciones presentan una elevada vulnerabilidad a la contaminación debido a la presencia de una red de fracturas y conductos kársticos que favorece la circulación de las aguas subterráneas (Goldscheider y Drew 2007). La movilización de sedimentos es bien conocida en el karst y provoca variaciones de turbidez en el agua de los manantiales. Además, las partículas en suspensión actúan como vector de transporte de bacterias durante episodios de lluvia intensa (Mahler et al., 2000), por lo que su presencia en captaciones destinadas al abastecimiento puede tener implicaciones directas para la salud.

Actualmente, los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) abarcan un conjunto de técnicas diseñadas para optimizar y proteger la captación de agua en manantiales o sondeos (Grayman et al., 2001). Sin

embargo, la elección de los parámetros óptimos que permitan detectar de forma rápida y fiable la posible llegada de agua subterránea contaminada a un punto de captación depende de las fuentes de contaminación y de las características hidrogeológicas del sistema.

El objetivo del trabajo es la caracterización preliminar de los procesos relacionados con la movilización de sedimento y sus implicaciones en la actividad bacteriológica del agua del manantial. Para ello se analiza uno de los eventos de lluvia que provocó respuesta hidrodinámica con turbidez asociada en una de las principales surgencias (Cornicabra de la Sierra de Ubrique (Cádiz). Con ello se valorará el interés de la turbidez y distribución de partículas como parámetros de alerta temprana frente a la contaminación de acuíferos kársticos.

Área de estudio

El acuífero de la Sierra de Ubrique (Fig. 1), ubicado dentro de los límites del Parque

RESUMEN

En el presente trabajo se ha investigado con detalle un episodio de crecida en un manantial kárstico destinado al abastecimiento de Ubrique (Serranía de Grazalema, provincia de Cádiz). Para ello se ha aplicado un conjunto de técnicas encaminadas a la caracterización del transporte de sedimento y de la presencia de *Escherichia coli* como indicador de contaminación fecal. Los resultados muestran las variaciones temporales de parámetros físico-químicos, la distribución de partículas y sus implicaciones directas en el transporte de bacterias en un manantial kárstico durante un episodio de lluvia intensa. Además, se analiza la utilidad del control continuo de dichos parámetros para el desarrollo de un sistema de medida y envío remoto de datos con el fin de prevenir la contaminación en manantiales destinados al consumo humano.

Palabras clave: karst, turbidez, alerta temprana, agua potable, Ubrique.

Fecha de recepción: 24/02/2023
Fecha de revisión: 20/04/2023
Fecha de aceptación: 26/05/2023

Natural Sierra de Grazalema (Cádiz), constituye un sistema kárstico formado por dos macizos montañosos (sierras del Caíllo y de Ubrique) de orografía pronunciada (de 317 a 1395 m s.n.m.).

El régimen climático del área es de tipo mediterráneo-húmedo y el período de lluvias comprende principalmente otoño y primavera. La precipitación media anual es 1348 mm (período 2012/13 a 2017/18, Sánchez et al., 2018).

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se encuentra en la Zona Externa de la Cordillera Bética (Martín-Algarra, 1987). Las formaciones geológicas que definen el basamento del acuífero son arcillas, areniscas y rocas evaporíticas del Triásico Superior (Keuper). Las principales litologías permeables son dolomías (Jurásico inferior) y calizas (Jurásico medio-superior) con un espesor de varios centenares de metros (hasta 500 m). Sobre ellas, afloran margas y margocalizas del Cretácico-Paleógeno. Finalmente, sobre la secuencia de materiales mesozoicos cabalgan formacio-

nes terciarias del denominado Complejo de Flysch del Campo de Gibraltar.

La estructura geológica se caracteriza por pliegues anticlinales de charnela plana, con dirección NE-SO, y sinclinales estrechos afectados por fallas inversas, a partir de las cuales se desarrollaron cabalgamientos con vergencia hacia el NNO (Fig. 1).

La recarga del acuífero se produce principalmente por infiltración directa (recarga difusa) de agua de lluvia sobre afloramientos permeables (26 km²), pero también a partir del agua de escorrentía de cuencas endorreicas asociadas a sumideros (recarga concentrada, 3 km²; Fig. 1), como es el caso de la sima de Villaluenga del Rosario (Marín et al., 2021). La densa fracturación de las calizas, junto con la elevada pluviometría, han favorecido el desarrollo de formas exokársticas, lo que conlleva una elevada tasa de infiltración. La aplicación de técnicas de trazadores artificiales en la zona de estudio permitió verificar la conexión hidrogeológica entre varios puntos de infiltración ubicados en el área de recarga (sumideros y simas) y los principales manantiales (Martín-Rodríguez et al., 2022). La descarga se produce hacia el borde occidental de los afloramientos carbonáticos, a través de dos manantiales permanentes situados en el casco urbano de Ubrique (Cornicabra y Algarrobal, 349 y 317 m s.n.m., respectivamente). Existen, además, otros manantiales de régimen intermitente (Garcíago, 422 m s.n.m. y Arroyo Seco 352-521 m s.n.m., Fig. 1).

Materiales y métodos

El control continuo de parámetros físico-químicos se ha llevado a cabo entre los días 19 de enero y 1 de febrero de 2021 mediante la instalación de un sensor para la medida de la altura de lámina de agua con compensación barométrica Odyssey® (Dataflow Systems LTD, Nueva Zelanda) y de un fluorímetro portátil GGUN® FL30 (Albilia, Suiza), con termómetro y conductivímetro incorporado, para la medida de temperatura, conductividad eléctrica y turbidez del agua.

Durante el periodo mencionado anteriormente, cada dos días, se han tomado medidas puntuales de la temperatura del agua subterránea, conductividad eléctrica (WTW Cond 3110, Xylem™, EEUU) y turbidez (2100QiS, HACHT™, EEUU) para la calibración del registro continuo. Se han recogido manualmente muestras para la determinación de la actividad de *Escherichia coli* (*E. coli*) mediante el sistema de

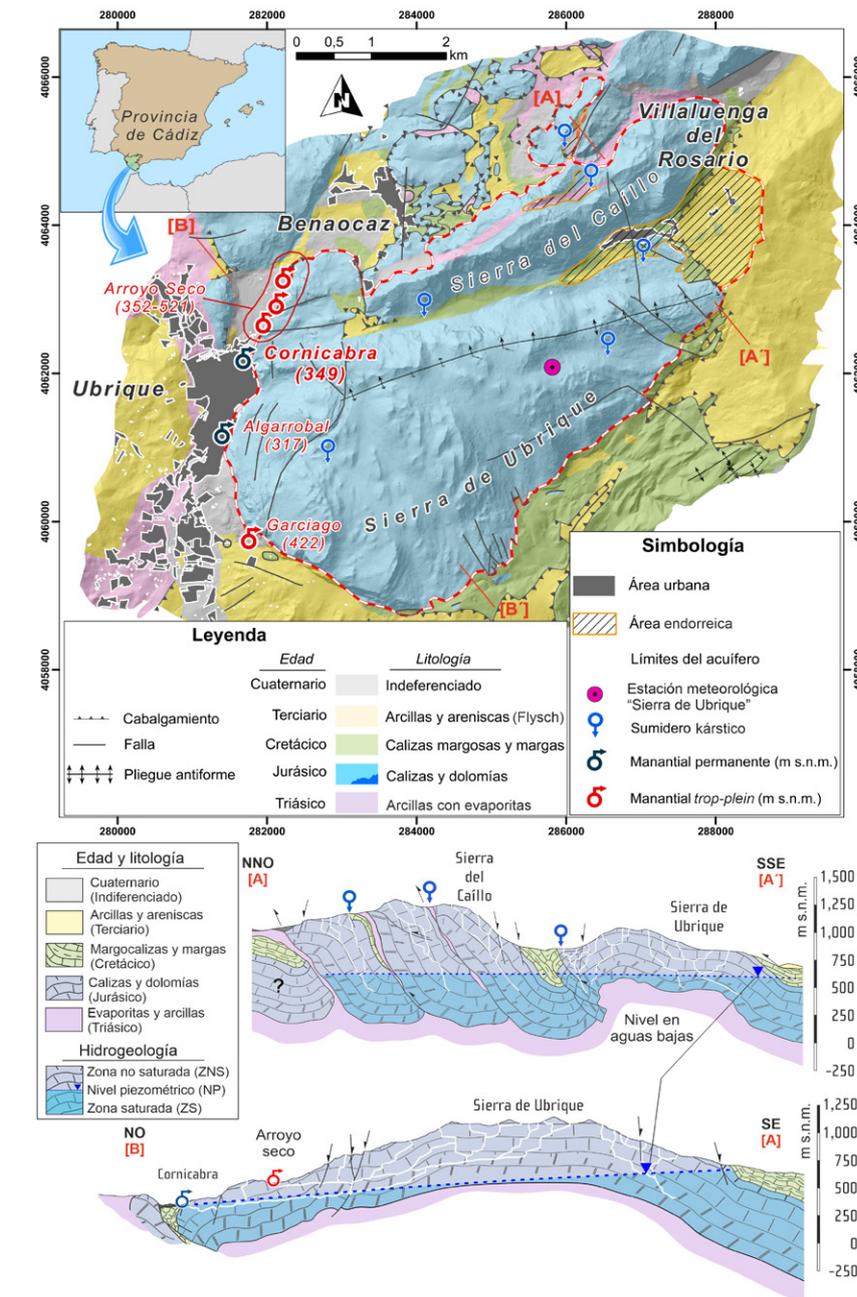


Fig. 1.- Localización de la zona de estudio, esquema geológico del acuífero de la Sierra de Ubrique y cortes hidrogeológicos.

Fig. 1.- Geological setting of Sierra de Ubrique aquifer and hydrogeological cross-sections.

cultivo Colisure (IDEXX™, EEUU). El uso del automuestreador ISCO 3700 (Teledyne™, EEUU) ha permitido tomar muestras con una periodicidad de 4 horas, para medir posteriormente el número y distribución de tamaños de partículas con un contador PCSS fluid lite (Markus Klotz® GmbH, Alemania).

Resultados

Actividad bacteriana

Durante el evento de precipitación estudiado, se obtuvieron 5 muestras (A

a E, Tabla I) para la determinación de *E. coli*. La tabla I muestra los valores de *E. coli* obtenidos, en Unidades Formadoras de Colonias (UFC), y los valores normalizados de los parámetros medidos (redimensionados entre 0 -color blanco- para el mínimo y 1 -color rojo- para el máximo) de los parámetros medidos (caudal -Q-, temperatura -T-, conductividad eléctrica -CE- y turbidez) y distribución de tamaños de partículas.

Los resultados evidencian mayor actividad bacteriana (105 y 74 UFC) en las muestras con valores máximos de turbidez y partículas, especialmente entre 1 y

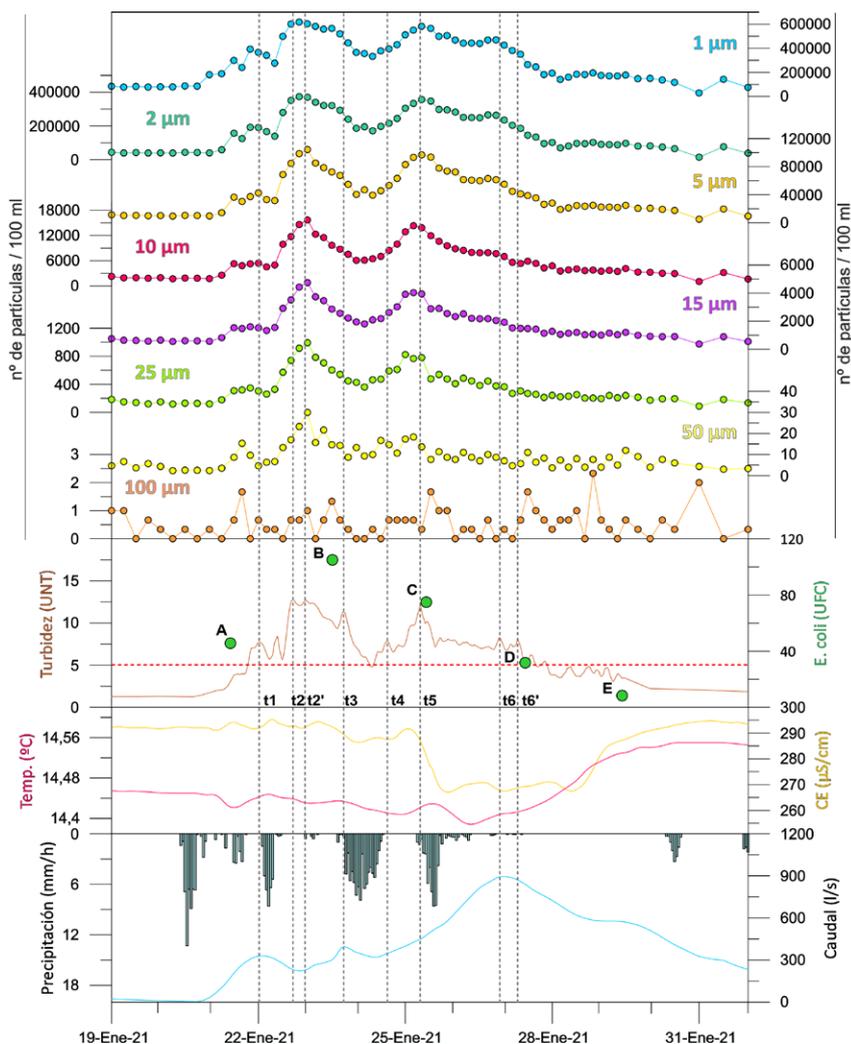


Fig. 2.- Series temporales del evento de precipitación y respuestas asociadas en el manantial de Cornicabra. La línea de puntos roja indica el máximo legal de turbidez recogido en el RD 140/2003.

Fig. 2.- Time series of the precipitation event and the associated responses in Cornicabra spring. The red dotted line indicates the legal maximum turbidity included in RD 140/2003.

25 µm (B y C, Tabla I). Valores bajos de la actividad de *E. coli* coinciden con máximos de caudal y mínimos de CE y T. En cambio, la muestra con la actividad bacteriana más baja (8 UFC) muestra valores mínimos de partículas (hasta 25 µm, D y E, Tabla I). Destaca el valor de *E. coli* de la muestra A (46 UFC), más elevado que el medido en la muestra E, pero con menor turbidez.

Análisis de series temporales

Durante el período de estudio se acumularon 245 mm de lluvia en la estación de la Sierra de Ubrique (1023 m s.n.m. (Fig. 1), distribuidos en cuatro episodios que produjeron la recarga del acuífero (Fig. 2). En el primero se registró la máxima intensidad de precipitación (13 mm/hora), mientras que el tercero tuvo la mayor duración, 23 horas. Los efectos de la lluvia provocaron un rápido aumento de caudal, desde 30 hasta 330 l/s en

24 horas (22 de enero). Posteriormente, se registraron tres picos de caudal con valores en torno a 400, 900 y 600 l/s, respectivamente, a los 2, 5 y 8 días del primer pico (Fig. 2).

La conductividad eléctrica presenta valores próximos a 290 µS/cm, con cuatro máximos relativos (en torno a 295 µS/cm) previamente a una disminución hasta 270 µS/cm (durante 48 horas), como consecuencia del tercer pulso de recarga (Fig. 2).

La turbidez presenta una rápida respuesta en las 24 horas desde el inicio del incremento de caudal y aumenta hasta 8 UNT (t1, Fig. 2). El registro muestra sus máximos en dos instantes sucesivos, (t2 y t2', Fig. 2) inmediatamente después del segundo episodio de lluvia. Los mayores valores de *E. coli* se observan en dos muestras durante el intervalo de turbidez >10 UNT (B y C, Fig. 2). A partir del instante t5, se observa un descenso de la CE y múltiples picos de turbidez, entre 8 y

5 UNT (t6 y t6'). La actividad de *E. coli* disminuye hacia el final del evento (E, Fig. 2).

La figura 2 muestra la distribución temporal de tamaño de partículas en ocho clases (1, 2, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 µm, respectivamente). Se observan variaciones similares entre ellas y el registro de turbidez, excepto la clase de 100 µm (Fig. 2). El número máximo de partículas aumenta al disminuir tamaño de las mismas. La detección de partículas con tamaños superiores a 25 µm fue notablemente inferior que los demás tamaños de partículas y muestran menor sensibilidad al pico de turbidez t6 (Fig. 2). Se aprecia un aumento de las partículas, especialmente notable en las inferiores a 5 µm, conforme aumenta la descarga del manantial en los primeros instantes de la crecida.

		Muestra					UFC
		A	B	C	D	E	
<i>E. coli</i>		46	105	74	32	8	Valores normalizados
Q		0	0,19	0,45	1	0,60	
T		0	0,15	0,09	0	1	
CE		1	0,94	0,51	0	0,73	
Turbidez		0	1	0,96	0,41	0,13	
1 µm		0,31	0,99	1	0,22	0	
2 µm		0,24	0,89	1	0,19	0	
5 µm		0,17	0,69	1	0,20	0	
10 µm		0,15	0,71	1	0,22	0	
15 µm		0,19	0,98	1	0,16	0	
25 µm		0,19	1	0,65	0,08	0	
50 µm		0,14	1	0	0,48	0,62	
100 µm		0	0,67	1	1	0	

Tabla I.- Relación entre *Escherichia coli* y valores normalizados de parámetros físico-químicos y distribución de partículas en cinco instantes del evento de crecida (véase posición de las muestras en la figura 3).

Table I.- Relationship between *Escherichia coli* and normalized values of physical-chemical parameters and particle size distribution at five instants of the flooding event (see position of samples in figure 3).

Discusión

En respuesta a los eventos de precipitación de máxima intensidad del período estudiado se produjeron máximos de caudal de 300-500 l/s y elevada turbidez y actividad de *E. coli* (t1 a t5; Figs. 2 y 3). Durante los instantes iniciales de la crecida, la detección de bacterias es apreciable (A, Tabla I) aun cuando la turbidez no supera el umbral máximo de 5 UNT establecido en el RD 140/2003. Esta situación implicaría un riesgo para la

salud humana si el agua subterránea llegase a ser incorporada a la red de abastecimiento.

La presencia de *E. coli* se asocia con la llegada de flujos de recarga concentrada generados por escorrentía superficial, dado que la supervivencia de estos microorganismos en el interior del sistema es limitada (Pronk *et al.*, 2007). Así, el pico simultáneo de turbidez y caudal (t1, Fig. 3) en el manantial de Cornicabra se explica como resultado de la rápida circulación de las aguas infiltradas en sumideros y simas (con alta carga bacteriana). Esto produce el rápido aumento de turbidez y la entrada de partículas (sedimentos) desde el exterior del sistema.

Inmediatamente después del quinto pico significativo de turbidez (t5, >10 NTU; Figs. 2 y 3), se observa una disminución de la CE, turbidez y *E. coli*, coincidiendo con el aumento de caudal registrado en el manantial, de 600 a 900 l/s. El penúltimo pico significativo de turbidez (t6, 8 NTU) se produce a la par que el máximo caudal registrado. El descenso de la turbidez y la menor proporción de partículas en suspensión (por cada 100 ml), coincidiendo con la menor conductividad eléctrica del agua, se interpreta como consecuencia de la dilución y el posterior descenso de carga hidráulica del sistema, lo que contribuye a la decantación de las partículas (Fig. 3).

Los picos de turbidez t1, t3 y t6 coinciden con los de caudal, lo que sugiere un proceso simultáneo de aumento de la turbidez asociado a la entrada de recarga concentrada. Por otro lado, los picos t2, t2', t4, t5 y t6' coinciden con mínimos relativos o incrementos de caudal y se podrían relacionar con la movilización de sedimento para-aυτόctono en el interior del sistema (introducido durante eventos previos de crecida).

Esta relación no lineal entre la carga hidráulica y el transporte de sedimento se aprecia en la figura 3. La movilización de partículas que genera la turbidez en el agua del manantial de Cornicabra muestra un rápido aumento de los tamaños de 1-2 µm, entre 5 y 8 NTU (con detección de bacterias asociada), directamente ligado al aumento de la descarga del sistema (Fig. 3). Frank *et al.*, (2018) observaron un comportamiento similar en el manantial de Sagebach, principal punto de drenaje del acuífero kárstico de Gottesacker (Alpes austríacos), en el que se reconocen abundantes formas exokársticas de infiltración preferencial, aunque de pequeña entidad. Sin embargo, estos autores contabilizaron valores de distribución de partículas y *E.*

coli inferiores para niveles similares de turbidez, si se comparan con los resultados obtenidos por Pronk *et al.*, (2007) y la presente investigación. En estos estudios registraron, a su vez, valores máximos de caudal significativamente inferiores a los presentados en este trabajo. En concreto, el estudio de Pronk *et al.*, (2007), desarrollado en el principal punto de drenaje del sistema kárstico de Yverdon (Jura, Suiza), presentó el menor caudal máximo (120 l/s) y la mayor actividad bacteriana (1200 UFC) durante un episodio de crecida. En dicho artículo se destaca la presencia de un sumidero kárstico activo, de dimensiones significativas, en el que se llegó a infiltrar caudal máximo de 600 l/s.

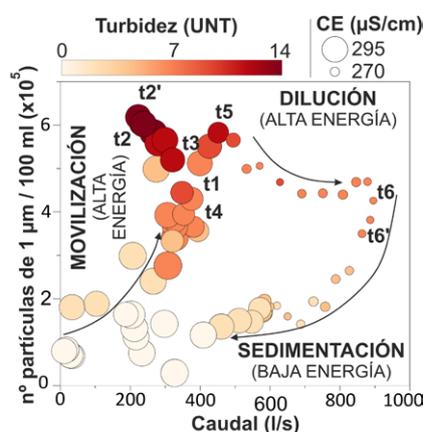


Fig. 3.- Procesos de movilización de sedimento representados en función del caudal y de las partículas de 1 µm.

Fig. 3.- Sediment mobilization processes represented as function of spring discharge and 1 µm particles.

Conclusiones

En este trabajo se presenta una caracterización preliminar de los procesos que determinan el transporte de partículas (sedimentos) en el acuífero estudiado y se plantean, de manera incipiente, hipótesis sobre el origen de la turbidez en un contexto dual de los procesos de recarga (difusa vs concentrada).

Se ha demostrado que existe relación entre la presencia de turbidez y la actividad bacteriana en el agua del manantial de Cornicabra. Así, el uso combinado de turbidez y distribución de partículas, junto con otros parámetros del agua y la actividad bacteriana es esencial para establecer las medidas de prevención adecuadas en captaciones de agua destinadas al consumo humano.

Contribución de los autores

Jaime Fernández Ortega se ha encar-

gado de la adquisición de datos y resultados, primera redacción del texto y elaboración de figuras. José Francisco Martín Rodríguez ha contribuido a la elaboración del mapa y cortes geológicos. Juan Antonio Barberá y Bartolomé Andreo han contribuido a la financiación y coordinación del proyecto de investigación, así como a la revisión científica de este manuscrito.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del grupo de investigación RNM-308 del PAIDI de la Junta de Andalucía. Ha sido financiado por el proyecto europeo KARMA (*Karst Aquifer Resources availability and quality in the Mediterranean Area* – ANR-18-PRIM-0005), a través del Programa Conjunto Internacional del Ministerio de Ciencia e Innovación (PCI2019-103675) y por el proyecto PID2019-111759RB-I00.

Referencias

Frank, S., Goeppert, N. y Goldscheider, N., (2018). *Science of the Total Environment* 615,1446–1459. <https://doi.org/jxtb>

Goldscheider, N. y Drew, D. (2007). En: *IAH International Contributions to Hydrogeology* 26. CRC, Boca Raton, FL

Grayman, W.M., Deininger, R.A., y Males, R.M. (2001). AWWA Res. Fdn, Denver.

Mahler, B.J., Person, J., Lods, G. y Drogue, C. (2000). *Journal of Hydrology* 238, (3–4), 17993. <https://doi.org/dcd8gz>

Marín, A.I., Martín-Rodríguez, J.F., Barberá, J.A., Fernández-Ortega, J., Mudarra, M., Sánchez, D., Andreo, B., (2021). *Hydrogeology Journal* 29, 379–396. <https://doi.org/gpxnmk>

Martín-Algarra, M. (1987). *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y Externas de la Cordillera Bética*. PhD Thesis, University of Granada, Spain, 1171 pp

Martín Rodríguez, J.F., Mudarra, M., Andreo, B., 2022. Contribución ID: 142, Poster *Eurokarst Conference*, Málaga, España, junio 2022

Pronk, M., Goldscheider, N., Zopfi, J., 2007. *Environmental Science Technology* 41(24),8400–8405. <https://doi.org/c5cth3>

Sánchez, D., Barberá, J.A., Mudarra, M., Andreo, B. y Martín-Rodríguez, J.F. (2018). *Geol Soc London Spec Publ* 466:275–293. <https://doi.org/jxtd>

Stevanović, Z. (2019). *Environmental Earth Sciences* 78, 662. <https://doi.org/jxtc>