

# Funcionamiento hidrogeológico del Trías de Antequera. Hipótesis sobre el modelo general de flujo subterráneo

Matías Mudarra Martínez<sup>(1)</sup>, José Manuel Gil Márquez<sup>(1)</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>(1)</sup>,  
Francisco Carrasco Cantos<sup>(1,2)</sup> y Luis Linares Girela<sup>(2)</sup>

(1) Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). 29071, Málaga, España.  
mmudarra@uma.es, josemgil@uma.es, andreo@uma.es, fcarrasco@uma.es  
(2) Academia Malagueña de Ciencias. c/Moratin 4, 29015 Málaga, España.  
luislinares@telefonica.net

## RESUMEN

A los afloramientos de materiales de diversa naturaleza (arcillas, evaporitas, carnioles, ofitas, areniscas, etc.) y estructura caótica, pertenecientes a los llamados Complejos Caóticos Subbéticos y agrupados aquí con la tradicional denominación "Trías de Antequera" (norte de la provincia de Málaga), se les ha atribuido históricamente un comportamiento hidrogeológico poco permeable. Sin embargo, algunos estudios evidencian cierta complejidad hidrogeológica, con un carácter acuitado predominante, pero con mayores permeabilidades en los enclaves evaporíticos, fruto de los procesos de disolución/karstificación y de los movimientos halocinéticos. La alimentación procede de la infiltración directa de la lluvia y también de la infiltración de la escorrentía a través de sumideros kársticos, mientras que la descarga se produce fundamentalmente hacia el estrecho de Meliones, en el río Guadalhorce. La información hidrogeoquímica evidencia el aumento general de la mineralización y de la temperatura desde los puntos de agua situados a mayor altitud hasta los localizados a menor cota en el acuífero. Dicho aumento va acompañado por una transición progresiva de facies hidroquímicas: de bicarbonatada cálcica a clorurada sódica, pasando por sulfatada cálcica. Todo ello sugiere la existencia de un sistema jerarquizado de flujos subterráneos con diferentes tiempos de residencia en el medio, que podría asimilarse al propuesto por Tóth para grandes cuencas sedimentarias, donde las aguas menos mineralizadas y de reciente infiltración (que en este caso fluyen por los conductos kársticos de la zona no saturada) se mezclarían con aguas más antiguas asociadas a flujos lentos, ascendentes, profundos y de mayor tiempo de residencia en el acuífero.

Palabras clave: flujo subterráneo, funcionamiento hidrogeológico, karst, "Trías de Antequera"

## ***Hydrogeological functioning of the Trías de Antequera. Hypothesis on the general groundwater flow model***

### ABSTRACT

*The Trías de Antequera (in the north of the province of Malaga), belonging to the so-called Chaotic Subbetic Complexes, is formed by diverse materials (clays, evaporites, sandstone, ophites, dolostones, etc.). This complex has traditionally been considered to have low permeable behavior as a whole. Nevertheless, some studies evidence high hydrogeological complexity, with predominantly aquitard functioning and higher permeability in the evaporitic outcrops as a result of dissolution/karstification processes and halokinetic movements. Recharge is associated with direct rainfall infiltration and runoff entry through karst swallow holes, whilst discharge mainly takes place towards the Meliones Strait, in the Guadalhorce River. Hydrogeochemical data reveal a general increase of water temperature and mineralization from outlets located at higher places towards those at a lower altitude. This provokes a progressive transition of hydrochemical facies: from calcium-bicarbonate to sodium-chloride type, passing through calcium-sulphated waters. All these results suggest the existence of a hierarchized groundwater flowpath system, with different residence times in the media, similar to that proposed by Tóth for sedimentary basins. Thus, low mineralization groundwater of recent infiltration (flowing through karst conduits within the unsaturated zone) is mixed with older groundwater related to the deep ascending slow flow paths of greater residence time in the media.*

Keywords: groundwater flow, hydrogeological functioning, karst, Trías de Antequera.

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

**Introduction and study setting description**

The Trías de Antequera (Staub, 1926; 1934; Blumenthal, 1927; Peyre, 1974) is an outcrop of the so-called Chaotic Subbetic Complexes of the Betic Cordillera located in the north of the province of Malaga, in the Guadalhorce River watershed (Fig. 1). This formation is a megabreccia with a chaotic structure and a matrix mainly formed by Triassic lithologies of Germanic facies (clays, evaporites, sandstones, ophites, etc.) that contains olistoliths of diverse embedded materials (limestone, dolostones, marls, sandstone, metamorphic rocks). Low permeability has been traditionally assumed for the Chaotic Subbetic Complexes, although local karstification in evaporite rocks, favoured by the fault system caused by halokinetic movements (Calaforra and Pulido-Bosch, 1999), enhanced the secondary porosity and permeability. Consequently, numerous karst landforms were developed (dolines, collapses, swallow holes), which are preferential infiltration routes that allow rapid groundwater flows beneath the surface (Gil-Márquez et al., 2017a). Therefore, those areas with greater evaporite enclaves give the Chaotic Subbetic Complexes a markedly karst functioning. Nonetheless, the intense tectonic deformation and the abundance of low permeability lithologies cause a great hydrogeological complexity in the clayey-evaporitic formation. Generally, springs located at a lower altitude drain water of high salinity, such as the springs located in the Meliones Canyon, resulting in a reduction of the chemical quality of surface water resources (retained by Guadalhorce Dam) used for water supply to Malaga city and the Bajo Guadalhorce valley.

Several institutions have investigated this issue and carried out some remediation programmes, mainly focused on the salt contribution from the main spring in the Meliones Canyon, which is below the maximum storage height of the dam and remains flooded during long periods. Despite the time and efforts expended, no solution has yet been reached. Most studies dealt with the problem using a local perspective, and they did not consider the hydrogeological functioning of the Trías de Antequera as a whole. This paper aims to provide a unifying and updated perspective of the geomorphological and hydrogeological aspects controlling groundwater flows within the Trías de Antequera in order to reach a better understanding of its functioning.

**Methods and results**

Hydrodynamic and hydrochemical data obtained during the last few decades (Carrasco, 1986; Andreo et al., 2016) have been used in this study. Additionally, from September 2017 to January 2018, weekly measurements of discharge rate, water temperature and electrical conductivity (EC) were carried out in the main outlet and samples were taken for major element determination, coinciding with a decrease of water level in the reservoir below the altitude of the Meliones spring (346 m a.s.l.).

Location of the studied springs is indicated in Figure 1, and their main chemical characteristics are summarized in Table 1. If the outlets located in Los Hoyos area are not taken into account, an inverse relationship between the spring heights and their mean water temperatures and electrical conductivity values can be established (Fig. 2). The temporal evolution of discharge rate, physico-chemical parameters and major ion components of the Meliones spring water are represented in Figure 3. Between 1974 and 1976, there is a general descendent trend of discharge rate (from 12 to 6 l/s) that is simultaneous with a progressive mineralization increase (from 58 to 90 mS/cm). Both trends were interrupted after several rainy months by a 20 l/s peak, coinciding with an electrical conductivity rise of more than 40 mS/cm. At the beginning of the 2017/18 period (Fig. 3), there was a gradual rise of salinity (up to 172.1 mS/cm) followed by a general drop of mineralization. This change of trend seems to be controlled by the first rain of the hydrological year, which caused the runoff that entered through swallow holes. The consequence was a rise of discharge rate (14.1 l/s) jointly to a fall of 7.3 mS/cm respect previous EC values. In both periods, the mineralization changes are mainly due to variations of the content of solutes derived from halite. No remarkable changes in water temperature were registered.

**Discussion**

The complex groundwater hydrochemistry of the Trías de Antequera has been interpreted in different ways. Calaforra and Pulido-Bosch (1999) related the spring chemical variability to the concurrence of halokinetic movement and associated fault systems, which affect the geomorphology and hydrogeology of the study area

by enhancing its heterogeneity and compartmentalizing the outcrops in several systems. Thus, outlets at higher positions and draining calcium-sulphated water would be linked to epigenetic karst systems developed in gypsum enclaves, whilst brine springs (lower heights), would be related to deeper groundwater flows that go through the salt core of the diapiric structures (Calaforra, 2004). This hydrogeological scheme is well adapted to the Los Hoyos area (Calaforra y Pulido-Bosch, 1993; Gil-Márquez et al., 2016). However, the rest of the brine springs in the Trías de Antequera (Cañaveralejo, Meliones) are near the Meliones Canyon (Fig. 1), where they seem to define a base level. Thus, the whole clayey-evaporitic formation could be a single regional system in which the groundwater flow path ultimately converges to the Meliones area. This would be in agreement with the higher discharge rate (20-40 l/s) of the Meliones spring, as well as the physic-chemical characteristics of its waters which have the highest water temperature and mineralization in the region. Moreover, the isotope information provided by Carrasco (1986) defines a recharge height for the Meliones spring in the altitudinal range of the Trías de Antequera (400-800 m a.s.l.). This author also found  $^3\text{H}$  with thermonuclear origin in the brine springs, although below the post-1953 precipitation values, deducing the mixing between the groundwater of different residence times in the media.

Andreo et al. (2016) proposed an integral hydrogeological model for the Chaotic Subbetic Complexes, including the Trías de Antequera which defines a hierarchized system of groundwater flows of different lengths, depths and residence times. Contrary to the hypothesis propounded by Calaforra and Pulido-Bosch (1999) and Calaforra (2004), mineralization increases would be due not only to the massive presence of halite at depth, but also to longer water-rock interactions. Hence, springs draining water with low electrical conductivity and temperature values, of calcium-bicarbonate facies, would be related to shallow and short young groundwater flowpaths. On the other hand, long (regional) and deep flows, of great residence time, would gradually acquire more solute content by evaporite minerals dissolution until reaching the Meliones Canyon. Between the two extremes, at intermediate positions, the springs have variable hydrochemical characteristics, depending on groundwater residence times and lithologies. This model is inspired by the gravity regional groundwater flow model proposed by Tóth (1963, 1970) for sedimentary basins, which has been previously used to explain the existence of brine springs in karst media (Memon et al., 1999). However, Tóth's model is not completely applicable here due to the geomorphological and hydrogeological implication of the karst processes. Although regional groundwater flows are influenced by topography, the abundance of preferential infiltration forms and the spatial hydraulic heterogeneity of karst can largely affect their direction and speed (Ford and Williams, 2007). Thus, in the Meliones area (Fig. 1) recently infiltrated low-mineralized water (conduit flow in the unsaturated zone) would mix in the saturated zone with older groundwater related to regional deep flow paths. Previous research (Carrasco, 1986; Calaforra and Pulido-Bosch, 1999) registered simultaneous rises of discharge rate, water temperature, and salinity during rain periods, followed by drops in these parameters when the rain ceases (Fig. 3). This kind of response involves the whole participation of the system, both the saturated and unsaturated zones. Therefore, recharged groundwater flowing through the unsaturated zone pushes and mobilizes towards the spring groundwater previously stored within the saturated zone (older, warmer and more mineralized). However, in the last control period (2017/18), after dispersed recharge events, light dilutions were registered. This behaviour modification would be coherent with variations in the different flow components, favoured by the high karst development of the unsaturated zone.

## Conclusions

Despite being traditionally considered an aquitard, the Trías de Antequera has a complex hydrogeological functioning. Generally, groundwater flows diffusively in a slow way, although local karstification allows rapid hydrogeological connections. The location of springs and wetlands within the Trías de Antequera and their hydrochemical characteristics respond to a hierarchized gravity-driven groundwater flow system, with diverse residence times, lengths and depths. Thus, water temperature and mineralization would be partially related to the water-rock interaction time. However, this model does not completely explain the hydrogeological functioning of the Meliones spring, due to functional karst development that allows a quick transfer of recently infiltrated water towards the saturated zone where it mixes with groundwater of greater residence time, related to slow, deep groundwater flows. Given the implications on water resource management of the salt contribution in the Meliones area, it would be advisable to carry out more detailed research, including groundwater dating technique, in order to corroborate the model here proposed.

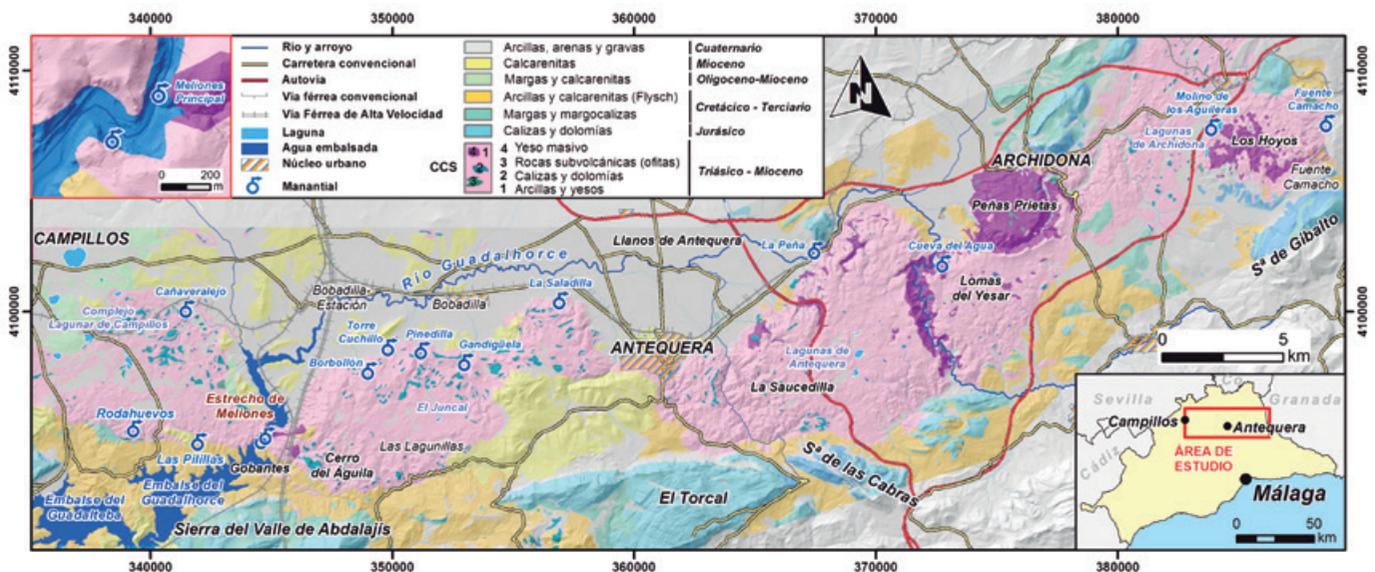
**Introducción**

Bajo la denominación “Trías de Antequera” (Staub, 1926; 1934; Blumenthal, 1927; Peyre, 1974) se incluyen materiales de los Complejos Caóticos Subbéticos de la Zona Externa de la Cordillera Bética (Vera y Martín-Algarra, 2004) que afloran, siguiendo una franja de dirección E-O, por la parte centro-septentrional de la provincia de Málaga, en la cuenca alta del río Guadalhorce (Figura 1). En conjunto se trata de una megabrecha con una estructura interna caótica, en la que hay un amplio predominio de litologías triásicas de facies germano-andaluzas (arcillas, evaporitas, carnio-las, ofitas, areniscas, etc.), pero que contiene, además, olistolitos y bloques de otros materiales (calizas, dolomías, margas, areniscas, incluso rocas metamórficas) pertenecientes a diferentes edades, a veces incluidos en sedimentos del Mioceno Medio (Peyre, 1974; Pérez-López, 1991; Sanz de Galdeano et al., 2008).

A los materiales de los Complejos Caóticos Subbéticos, incluido el “Trías de Antequera”, se les ha atribuido tradicionalmente un comportamiento hidrogeológico poco permeable. Sin embargo, la presencia de enclaves evaporíticos (yeso y halita), más solubles que las rocas carbonáticas, así como la concurrencia de movimientos halocinéticos y de los sistemas de fracturas asociados (Calaforra y Pulido-Bosch, 1999), han favorecido localmente los procesos de disolución y karstificación, y los respectivos aumentos de la porosidad y permeabilidad secundaria. Como consecuencia surgen redes de conductos y cavidades kársticas,

altamente inestables, cuyo colapso y hundimiento condicionan la génesis y determinan la rápida evolución de las formas típicas del modelado exokárstico, como dolinas, uvalas y sumideros kársticos; todos ellos vías preferenciales de infiltración que favorecen la circulación rápida del agua en el medio subterráneo (Gil-Márquez et al., 2017a).

La elevada solubilidad de los materiales evaporíticos juega, por tanto, un papel fundamental en el funcionamiento hidrogeológico de los afloramientos del “Trías de Antequera”, ya que confiere a éstos un comportamiento kárstico muy marcado, sobre todo allí donde los enclaves evaporíticos adquieren mayores dimensiones. Sin embargo, la intensa deformación tectónica sufrida y el predominio de litologías con menor permeabilidad y un comportamiento propio de acuíferos pobres o acuitardo, proporcionan al conjunto arcilloso-evaporítico gran complejidad hidrogeológica (Calaforra y Pulido-Bosch, 1999; Calaforra, 2004; Andreo et al., 2016), que se manifiesta por la existencia de flujos subterráneos de distintas longitudes y profundidades, con diversos tiempos de residencia y valores de mineralización, desde las áreas de recarga (a mayor altitud) hasta las zonas de descarga (cauces, humedales y manantiales). La elevada salinidad de algunos de los puntos de drenaje (por ejemplo, los situados en el estrecho de Meliones) provoca el deterioro de la calidad química de las aguas embalsadas por la presa del Guadalhorce, cuyo fin es el abastecimiento urbano y regadíos del valle del Bajo Guadalhorce. Varios organismos han realizado investigaciones so-



**Figura 1.** Esquema geológico-hidrogeológico del sector septentrional de la provincia de Málaga, en el que se observan los afloramientos atribuibles al “Trías de Antequera” (franja de colores rosa y violeta). Modificado de Pineda Velasco (1990) y Martín-Serrano (1986).

**Figure 1.** Geological-hydrogeological sketch of the northern sector of the province of Málaga. The Trias de Antequera outcrops are shown in pink and violet. Modified from Pineda Velasco (1990) and Martín-Serrano (1986).

bre este problema y han puesto en práctica soluciones para su eliminación, particularmente la Comisaría de Aguas del Sur, el Servicio Geológico del MOPU y el Centro de Experimentación de Obras Públicas. La mayor complicación estriba en que la principal surgencia de agua salina (Meliones) queda inundada durante largos periodos por estar situada bajo la cota de máximo embalse.

A pesar del tiempo y de los esfuerzos económicos dedicados, aún no se ha alcanzado una solución eficaz que reduzca las aportaciones de aguas altamente salinas a los embalses. La mayoría de los trabajos se han centrado en abordar el problema a escala local, sin considerar ni comprender el funcionamiento hidrogeológico del "Trías de Antequera" en toda su magnitud. Para ello serían necesarios, por ejemplo, estudios adicionales dirigidos a cuantificar y caracterizar la dirección y la longitud de los flujos regionales de aguas subterráneas que alimentan a las principales descargas salinas y, cuando fuera posible, definir los límites de los acuíferos asociados. Estos nuevos trabajos deberán apoyarse, como es lógico, en los conocimientos geológicos e hidrogeológicos previos que existan del manantial de Meliones y su entorno. Con este enfoque, el objetivo de este trabajo es, precisamente, proporcionar una visión integradora y actualizada de los aspectos geomorfológicos e hidrogeológicos que gobiernan los flujos subterráneos en el "Trías de Antequera". Para ello se ha utilizado la información hidrodinámica e hidroquímica recopilada durante los últimos años, que ha contribuido a la mejora del conocimiento de la hidrogeología de los Complejos Caóticos Subbéticos a escala regional, como base para establecer un modelo general de flujo subterráneo. Dicho modelo ayudará al desarrollo de investigaciones más detalladas en este tipo de medios, habida cuenta de su incidencia sobre la calidad natural de las aguas superficiales.

### **Características generales del área de estudio**

Los afloramientos del "Trías de Antequera" constituyen zonas ligeramente elevadas con respecto a los terrenos colindantes, de relieve suave y pendientes moderadas, con inclinación general hacia el oeste, desde 800 m s.n.m., en la parte oriental (Los Hoyos), a 600 m s.n.m., en la occidental (Campillos). En el centro de los afloramientos hay lomas, vaguadas y numerosas depresiones cerradas, mientras que en hacia los bordes aumenta la pendiente, lo que da lugar incluso a escarpes. Los mayores desniveles (hasta 200 m) se presentan en el borde norte, cerca de Antequera, mientras que en las inmediaciones de Campillos son

imperceptibles. Las características topográficas condicionan que la red de drenaje superficial sea centrífuga, adaptada a la morfología alargada y en domos de los afloramientos del "Trías de Antequera". La continuidad topográfica de los domos se ve interrumpida por dos cañones originados por el río Guadalhorce, situados respectivamente en las Lomas del Yesar, entre Archidona y Villanueva del Rosario, y en el estrecho de Meliones, en Gobantes (Figura 1).

El clima de la zona es de tipo Mediterráneo y está caracterizado por una estación seca y calurosa, entre los meses de mayo a septiembre, y un periodo relativamente frío y con mayores precipitaciones entre los meses de octubre a abril. El valor medio anual de precipitación es 475 mm, según se desprende de la serie histórica (periodo 1974/75 – 2011/12), mientras que las temperaturas medias anuales son del orden de 15- 17 °C. La evapotranspiración potencial anual, calculada como la media de las ecuaciones de Thornthwaite (1948), Hargreaves (1985) y Blaney-Cridde (1962), es próxima a 1.100 mm. La evapotranspiración real, con una reserva útil del suelo de 75 mm, asciende a 307-387 mm/año, según estas mismas ecuaciones. Los excedentes anuales o lluvia útil varían entre 90 y 170 mm y representan del 19 al 36% de la precipitación.

En el "Trías de Antequera" se ha desarrollado uno de los complejos kársticos-evaporíticos más significativos de España (Molina, 1982; Durán y Molina, 1986), con la presencia de numerosas formas de modelado, tanto exo- como endokársticas: campos de lapiaz, depresiones, dolinas, simas y cuevas en yesos (Sima del Águila, Cueva del Agua). La posición y abundancia de estas formas están controladas por las estructuras diapíricas con morfología subcircular, así como por los sistemas de fracturas asociados. Entre las geoformas más comunes destacan las depresiones, originadas a partir de la disolución de las rocas evaporíticas (Durán y Molina, 1986; Calaforra, 1998). Algunas de estas zonas endorreicas presentan sumideros kársticos, los cuales son activos cuando hay escorrentía. Por el contrario, donde no existen sumideros, las depresiones pueden permanecer inundadas durante un periodo de tiempo variable tras las lluvias. Se pueden reconocer humedales de origen kárstico-evaporítico de este a oeste: en el paraje de Los Hoyos (Figura 1), en la Loma del Yesar y Peñas Prietas en Archidona, en la Saucedilla en Antequera, pequeñas cuencas en Gobantes, y en las inmediaciones de Campillos.

La alimentación del conjunto arcilloso-evaporítico se produce tanto por infiltración directa del agua de lluvia, como por la entrada del agua de escorrentía en los sumideros. Por su parte, la descarga tiene lugar por manantiales, hacia cauces fluviales o hacia humedales. El drenaje subterráneo principal se produce ha-

cia el río Guadalhorce, hacia el estrecho de Meliones (Carrasco, 1986; Calaforra y Pulido-Bosch, 1999), donde existe un área de descarga definida por varias surgencias salinas situadas entre 345 y 353 m s.n.m. (Figura 1). El valor medio de descarga conjunta de todas ellas está comprendido entre 20 y 45 l/s, con valores de conductividad eléctrica del agua que varían entre 60 y 190 mS/cm, y facies hidroquímicas del tipo clorurada-sódica (Carrasco, 1986). Desde 1976, la zona permanece inundada por las aguas del embalse del Guadalhorce salvo cuando desciende el nivel de agua. La última vez que esto ocurrió fue entre septiembre de 2017 y marzo de 2018. No obstante, al quedar sumergido el manantial se produce un ascenso de la cota de surgencia y a veces el agua salada mana en los bordes del embalse.

Otros manantiales significativos (Figura 1) aparecen en las márgenes del río Guadalhorce (Cueva del Agua, La Peña), en arroyos que discurren sobre los afloramientos del "Triás de Antequera" (Cañaveralejo, Las Pilillas, Rodahuevos), en el contacto de estos materiales con otros más recientes (La Saladilla, Torre Cuchillo, Gandigüela, Pinedilla, Fuente Camacho) o cerca de lagunas (Molino de los Aguileras). Algunas de las surgencias se localizan en el entorno del área de Gobantes, a ambos lados del río Guadalhorce, entre 345

y 520 m s.n.m. Sin embargo, en general, es posible observar una disminución en la cota de surgencia de este a oeste, desde 787 (Molino de los Aguileras) hasta 346 m s.n.m. (Meliones). Los manantiales presentan mayoritariamente dos tipos de facies hidroquímicas: sulfatada cálcica y clorurada sódica. El primer tipo es el más común, debido a la abundancia de yesos. Las aguas de mayor salinidad y facies clorurada sódica (Meliones, Cañaveralejo, Fuente Camacho) fueron explotadas desde la antigüedad para la producción de sal. También hay descarga difusa hacia el río Guadalhorce, en las dos zonas donde éste atraviesa los afloramientos de los Complejos Caóticos Subbéticos, hacia los materiales detríticos permeables miocenos y cuaternarios de la depresión de Antequera, y hacia algunos humedales que se desarrollan en las zonas endorreicas (CMA, 2005). Existen, además, salidas por bombeos en pozos y sondeos, generalmente para fines agrícolas. Los caudales de explotación en estas captaciones pueden llegar a ser de decenas de l/s.

### Metodología

Entre septiembre de 2017 y enero de 2018, coincidiendo con el descenso de la cota de embalse por debajo

Zona	Los Hoyos		Lomas del Yesar	Antequera		Gobantes								
	Fuente Camacho	Molino de los Aguileras	Cueva del Agua	La Peña	La Saladilla	Gandigüela	Pinedilla	Borbollón	Meliones Principal	Cañaveralejo	Las Pilillas	Rodahuevos	Torre Cuchillo	
Cota (m s.n.m.)	725	787	630	480	462	511	466	515	346	399	443	386	449	
Caudal (l/s)	n.d.	21,9	17,6	n.d.	2,4	n.d.	n.d.	n.d.	17,4	1,8	n.d.	n.d.	n.d.	
C. E. (mS/cm)	n	37	69	23	8	48	2	3	2	59	68	5	5	6
	media	215,5	2,9	2,4	2,3	17,4	2,7	2,6	2,5	123,3	140,1	8,6	15,6	2,3
	máx.	220,0	3,2	2,6	2,6	35,0	2,8	2,6	2,6	190,0	166,7	13,5	18,5	2,6
	mín.	210,0	2,6	2,1	2,0	14,7	2,6	2,5	2,4	58,0	42,0	5,5	11,7	2,0
cv%	1,0	5,8	5,3	9,7	18,6	5,2	1,9	6,2	31,7	14,6	35,4	17,6	9,4	
Temp. (°C)	n	36	69	17	-	39	1	1	1	31	59	-	-	-
	media	17,3	17,0	16,8	-	17,7	17,3	16,7	16,8	19,3	19,4	-	-	-
	máx.	21,3	17,7	16,9	-	17,9	17,3	16,7	16,8	23,0	19,7	-	-	-
	mín.	13,2	16,8	16,7	-	17,6	17,3	16,7	16,8	16,0	19,2	-	-	-
cv%	12,0	0,8	0,3	-	0,5	-	-	-	6,2	0,8	-	-	-	
Catión predominante	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	
Anión predominante	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	

**Tabla 1.** Lista de los principales manantiales estudiados en el "Triás de Antequera", incluida la altitud, y resumen de los parámetros físico-químicos controlados. n, número de muestras/medidas; máx, máximo; mín, mínimo; cv%, coeficiente de variación (%).

**Table 1.** List of the main studied springs found in the "Triás de Antequera", indicating altitude, and a summary of the controlled physical-chemical parameters. n, number of samples/measurements; max, maximum; min, minimum; and cv%, coefficient of variation (%).

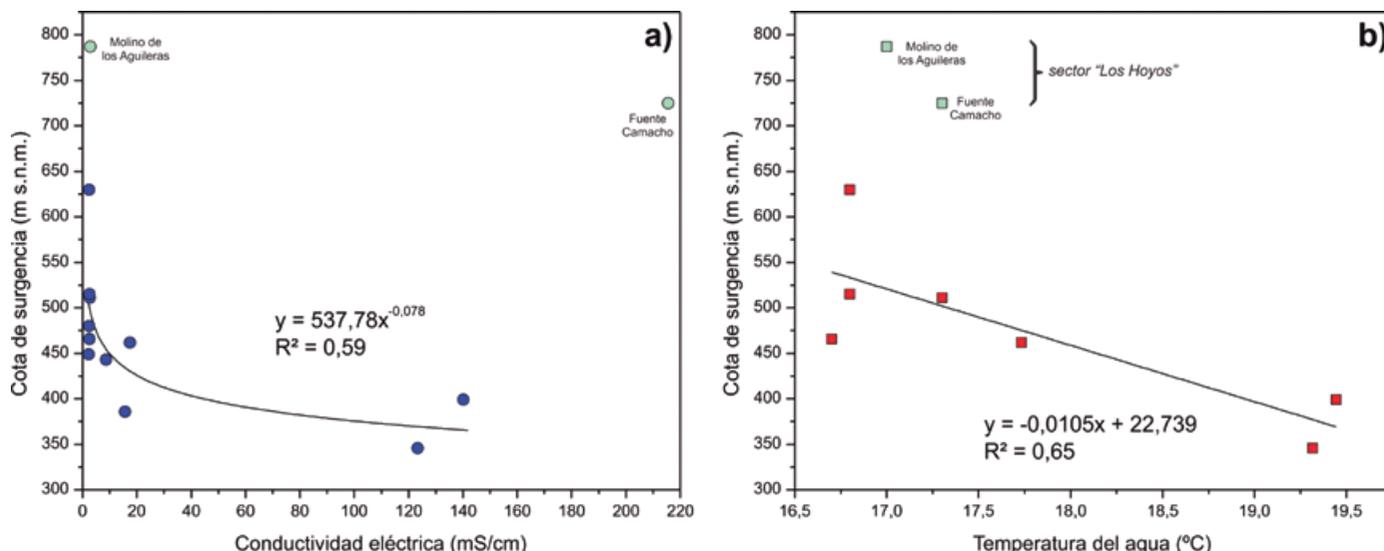
del punto de surgencia del manantial de Meliones, se llevó a cabo un control de dicha surgencia. El control consistió en la realización de medidas del caudal de descarga, con un micromolinetete de la marca OTT®, modelo C2, y de los valores de conductividad eléctrica y temperatura del agua (marca WTW®, modelo 3310). Con la misma periodicidad, se tomaron muestras de agua en el manantial, para la posterior determinación analítica de sus componentes químicos mayoritarios en el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). El contenido de  $\text{HCO}_3^-$  fue determinado mediante volumetría, con adición de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0,02N) hasta pH 4,45; mientras que la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  se analizó mediante cromatografía iónica (METROHM® Compact 930 IC Flex para cationes, y Compact 881 IC Pro para aniones).

Asimismo, se ha considerado la información hidroquímica e hidrodinámica previa del manantial principal de Meliones de la que se dispone. En concreto, se han utilizado los datos tomados por la Comisaría de Aguas del Sur, por el Servicio Geológico del MOPU y por Carrasco (1986), entre agosto de 1974 y diciembre de 1976. En total, se cuenta con una serie de 34 medidas mensuales, de las cuales 20 ofrecen información de todos los parámetros considerados en este estudio. Además, se han incluido los datos de conductividad eléctrica y temperatura del agua de las principales surgencias existentes en el Trías de Antequera, tanto los publicados por Carrasco (1986) como por Andreo et al. (2016).

## Resultados

La figura 1 muestra la situación de los principales manantiales asociados a los materiales que conforman el "Trías de Antequera" y la tabla 1 resume las características físico-químicas de sus aguas. Debido al limitado número de datos de algunos puntos, los parámetros estadísticos calculados sólo pueden considerarse orientativos de la variabilidad hidroquímica de las aguas subterráneas.

En general, se puede apreciar una relación inversa de tendencia entre los valores medios de mineralización del agua y la cota de surgencia de los manantiales (Figura 2a), con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0,59. Igualmente, se intuye una relación lineal entre la temperatura del agua y la cota ( $R^2 = 0,65$ ), de tal modo que la primera es mayor cuanto más bajo está situado el punto de drenaje (Figura 2b). Para el ajuste de ambas relaciones se ha prescindido de los manantiales situados en el paraje de Los Hoyos, por presentar sus aguas valores que apuntan hacia un funcionamiento, *a priori*, independiente con respecto al resto de afloramientos del "Trías de Antequera" (Andreo et al., 2016; Gil-Márquez et al., 2016). Asimismo, hay que tener presente que ambos cálculos se han efectuado con medidas puntuales en algunos manantiales (Gandigüela, Pinedilla, Borbollón; Tabla 1) y que los valores medios proceden de datos tomados en periodos temporales distintos. El gradiente de temperatura en función de la altitud es  $-1,1 \text{ }^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$  altitud, superior al gradiente térmico ambiental calculado por Pita-López (2003) para toda la región Andaluza (de  $-0,33$  a  $-0,46 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ).



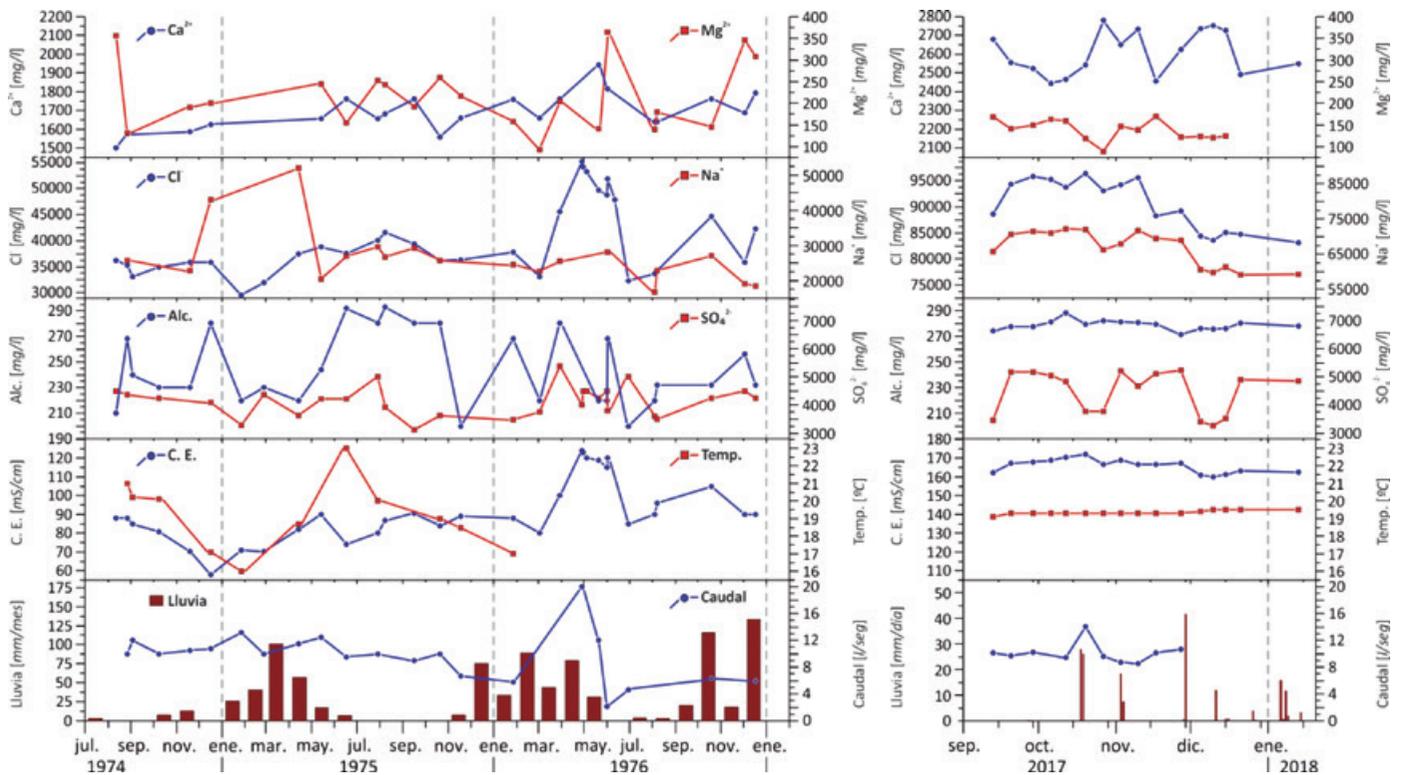
**Figura 2.** Relación entre la cota de surgencia de los manantiales pertenecientes al "Trías de Antequera" frente a la conductividad eléctrica (a) y temperatura (b) de sus aguas.

**Figure 2.** Statistical relationship between the springs located in the "Trías de Antequera" outcrops versus electrical conductivity (a) and temperature (b) of groundwater.

La figura 3 muestra la evolución temporal del caudal, de los parámetros físico-químicos y de los componentes químicos mayoritarios medidos en el agua drenada por el manantial principal de Meliones durante los periodos en los que ha sido posible su control. De manera complementaria, la figura 3 muestra también la evolución temporal de las lluvias mensuales y diarias registradas en la zona (Estación de Bobadilla) durante ambos periodos. Los resultados obtenidos entre 1974 y 1976 ponen de manifiesto una tendencia general descendente en los valores de caudal, desde 12 l/s (sep/1974) hasta 6,0 l/s (dic/1976). Dicha tendencia fue interrumpida por un aumento de caudal a comienzos de 1976 (valor máximo de 20 l/s), en respuesta a varios meses consecutivos de lluvias. Las variaciones en la descarga estuvieron acompañadas por un ascenso progresivo y general de los valores de mineralización del agua, desde 58,0 mS/cm (dic/1974) hasta 90,0 mS/cm (dic/1976). Los aumentos de caudal acaecidos en la primera mitad de 1976 coincidieron

con un aumento simultáneo de más de 40 mS/cm en los valores de conductividad eléctrica, para más tarde descender tras el cese de las precipitaciones. Estas variaciones en la mineralización del agua fueron debidas principalmente a cambios en los contenidos en Cl. En cambio, el caudal apenas varió como consecuencia de las lluvias que se produjeron a finales de 1976.

El control semanal de las respuestas naturales del manantial principal de Meliones, durante el periodo 2017/18 (Figura 3), revela una primera etapa caracterizada por el aumento gradual de los valores de salinidad (hasta 172,1 mS/cm), seguida por otra en la que se aprecia un declive general de dicho parámetro. Este cambio de tendencia parece estar controlado por el inicio del periodo otoñal de lluvias y la consecuente generación de escorrentía, que entra por los sumideros. Ello se deduce por el pico de caudal (14,1 l/s) y por los descensos de hasta 7,3 mS/cm (dic/2017) observados en los valores de mineralización como consecuencia de las lluvias, que fueron seguidos por subidas



**Figura 3.** Evolución temporal del caudal, conductividad eléctrica (C.E.), temperatura (Temp.), alcalinidad (Alc.) y de los principales componentes hidroquímicos medidos en el agua drenada por el manantial de Meliones entre agosto de 1974 y enero de 1977, respecto a las lluvias mensuales registradas durante el mismo periodo (izquierda), y entre septiembre de 2017 y enero de 2018 y las respectivas lluvias diarias para el mismo periodo (derecha).

**Figure 3.** Temporal evolution of the discharge rate, electrical conductivity (C.E.), water temperature (Temp.), alkalinity (Alc.), and the main hydrochemical components measured in the water drained by the Meliones spring, from August 1974 to January 1977, compared to accumulated monthly precipitation recorded during the same period (left), and between September 2017 to January 2018 with the daily rainfall for the same period (right).

pero que no lograron devolver al manantial al estado hidroquímico previo a los eventos de precipitación. Las variaciones en la mineralización del agua fueron provocadas por cambios en los iones analizados, pero con especial influencia de los solutos derivados de la disolución de halita. Por su parte, los valores de temperatura del agua se mantuvieron constantes o con pequeños ascensos en respuesta a las lluvias de diciembre 2017 – enero 2018.

## Discusión

Las características hidroquímicas de las aguas subterráneas del “Trías de Antequera” sugieren la existencia de una marcada complejidad hidrogeológica, razón que llevó a varios autores a proponer modelos conceptuales para explicar el funcionamiento hidrogeológico de éste y de otros afloramientos de los Complejos Caóticos Subbéticos. Calaforra y Pulido-Bosch (1999) relacionan la variabilidad hidroquímica con la concurrencia de movimientos halocinéticos, y los sistemas de fracturas asociados, los cuales influyeron de manera decisiva en la evolución geomorfológica e hidrogeológica del área de estudio, con el consiguiente aumento de la heterogeneidad y la compartimentación de los afloramientos en varios sistemas, más o menos independientes entre sí. Así, los puntos situados a mayor altitud y que drenan aguas con facies sulfatadas-cálcicas estarían relacionados con sistemas kársticos epigénicos desarrollados en enclaves donde predominan yesos, mientras que las surgencias salinas e hipersalinas lo estarían con flujos subterráneos más profundos y que interaccionan con los núcleos salinos de los diapiros (Calaforra, 2004). Salvo por el caso de los manantiales asociados al afloramiento de Los Hoyos, que constituye un buen ejemplo de este esquema de flujos (Calaforra y Pulido-Bosch, 1993; Gil-Márquez *et al.*, 2016), el resto de surgencias hipersalinas (Cañaveralejo, Meliones) se sitúan a cotas bajas en los límites de los afloramientos del “Trías de Antequera”, en torno al estrecho de Meliones, donde parecen definir un nivel de base. La existencia de estos manantiales, en especial el de Meliones, constituye una prueba para argumentar que el conjunto arcilloso-evaporítico se comporta como un único sistema regional cuyos flujos subterráneos van dirigidos, en última estancia, hacia los puntos ubicados a menor altitud (Figura 1). Este planteamiento sería compatible con el valor medio de descarga total (20 - 40 l/s) que brota en la garganta de Meliones y con las características físico-químicas del agua de sus manantiales (Figura 3), con los valores de mineralización y temperatura del agua más elevados de la

región. Estaría igualmente en consonancia con los resultados aportados por Carrasco (1986) sobre los valores isotópicos de la molécula del agua, que definen un área de recarga comprendida entre 400 y 800 m s.n.m. para el manantial de Meliones; rango de cotas que corresponde a las de los afloramientos del “Trías de Antequera”. Este autor presentó también datos de concentraciones de  $^3\text{H}$  y obtuvo valores más bajos en las aguas con facies de tipo clorurada-sódica que en el agua de las lluvias precipitadas después de 1957. No obstante, todas exhibían tritio de origen termonuclear, en mayor o menor proporción, de lo que pudo deducir mezcla entre aguas con diferentes orígenes y edades, anteriores y posteriores a ese año.

La información previa, junto con las observaciones efectuadas en otros enclaves de los Complejos Caóticos Subbéticos, llevó a Andreo *et al.* (2016) a presentar un nuevo modelo conceptual integral sobre el funcionamiento hidrogeológico del “Trías de Antequera”. Este modelo establece la existencia de un sistema jerarquizado de flujos subterráneos que abarca distintas longitudes y profundidades, desde las zonas topográficamente más elevadas (áreas de recarga) hasta las situadas a menor altitud (cauces, humedales y manantiales de agua salina, eventualmente más caliente y asociados a flujos regionales ascendentes). Pero, a diferencia de la hipótesis propuesta por Calaforra y Pulido-Bosch (1999) y Calaforra (2004), los aumentos en la mineralización del agua responderían, además de a la presencia masiva de halita en profundidad, al tiempo de interacción del agua con las rocas; factor principal que determinaría los procesos geoquímicos y la evolución de las aguas subterráneas a lo largo de las distintas líneas de flujo (Gil-Márquez *et al.*, 2017b). Así, las aguas con los valores de mineralización y temperatura más bajos y con facies bicarbonatada-cálcica estarían asociadas a flujos subterráneos próximos a la superficie y de corto recorrido, con las áreas de recarga y descarga próximas entre sí. El tiempo de residencia del agua en los materiales de los Complejos Caóticos Subbéticos sería breve. En el lado opuesto se encontrarían los flujos regionales con los tiempos de residencia más prolongados, que alcanzarían profundidades mayores y recorrerían distancias más largas. A lo largo de su recorrido, hasta converger en el estrecho de Meliones, el agua iría adquiriendo gradualmente más mineralización (por disolución de halita y yeso) y valores más elevados de temperatura. Entre los dos extremos existiría un tipo intermedio de flujo subterráneo, relacionado con las aguas del “Trías de Antequera”, que presentan características físico-químicas y facies hidroquímicas diversas, desde sulfatada-cálcica a clorurada-sódica, según el tiempo de residencia y la litología predominante en su recorrido

subterráneo. En este sentido, el uso combinado de diferentes técnicas hidrogeoquímicas, incluidos análisis de los principales componentes hidroquímicos e isotópicos del agua, así como modelización geoquímica a baja temperatura (modelo inverso), proporcionaría evidencias cuantitativas y fiables sobre las interacciones agua-roca y los procesos geoquímicos aquí deducidos. Así se ha podido contrastar en otros sistemas kársticos-evaporíticos de Andalucía (Gil-Márquez et al., 2016; 2017b). Asimismo, la aplicación de métodos para la datación de las aguas subterráneas, ha permitido verificar la existencia de flujos de largo recorrido en los Complejos Caóticos Subbéticos (Gil-Márquez et al., 2020).

En un primer momento, el modelo general de flujo propuesto por Andreo et al. (2016) se podría asemejar al modelo de flujo regional planteado por Tóth (1963, 1970) para grandes cuencas sedimentarias y con un nivel piezométrico próximo a la superficie del terreno. Este esquema fue ya usado por Memon et al. (1999) para explicar la presencia de surgencias y rezumes salinos en medios kársticos evaporíticos. Sin embargo, en detalle, dicho modelo no lograría explicar correctamente el funcionamiento hidrogeológico del entorno de los enclaves evaporíticos (localizados en el centro de domos diapíricos), al concurrir en ellos las consecuencias (geomorfológicas e hidrogeológicas) de los procesos de karstificación. Aunque los flujos regionales estén bajo la influencia de la topografía, la abundancia de formas preferenciales de infiltración y la heterogeneidad y anisotropía en la distribución espacial y temporal de las propiedades hidráulicas de los materiales (Ford y Williams, 2007) pueden repercutir localmente en la dirección y la velocidad de los flujos subterráneos. Esto ocurriría particularmente en el área de Gobantes (Figura 1), donde las aguas menos mineralizadas y de reciente infiltración (que fluyen rápidamente por los conductos de la zona no saturada) se mezclarían en la zona saturada con aguas más antiguas asociadas a flujos lentos, profundos y de mayor tiempo de residencia en el acuífero. Como se muestra en la figura 3, los estudios previos de Carrasco (1986) y Calaforra y Pulido-Bosch (1999), así como los informes técnicos realizados en la zona, advirtieron la existencia de aumentos simultáneos de caudal, salinidad y temperatura del agua durante los periodos de lluvias, con la consiguiente disminución tras las precipitaciones. Estas respuestas ante la recarga implican la participación de todo el acuífero, tanto de la zona no saturada como de la zona saturada, en su funcionamiento hidrogeológico. Así, el agua infiltrada que fluye por la primera moviliza hacia el manantial el agua previamente almacenada en la segunda zona, con mayor tiempo de residencia en el sistema y valores más

elevados de mineralización y temperatura. Sin embargo, el control de estos mismos parámetros en el manantial principal de Meliones en épocas más recientes parece indicar que el agua que se infiltra por los sumideros del entorno de Gobantes no causa siempre aumentos de salinidad; más bien al contrario, provoca ligeras diluciones, al menos en condiciones de aguas bajas y con lluvias dispersas y de pequeña magnitud. Esto sería coherente con procesos de mezcla de aguas con distintos tiempos de residencia, favorecidos por el marcado desarrollo de la karstificación en la zona no saturada.

## Conclusiones

Aunque los materiales del "Trías de Antequera" han sido considerados tradicionalmente como acuíferos pobres o acuitados, lo cierto es que presentan un comportamiento hidrogeológico complejo, como evidencian la presencia de humedales, dolinas, sumideros kársticos, manantiales y sondeos. Por lo general, las aguas subterráneas fluyen de un modo difuso y lento, debido al predominio de litologías con baja permeabilidad. Sin embargo, el desarrollo local de los procesos de disolución/karstificación confiere al conjunto arcilloso-evaporítico una considerable heterogeneidad hidrogeológica, sobre todo allí donde los enclaves evaporíticos adquieren mayores dimensiones.

La situación de los manantiales y humedales en los afloramientos del "Trías de Antequera" y las características físico-químicas de sus aguas parecen responder a un sistema jerarquizado de flujo regional controlado en última instancia por la gravedad, con flujos subterráneos de distintas escalas, desde las zonas topográficamente más elevadas (áreas de recarga) hasta las situadas a menor altitud (cauces, humedales y manantiales). La mineralización y la temperatura de las aguas subterráneas y la evolución geoquímica de sus facies a lo largo de las distintas líneas de flujo estarían determinadas, además de por las litologías predominantes, por el tiempo de interacción del agua con las rocas.

Este modelo, inspirado en el de Tóth, sería adecuado para explicar de manera aproximada el funcionamiento hidrogeológico y las características de los flujos subterráneos en el "Trías de Antequera". Sin embargo, en detalle, dicho modelo no lograría explicar correctamente el funcionamiento hidrogeológico del entorno de los enclaves evaporíticos, al concurrir en ellos las consecuencias geomorfológicas e hidrogeológicas de los procesos de karstificación y de los movimientos halocinéticos. Esto ocurre de manera particular en el área de Gobantes, donde el intenso

desarrollo de la karstificación funcional en la zona no saturada favorece la entrada y el flujo rápido de agua menos mineralizada hacia la zona saturada, donde se mezcla con aguas más antiguas asociadas a flujos lentos, profundos, ascendentes y de mayor tiempo de residencia en el acuífero, que fluyen por un medio de baja permeabilidad, antes de brotar por los manantiales de Meliones.

Dadas las implicaciones que las descargas salinas de Meliones tienen para la gestión de los recursos hídricos superficiales, serían necesarios estudios más detallados y con un enfoque multidisciplinar para profundizar en el conocimiento hidrogeológico del "Triás de Antequera" y validar el modelo conceptual de funcionamiento aquí propuesto. Sólo con un programa de investigación ambicioso se podrá cuantificar la dirección y la longitud de los flujos regionales de agua subterránea y establecer la edad de las diferentes componentes de la mezcla, mediante la utilización de técnicas hidrogeoquímicas, hidrodinámicas y de datación absoluta ( $^3\text{H}/^3\text{He}$ , CFC, etc.).

## Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del Grupo de Investigación RNM-308 de la Junta de Andalucía a los proyectos de Excelencia RNM-6895R y RNM-8087 de la Junta de Andalucía. Se agradece los comentarios constructivos del Profesor Javier Cruz San Julián y la Profesora Rosario Jiménez Espinosa.

## Referencias

- Andreo, B., Gil-Márquez, J.M., Mudarra, M., Linares, L. y Carrasco, F. 2016. Hypothesis on the hydrogeological context of wetland areas and springs related to evaporitic karst aquifers (Málaga, Córdoba and Jaén provinces, Southern Spain). *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 1–19.
- Blaney, H.F. y Criddle, W.D. 1950. *Determining Water needs From Climatological Data*. U.S.D.A. Soil Conservation Service. SOS –TP-, 8-9.
- Blumenthal, M. 1927. Versuch einer tektonischen Gliederung der betischen Cordillera von Central-und Südwest (Andalusien). *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 20, 487-532.
- Calaforra, J.M. 1998. *Karstología de yesos*. Monografías Ciencia y Tecnología, 3, Universidad de Almería –Instituto de Estudios Almerienses, 384 pp.
- Calaforra, J.M. 2004. *A conceptual model proposal to the Trias of Antequera Karst*. Workshop in Triassic sediments hydrogeology and its influence over wetland system functioning in the northern sector of the province of Málaga. IGME, Madrid, 45–47.
- Calaforra, J.M. y Pulido-Bosch, A. 1993. The hydrogeochemistry and morphology of the Triassic gypsum in the Salinas- Fuente Camacho area (Granada). En: Pulido-Bosch, A. (Ed.) *Some Spanish karstic aquifers*. Universidad de Granada, 67-83.
- Calaforra, J.M. y Pulido-Bosch, A. 1999. Gypsum karst features as evidence of diapiric processes in the Betic Cordillera, Southern Spain. *Geomorphology*, 29(3–4), 251–264.
- Carrasco, F. 1986. *Contribución al conocimiento de la cuenca alta del Río Guadalhorce. El medio físico. Hidrogeoquímica*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 435 pp.
- C.M.A. 2005. *Definición del Contexto Hidrogeológico de Humedales Andaluces*, 7 tomos. Documento interno inédito. EGMASA-Grupo de Hidrogeología de la Univ. de Málaga.
- Duran, J.J. y Molina, J.A. 1986. Karst en los yesos del triás de Antequera (Cordilleras Béticas). *Karstologia Memoires*, 1, 37-46.
- Ford, D.C. y Williams, P.W. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester, Reino Unido, 562 pp.
- Gil-Márquez, J.M., Mudarra, M., Andreo, B., Linares, L., Carrasco, F. y Benavente, J. 2016. Hydrogeological characterization of the Salinas-Los Hoyos evaporitic karst (Málaga province, S Spain) using topographic, hydrodynamic, hydrochemical and isotopic methods. *Acta Carsologica*, 45(2), 147–160.
- Gil-Márquez, J.M., Barberá, J.A., Mudarra, M., Andreo, B., Prieto-Mera, J., Sánchez, D., Rizo-Decelis, L.D., Argamasilla, M., Nieto, J.M. y de la Torre, B. 2017a: Karst development of an evaporitic system and its hydrogeological implications inferred from GIS-based analysis and tracing techniques. *International Journal of Speleology*, 46(2), 219-235.
- Gil-Márquez, J.M., Barberá, J.A., Andreo, B. y Mudarra, M. 2017b. Hydrological and geochemical processes constraining groundwater salinity in wetland areas related to evaporitic (karst) systems. A case study from Southern Spain. *Journal of Hydrology*, 544(1), 538–554.
- Gil-Márquez, J.M., Sültenfuß, J., Andreo, B., Mudarra, M. 2020. Groundwater dating tools ( $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ , CFC-12, SF6) coupled with hydrochemistry to evaluate the hydrogeological functioning of complex evaporite-karst settings. *Journal of Hydrology*, 580, 124263.
- Hargreaves, G. y Samani, Z. 1985: Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *American Society of Agricultural Engineering*, 1(2): 96-99.
- Martín-Serrano García, A. 1986: *Mapa geológico de España*. Serie Magna, 1:50.000, hoja nº 1023 (Antequera). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 48 pp.
- Memon, B.A., Patton, A.F. y Pitts, M.W. 1999. Control of naturally occurring brine springs and seeps in an evaporite karst setting. *Engineering Geology*, 52(1-2), 83–91.
- Molina, J.A. 1982. Los karst en yesos en la provincia de Málaga. *Revista 75 Aniversario Sociedad Excursionista de Málaga*, 95-112.

- Pérez-López, A. 1991. *El Trías de facies germánica del sector Central de la Cordillera Bética*. Tesis Doctoral de Universidad de Granada, 400 pp.
- Peyre, Y. 1974. *Géologie d'Antequera et de sa région (Cordillères bétiques, Espagne)*. Tesis Doctoral Universidad de Paris, 518 pp.
- Pineda-Velasco, A. 1983. *Mapa geológico de España*. Serie Magna, 1:50.000, hoja nº 1024 (Archidona). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 67 pp.
- Pita López, M.F. 2003. El clima de Andalucía. En: López-Ontiveros, A. (Coord.) *Geografía de Andalucía*. Ariel, Barcelona, 137-174.
- Sanz de Galdeano, C., Lozano, J. A. y Puga, E. 2008. El "Trías de Antequera": Naturaleza, origen y estructura. *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 21(3), 111-124.
- Staub, R. 1926. Gedanken zur Tektonik Spaniens. *Vierteljahrschr. de Naturforschender Gesellschaft*. Zürich, 71:196-261.
- Staub, R. 1934. Der Deckenbau Südspaniens in den Betischen Cordilleren. *Vierteljahrschr. de Naturforschender Gesellschaft*. Zürich, 79: 271-332.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- Tóth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geographical Research*, 68, 4795-4812.
- Tóth, J. 1970. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeological environment. *Journal of Hydrology*, 10, 164-176.
- Vera, J.A. y Martín-Algarra, A. 2004. Cordillera Bética y Balears. En: Vera, J.A. (Ed.) *Geología de España*. Sociedad Geológica de España-IGME, Madrid, 345-464.

Recibido: julio 2019

Revisado: noviembre 2019

Aceptado: enero 2020

Publicado: marzo 2021