

11 Aproximación hidrológica de siete manantiales kársticos de la Sierra de Espadán, Castellón

Hydrological approach of seven karstic springs in Sierra de Espadán, Castellón

Jesús Almela Agost^{1, 2}

¹ Espeleo Club Castelló. masdexiva@hotmail.com.

² Socio de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst.

Resumen

La sierra de Espadán forma parte de las últimas estribaciones del sistema Ibérico antes de llegar al mar Mediterráneo, tratándose de un área de importancia geoespeleológica donde encontramos algunas cavidades activas, entre ellas surgencias kársticas. Analizando la hidrodinámica, hidrogeotermia e hidrogeoquímica de siete surgencias durante el año 2022, se pretende realizar una aproximación hidrológica de cada una de ellas y de forma comparada. Esta información ayuda a comprender la organización del drenaje subterráneo y grado de desarrollo kárstico, que vienen condicionados por las estructuras geológicas y las cuencas de captación.

Abstract

Sierra de Espadán is part of the last foothills of the Iberian system before reaching the Mediterranean Sea, being an area of geospeleological importance, where we find numerous active cavities and karstic springs. Analyzing the hydrodynamics, hydrogeothermal and hydrogeochemistry of seven springs during the year 2022, it is intended to make a hydrological approximation of each one of them and in a comparative way. This information helps to understand the organization of underground drainage and the degree of karstic development, which are conditioned by geological structures and catchment basins.

Palabras clave: Karst mediterráneo, Sierra de Espadán, surgencias kársticas, hidrogeología.

Key words: Mediterranean karst, Sierra de Espadán, karst springs, hydrogeology.

INTRODUCCIÓN

Las cavidades y el karst de la Sierra de Espadán han sido objeto de numerosas exploraciones y publicaciones de carácter espeleológico en las últimas décadas. Han despertado su interés las cavidades activas, que forman pequeños ríos subterráneos, hecho prácticamente insólito en el karst Mediterráneo de la Comunidad Valenciana, donde aparecen con mayor frecuencia cavidades semiactivas o fósiles.

En la catalogación e inventario de cavidades en el sector de Espadán, en los últimos años se ha abordado desde una aproximación hidrológica, atendiendo a las subdivisiones hidrogeológicas o sistemas de drenaje, donde se estudian todas las cavidades de una misma cuenca hidrológica y con un punto de descarga común (Almela, 2021; Almela, 2023a; Almela, 2023b). Con ello nos aproximamos a la contextualización del acuífero kárstico, teniendo en cuenta todos los fenómenos implicados en el drenaje subterráneo, tanto activos, como semiactivos o también los fenómenos que componen el paleokarst (Palmer, 2012).

Las líneas que siguen, pretenden ser una aproximación hidrológica de siete surgencias kársticas, todas ellas relacionadas con cavidades de diferentes características, donde se han monitorizado durante el año 2022. Por tanto, la información de todas ellas comparada y analizada individualmente aporta información sobre sus características y organización del drenaje.

MARCO GEOLÓGICO Y ESPELOELÓGICO

La sierra de Espadán, junto con la vecina sierra Calderona, constituyen uno de los más extensos afloramientos triásicos de la península Ibérica (Garay, 2000). Ambas alineaciones montañosas quedan separadas por el valle que forma el río Palancia y representan las últimas estribaciones del Sistema Ibérico antes de alcanzar el mar Mediterráneo, por lo que en ella el relieve se



Figura 1. Vista de la vertiente sur de la sierra desde el pico Espadán (1.099 m). Al fondo se emplaza el valle que forma el río Palancia, con la población de Segorbe a la izquierda y Algimia de Almonacid a la derecha.

Figure 1. View of the southern slope of the sierra from the Espadán peak (1,099 m). In the background is the valley formed by the Palancia river, with Segorbe town on the left and Algimia de Almonacid on the right.

ubicará desde los 100 hasta los 1.100 metros, encontrando acusados desniveles (Fig. 1). Centrándonos en la sierra de Espadán, se ubica en el sur de la provincia de Castellón, entre los ríos Palancia y Mijares, formando un espacio de 39 kilómetros de longitud por 17 de anchura, con un eje principal NO-SE, donde se ubican las principales cumbres (Fig. 2). Parte de este territorio forma parte del Parque Natural, que agrupa 19 municipios, siendo el mayor Espacio Natural protegido de la Comunidad Valenciana.

Geológicamente en esta alineación montañosa aparece la serie triásica bien representada, con areniscas del Triásico inferior Buntsandstein, dolomías del



Figura 2. Mapa de la sierra de Espadán con las diferentes surgencias y sus zonas de influencia o cuencas de captación.

Figure 2. Map of Sierra de Espadán with different upwellings and their areas of influence or catchment basins.

Muschelkalk, y finalmente las margas y yesos del Triásico superior Keuper. En la periferia de la sierra aparecen numerosos afloramientos jurásicos (Gutiérrez & Pedraza, 1973), a modo de elevaciones aisladas, que a nivel espeleológico quedan en un segundo plano (Fig. 3). Asimismo, la presencia de un anticlinorio dirección

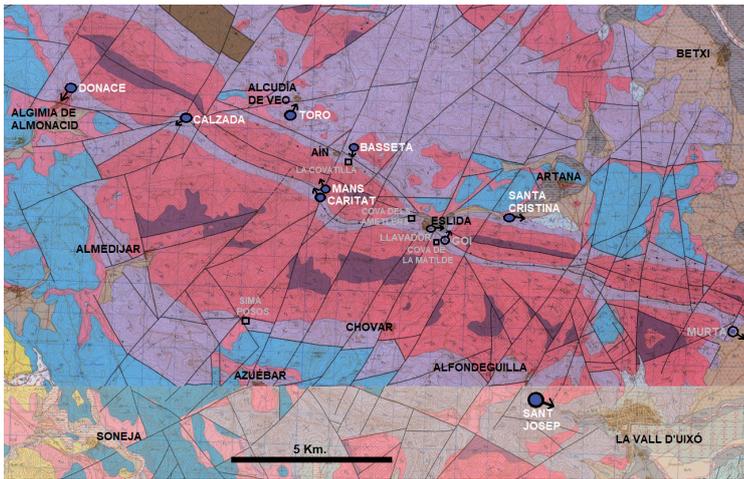


Figura 3. Mapa geológico escala 1:50.000 (Gutiérrez & Pedraza, 1973) con la ubicación de las surgencias citadas en la tabla I y las cavidades activas más interesantes.

Figure 3. Geological map scale 1:50.000 (Gutiérrez & Pedraza, 1973) with the location of the upwellings mentioned in table I and the most interesting active cavities.

ONO-ESE acompañado por una densa red de fallas de distintas direcciones, da lugar a un mosaico de dovelas, con superficies relativamente pequeñas, que provoca una compartimentación del territorio y de las zonas de descarga, como se aprecia en el sector estudiado.

En el sector más oriental de la sierra de Espadán es donde se encuentran el mayor número de cavidades activas, tanto surgencias permanentes o temporales, como simas con pequeños cursos activos. También cavidades colgadas decenas de metros por encima de los cauces actuales, cuyos sedimentos y espeleotemas señalan su pasado activo, estando ahora desconectadas del acuífero. En este trabajo se analizan con mayor detalle siete surgencias, todas ellas relacionadas con diferentes cavidades (1 a 7 de la tabla I) y ubicadas en un espacio de unos 125 km². En la descripción del sector también se incluyen algunas de las cavidades más relevantes, que, aunque queden fuera de los límites del trabajo (8 a 10 de la tabla I), ayudan a contextualizar el karst del Espadán.

El valle que forma el Barranc d'Eslida y que une las poblaciones de Aín, Eslida y Artana, aguas abajo se une al riu Anna. En su parte intermedia se encuentran la Font de Santa Cristina (Artana) que constituye el nivel base del denominado sistema kárstico Aín – Artana (Almela, 2021), abarcando un impluvio

de 22,7 km² y donde quedan implicadas cavidades activas como La Covatilla (Aín) y la Cova dels Ametlers (Artana), y muchas otras fósiles, desconectadas de la circulación actual y elevadas decenas de metros sobre el nivel base actual.

Dentro del impluvio de la Font de Santa Cristina se encuentran otros manantiales kársticos que lo alimentan, también relacionados con cavidades y que al mismo tiempo forman pequeños sistemas kársticos o puntos de descarga. En las inmediaciones de la población de Eslida se encuentran los manantiales temporales del Llavador y Motor de Goi, relacionados con la Cova de la Matilde y el sondeo que abastece a la población (Almela, 2020; Domínguez, 2014).

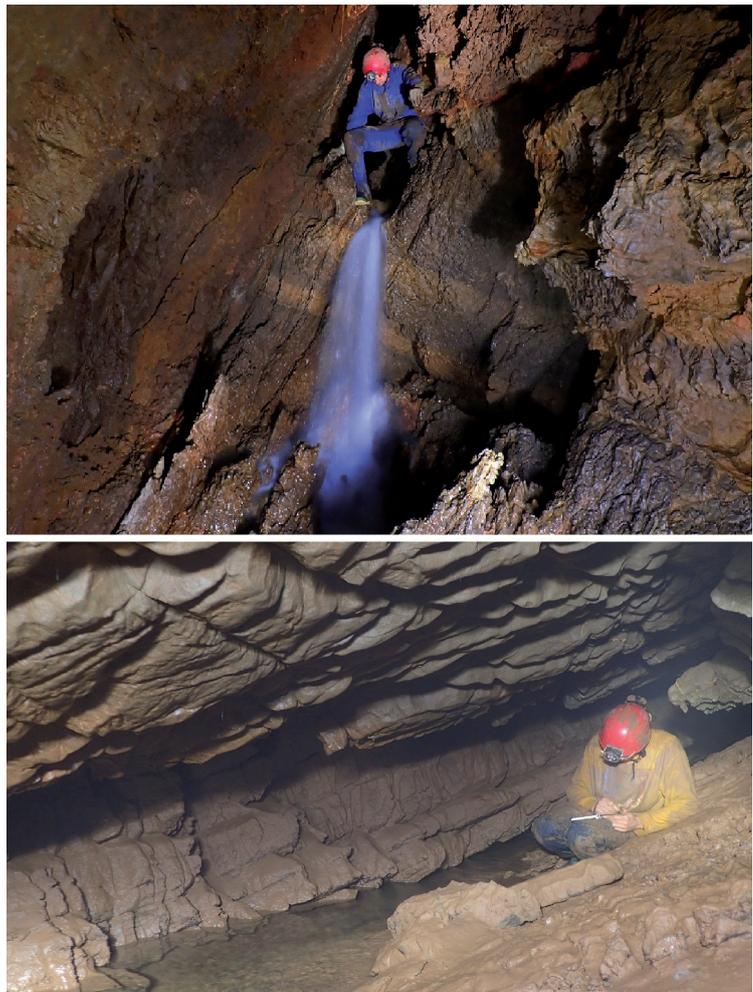
Aguas arriba, cerca de Aín se desarrolla el manantial de la Font de la Basseta, con un trop plein elevado 1,5 metros sobre la fuente y 5 metros por encima de este, las cavidades fósiles de les Coves del Bou y el Gat.

Al sur de la población de Aín, pero en un afloramiento dolomítico diferente al anterior se encuentran las surgencias activas de la Cova de les Mans y la Font de la Caritat (Almela, 2023a), separadas entre ellas a 120 metros, que aportan sus aguas al barranc d'Eslida y a la captura que forma el río subterráneo de La Covatilla, que presenta relación directa con la Font de Santa Cristina (Fig. 4).

En la vecina población de Alcudia de Veo, ya dentro de la vertiente hidrológica del río Veo, tributario del riu Sonella y posteriormente riu Anna, se encuentra la conocida Cueva del Toro, ubicada en el barranco de la Chelva (Fig. 4). Esta surgencia recoge las aguas de la vertiente norte del pico Espadán. La cavidad está formada por la surgencia activa y una segunda entrada que forma un nivel fósil, con un desarrollo total de 848 metros. Además de la cavidad principal, aparecen otras pequeñas cavidades fósiles emplazadas por encima del dren activo.

En la otra vertiente del pico Espadán que vierte sus aguas al río Palancia, se emplazan otras dos surgencias, dentro del término municipal de Algimia de Almonacid. El manantial de la Calzada se ubica por debajo del collado de la Nevera y pico de Espadán, drenando un estrecho afloramiento de dolomía. Por encima del manantial principal se emplazan hasta 4 salidas temporales, siendo la más elevada la Cueva del Camino de la Alcudia-2. Aguas abajo de la rambla del Almarche y en las inmediaciones de Algimia de Almonacid se ubica la Fuente Donace, que mana de una cavidad sumergida donde se han explorado 140 metros con medios de espeleobuceo. Esta dreña parte de la vertiente sur del pico de la Rápita.

También en la vertiente sur de la sierra, pero más hacia el este se encuentra la sima Posos (Azuébar), extensa cavidad, que tras su desarrollo vertical inicial da paso a una red con un curso activo y numerosos aportes temporales con más de 6 kilómetros de recorrido explorado y que parece drenar hacia alguna de las surgencias inmediatas al cauce del río Palancia (Almela, 2023b). Más hacia el este y en contacto con la llanura litoral se desarrollan los Coves de Sant Josep (La Vall d’Uixó), cavidad surgente de 3 kilómetros de desarrollo acondicionada



parcialmente para el turismo y que en importantes crecidas puede alcanzar puntas en torno a 8 m³/s (Garay, 2000). Finalmente,

Figura 4. Arriba: cascada en la Cueva del Toro. Abajo: Tramo río arriba de La Covatilla.

Figure 4. Above: waterfall in Cueva del Toro. Below: Upstream section of La Covatilla.

Tabla I. Listado de las principales surgencias kársticas de la sierra de Espadán con su cota y extensión de su cuenca de captación o impluvio kárstico. Dentro de su cuenca suelen estar en relación con cavidades de diferente tipo: activas, semiactivas o fósiles, formando un paleokarst.

Table I. List of the main karstic springs of Sierra de Espadán with their height and extension of their catchment basin or karstic impluvium. Within their basin they are usually in relation to cavities of different types: active, semi-active or fossil, forming a paleokarst.

SURGENCIA/CAVIDAD	COTA SURGENCIA	ENDOKARST RELACIONADO			CUENCA DE CAPTACIÓN (km ²).
		activo	semiactivo	paleokarst	
1- Font de Santa Cristina	274	X	X	X	22,7
2- Font de la Basseta	484			X	0,9
3- Font de la Caritat	530	X		X	2,9
4- Cova de les Mans	519	X		X	2,9
5- Cueva del Toro	440	X		X	5,3
6- Manantial de la Calzada	585		X	X	2,6
7- Fuente Donace	475	X			5,5
8- Coves de Sant Josep	139	X	X	X	32,0
9-Font de Murta	73		X		4,0
10-Motor de Goi/ Font del Llavador	442	X	X	X	3,1

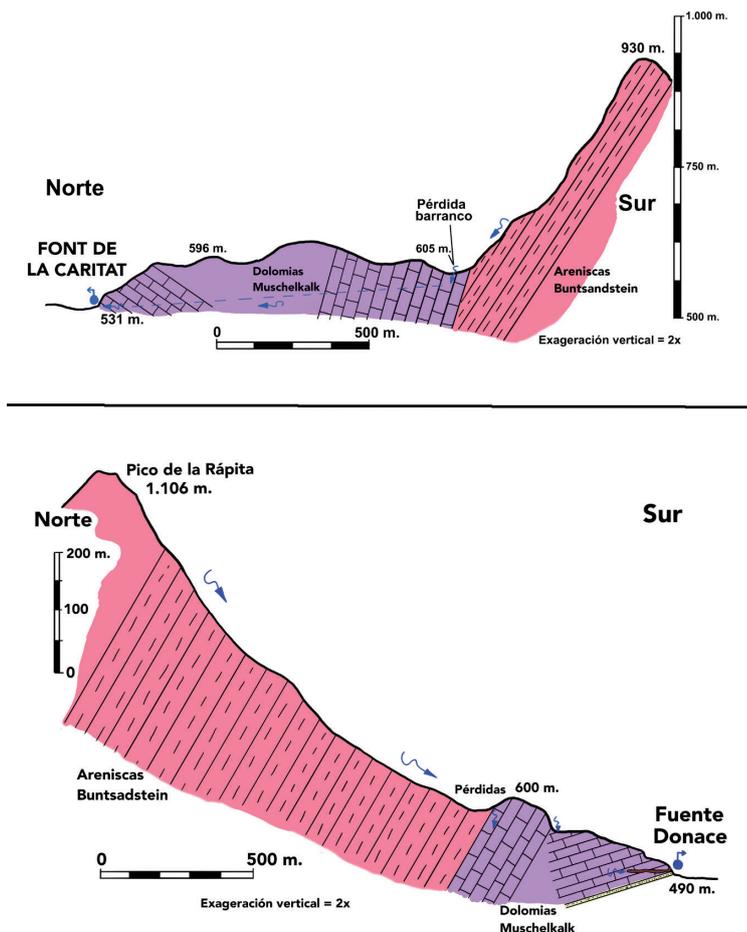


Figura 5. Corte geológico típico de las surgencias descritas, con areniscas en las partes superiores y dolomías en las cotas inferiores, donde tiene lugar el desarrollo de cavidades. Arriba: Cuenca de captación de la Font de la Caritat y abajo de la fuente Donace.

Figure 5. Typical geological section of the described upwellings, with sandstones in the upper parts and dolomites in the lower levels, where the development of cavities takes place. Above: Catchment basin of Font de la Caritat and below Donace fountain.

también en el límite con la llanura litoral pero más al norte, encontramos la Font de Murta (Nules), surgencia temporal que mana del interior de una pequeña cavidad.

El escenario de las surgencias o cavidades activas ahora descritas responde a un mismo patrón geológico. Los afloramientos de dolomías donde se desarrollan las cavidades, generalmente se presentan en forma de barras con un acusado buzamiento que en ocasiones tienden a la verticalidad, ubicándose en cotas más bajas, mientras que los de arenisca son los que forman las cumbres más elevadas, estableciendo laderas con pendientes muy pronunciadas. En todos los casos expuestos nos encontramos ante sistemas binarios. La cuenca de captación o impluvio kárstico queda formada mayormente por areniscas, descendiendo los barrancos hacia las zonas inferiores

donde encontramos los afloramientos dolomíticos (Fig. 5). Este escenario hace que en los contactos de materiales encontremos numerosas pérdidas que representan puntos de alimentación para las surgencias y que tienen gran interés en el funcionamiento de estas durante las crecidas.

Atendiendo a la sectorización hidrogeológica establecida en el dominio Triásico de Espadán-Calderona, mediante unidades de drenaje (Garay, 2000), las surgencias antes expuestas quedan de la siguiente manera: en la unidad de drenaje Aín-Eslida, encontramos la Font de Santa Cristina, la Font de la Basseta, la Font de la Caritat, cova de les Mans y las surgencias temporales del Llavador, Motor de Goi y Font de la Murta. En la unidad de drenaje de Alcudia de Veo encontramos la Cueva del Toro, que limitaría por el sureste con la anterior y al suroeste con la unidad de Algimia de Almonacid, donde encontramos el manantial de la Calzada y la fuente Donace. Al sur de las anteriores unidades de drenaje se desarrolla la extensa unidad Castellnovo-Azuébar, donde se abre la sima Posos, y limitando con esta por el noreste, la unidad de drenaje Alfondeguilla-Sant Josep, cuyo punto principal de descarga son los Coves de Sant Josep.

MATERIALES Y MÉTODOS

El conocimiento del karst se puede abordar desde tres puntos de vista (Mangin, 1975; Freixes, 1993) que aportaran información en diferentes campos. El punto de vista geomorfológico es el que describe las formas del karst y los clasifica en función del clima, centrándose en el exokarst. El punto de vista espeleológico describe las cavidades subterráneas accesibles, estudiando los procesos geológicos que las formaron. Esta aproximación tiene una visión reduccionista, ya que los conductos explorados suponen alrededor de un 0,2%, mientras que la estructura de los vacíos que forma un acuífero kárstico puede alcanzar el 15% o valores superiores. Finalmente, el punto

Tabla II. Datos de pluviometría de 2022 de las diferentes localidades inmediatas a la zona de estudio, obtenidas de AVAMET (<https://www.avamet.org/>).

Table II. 2022 rainfall data of different localities close to the study area, obtained from AVAMET (<https://www.avamet.org/>).

Estación	Acumulado anual (mm)	Máximo diario (mm)	Nº de días precipitación más de 20 mm	Episodio precipitaciones (mm)			
				19 al 26 de marzo	12 a 14 abril	3-4 de mayo	12-13 de noviembre
Eslida	1.339,4	374,0	15	611,0	79,4	84,0	114,2
Aín	1.124,6	251,4	14	472,8	67,0	79,4	146,4
Alcudia de Veo	1.159,8	238,2	12	477,3	55,5	86,1	160,3
Algimia de Almonacid	741,4	147,6	11	280,7	33,2	44,9	45,0

de vista hidrológico, que reconoce el karst como un acuífero, donde la circulación de las aguas es el proceso fundamental. El acuífero kárstico presenta unas particularidades que lo definen, teniendo gran protagonismo para su estudio los puntos de descarga o surgencias. Esta visión hidrológica es con la que pretendemos abordar el conocimiento de estas surgencias.

El estudio de la hidrología de las diferentes surgencias, se ha abordado desde la aproximación funcional, donde se tienen en cuenta diferentes variables como la hidrodinámica, hidrogeotermia e hidrogeoquímica. Durante el año 2022 se han monitorizado las siete surgencias con un control sistemático mediante una regularidad quincenal, aunque en los episodios de aguas altas este control ha sido más frecuente, para reconocer los cambios en la química y temperatura del agua y su relación con las aguas meteóricas. Asimismo, también se han prospectado en busca de pérdidas, comprobando en algunos casos el tiempo de funcionamiento, así como la visita de algunas cavidades para observar su relación con el drenaje o tiempo de actividad en el caso de ser surgencias temporales.

Referente a la fase de estudio de estas surgencias, únicamente se ha localizado información puntual de sus diferentes parámetros, sin conocer la evolución de estos a lo largo de un periodo prolongado (Morell, 1992; Garay, 2000; Domínguez, 2014), por lo que la información obtenida ahora resulta novedosa y constituye una

aproximación inicial en el estudio de estos sistemas kársticos. Siguiendo la propuesta de la secuencia de fases de estudio de los medios kársticos, propuesta por Crochet y Marsaud (Crochet & Marsaud, 1997) nos encontraríamos en la fase 1 que corresponde con la identificación de la presencia de reservas, así como una caracterización de los parámetros básicos de conductividad y temperatura.

Sobre las precipitaciones registradas en las diferentes localidades, han sido obtenidas de los datos disponibles de Avamet (Asociación Valenciana de Meteorología) que dispone de registros en Eslida, Aín, Alcudia de Veo y Algimia de Almonacid (Tabla II). Comparando los registros se aprecia como en la parte norte de la sierra las precipitaciones son más abundantes. En marzo, abril, mayo y noviembre se registraron cuatro eventos de precipitaciones que suponen entre un 55 y 68% del total anual. Es decir, en tan solo 15 días se recoge gran parte de las precipitaciones anuales, quedando las restantes en periodos más aislados, siendo mucho menos representativos y con menor influencia en los manantiales kársticos.

RESULTADOS

Hidrodinámica.

Se ha analizado la evolución de los diferentes caudales, que al tratarse de manantiales escogidos de forma discriminada y por tanto de carácter kárstico y relacionados con cavidades, todos presentan cambios



Figura 6. Diferentes rebosaderos o *trop plein* en actividad: A, Manantial superior de la Font de la Basseta, por encima las entradas de les Coves del Bou y del Gat. B, Manantial superior de la Font de Santa Cristina, acondicionado a principios del siglo XIX. C, Entrada de la cueva del camino de Acudía-2 en actividad.

Figure 6. Different overflows or *trop plein* in activity: A, Upper spring of Font de la Basseta, above the entrances of Coves del Bou and Gat. B, Upper spring of Font de Santa Cristina, conditioned at the beginning of the 19th century. C, Cave entrance on camino de Acudia-2 in activity.

bruscos como respuesta a las crecidas (Tabla III). De los siete manantiales estudiados, tres de ellos tienen salidas temporales o *trop plein* ubicados pocos metros por encima de las surgencias que establecen el nivel base, que mantienen una duración más o menos prolongada tras intensas precipitaciones (Fig. 6). En la crecida de marzo el manantial superior de la Font de Santa Cristina permaneció activo durante 8 semanas. En el manantial de la Calzada, se localizaron cuatro salidas temporales. La cueva del camino de Alcudia-2, que se ubica 4 metros sobre la surgencia, estuvo unos 6 días activa, mientras que otro pequeño rebosadero ubicado 2 metros por encima del manantial principal no cesó hasta pasadas 8 semanas. También el *trop plein* superior de la Font de la Basseta permaneció activo durante 10 semanas.

Sobre los datos obtenidos, se aprecia como el máximo de caudal para todos los manantiales ha tenido lugar en la crecida marzo, mientras que los mínimos de caudal se registran en enero. Se observan dos tipos de surgencias (Fig. 8) en función del volumen de descarga; un primer grupo con caudales medios más o menos importantes y que experimentan crecidas con puntas en torno a 1 m³/s o superiores. En este grupo encontramos la Font de Santa Cristina con

caudales máximos de 2,5 m³/s, Cueva del Toro con 1,8 m³/s, Font de la Caritat 0,95 m³/s y Fuente Donace 0,85 m³/s (Fig. 7). Todos son aprovechados de manera directa o indirecta para el abastecimiento de las localidades inmediatas. El otro grupo está formado por manantiales con un caudal más modesto y que con motivo de una sequía muy prolongada pueden llegar a secarse. Estos son la Font de la Basseta, Cova de les Mans y manantial de la Calzada, con un caudal base escaso y un máximo que apenas supera los 50 l/s en grandes crecidas.

Los hidrogramas analizados presentan puntas muy marcadas, con decrecidas rápidas que muestran una duración entre 2 y 6 días y agotamientos más aplanados. En este aspecto, todos los manantiales comparten unas características comunes, que en cada caso vienen matizados por aspectos particulares como la extensión de su cuenca. Estas puntas alcanzadas en las crecidas, posiblemente señalen la influencia de una recarga rápida que se origina fundamentalmente en las pérdidas de los diferentes cauces de barrancos. La Font de Santa Cristina, a diferencia de las otras surgencias, es el manantial que responde ante eventos menores, experimentando pequeñas crecidas ante precipitaciones de entre 10 o 20 litros en 24 horas. En las otras surgencias estas precipitaciones menores apenas tienen incidencia. En el caso de las 4 crecidas acontecidas en 2022 (Tabla II), se aprecia como las crecidas de abril y mayo quedan influenciadas por el episodio excepcional de marzo y, por el contrario, el episodio de noviembre, que acontece tras un largo periodo seco apenas tiene incidencia, a pesar de registrarse mayores precipitaciones. En esta crecida de noviembre también se nota una diferencia entre la Font de Santa Cristina respecto al resto de manantiales, donde tiene una repercusión importante en Santa Cristina, alcanzando un caudal 1,3 m³/s, mientras que en las otras surgencias la crecida no resulta tan notable. Cabe recordar

que la cuenca de captación de Santa Cristina es mayor que en el resto de los manantiales (Tabla I).

En la comparativa de los caudales, un hecho que resulta paradigmático es el funcionamiento tan dispar de las surgencias de Mans y Caritat, que se ubican a escasos metros una de la otra y los conductos de la cova de les Mans quedan 6 metros por debajo de los de la Font de la Caritat. Interpretamos que actualmente forman parte de sistemas diferentes, aunque en el pasado podemos suponer que existiría una relación hidrológica entre ambas (Almela, 2023).

Hidrogeotermia.

En la interpretación de los datos de temperatura es importante fijarnos en las cotas de las surgencias, que se ubican entre 274 y 585 metros, con cerca de 300 metros de diferencia (Tabla I). En general la evolución de la temperatura presenta un marcado carácter estacional, estando afectada por las temperaturas exteriores, que parecen obedecer al gradiente marcado por la cota. Evidentemente, las variaciones más significativas vienen condicionadas por las crecidas, que provocan en las surgencias cambios bruscos de temperatura.

Las temperaturas medias oscilan entre 14,5°C del manantial de les Mans y 16,2°C de la fuente Donace (Tabla III). Respecto a las mínimas, coinciden todas en la crecida de marzo menos en la Font de la Basseta, que tiene lugar tras la crecida de abril. En los máximos de temperatura existe variación, ubicándose entre agosto y noviembre, correspondiendo con la fase de agotamiento, donde suponemos que se alcanza un equilibrio térmico entre la roca y el agua. En agosto las máximas se alcanzan en Mans y Donace; en septiembre la Caritat; en octubre para Calzada y en noviembre para Santa Cristina, Toro y Basseta.

La recuperación de la temperatura presenta una estrecha relación con el caudal, siendo



más rápida para la Font de la Basseta y la Cova de les Mans, entre 2 y 3 semanas. Unas 10 semanas para el manantial de la Calzada y para el resto de las surgencias la recuperación tarda alrededor de 14 semanas. La temperatura evoluciona más rápido para las surgencias con menor entidad y más lento para el resto, que son las que presentaran mayores reservas.

Respecto a la amplitud de temperatura (Tabla IV), el manantial de la Calzada es el que presenta una variación más estrecha, con 1,5°C, mientras que la Font de la Basseta presenta la máxima amplitud de temperatura con 4,4°C. Sobre las curvas de frecuencia de las temperaturas, los manantiales de Mans y Basseta son marcadamente polimodales. Por otro lado, se podrá clasificar a los manantiales del Toro, Santa Cristina, Calzada y Caritat, como bimodales, con una moda muy marcada, que supera el 30%, y otra mucho menos marcada. El caso de Donace, se podrá considerar a caballo entre polimodal y bimodal. Las frecuencias unimodales suelen señalar escasa o nula karstificación, propia de acuíferos fisurados, mientras que las bimodales y polimodales señalan una mejor organización del drenaje, propia de acuíferos kársticos.

Figura 7. Manantiales durante la crecida de marzo. A, Cueva del Toro, B, Manantial intermedio de Santa Cristina uniéndose sus aguas a las del barranc d'Eslida. C, Fuente Donace.

Figure 7: Springs during March's flood. A, Cueva del Toro, B, Intermediate spring of Santa Cristina joining its waters to those of Eslida ravine. C, Fuente Donace.

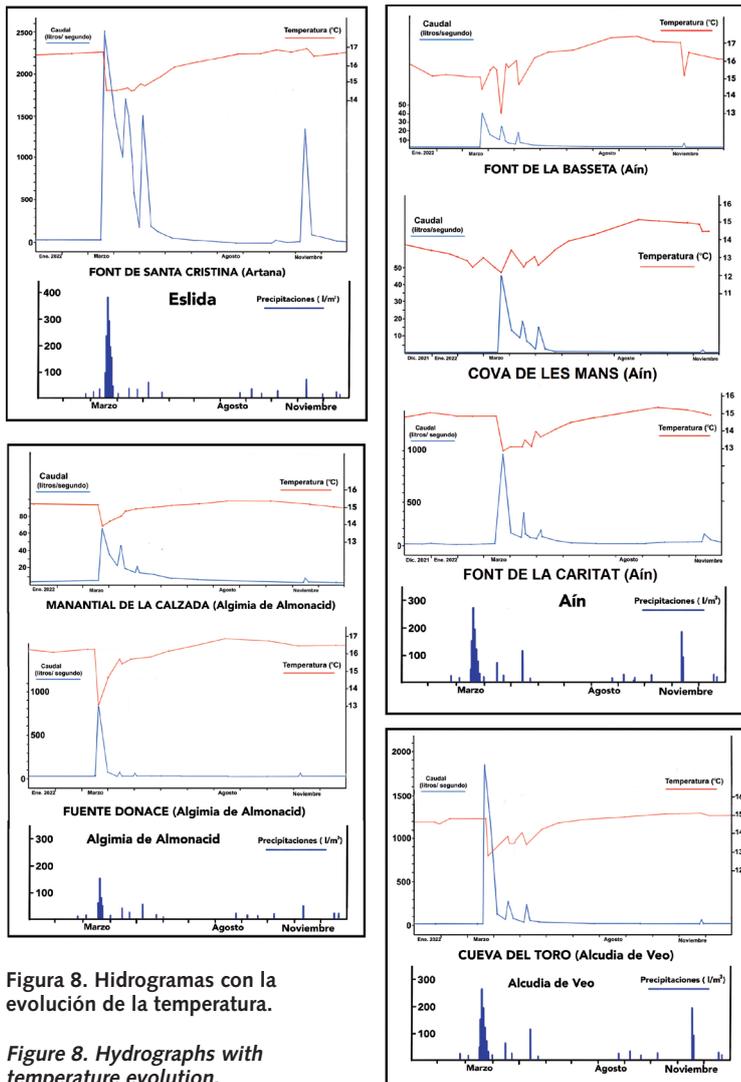


Figura 8. Hidrogramas con la evolución de la temperatura.

Figure 8. Hydrographs with temperature evolution.

Hidrogeoquímica.

Como expresión indirecta del contenido mineral de las aguas, se ha analizado la conductividad eléctrica como valor globalizador que se obtiene de la mineralización. Esta nos informa del funcionamiento y el grado de organización o desarrollo de un sistema kárstico (Mangin, 1975; Freixes, 2020). En el análisis de las curvas de conductividad a lo largo del año, se aprecia la influencia de las precipitaciones, donde el agua de lluvia que presenta una conductividad más baja se mezcla con la del acuífero, y como resultado las aguas drenadas por los manantiales tendrán una determinada respuesta, según el grado de organización, características de la zona

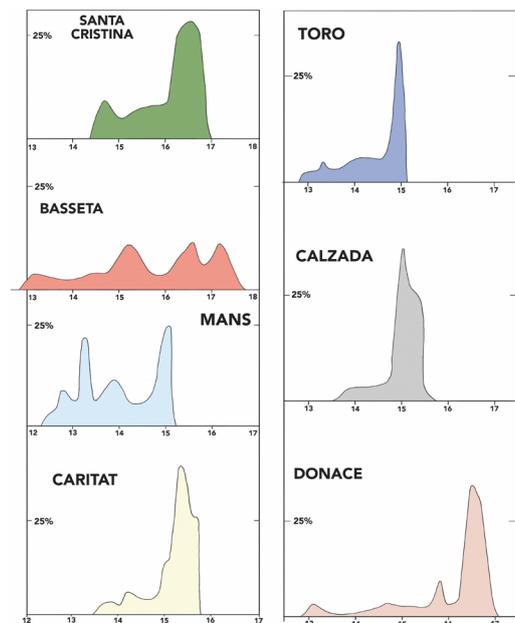


Figura 9. Frecuencias de la temperatura en los diferentes manantiales.

Figure 9. Frequencies of the temperature in different springs.

inundada, las reservas presentes o la eficiencia de las pérdidas, entre otros factores.

Por tanto, los mínimos de conductividad en todas las surgencias se han alcanzado durante la crecida de marzo, mientras que los máximos en periodo de estiaje, que en todos los manantiales tiene lugar en enero o febrero (Fig. 10). En estiaje, los valores más elevados los ha presentado la Fuente Donace, con 780 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y el manantial de les Mans con 731 $\mu\text{s}/\text{cm}$. En los mínimos de conductividad destacan los 128 y 179 μs del manantial de les Mans y la cueva del Toro respectivamente, que son valores similares o sensiblemente superiores a los registrados en los barrancos exteriores durante las crecidas. Respecto a las conductividades medias han oscilado entre los 373 $\mu\text{s}/\text{cm}$ de la Font de la Caritat y los 651 de Donace. Referente a la evolución de la conductividad tras una crecida, en prácticamente todos los manantiales se ha podido verificar un pequeño efecto retardado en el descenso de los valores, de entre uno y dos días. En la posterior decrecida y agotamiento, donde

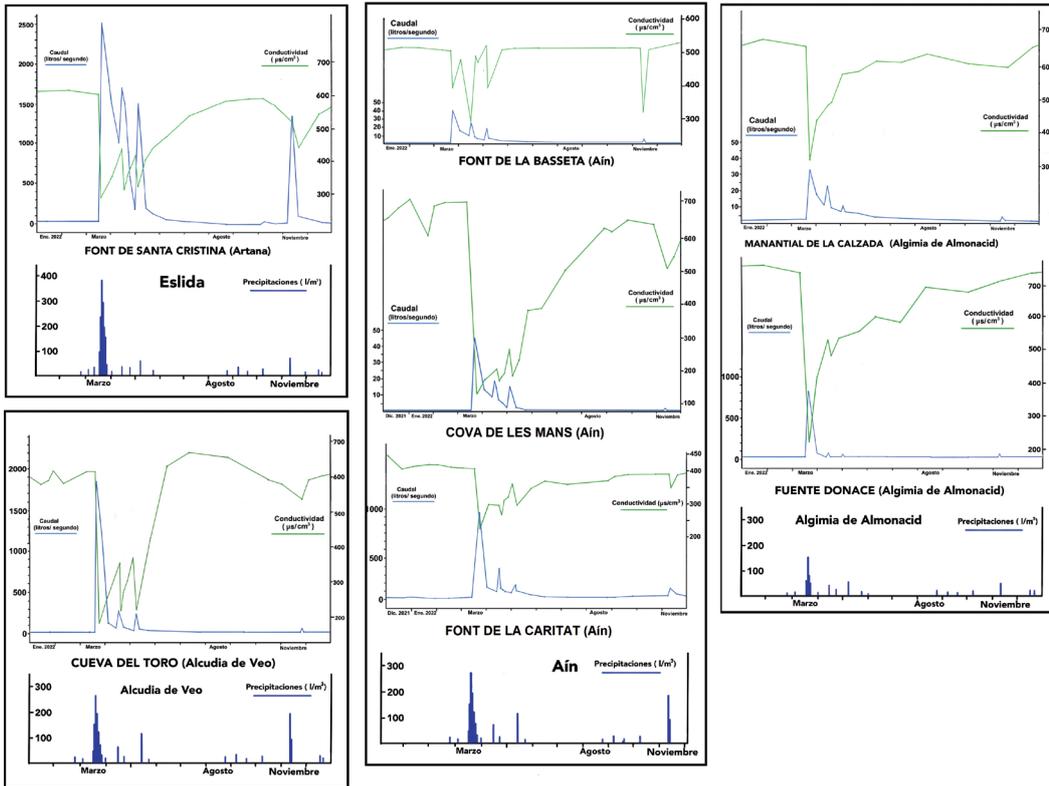


Figura 10. Hidrogramas con la evolución de la conductividad.

Figure 10. Hydrographs with conductivity evolution.

tiene lugar la recuperación de los valores de la conductividad hasta estabilizarse, se notan algunas diferencias entre los siete manantiales. En la Font de la Basseta la estabilización es muy rápida, entre 3 y 5 días, en Caritat sobre 15 días. En la cueva del Toro tardó 45 días, en el manantial de la Calzada sobre 50 días, en Donace unos 70 días, en Santa Cristina 3 meses y en el manantial de les Mans, 5 meses. Volvemos a notar un gran contraste entre las surgencias de Mans y Caritat, ya apuntado anteriormente en la hidrodinámica.

Analizando la amplitud de la conductividad (Tabla IV), destacan los valores del manantial de les Mans, en 603 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y la fuente Donace, con 555 $\mu\text{s}/\text{cm}$, con valores muy altos en estiaje y muy bajos en crecida, además presentar una recuperación muy lenta de la conductividad después de las crecidas. Por el contrario, los valores más estrechos corresponden en la vecina Font de la Caritat con 219 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y la Font de la Basseta, con 241 $\mu\text{s}/\text{cm}$, que son en las que la recuperación de la conductividad ocurre

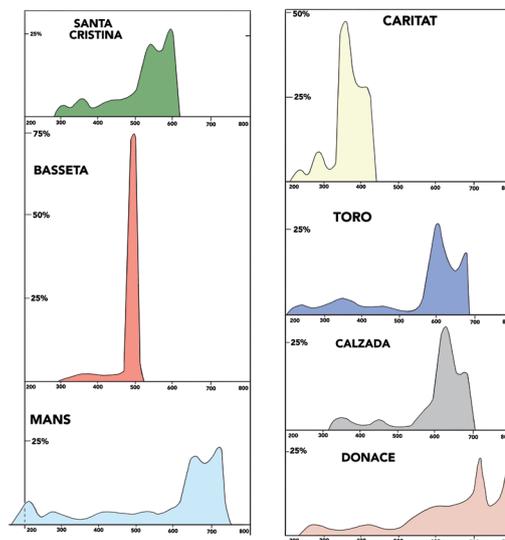


Figura 11. Frecuencias de la conductividad de los diferentes manantiales.

Figure 11. Frequencies of conductivity in different springs.

más rápido.

Aplicando las frecuencias de la conductividad, las de tipo unimodal representan a los acuíferos fisurados, mientras que las polimodales son acuíferos con un mayor grado de karstificación (Fig. 11) (Bakalowicz, 1979; Freixes, 2020). En estos casos, se encuentran manantiales marcadamente polimodales, donde la moda más frecuente

Tabla III. Información sobre la hidrodinámica, hidrogeotermia e hidrogeoquímica de los siete manantiales durante el año 2022.

Table III. Information on the hydrodynamics, hydrogeothermal and hydrogeochemistry of seven springs during the year 2022.

Manantial	Caudal (litros/segundo)			Temperatura (°C)			Conductividad (µs/cm)		
	máxima	mínimo	medio	máxima	mínima	media	máximo	mínimo	medio
Santa Cristina	2.500	29,3	241	16,9	14,5	16,1	617	280	525
Basseta	40	0,1	1,7	17,4	13,0	16,0	534	293	501
Caritat	950	14,0	55,3	15,8	13,4	15,4	442	223	373
Mans	45	0,001	0,2	15,2	12,2	14,5	731	128	545
Toro	1.800	4,0	46,0	15,1	12,9	14,7	677	179	552
Calzada	60	1,5	5,2	15,3	13,8	14,9	685	312	602
Donace	850	5,1	28,7	17,0	13,2	16,2	780	225	651

Tabla IV. Amplitud de los valores de temperatura y conductividad para los siete manantiales.

Table IV. Range of temperature and conductivity values for the seven springs.

Manantial	Amplitud temperatura (°C)	Amplitud conductividad (µs/cm)
Santa Cristina	2,4	337
Basseta	4,4	241
Caritat	2,4	219
Mans	3,0	603
Toro	2,2	498
Calzada	1,5	370
Donace	3,8	555

no suele superar el 25%, exceptuando la moda de la Font de la Caritat, con un 45%. En el otro extremo destaca la Font de la Basseta, con una moda muy marcada, con tendencia a unimodal, que supone cerca de un 75% ubicada sobre 510 µs y con otra mucho menor, que podría señalar la escasa organización del drenaje o karstificación.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos han permitido realizar una aproximación al conocimiento hidrológico del karst del Espadán. La evolución de los diferentes parámetros muestreados ha puesto de manifiesto su grado de karstificación, que responde a una organización del drenaje más o menos eficiente. El clima Mediterráneo, con

largos estiajes y precipitaciones intensas y concentradas condiciona los ciclos hidrológicos. Creemos que las cuencas de captación, por lo general reducidas, limitan las descargas, presentando en los largos estiajes caudales bajos. Nos encontramos ante sistemas kársticos de tipo binario, que presentan un esquema bien definido, que está condicionado por la cuenca de captación de areniscas y el emplazamiento de las dolomías en cotas más bajas. Las entradas al sistema tienen lugar mediante pérdidas, generalmente de carácter temporal y ubicadas en los lechos de los barrancos que mediante una infiltración rápida generan una escorrentía subterránea que drenará hacia las surgencias (Fig. 12). Estos puntos de descarga suelen albergar un endokarst activo, con conductos más

o menos accesibles, tanto en las zonas de captación como en las de emisión. En ocasiones estas surgencias van acompañadas de algunas formas semiactivas. Finalmente, y dentro de este contexto más amplio de sistema, encontramos un paleokarst bien representado, con la presencia de numerosas cavidades fósiles que actualmente quedan desconectadas de la red de drenaje.

En la información multidisciplinar de los tres parámetros, encontramos algunas similitudes entre surgencias. Los manantiales de Santa Cristina, cueva del Toro, Font de la Caritat, la Calzada y fuente Donace, presentan hidrogramas y evolución de la conductividad y temperatura más o menos análogos, con algunas diferencias que pueden venir condicionadas por las reservas existentes, la pluviometría, que es menor en la vertiente sur de la sierra, o debido al tamaño del área de la cuenca de captación. Sobre la presencia de reservas, no parece que sean muy notables, aunque tras las crecidas notamos un efecto descarga que se nota más en la Santa Cristina y en la cueva del Toro. En el caso del Toro, Donace y Caritat, las surgencias corresponden a conductos accesibles y explorables, siendo en Calzada un endokarst menos desarrollado. Respecto a la Cova de les Mans, parece una forma residual, de aguas frías y con valores muy extremos de conductividad, que la diferencia mucho de la vecina Font de la Caritat. Finalmente, la Font de la Basseta, intuimos que se trata de una surgencia con una organización del drenaje menos karstificada, desviándose del resto de manantiales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Antoni Freixes Perich, coordinador de «Karst, hidrología experimental», por su propuesta metodológica, consejos facilitados y bibliografía aportada a la hora de abordar el trabajo. Asimismo, agradecemos a Policarp Garay por algunas sugerencias aportadas.



Figura 12. Pérdidas en diferentes barrancos, donde la dolomía queda tapizada de cantos de arenisca. Arriba, barranc d'Eslida, con una pérdida temporal en actividad. Abajo, cauce del barranco de Bagueña, que tras las crecidas aportará sus aguas al sistema de la cueva del Toro.

Figure 12. Sinkholes in different ravines, where the dolomite is covered with sandstone pebbles. Above, the Eslida ravine, with a temporary sink of activity. Below, the bed of the Bagueña ravine, which after the floods will contribute its waters to the Cueva del Toro system.

BIBLIOGRAFÍA

- Almela, J. (2020). La Cova de la Matilde (Eslida, Castellón). *Gota a gota*, 21, 64-75.
- Almela, J. (2021). El Sistema kárstico Aín - Artana. *Berig*, 20, 7-45.
- Almela, J. (2023a). El Sistema kárstico de la Font de la Caritat. *Berig*, 21, 23-39.
- Almela, J., & Almela, L. (2023b). 10 años de exploraciones en la sima Posos (Azuébar). *Berig*, 21, 40-93.
- Bakalowicz, M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux a la connaissance de l'aquifère karstique et la karstification. Tesis doctoral. Université Pierre et Marie Curie. Paris.
- Crochet, Ph., & Marsaud, B. (1997). Approches conceptuelles de l'aquifère karstique. Problèmes méthodologiques et d'exploitation». *Hidrogeologie*, 3, 3-18.
- Domínguez, J.A. (2014). Estudio hidrogeológico para la autorización de vertido de la Edar de Eslida (Castellón). Diputació de Castelló (ed.). IGME. 131 p. Castellón.
- Freixes, A. (1993). «El medio kárstico: de la investigación observacional y experimental a la modelización. Hidrología Subterránea y Migración de Contaminantes». In: A. Correig (ed.). *Hidrología subterránea y migración de contaminantes*, 97-141. Universitat de Barcelona - Institut d'Estudis Catalans, Barcelona
- Freixes, A. (2020). Els acuífers kàrstics dels Pirineus de Catalunya. Interès estratègic i sostenibilitat. *Kras, hidrología experimental*. 558 p.
- Garay, P. (2000). El dominio triásico Espadán-Calderona. Contribución a su conocimiento geológico e hidrogeológico. Tesis doctoral. Universitat de València, Departament de Geologia. 754 p. Valencia.
- Gutiérrez, M., & Pedraza, J. (1973). Mapa geológico de España. Hoja 640, Segorbe, escala 1:50.000. Servicio de publicaciones-Ministerio de Industria. IGME. Madrid.
- Mangin, A., (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Tesis doctoral, In: *Annales de Spéléologie*, 29. Dijon, Francia.
- Morell, I., (1992). Manantiales de la provincia de Castellón. Col·lecció Universitaria, Diputació de Castelló. 307 p.
- Palmer, A.N. (2012). *Cave geology*. Cave Books, Unión Internacional de Espeleología. 502 p.