

# Características hidrogeológicas de las formaciones acuíferas carbonatadas cretácicas y su relación con los complejos de torcas y lagunas en la Serranía de Cuenca (provincia de Cuenca, España)

Marc Martínez-Parra

Hidrogeólogo  
mmartinezhidro@gmail.com

## RESUMEN

Las formaciones carbonatadas del periodo cretácico de la Serranía de Cuenca (España) constituyen acuíferos karstificados de gran importancia y presentan abundantes morfologías kársticas, tanto internas (cavidades, simas) como externas (lapiaces, torcas, lagunas). Las variaciones litológicas y el diferente grado de fracturación y karstificación condicionan espacialmente la conexión vertical de los acuíferos, definiéndose unas franjas acuíferas irregulares de mayor porosidad secundaria que funcionarán a modo de acuífero semiconfinado y que pueden constituir acuíferos locales, e influirán en el funcionamiento hidrodinámico del acuífero y de los manantiales principales y en su relación con las morfologías kársticas existentes, particularmente con el conjunto lagunar de Cañada del Hoyo y las denominadas "Torcas de los Palancares". El estudio de la hidroquímica y de las relaciones iónicas evidencia la influencia de la litología en el quimismo de sus aguas, predominando facies bicarbonatadas cálcicas y cálcico-magnésicas, y los fenómenos de posible desconexión, precipitación y evaporación en las lagunas, con aguas bicarbonatadas magnésicas.

Palabras clave: acuífero, hidrogeología, hidroquímica, karst, laguna.

## ***Hydrogeological characteristics of carbonated cretaceous aquifers and their relationship with complexes of collapsed dolines and ponds in Serrania de Cuenca (province of Cuenca, Spain)***

### ABSTRACT

*The carbonate formations of the cretaceous period of Serrania de Cuenca (Spain), constitute karstified aquifers of great importance and abundant karstic morphologies, both internal (caverns, pit-caves) and external (limestone pavements, collapsed dolines, karst ponds). The lithological variations and the different degree of fracturing and karstification condition the vertical connection of the aquifers, defining irregular aquifer strips of greater secondary porosity that will function as a semi-confined aquifer and that may constitute local aquifers. This influences the hydrodynamic behaviour of the aquifer and main springs and their relationship with karst morphologies, particularly with Cañada del Hoyo pond complex and the so-called "Torcas de los Palancares" collapsed dolines. The study of hydrochemistry and ionic relations evidence the influence of lithology on the chemistry of its groundwater, predominantly calcium and magnesium bicarbonated facies, and the phenomenon of possible disconnection, precipitation and evaporation in the ponds, with bicarbonated magnesium groundwater.*

*Keywords: aquifer, hydrochemistry, hydrogeology, karst, pond.*

## Introducción

La Serranía de Cuenca, situada al E de la provincia de Cuenca, es una compleja región geológica constituida principalmente por materiales carbonatados que constituye la cabecera de dos grandes cuencas hidrográficas de la Península Ibérica: Tajo y Júcar. Sin embargo, el conocimiento de la hidrogeología de la misma, de sus formaciones acuíferas y de su funcionamiento hidrogeológico, se ha quedado anclado en los estudios hidrogeológicos regionales desarrollados por el IGME en la década de los 80 y 90 del siglo XX (IGME, 1980; 1982; IGME-CHJ, 1991). No obstante se han realizado varias tesis centradas en diversos aspectos, relacionados con la limnología y microbiología, de las lagunas de Cañada del Hoyo (Alonso, 1997; Boronat, 2003; Camacho, 1997, Morata, 2016; Rodrigo, 1997). En 2014 se presentó una tesis sobre la hidrogeología de la Serranía de Cuenca, principalmente centrada en los acuíferos de la cuenca del Júcar (Martínez-Parra, 2014).

El objeto de este artículo es describir la íntima relación entre la karstificación de las rocas carbonatadas que constituyen formaciones acuíferas de diferente entidad y su funcionamiento hidrodinámico e hidroquímico, lejos de un funcionamiento uniforme y homogéneo. Para ello se muestra el estudio e interpretación de los datos obtenidos de Martínez-Parra (2014) sobre las formaciones acuíferas carbonatadas cretácicas situadas al este de la ciudad de Cuenca, en la Serranía de Cuenca, a las que se asocian morfologías kársticas singulares, como las lagunas de Cañada del Hoyo y las Torcas de Los Palancares.

## Marco geográfico y geológico

La zona estudiada se sitúa al E de la provincia de Cuenca (Castilla-La Mancha, España), en la denominada Serranía de Cuenca (figura 1). Se extiende desde el SO de la ciudad de Cuenca hasta el cauce y polje del río Guadazaón, limitado al S por la Sierra de la Pila, al E por los ríos Júcar y Chillarón y septentrionalmente por los relieves de Valdecabras en contacto con el río Júcar y el cambio de relieve que forma la paramera denominada Tierra Muerta. Está diseccionada por el río Huécar y los arroyos de Bonilla y Cueva del Fraile, de orientación O-E, y el río Júcar, dispuesto en dirección N-S.

Geológicamente el área se encuentra en las estribaciones occidentales de la Serranía de Cuenca, en la Rama castellana de la Cordillera Ibérica. La Serranía es un antiformal formado por materiales paleozoicos a terciarios, que se dispone en sus flancos con suaves pliegues de orientación NO-SE a N-S afectando a materiales mesozoicos; los sinclinales asociados están rellenos de materiales detríticos terciarios; al O con-

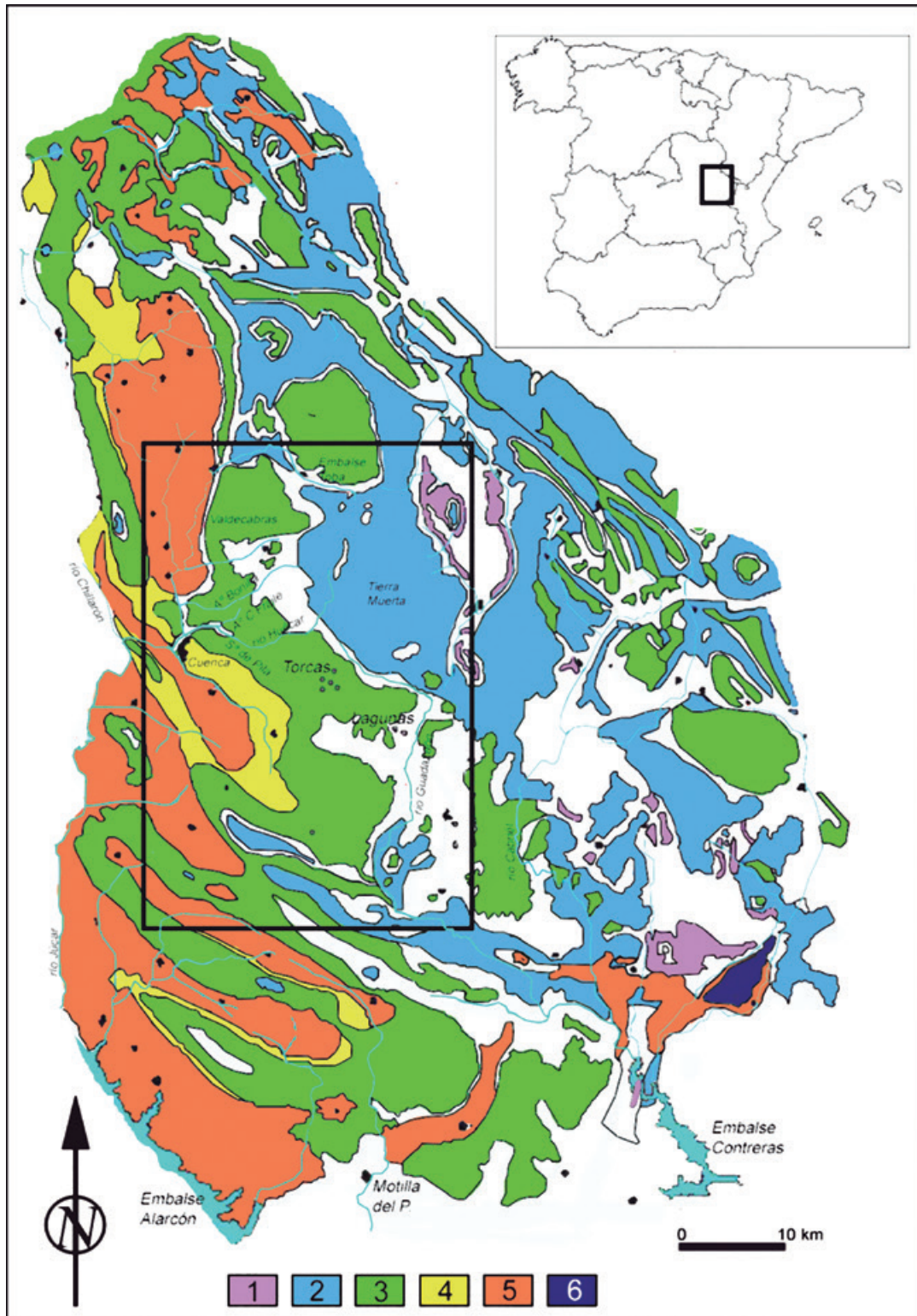
tactan mecánicamente con la Depresión intermedia, contacto definido por el cauce del río Júcar (figura 1). La serie estratigráfica de materiales del periodo cretácico se ha investigado en diversos sondeos mecánicos (JCCM, 1995; Martínez-Parra, 2014), obteniéndose un espesor medio de 300 a 370 m. De techo a muro se han reconocido (Del Olmo y Álvaro, 1989), dentro de la época del Cretácico Superior y de edad Campaniense 200 m de calizas dolomíticas y brechas, margas verdes de 1-10 m de espesor; de edad Turoniense 25 m de calizas dolomíticas y margas, dispuestas en estratos decimétricos con juntas margosas y 20-30 m de dolomías rosadas, masivas, cuyo espesor disminuye al E; de edad Cenomaniense 7-10 m de calizas nodulosas y 10 m de margas con abundante fauna; 35 m de dolomías tableadas bien estratificadas, muy recristalizadas y con niveles brechoides; 40 m de dolomías alternantes con margas y 20 m de margas verdosas con intercalaciones arenosas a base. Bajo estos depósitos se sitúan los pertenecientes a la época Cretácico Inferior, principalmente detríticos (arenas de la Facies Utrillas, arenas, areniscas y arcillas de la Facies Weald). Las formaciones carbonatadas del conjunto cretácico, en ocasiones no muestran separación litológica clara (Martínez-Parra, 2014).

## Aspectos geomorfológicos

Las litologías carbonatadas cretácicas, principalmente las de edad turoniense, sufren erosión diferencial a causa de la distinta composición mineralógica de las rocas carbonatadas que las conforman y la variable presencia en margas, generando un paisaje muy característico. A una de las formaciones de edad turoniense se la denomina "Fm. Dolomías de la Ciudad Encantada", ya que el mencionado monumento natural se desarrolla en estos materiales.

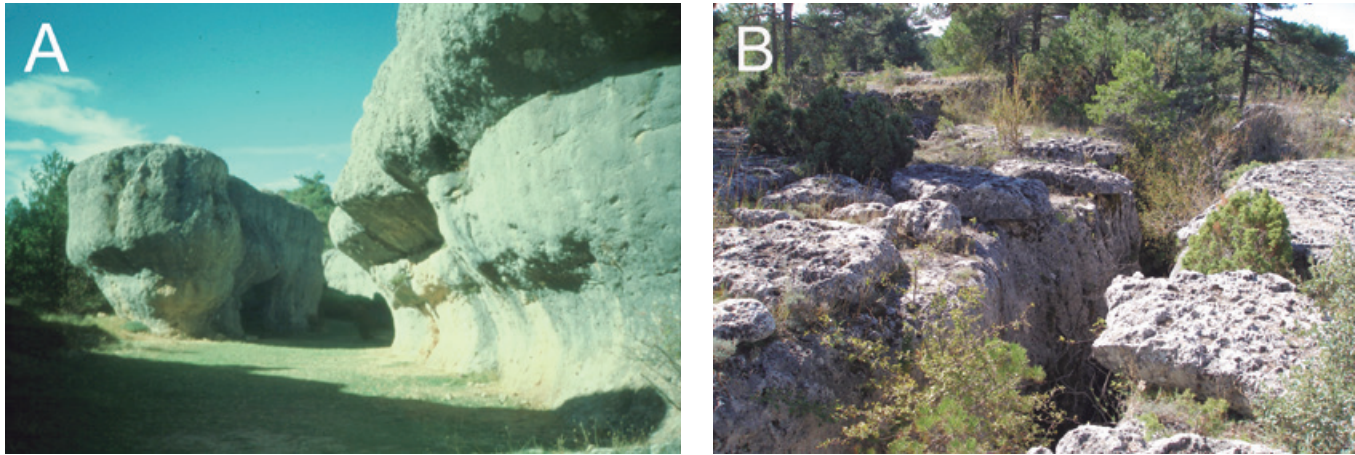
Se diferencian tres tipos de morfologías kársticas (Alonso, 1991), según escala: 1) a gran escala se definen hoces erosionadas causadas por los ríos Huécar y Júcar y superficies o muelas, 2) a escala media se definen diversas morfologías de hundimiento como las torcas (Torcas de los Palancares) y lagunas (Lagunas de Cañada del Hoyo) y de disolución como los denominados "callejones" y tormos, estando todas las morfologías afectadas por fracturas NO-SE y sus conjugadas, que en profundidad, y en menor medida en superficie, han favorecido el desarrollo de redes de cavidades y simas y 3) a pequeña escala los lapiaces, acentuados a su vez por el efecto disolutivo de la lluvia y por pequeñas fracturas (figura 2).

Se ha estimado, a partir de las columnas litológicas de sondeos perforados, que el epikarst puede alcan-



**Figura 1.** Mapa de situación general y mapa simplificado de las principales formaciones acuíferas de la Serranía de Cuenca. La zona de estudio está marcada con un recuadro. Leyenda: 1- Carbonatos del Triásico, 2- Carbonatos del Jurásico, 3- Carbonatos del Cretácico superior, 4- Margas y yesos del Tránsito Cretácico-Terciario, 5- Detríticos terciarios, 6- Carbonatos terciarios.

**Figure 1.** General situation map and simplified map of the main aquifer formations of Serranía de Cuenca. The study area is marked with a box. Legend: 1- Triassic carbonated rocks, 2- Jurassic carbonated rocks, 3- Late Cretaceous carbonated rocks, 4- Cretaceous-Tertiary marls and gypsum rocks, 5- Tertiary detrital rocks, 6- Tertiary carbonated rocks.



**Figura 2.** Callejones en la Ciudad Encantada (A). Fisuras kársticas con disolución (B). Se observa el relieve diferencial existente en las dolomías turonienses.

**Figure 2.** Karstic corridors in the “Enchanted City” (A). Karstic fissures with solution (B). The differential relief existing in the turonian dolomites is observed.

zar los 60 m de profundidad siendo, en general, las formas exokársticas muy abundantes (Martínez-Parra, 2014).

### Lagunas de Cañadas del Hoyo

Son siete lagunas y once torcas sin agua en la margen derecha del río Guadazaón y otras diez torcas sin agua en la margen izquierda, que se agrupan en un paleo-polje abierto capturado por el río Guadazaón (Armengol, 1997; Eraso et al, 1979; Gutiérrez-Elorza y Valverde, 1994; Rodrigo, 1997) con diámetros comprendidos entre 65 y 145 m (tablas 1 y 2, figuras 3 y 4). Se desarrollan en formaciones carbonatadas del Cretácico Superior, en materiales de edad Cenomaniense (Ramírez et al, 1975) y favorecidas por las fracturas del polje en el que se encaja el río Guadazaón (de dirección O-E con tendencia a ESE en la margen derecha del río y las de dirección OSO-ENE en la izquierda, según

Eraso et al., (1979), o bien fracturas en dirección NE-SO y NE-SE que definen las alineaciones de lagunas y torcas (Martínez-Parra, 2014) que han podido dirigir los colapsos que forman las lagunas (Casado y Montes, 1995). Los materiales margosos basales del Cretácico superior, junto a los depósitos detríticos del Cretácico inferior tienen un importante papel hidrogeológico, por cuanto ejercen de impermeable de base de la estructura que origina las lagunas y favorecen la circulación hacia el río Guadazaón en las lagunas inferiores; pero también pueden adaptarse, como cierre de las mismas, a las posibles morfologías kársticas que puedan haberse desarrollado, aprovechando la fracturación, en los materiales jurásicos infrayacentes.

El entorno geológico de las lagunas de la Cruz y de Parra corresponde a calizas tableadas y niveles margosos en su terreno aflorante, de edad Cenomaniense, mientras que en la Laguna Llana se han observado arcillas y areniscas; en la laguna Cardenilla se han observado arcillas, areniscas y margas verdes, co-

Lagunas	Cota topográfica (m s.n.m.)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Diámetro (m)	Columna de agua (m)
Del Tejo	1015	37100	145	26-32
De la Cruz o de la Gitana	1015	11800	132	19-25
Lagunillo del Tejo	1010	13300	83	3.8-11
Llana	990	10400	100	7.3-6.6
Lagunillo Cardenilla o	995	3900	65	4.7-5.1
Tortugas	995	7864	90	7.3-12
de los Cardenillas	1000	13800	116	13.9-17.5
De la Parra				

**Tabla 1.** Características del complejo lagunar de Cañada del Hoyo (Eraso et al, 1979; Armengol, 1997, Camacho et al, 2007, Barreiro-Lostres et al, 2013; Martínez-Parra, 2014).

**Table 1.** Characteristics of the Cañada del Hoyo pond complex (Eraso et al, 1979; Armengol, 1997, Camacho et al, 2007, Barreiro-Lostres et al, 2013; Martínez-Parra, 2014).

Denominación	Cota topográfica (m s.n.m.)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Diámetro (m)	Profundidad total (m)
Junto Llana	985	9354	110	--
Torcazo Colorado	1030	12400	130 x 150	18
Torcazo 2	1040	8600	89 x 124	21-28
Torcadillo 1	1050	8642	93 x 120	36-46
Torcadillo 2	1040	9840	100	44
Torcadillo 3	1030	4400	58	19
Tornadillo 4	1020	6400	54	15
Tornadillo 5	1020	1050	40	<10
Laguna Seca	1025	16800	150	22

**Tabla 2.** Características de las principales torcas (sin agua) del complejo lagunar de Cañada del Hoyo (Eraso et al, 1979; Armengol, 1997; Martínez-Parra, 2014).

**Table 2.** Characteristics of the main collapse dolines (without water) of the Cañada del Hoyo pond complex (Eraso et al, 1979; Armengol, 1997; Martínez-Parra, 2014).

respondientes a la base de los depósitos de la misma edad. Asimismo, la laguna de la Parra muestra, al fondo, bajo los sedimentos depositados, margas verdes (Barreiro-Lostres et al, 2013) atribuibles también a la base de edad Cenomaniense.

La laguna de mayor diámetro es la del Tejo, también en materiales cenomanienses, con 145 m aproximadamente, que ha perdido profundidad desde la década de 1980, en torno a 6 m, al igual que la lagunilla del Tejo, pasando de 11 m a 3.8 m (Camacho et al, 2007). Según Marqués de Cantarranas (2001) en la década de los 70 del siglo pasado se realizaron obras de canalización en el río Guadazaón lo que provocó un descenso del nivel de las aguas en las lagunas de Tejo y Cruz. Las lagunas oscilan anualmente 5 m (Eraso et al, 1979) aunque muestran rápidos ascensos de nivel frente a lluvias intensas y la cota de agua se encuentra entre 1000 m s.n.m en las lagunas al NO y 985 m s.n.m. en las lagunas al SE, cota similar a la del río Guadazaón.

### Torcas de los Palancares

Es un conjunto de 30 torcas sin agua en el paraje de los Palancares (figuras 2, 3 y 5, tabla 3) de fondos cónicos a troncocónicos por relleno, semiesféricos y planos, con una longitud entre 50 a 450 m en su eje principal, ocupando una superficie entre 0.35-10.27 ha y profundidades entre 17-90 m. Las principales direcciones

de fracturas son las descritas anteriormente NO-SE y NE-SO, como más frecuentes en los materiales del Cretácico superior (Eraso et al, 1979). Estas torcas se sitúan a una distancia de 7.5 km al NO de las lagunas de Cañada del Hoyo y a una cota superior (1200-1290 m s.n.m), con una diferencia máxima superior a 300 m. Estas formaciones son de edad campaniense y turoniense (Del Olmo y Álvaro, 1989), no siendo las mismas formaciones que las de las lagunas, que corresponden a las formaciones infrayacentes.

### Aspectos hidrogeológicos

#### Hidrogeología regional y descriptiva

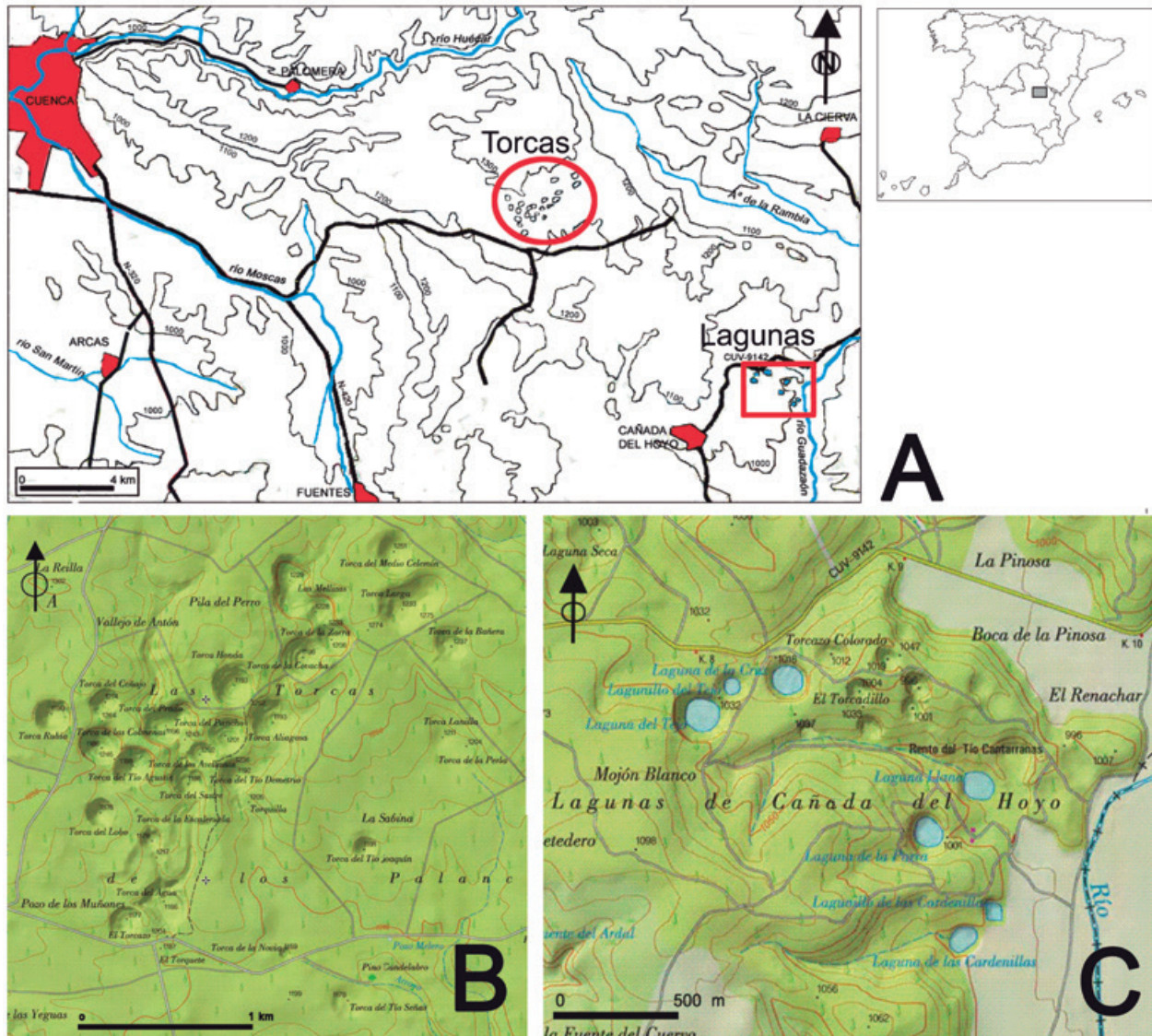
El acuífero estudiado se sitúa en el denominado Acuífero de Cuenca, dentro del Sistema Acuífero nº 18 "Flanco Occidental de la Ibérica"; posteriormente se consideró que formaba parte de la Unidad Hidrogeológica 08.017 "Serranía de Cuenca" y de la Masa de Agua Subterránea 080.118 "Cretácico de Cuenca Norte". En conjunto, esta catalogación de la formación acuífera, particularmente las dos últimas, corresponden a unidades de gestión de los acuíferos por parte de la Confederación Hidrográfica del Júcar, dentro de los objetivos que marca el Plan Hidrológico de Cuenca para el ciclo de planificación 2015-2021 (CHJ, 2015).

El "Acuífero Cretácico de Cuenca", propuesto en el presente artículo, es uno de los 16 acuíferos definidos

	Nº	Superficie (ha)	Superficie media (ha)	Cota topográfica (m s.n.m.)	Profundidad (m)	Profundidad media (m)
Torcas	30	0.35-10.27	3.47	1200-1289	17-91	51.5

**Tabla 3.** Torcas de los Palancares, a partir de datos de Erasos et al (1979).

**Table 3.** Los Palancares collapsed dolines, based on data from Erasos et al (1979).



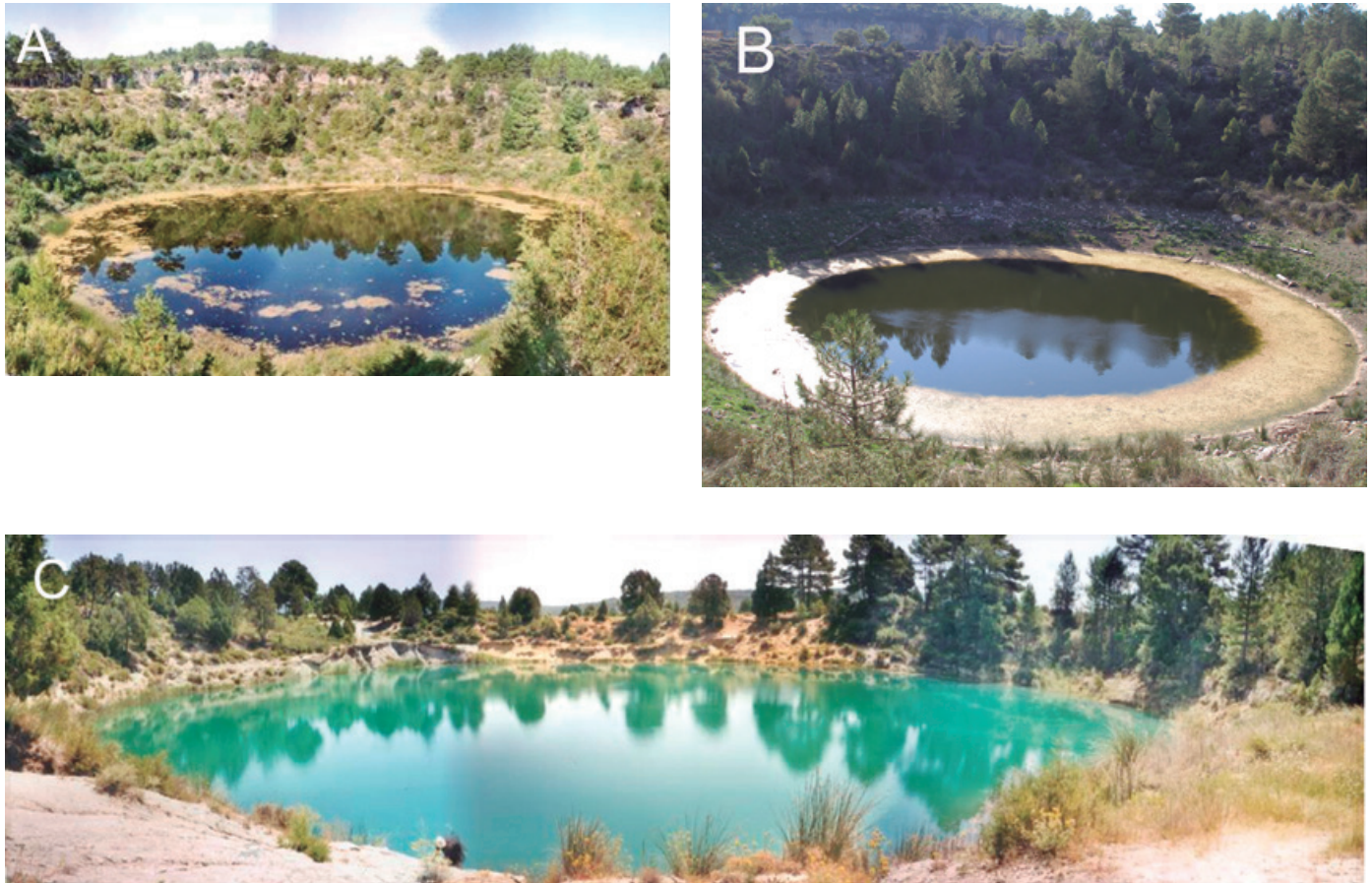
**Figura 3.** Mapa de situación (A), y de detalle de las Torcas de los Palancares (B) y de las lagunas de Cañada del Hoyo (C). Cartografía procedente de SIGPAC.

**Figure 3.** Location map (A). Topographic map of collapsed dolines in Torcas de los Palancares (B) and topographic map of the Cañada del Hoyo pond complex (C). Cartography from SIGPAC.

por Martínez-Parra (2014) para las formaciones carbonatadas cretácicas, sin conexión aparente con formaciones infrayacentes jurásicas ni con suprayacentes terciarias. Se tiene en cuenta la desconexión hidráulica, temporal o permanente, entre los acuíferos debido a las estructuras geológicas (anticlinales, fallas, discontinuidades), puesto que favorecen la existencia de umbrales hidrogeológicos. Así, en el caso de este acuífero está limitado al S por un pliegue anticlinal de dirección NO-SE y los afloramientos del Cretácico inferior, al N y E por los materiales del Cretácico inferior y del Jurásico y al O por el pliegue sinclinal que se de-

fine en el río Valdecabras (figuras 1, 6 y 7). En la tabla 4 se recogen las características de los puntos de agua existentes y su identificación aplicada a la figura 6.

En general, las formaciones carbonatadas son heterogéneas en cuanto a litología, con una distribución anisotrópica de la fracturación y extensión de la karsificación. A causa de ello se diferencian horizontes o franjas acuíferas irregulares que están condicionadas por estas diferencias litológicas, asociadas a zonas más fracturadas o alteradas que favorecen el desarrollo de una mayor porosidad secundaria y permeabilidad, condicionando espacialmente la conexión verti-



**Figura 4.** Lagunilla del Tejo, (A) mayo de 2003, (B) octubre de 2007. Obsérvese el descenso del nivel del agua tras el verano , en torno a 3-4 m. (C) Laguna Cardenilla.

**Figure 4.** Tejo little pond, (A) May 2003, (B) October 2007. Note the decrease in water level after summer, around 3-4 m. (C) Cardenilla pond.

cal de los acuíferos cretácicos (Martínez-Parra, 2014) (figuras 7, 8). El funcionamiento de estos horizontes se puede asemejar al de un acuífero multicapa, con zonas de funcionamiento libre, semiconfinado y confinado, recibiendo la infiltración de las aguas procedentes de zona superior de menor fracturación y permeabilidad y cediendo agua a niveles inferiores a través también de zonas de menor permeabilidad y fracturación (Martínez-Parra, 2014), similar al modelo de doble porosidad descrito por Kiraly (1975). Asimismo, hay zonas de este acuífero en las que los materiales permeables están separados a su vez por horizontes margosos (principalmente en la base de la serie) que pueden desconectar parcial o totalmente a estos horizontes permeables, creando acuíferos locales, cuyos drenajes corresponden a manantiales situados a diferentes cotas y de diverso caudal, indicando diferente grado de alimentación superficial del acuífero, como parece ocurrir en acuíferos asociados a las lagunas. Un ejemplo de ello se encuentra en el sondeo SGOPU-3, que atraviesa dentro del nivel cretácico fracturado, dis-

tintos horizontes acuíferos en tramos entre 60-104 m, 116-122 m y 130-156 m de profundidad, con horizontes margosos intercalados (JCCM. 1995; Martínez-Parra, 2014).

Así, los horizontes acuíferos principales están asociados a los materiales del Cretácico superior (del Campaniense y Turoniense), con un espesor medio de 255 m. Bajo ellos, y separados por horizontes margosos, se encuentran otros horizontes acuíferos de interés local en la alternancia de hasta 100 m de calizas, dolomías y margas de edad Cenomaniense (Del Olmo y Álvaro, 1989).

En cuanto al funcionamiento hidrodinámico, la vergencia en la dirección oeste de los estratos favorece una circulación de flujo también hacia ese sentido, ejerciendo como colectores de aguas subterráneas los ríos que intersectan la superficie carbonatada (Júcar, Huécar, Valdecabras, Palomera), condicionando dicho funcionamiento así como a la piezometría. También existe una circulación de menor relevancia hacia el E y S, en dirección al río Guadazaón. En conjunto, esta cir-

	Denominación	Nat.	m	Z	P	PNP	Q	Fecha	Subacuífero
1	FCueva Fraile	M	7	1060	--	--	90 25 135	6/01 6/02 4/03	B
2	FRollo	M	7	1103	--	--	2 3 2.6 2.7 2.9 32.5 20 16	2/82 3/91 6/02 1/03 3/03 7/03 3/04 3/10	C
3	SCS	S	1	970	250	68	50	5/95	--
4	SPalancares/ 08.17.024	S	4	1165	150		51.93-76.91	3/00-9/12	C
5	F1CU	M	1	940	--		1.6	6/02	F
6	F2CU	M	1	960	--		0.3	6/02	F
7	SCF	S	--	890	100	surgente	8-10	5/01	B
8	SHCF	S	--	1050	170	50	2.5	-/94	B
9	SE	S	1	930	253	30	50	6/95	F
10	SGOP-3	S	1	980	235	52.5		7/94	F
11	SGOP-2	S	2	970	256	100	15	5/94	F
12	SHCE	S	--	1423	195	106 140	3	-/94 1/07	A
13	FA4	M	2	950	--	--	0.01 0.2	9/02 4/03	B
14	FA1	M	2	950	--	--	0.01 0.15	8/02 4/03	B
15	FCH	M	--	1150	--	--	0.5	7/80	D
16	FA	M	--	1040	--	--	1	11/78	D
17	FSCH	M	3	1000	--	--	0.07 0.70 0.02	9/02 7/03 1/06	D
18	FCU-RC	M	2	1200	--	--	0.7 3.2	10/02 5/03	A
19	FMotores	M	2	990	--	--	14 50	9/02 4/03	B
20	FF29	M	--	980	--	--	0 0.5	9/02 4/03	B
21	ST1	S	1	1060	290	197	1.5-2	12/02	G
22	ST2	S	1	1060	200	114		10/02	G
23	SVC	S	--	1010	152	34	100	11/06	A
24	SCCU	S	--	1000		--	--	--	F
25	SFU	S	--	1010	254	76.99		4/02	--
26	NHuécar	M	2	1090	--	--	200 150 170	-/70 8/80 5/91	C
27	SVDG	S	--	1060	260	182.76 190	15	2/82 1/95	--
28	FRollo II	M	--	1103	--	--	1-2	3/04	E
29	LCruz	L	2	1015	21-24	1 000			D
30	LCardenilla	L	2	995	12	990			D
31	LParra	L	2	1000	16	990			D
32	LLlana	L	2	995	6-12	985			D
33	F Rollo III	M	--	1103	--	--	24	3/10	E
34	F Royo frío (acuífero jurásico)	M	--	1013			880	7/05	--

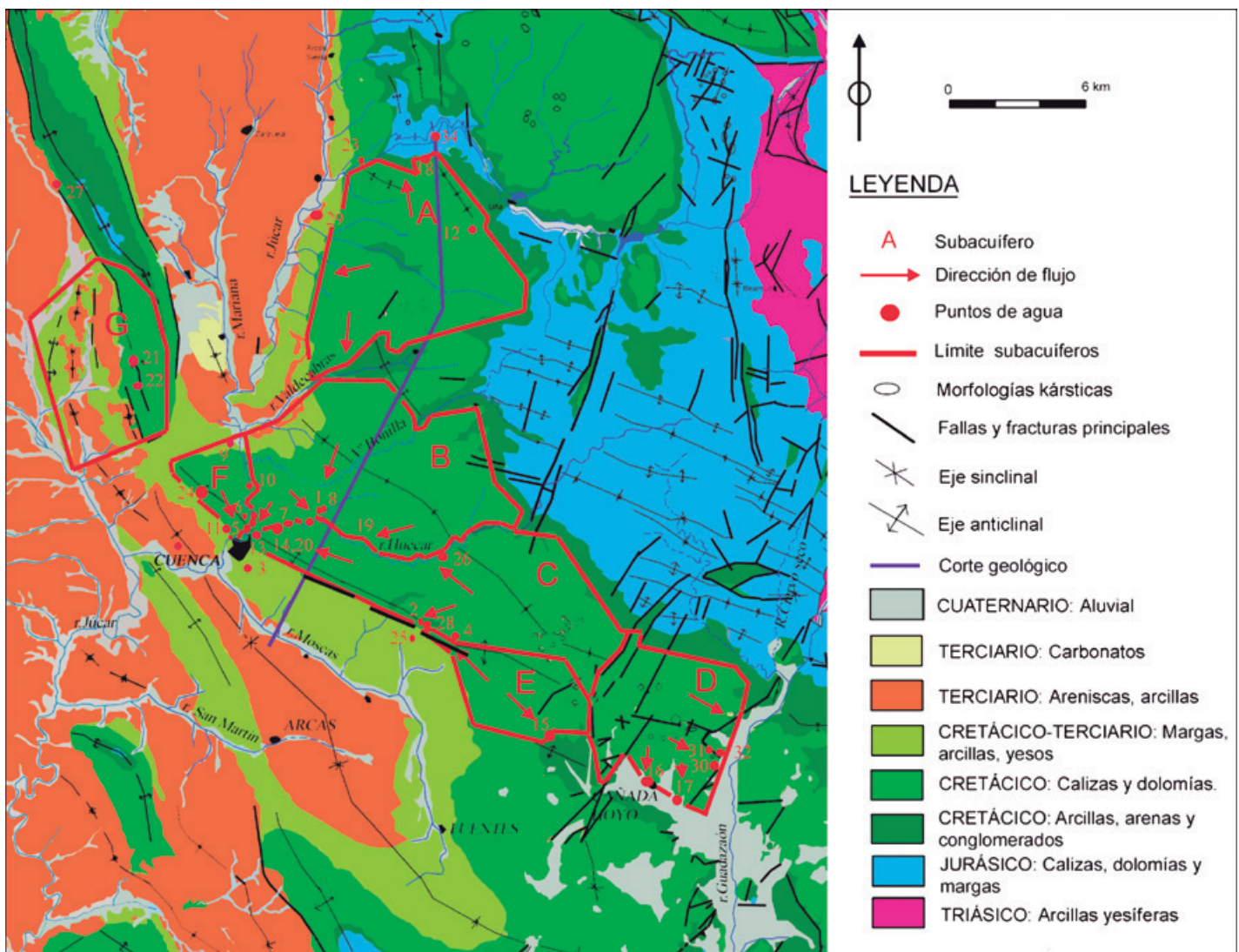
**Tabla 4.** Puntos de agua en el acuífero cretácico de Cuenca. (Leyenda: Nat.- naturaleza de la captación (M-manantial, S-sondeo, L-laguna), m- nº de muestras, Z- cota topográfica (m s.n.m.), P- profundidad (m), PNP-profundidad del nivel piezométrico (m), Q- caudal (L/s). Subacuíferos: A- Este de Bascañana, B- Norte de Palomera, C- Sierra Socorro, D- Cañada del Hoyo, E- Hoz del Moro, F- Dehesa de Santiago, G- Sierra Bascañana (modificado de Martínez-Parra, 2014).

**Table 4.** Water points in the Cuenca cretaceous aquifer. (Legend: Nat.- water point type (M-spring, S-borehole, L-pond), m- number of samples, Z- topographic level (m snm), P- depth (m), PNP-depth of piezometric level (m), Q- flow (L/s) Underwater: A- Este de Bascañana, B- Norte de Palomera, C- Sierra Socorro, D- Cañada del Hoyo, E- Hoz del Moro, F- Dehesa de Santiago, G- Sierra Bascañana. ( modified from Martínez-Parra, 2014).

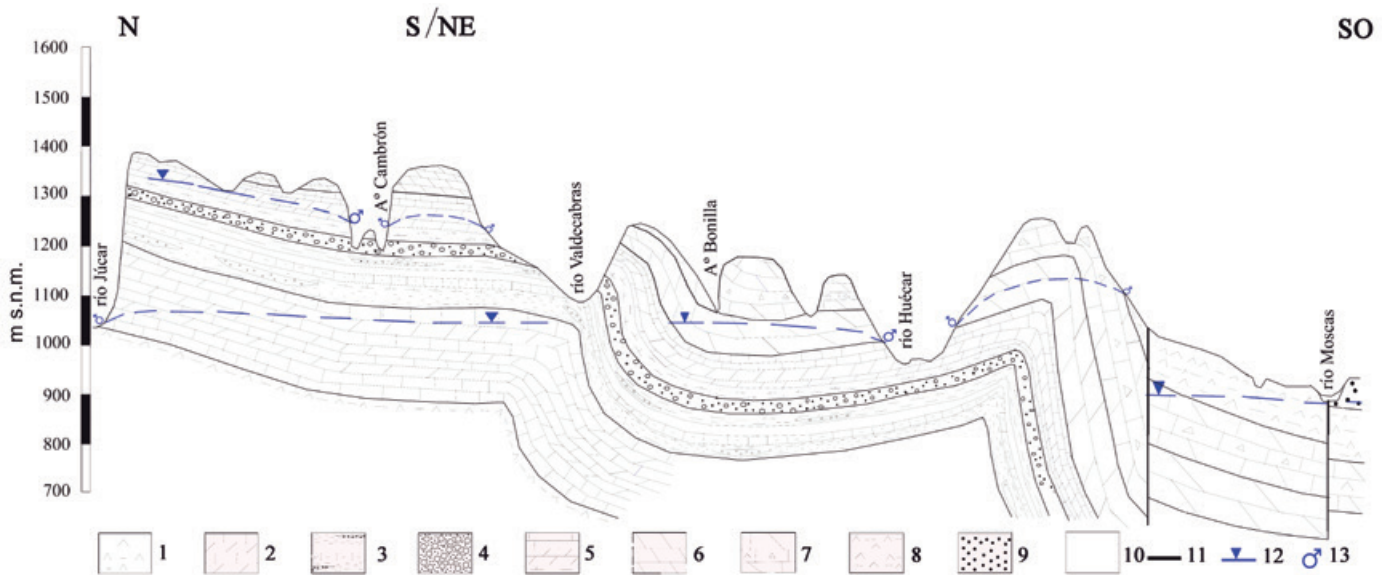




**Figura 5.** Borde de una de las torcas de los Palancares.  
**Figure 5.** Edge of one collapsed doline of Los Palancares.



**Figura 6.** Esquema hidrogeológico del “Acuífero Cretácico de Cuenca”. Subacuíferos: A- Este de Bascuñana, B- Norte de Palomera, C-Sierra Socorro, D-Cañada del Hoyo, E-Rollo, F-Dehesa de Santiago, G-Sierra Bascuñana (modificado de Martínez-Parra, 2014).  
**Figure 6.** Hydrogeological scheme of the “Cuenca cretaceous aquifer”. Sub-aquifers: A- Este de Bascuñana, B- Norte de Palomera, C-Sierra Socorro, D-Cañada del Hoyo, E-Rollo, F-Dehesa de Santiago, G-Sierra Bascuñana (modified from Martínez-Parra, 2014).



**Figura 7.** Corte hidrogeológico-interpretativo N-S/NE-SO. Leyenda: Triásico 1-arcillas y yesos, Jurásico 2.-calizas y dolomías; Cretácico inferior 3.-arcillas, areniscas y conglomerados, 4.-arenas (Fm. Utrillas); Cretácico superior 5.-calizas, margas y dolomías, 6.-dolomías, 7.-breccias y calizas, 8-margas y yesos (Facies Garumniense); Terciario 9-areniscas y arcilla; Cuaternario 10-depositos aluviales; 11-fallas, 12-nivel piezométrico, 13-manantial.

**Figure 7.** N-S / NE-SO hydrogeological-interpretive section. Legend: Triassic 1- clays and gypsum; Jurassic 2.-limestone and dolomites; Early Cretaceous 3.- clay, sandstone and conglomerates, 4.- sand (Utrillas Formation); Late Cretaceous 5.-limestone, marls and dolomites, 6.- dolomites, 7.-breccias and limestone, 8 - marls and gypsum (Garum Facies); Tertiary 9 - sandstone and clay; Quaternary 10-alluvial deposits; 11-faults, 12-piezometric level, 13- spring.

culación del agua subterránea, junto a la elevación de los tramos inferiores de la serie cretácica, que ejercen de divisoria, permite subdividir al acuífero en 7 subacuíferos, desconectados total o parcialmente entre sí, con su propio funcionamiento hidrodinámico (tabla 5, figura 6). En menor medida existe una circulación lateral hacia el acuífero cretácico "Sinclinal de Fuentes-Valdeganga" (Martínez-Parra, 2014) procedente de los subacuíferos "Este de Bascuñana", "Sierra de Socorro" y "Hoz del Moro".

### Puntos de descarga. Funcionamiento

El funcionamiento hídrico de los manantiales está condicionado por la estructura y fracturación de las litologías. En general los manantiales en la zona de estudio son del tipo de contacto con drenaje (Ford y Williams, 1989), aunque hay de otros tipos, como la Fuente de Cueva del Fraile, de tipo represado, asociada a una fractura NO-SE.

Los manantiales, como drenajes principales de los horizontes acuíferos, están asociadas a litologías más compactas y fracturadas de gran espesor, entre cotas topográficas de 990-1100 m s.n.m, con caudales elevados (50-100 L/s) junto a fuertes variaciones estaciona-

les y, en ocasiones, rápidas respuestas a la lluvia. Las más conocidas son la Fuente de la Cueva del Fraile, la del Rollo y la de Motores (figura 9).

Los manantiales asociados a horizontes acuíferos más locales en materiales margosos y calizos generalmente presentan caudales pequeños (0.01-5 L/s), muy variables, con incrementos en época húmeda de hasta 10 órdenes de magnitud; se sitúan en cotas piezométricas de 940-960 m s.n.m (asociados a materiales cenomanienses). En detalle, el área de la fuente Rollo corresponde al drenaje de dos Subacuíferos, "Sierra del Socorro" y el "Hoz del Moro"; y se ve favorecido por la existencia de fracturas de orientación NE-SO, que ponen en contacto materiales de distinta permeabilidad. Esta surgencia, en épocas de aguas altas o de eventos de lluvia de gran magnitud, mana a cotas superiores, como se observó en julio de 2003, a +5 m, con un caudal variable, próximo a 0.5 L/s. En marzo de 2010 se observó drenaje de ambos subacuíferos en el área de Fuente Rollo, con un caudal de 16 L/s (F. Rollo, tabla 4) y 24 L/s (F. Rollo III, tabla 4), respectivamente.

Únicamente se dispone de información de la evolución piezométrica del piezómetro de la CHJ 08.17.024 (punto 4, tabla 4; figura 6) en el Subacuífero "Sierra Socorro", en la que se observa, para el periodo 2000-2012, descensos suaves en periodo estival, de 1 a 5 m, y as-

C ó d i g o figura	Subacuíferos	Superficie (km <sup>2</sup> )	Cota piezo-métrica (m s.n.m.)	Dirección de flujo subterráneo	Puntos (tabla 4 )	Observaciones
A	<i>Este de Bascuñana</i>	71	1 200	Los manantiales de poco caudal drenan hacia el río Júcar y el arroyo de Valdecabras.	12, 18, 23	Forma una muela separada del resto por los materiales del Cretácico inferior
B	<i>Norte de Palomera</i>	75	940-1 010	La principal zona de drenaje es el arroyo de Bonilla, a lo largo del cual hay surgencias.		
C	<i>Sierra Socorro</i>	80	990-1 130	Hacia el SO, al río Huécar y al SE, a la Fuente Rollo (FRollo).	2,4,14,26	Torcas de los Palancares
E	<i>Hoz del Moro</i>	18	1 110	A la zona de Fuente Rollo	15, 28	
D	<i>Cañada del Hoyo</i>	42	985-1 030	Hacia el río Guadazaón (E) y A° del Prado (al S)	16, 17, 30, 31, 32	Lagunas de Cañada del Hoyo
F	<i>Dehesa de Santiago</i>	65	870	Drenajes locales	5,6,9,10, 11,24	
G	<i>Sierra de Bascuñana</i>	30	945	Drenaje hacia el río Júcar	21,22	Materiales yesíferos del Tránsito Cretácico-Terciario. Alimentación a formaciones detríticas de la Depresión Intermedia

**Tabla 5.** Subacuíferos definidos y sus características.  
**Table 5.** Defined sub-aquifers and their characteristics.

censos rápidos en periodo húmedo, acentuados con fuertes lluvias, como se define para octubre de 2006 o abril de 2007, de 12 y 4 m, respectivamente (figura 10). La cota piezométrica se encuentra en la horquilla entre 1037 y 1060 m s.n.m.

La transmisividad estimada se encuentra entre 5 y 500 m<sup>2</sup>/día, variando en función de la fisuración y permeabilidad, alcanzando un máximo de 3000 m<sup>2</sup>/día y de 50 m/día de permeabilidad. El caudal específico se halla entre 0.05-5 L/s/m (Martínez-Parra, 2014).

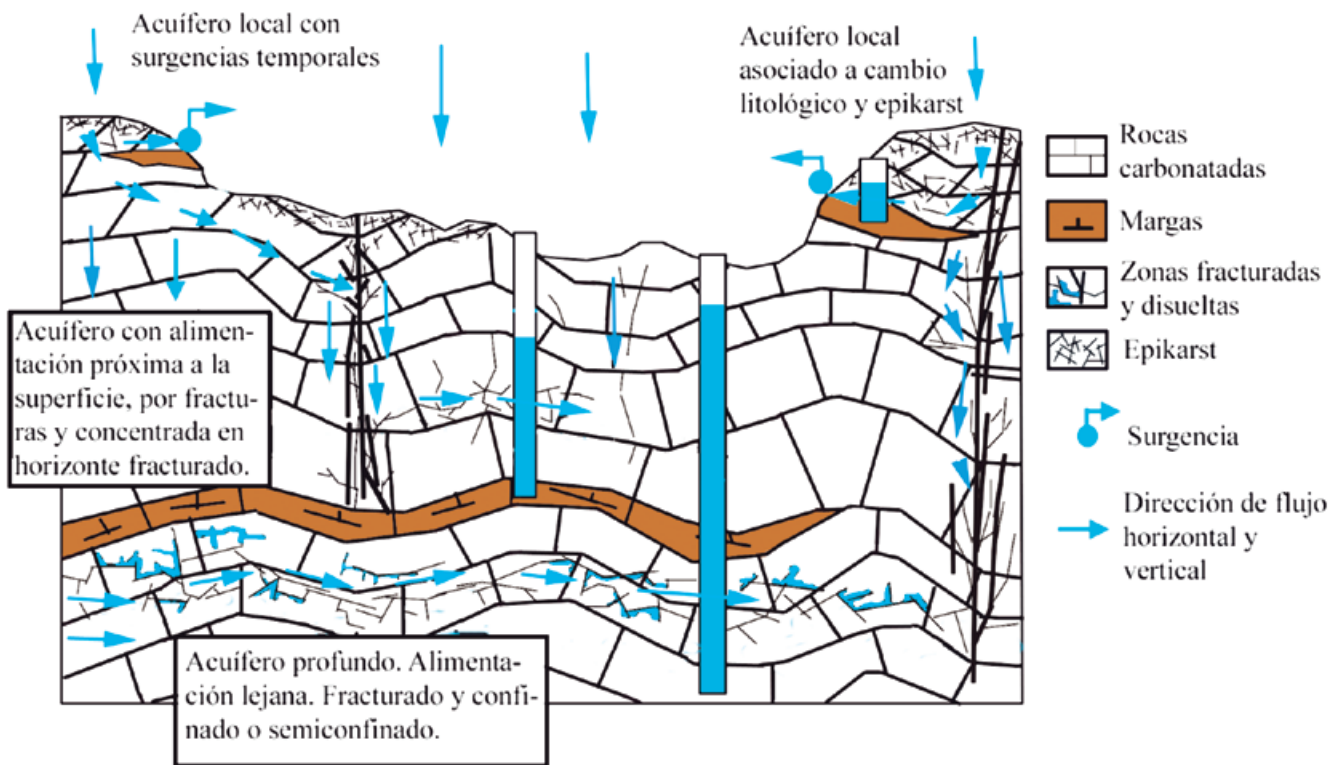
La recarga del acuífero se ha estimado en torno a 33.5 hm<sup>3</sup>/a procedente de la infiltración de la lluvia, en torno al 20 % del total precipitado; las salidas de agua subterránea son hacia el río Júcar (27 hm<sup>3</sup>/a), Guadazaón (1.2 hm<sup>3</sup>/a), Huécar (1.3 hm<sup>3</sup>/a) y lateral hacia el sinclinal de Fuentes-Valdeganga (4 hm<sup>3</sup>/a) (Martínez-Parra, 2014).

### Relación de los subacuíferos con las lagunas de Cañada del Hoyo y Torcas de los Palancares

Estas lagunas se sitúan en el Subacuífero "Cañada del Hoyo", tanto sobre la formación acuífera principal como sobre las formaciones acuíferas cenomanienses más locales. Su recarga se producirá en la superficie del Subacuífero. Según Camacho et al (2003) la lagu-

na del Tejo muestra un descenso de nivel entre mayo y octubre, debido a que la alimentación del acuífero local no compensa la evaporación que se produce. Ello evidencia que las lagunas tienen una alimentación muy reducida en otoño-primavera. Ello también se manifiesta en los resultados de los análisis de isótopos estables realizados, observándose que las aguas se sitúan en una recta de evaporación como se describirá en el apartado de hidroquímica.

Otra teoría considera que las lagunas podrían alcanzar al acuífero jurásico, al situarse la laguna de Cardenillas sobre materiales del Cretácico inferior, e indicaría una karstificación del Jurásico infrayacente que afectaría también a los materiales cretácicos; para justificarlo se apoya en datos isotópicos estimando que el área de recarga se situaría en los relieves de materiales jurásicos de Tierra Muerta, al N de las lagunas (Carmona y Bitzer, 2001; Marqués de Cantarranas, 2001). A este respecto es de destacar que sí que existen muestras de fenómenos de karstificación en los materiales jurásicos, como en el entorno de La Cierva o en el área de Uña, donde se observa alguna dolina que afecta a materiales del Cretácico inferior y, próxima a ella, otra en materiales jurásicos, sin embargo, en el caso del complejo lagunar de Cañada del Hoyo la cota piezométrica del acuífero jurásico principal se



**Figura 8.** Propuesta de funcionamiento hidrodinámico teórico de una formación acuífera carbonatada (modificado de Martínez-Parra, 2014).

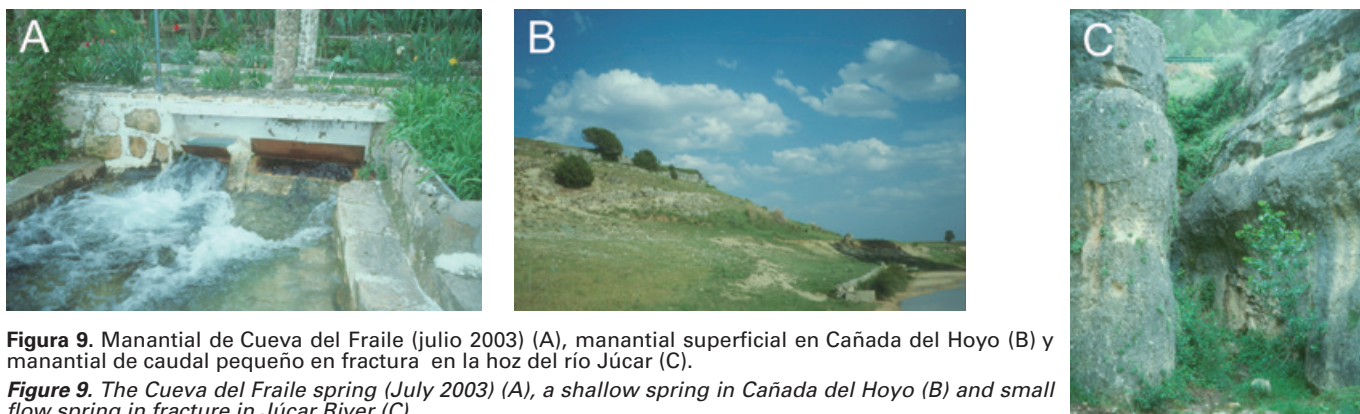
**Figure 8.** Proposal for the theoretical hydrodynamic behaviour of a carbonated aquifer formation (modified from Martínez-Parra, 2014).

encuentra en torno a 880 m s.n.m., a 110 m por debajo del nivel de las lagunas, por lo que el origen de las aguas podría corresponder tanto a los niveles carbonatados del Cretácico superior como a las formaciones detríticas y carbonatadas del Cretácico inferior, pero no al acuífero regional jurásico. Asimismo, debe tenerse en cuenta que los materiales karstificados del Cretácico superior en la base presentan un potente paquete de margas verdes, identificado en el perfil del sedimento de la laguna de la Parra (Barreiro-Lostres et al, 2013) y que, bajo éstos, se encuentran las arenas y arcillas de la Facies Utrillas, e incluso la facies Weald, que aíslan el nivel cretácico del jurásico. También es posible que las dolinas puedan estar relacionadas con la facies Weald, constituidas por niveles margosos, arcillosos, calizos y detríticos de un espesor en torno a 100 m o incluso con horizontes más locales del acuífero jurásico.

El funcionamiento de este Subacuífero "Cañada del Hoyo" es independiente del resto de los subacuíferos, recibiendo la recarga de las aguas de la lluvia y drenando hacia el río Guadazaón y al Arroyo de Prado, donde se encuentran pequeñas surgencias, cuyo quimismo, por su contenido en Cl<sup>-</sup>, podría indicar su conexión con las aguas de las lagunas y su circulación hacia el S. Es el caso de la denominada Fuente superficial de Cañada

del Hoyo (nº 17, tabla 4). Así la diferencia de cota piezométrica con el vecino Subacuífero "Sierra Socorro" es de 120 a 142 m, lo que evidencia dicha desconexión hidráulica, favorecida por una fracturación de dirección NNE-SSO. Las lagunas se desarrollan en las formaciones del Cenomaniense en las que hay mayor presencia de horizontes margosos; ello favorece la existencia de formaciones acuíferas locales en este Subacuífero, estando presumiblemente desconectadas total o parcialmente de las formaciones acuíferas del resto de subacuíferos.

Las torcas se sitúan en el subacuífero "Sierra Socorro", a una distancia de 7.5 km al NO de las lagunas, y a mayor cota topográfica (entre 1200-1290 m s.n.m), y con una diferencia de 225-300 m respecto a la cota de agua de las lagunas (985-1000 m s.n.m.); asimismo, la cota piezométrica del piezómetro CHJ 08.17.024 (punto 4, tabla 4) muestra una diferencia respecto a la lámina de agua de las lagunas que puede alcanzar los 70 m; por ello se considera que la zona de las torcas corresponde a la zona de recarga preferencial de estas formaciones acuíferas cretácicas que drenan hacia el río Huécar y Fuente Rollo, pero no parece alimentar al complejo lagunar, ya que puede existir una desconexión hidráulica, favorecida por la estructura.



**Figura 9.** Manantial de Cueva del Fraile (julio 2003) (A), manantial superficial en Cañada del Hoyo (B) y manantial de caudal pequeño en fractura en la hoz del río Júcar (C).

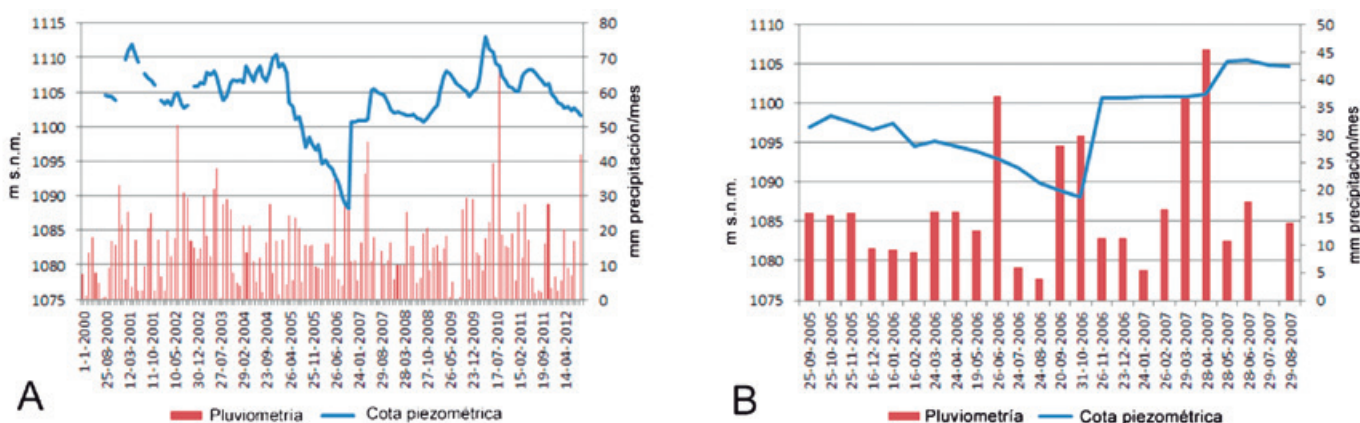
**Figure 9.** The Cueva del Fraile spring (July 2003) (A), a shallow spring in Cañada del Hoyo (B) and small flow spring in fracture in Júcar River (C).

### Hidroquímica del acuífero y de las lagunas

El estudio hidroquímico se ha abordado a partir de 48 analíticas, para un periodo comprendido entre 1991 a 2004, desde dos puntos de vista: agrupando los análisis por la naturaleza de las captaciones, independientemente de los subacuiferos y agrupando los puntos por los distintos subacuiferos. En cuanto a la hidroquímica de las lagunas, éstas ya han sido estudiadas en detalle (Rodrigo 1997; Camacho, 1997; Armengol, 1997; Carmona y Bitzer, 2001; Boronat, 2003; JCCM-UV, 2007; Martínez-Parra, 2014).

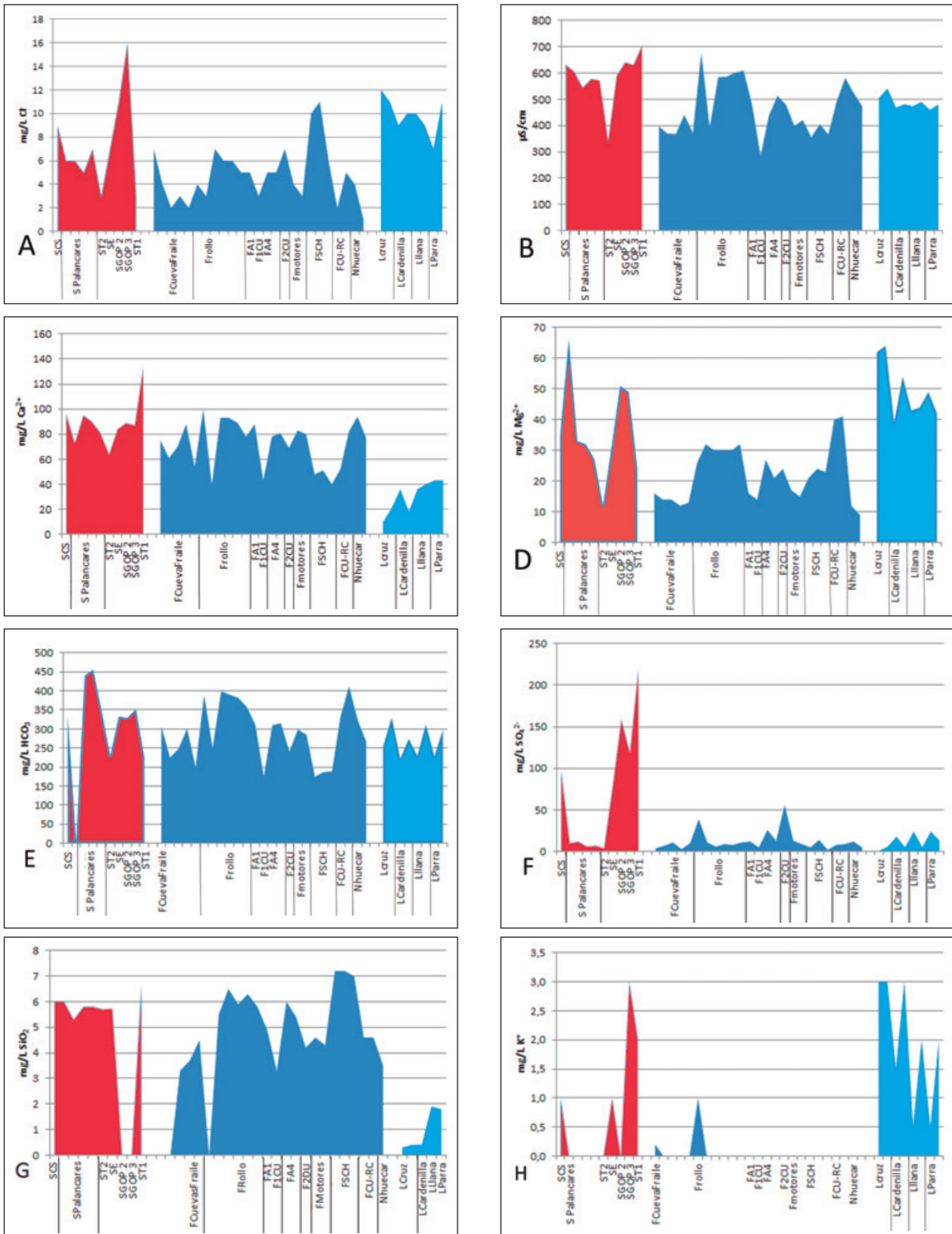
Para el primer tratamiento se han obtenido los datos estadísticos de la tabla 6 y representados en la figura 11. Las aguas son de facies bicarbonatada cálcica y cálcico-magnésica para manantiales y sondeos y bicarbonatadas magnésicas para las aguas de las lagunas (Carmona y Bitzer, 2001), la comparación de su quimismo permite apreciar los diferentes procesos químicos e influencias que reciben. Las lagunas tienen un mayor contenido en  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $K^+$  y  $Na^+$  que los sondeos y ma-

nantiales, así como notable presencia de  $CO_3^{2-}$ , de hasta 32 mg/L (tabla 6); ello puede estar causado por una desconexión hídrica temporal de las formaciones acuíferas locales y favorecido por los fenómenos de evaporación que se producen en las aguas, superior a la tasa de alimentación recibida de los acuíferos, lo que produce una sobresaturación y precipitación de  $CO_3Ca$ , incrementando la presencia del  $Mg^{2+}$  en las aguas, procedente de las dolomías del Cretácico superior, y disminuyendo el contenido en  $Ca^{2+}$ , en un proceso similar al descrito en los complejos lagunares de formaciones yesíferas de Arcas del Villar (Martinez et al, 2011). El comportamiento hidroquímico de la laguna de la Cruz confirma esta saturación en carbonatos y bicarbonatos en verano. Así, a finales de julio las aguas verde-azuladas de la laguna adquieren un color blanco lechoso por la precipitación del carbonato cálcico, a causa de la combinación de altas temperaturas, pH elevado y actividad fotosintética de elementos planctónicos (Cirujano, 1995; Rodrigo, 1997). A este fenómeno se le denomina "blanqueo" o "fenómeno blanco" (Rodrigo et al, 2003).



**Figura 10.** Evolución de la piezometría del piezómetro SPalancares/08.17.024 (A). Detalle durante el periodo 9/2005-8/2007(B). Datos piezométricos de la CHJ y pluviométricos de la estación de Cuenca (AEMET).

**Figure 10.** Evolution of the piezometry in SPalancares / 08.17.024 Piezometer(A). Detail in September2005/August 2007 period. Piezometric data of the CHJ and rainfall of the Cuenca station (AEMET).



**Figura 11.** Distribución de los diferentes valores iónicos (en mg/L) y conductividad eléctrica (en µS/cm). (A) Cloruros, (B) Conductividad eléctrica, (C) Calcio, (D) Magnesio, (E) Bicarbonatos, (F) Sulfatos, (G) Sílice, (H) Potasio. En rojo los sondeos, en azul marino los manantiales y en azul celeste las lagunas. Denominación de los puntos según tabla 4.

**Figure 11.** Distribution of the different ionic values (in mg/L) and Electrical conductivity (in µS/cm). A) Chlorides, (B) Electrical conductivity, (C) Calcium, (D) Magnesium, (E) Bicarbonates, (F) Sulphates, (G) Silica, (H) Potassium. Boreholes (red), springs (navy blue) and ponds (blue). Denomination of points according to Table 4.

Lagunas	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	pH	Cond	SiO <sub>2</sub>	F <sup>-</sup>	Sr <sup>2+</sup>
<b>Núm. de valores utilizados</b>	8	8	8	8	5	8	8	8	8	8	8	5	---	4
<b>Mínimo</b>	7	1	222	0	0	2	39	10	1	7.50	460	0.3	--	0
<b>Máximo</b>	12	24	330	32	2	7	64	43	3	8.90	541	1.9	--	0
<b>Media</b>	10	12	269	19	1	4	50	31	2	8.16	488	1	--	0
<b>CV</b>	0.17	0.76	0.15	0.72	1.49	0.61	0.19	0.41	0.54	0.06	0.05		-	
<b>Manantiales</b>														
<b>Núm. de valores utilizados</b>	29	28	24	29	29	23	25	25	23	29	29	21	3	16
<b>Mínimo</b>	1	1	175	0	0	0	9	40	0	6.98	260	3.3	0.1	0
<b>Máximo</b>	11	56	412	5	40	5	50	100	1	8.50	676	7.2	0.18	0.8
<b>Media</b>	5	12	295	0	7	1	24	73	0	7.70	462	5.2	0.11	0.12
<b>CV</b>	0.51	0.98	0.25	5.39	1.70	1.15	0.44	0.25	4.04	0.04	0.22	0.24		0.20
<b>Sondeos</b>														
<b>Núm. de valores utilizados</b>	10	10	9	10	10	9	10	10	9	10	10	8		5
<b>Mínimo</b>	3	4	224	0	0	0	12	64	0	7.15	342	5.3	--	0
<b>Máximo</b>	16	220	456	0	5	5	65	134	3	7.80	705	6.7	--	1.6
<b>Media</b>	7	71	338	0	3	2	36	89	1	7.46	584	5.8	--	0.4
<b>CV</b>	0.54	1.08	0.23		0.49	0.55	0.42	0.21	1.41	0.03	0.16	0.07	--	

**Tabla 6.** Valores estadísticos de las aguas de las lagunas, manantiales y sondeos. Concentraciones en mg/L, conductividad eléctrica en µS / CV- coeficiente de variación.

**Table 6.** Statistical values of pond, spring and borehole waters. Concentrations in mg / L, electrical conductivity in µS / CV- coefficient of variation.

Las aguas captadas en los sondeos presentan mayor conductividad eléctrica y contenido en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup> debido al mayor tiempo de circulación en el acuífero carbonatado, pudiendo incorporar iones provenientes de la diseminación de materiales yesíferos en la litología carbonatada. Por el contrario, los manantiales muestran, en general, menor contenido iónico y conductividad eléctrica, asociable tanto a que procedan de formaciones acuíferas locales de menor recorrido o bien que presentan incorporación de aguas de circulación rápida como respuesta a fuertes lluvias. Diferenciando los contenidos en función de su recorrido (tabla 7) - considerando a las de corto recorrido a manantiales procedentes de formaciones acuíferas locales y las de largo recorrido a los manantiales de mayor caudal asociados a formaciones acuíferas de mayor entidad - se observa que las de menor recorrido tienen menor contenido en iones principales

(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup>) aunque su contenido medio en nitratos es mayor, manifestando una mayor vulnerabilidad a la acción antrópica y presentando puntualmente un elevado contenido en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (un máximo de 40 mg/L). Aún y así, el contenido medio en nitratos es superior (7 mg/L) es mayor que en los sondeos (3 mg/L) y las lagunas (1 mg/L) (tabla 6).

Respecto a los iones minoritarios el contenido en SiO<sub>2</sub> es similar en sondeos y manantiales, muy superior al de las lagunas, que es prácticamente inexistente, quizás relacionado con la presencia de diatomeas, limitadas en su crecimiento por el contenido en sílice (Morata, 2016). En el caso del F<sup>-</sup> solo se dispone datos en la captación de Fuente Cueva del Fraile, con un contenido medio de 0.15 mg/L. En cuanto al Sr<sup>2+</sup>, es mayor su contenido en las aguas en los sondeos, pero su distribución no es homogénea y presenta un gran coeficiente de variación.

Contenido medio	Nº	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	pH	Cond	SiO <sub>2</sub>
<b>Manantiales de recorrido largo</b>	20	4	9	323	0	2	1	25	78	0	7.6	481	5
<b>Manantiales de recorrido corto</b>	9	6	18	238	0	15	2	21	62	0	7.9	418	6

**Tabla 7.** Valores medios de las aguas de los manantiales en función de su tiempo de recorrido. Concentraciones en mg/L, conductividad eléctrica en µS/cm.

**Table 7.** Average values of the spring waters according to their travel time. Concentrations in mg/L, electrical conductivity in µS/cm.

	Nº	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	pH	Cond	SiO <sub>2</sub>	Sr <sup>2+</sup>
<b>E de Bascuñana</b>	2	3	9	372	0	0	0	41	67	0	7.7	537	4.6	0
<b>Norte de Palomera</b>	11	4	10	290	0	3	1	16	79	0	7.62	439	5.4	0.16
<b>Sierra Socorro</b>	10	6	21	374	0	3	2	31	85	0.2	7.46	578	5.9	0.21
<b>Cañada del Hoyo</b>	3	9	7	184	1.6	38	0	23	46	0	8.03	376	7.1	0
<b>Dehesa Santiago</b>	3	10	103	314	0	3	3	39	82	1.3	7.52	585	4.4	0
<b>Sierra Bascuñana</b>	2	3	112	226	0	2.5	1	18	99	1	7.45	523	6.2	1.1

**Tabla 8.** Contenidos medios de las aguas subterráneas en función de la agrupación por subacuíferos. Concentraciones en mg/L, conductividad eléctrica en µS/cm. No hay análisis químicos del subacuífero Hoz del Moro.

**Table 8.** Average contents of groundwater according to grouping by sub-aquifers. Concentrations in mg/L, electrical conductivity in µS/cm. There is no chemical analysis of Hoz del Moro sub-aquifer.

Dejando aparte el quimismo de las lagunas, por sus peculiaridades, existe una cierta diferencia hidroquímica entre las aguas de una circulación de mayor recorrido (sondeos y manantiales de entidad regional, tablas 6 y 7) con respecto a las de menor recorrido, en surgencias más locales (tabla 7). Ello se evidencia en el contenido en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup>.

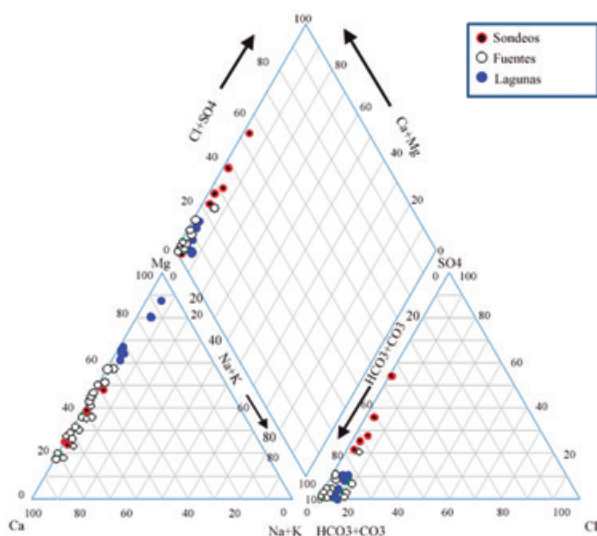
En el segundo tratamiento de los datos, agrupándolos por los subacuíferos descritos, no se han empleado los datos de las lagunas al no considerarse representativos del quimismo de las formaciones acuíferas. El resultado muestra leves diferencias en conductividad eléctrica, mayores contenidos en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> en los subacuíferos "Dehesa de Santiago", "Sierra Socorro" y "Sierra Bascuñana", y, en general, contenido bajo en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, con excepción del subacuífero "Cañada del Hoyo", que puede tratarse

de un hecho local del punto muestreado (figura 6 -punto 17 FSCH, tabla 8). Atendiendo a lo descrito, las diferencias en el quimismo más notables estarán asociadas más a la influencia litológica y no tanto al recorrido o tiempo de residencia (evidenciado por la diferente naturaleza de las captaciones).

La representación de los puntos analizados, según captación, en el diagrama de Piper-Hill-Langelier muestra las diferencias entre los tres grupos (figura 12). El mayor contenido en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en los sondeos les diferencia de los otros grupos, mientras que el quimismo de los manantiales muestra una mayor variación en el contenido de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, y las aguas de las lagunas se separan de los otros grupos por su mayor contenido en Mg<sup>2+</sup>.

Del conjunto de las lagunas, todas ellas son holomícticas (Miracle et al, 1992), excepto la laguna de la Cruz, que supone una singularidad al ser meromíctica. La conductividad eléctrica en las lagunas de la Parra, Cardenillas y Llana se encuentra entre 300-500 µS/cm, mientras que en la lagunilla Cardenilla es mayor, entre 1280 y 1300 µS/cm (Armengol, 1997; JCCM-UV, 2007; Martínez-Parra, 2014). En el caso de la laguna de la Cruz se define una capa inferior de mayor conductividad eléctrica y que no se mezcla con la superficial; las conductividades pasan, de techo a base, de 500 a 1700 µS/cm. Esta mayor conductividad está relacionada con la sedimentación y redisolución del CO<sub>3</sub>Ca proveniente de las capas superiores formado durante el "fenómeno blanco" (Rodrigo et al, 2003). La quimioclina se sitúa por debajo de 18-19 m de profundidad (Armengol, 1997; Boronat, 2003). En el Lagunillo del Tejo se desarrollan procesos de estratificación estival en condiciones de anoxia con presencia de bacterias fotosintéticas que usan el SH<sub>2</sub> anaeróbico (Armengol, 1997).

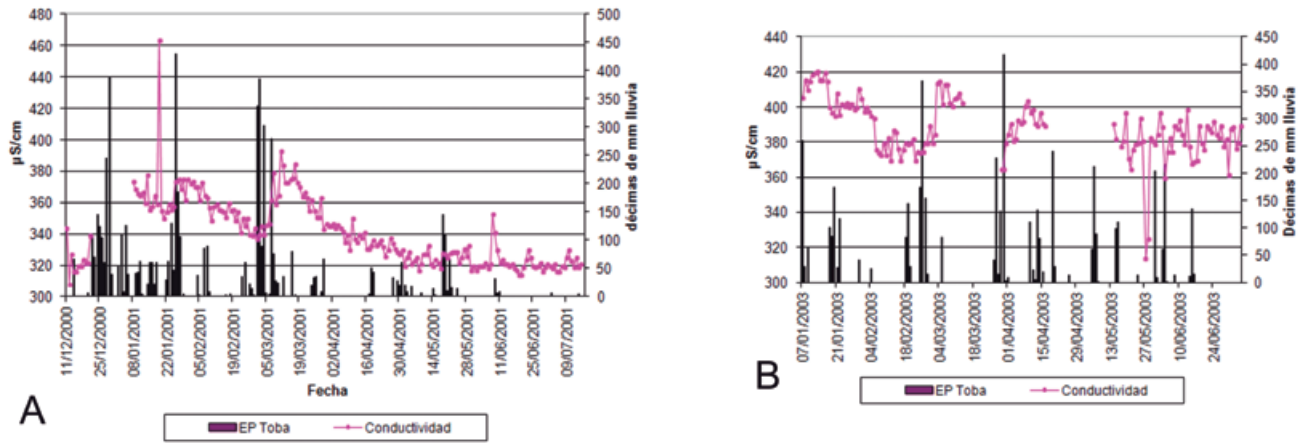
El estudio de la evolución de la conductividad eléctrica en las aguas del manantial Cueva del Fraile (subacuífero "Norte de Palomera") muestra que la relación pluviometría/conductividad no es siempre directa, así la conductividad es estable excepto en



**Figura 12.** Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las aguas del acuífero cretácico de Cuenca.

**Figure 12.** Piper-Hill-Langelier diagram of Cuenca cretaceous aquifer water.





**Figura 13.** Evolución de la conductividad eléctrica en las aguas del manantial Cueva del Fraile (Subacuífero Norte de Palomera)(A). Detalle de la evolución para el periodo enero/junio 2003(B). Datos pluviométricos de la estación de Embalse de la Toba (AEMET).

**Figure 13.** Evolution of the electrical conductivity of the Cueva del Fraile spring water (Norte de Palomera sub-aquífer). Detail of the evolution for the period January/June 2003 (B) Rainfall data of the Toba Dam station (AEMET).

periodos con fuertes lluvias, como las del periodo noviembre 2000/julio 2001 - de hasta 40 mm/día - en las que se produce un incremento puntual entre 40-100 µS/cm de conductividad eléctrica, posterior a las lluvias entre una semana y un mes, para luego disminuir. Se puede considerar que en esos casos, el funcionamiento del flujo hidrodinámico es rápido y de pistón (figura 8), mientras que para el resto del año es más retardado y de mezcla. No obstante no siempre es tan evidente dicho funcionamiento, ya que la incorporación rápida en las proximidades de la zona de surgencia puede favorecer el descenso inicial de la conductividad eléctrica y su mezcla con agua procedente de zonas más alejadas puede suavizar dicho incremento (figura 13).

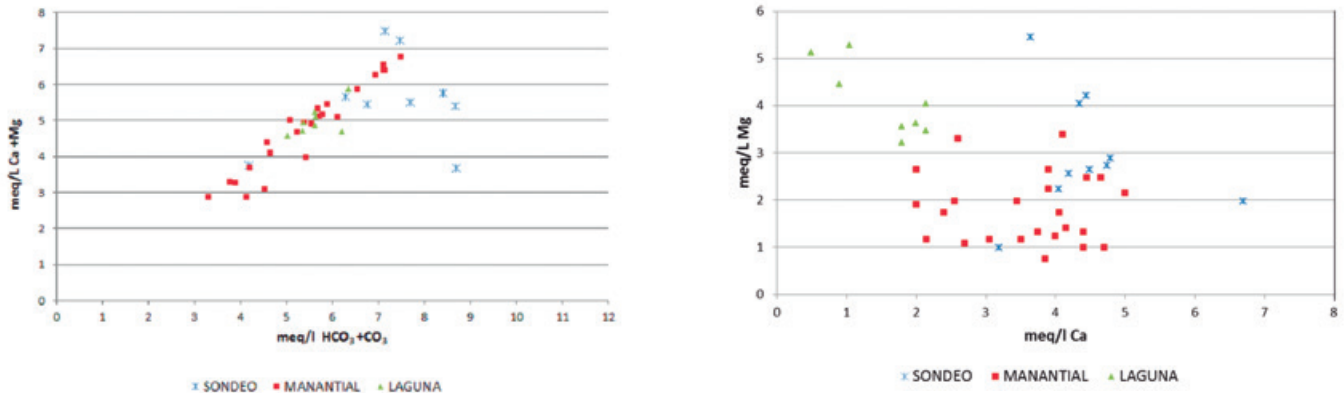
Según Martínez-Parra (2014), los índices de saturación en calcita y dolomita muestran un comportamiento similar para las aguas de los sondeos y los manantiales; las aguas están saturadas en calcita y dolomita, con índices medios de saturación de 0.356 y 0.372 respectivamente; sin embargo en el caso de las lagunas la sobresaturación en dolomita y calcita es mayor, de 0.631 y 1.807 respectivamente (tabla 9).

Las relaciones iónicas permiten profundizar en la evolución e influencias en el quimismo de las aguas, aunque sean formaciones carbonatadas y, grosso modo, homogéneas en su quimismo. La relación  $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{HCO}_3+\text{CO}_3)$  muestra una clara correlación de las aguas de los manantiales con un coeficiente de regresión  $R=0.96$  pero no en los sondeos (figura 14a) lo que evidencia otras influencias litológicas en su quimismo ( $\text{Ca}^{2+}$  proveniente de la disolución de los yesos presentes en las formaciones carbonatadas) y quizás un mayor tiempo de residencia, mientras que los manantiales están asociados principalmente a tramos de rocas carbonatadas cálcicas y magnésicas. La relación  $r\text{Ca}/r\text{Mg}$  (Figura 14b) muestra la diferencia entre las aguas de las lagunas, con mayor contenido en  $\text{Mg}^{2+}$ , del resto de las aguas, más cálcicas, causado principalmente por la desconexión de la alimentación desde las formaciones acuíferas, la evaporación y consiguiente precipitación de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Asimismo, se observa diferencias entre subacuíferos atribuibles, en general, a la influencia de la distinta composición mineralógica de la litología carbonatada y al tiempo de residencia (figura 15).

	Lagunas		Manantiales		Sondeos	
	IS Calcita	IS Dolomita	IS Calcita	IS Dolomita	IS Calcita	IS Dolomita
Núm. de valores utilizados	8	8	24	24	10	10
Mínimo	0.120	0.560	0.010	-0.210	0	-0.440
Máximo	0.770	3.420	0.610	1.290	0.630	1.190
Media	0.631	1.807	0.356	0.372	0.299	0.370
CV	0.60	0.54	0.63	1.34	0.72	1.60

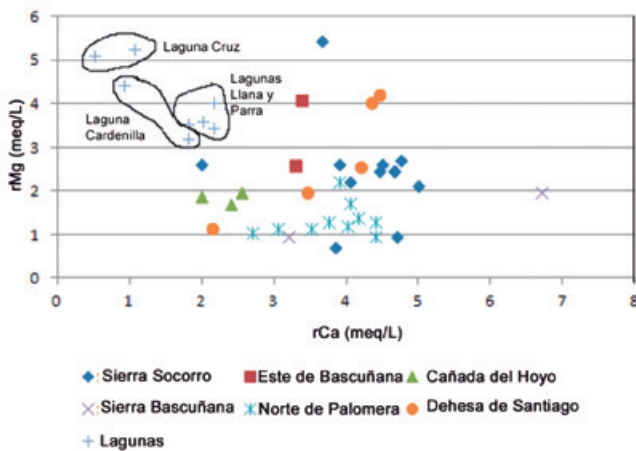
**Tabla 9.** Valores estadísticos de los índices de saturación de las aguas de las lagunas, manantiales y sondeos.

**Table 9.** Statistical values of the saturation indices of pond, spring and borehole water.



**Figura 14.** Relaciones iónicas  $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{HCO}_3+\text{CO}_3)$  (A) y  $r\text{Ca}/r\text{Mg}$  (B). En la figura (A) la relación muestra que los manantiales presentan una evidente correlación propia de acuíferos carbonatados, al igual que las lagunas, aunque las aguas de los sondeos muestran mayor variación por la incorporación de otras influencias litológicas y mayor tiempo de residencia. En la figura (B) se advierte la diferencia de las aguas de las lagunas en relación con los otros grupos, con mayor contenido en  $\text{Mg}^{2+}$  y menor en  $\text{Ca}^{2+}$ .

**Figure 14.** Ionic relations  $r(\text{Ca} + \text{Mg}) / r(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)$  (A) and  $r\text{Ca} / r\text{Mg}$  (B). In Figure (A), the relationship shows that the springs present an evident correlation typical of carbonated aquifers, as do the pond waters, although the borehole waters show greater variation due to the incorporation of other lithological influences and a longer residence time. Figure (B) shows the difference in pond waters in relation to other groups, with a higher content of  $\text{Mg}^{2+}$  and less in  $\text{Ca}^{2+}$ .



**Figura 15.** Agrupación de los puntos por subacuíferos y aguas de las lagunas con respecto a la  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ .

**Figure 15.** Grouping of the points by sub-aquifer and pond water in relation to  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ .

En cuanto a los isótopos estables del agua (figura 16, tabla 10) los resultados analíticos se han representado en el clásico diagrama  $\delta^{18}\text{O}$ -  $\delta^2\text{H}$  junto con la línea meteórica mundial definida por Craig (1961),  $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$  (figura 16). Del diagrama se desprende que las muestras 1, 2, 17 (en 2004) y 18 se sitúan en el entorno de la línea meteórica mundial, y presentan valores muy similares. Representarían aguas de recarga rápida, con la impronta del agua precipitación, y, por tanto, sin prácticamente interacción con la atmósfera. Los valores de exceso de deuterio,  $d = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ , definido por Dansgaard (1964), y que aparecen en la tabla 10, refuerza esta idea, con valores cercanos al 10 ‰, igual al de la línea meteórica mundial.

Las desviaciones isotópicas de la muestra 29, tomada en la laguna de la Cruz, indican que ha sufrido una evidente evaporación, con valores correspondientes a aguas pesadas, y un exceso de deuterio muy reducido (figura 16, tabla 10). El ajuste lineal de todas las muestras puede asimilarse a la línea de evaporación local, que se ha representado también en la figura 16b. Entre las muestras que representan una recarga con composición isotópica asimilable a la de la precipitación y la muestra de la laguna de la Cruz, se sitúan las muestras 14 y 17 (2006). Estas muestras se encuentran prácticamente sobre la línea de evaporación, e indican que han sufrido fraccionamiento por este proceso al permanecer el agua algún tiempo en contacto con la atmósfera durante el proceso de recarga. La pendiente de la línea de evaporación lineal, que es de 4.7, indicaría que el proceso de evaporación se ha producido en condiciones de humedad relativa moderada (Clark and Fritz 1997). La pendiente obtenida es similar a la descrita por Carmona y Bitzer (2001) para pequeñas superficies de agua que han sufrido evaporación.

La existencia de composiciones isotópicas diferentes debidas a la evaporación en el mismo punto (17), pero en fechas diferentes, indica que el proceso de recarga puede ser más complicada que la mera infiltración rápida del agua de precipitación, pudiendo existir almacenamiento en superficie, previamente a su entrada en el acuífero.

La escasa variabilidad las desviaciones isotópicas muestran que la cota de recarga ha debido ser muy similar en todos esos casos y asociada a las superficies del entorno.

Fecha	Nº	Punto	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	Exc D (‰)
ene-04	1	FCueva Fraile	-54.1	-8.16	11.18
ene-04	2	FRollo	-54.7	-8.01	9.43
ene-04	14	FA	-47.4	-6.4	3.8
feb-04	17	FSCH	-55.8	-8.33	10.84
feb-06	17	FSCH	-52.3	-7.29	6.02
ene-04	18	FCU-RC	-55.3	-8.17	10.06
feb-06	29	Laguna Cruz	4.79	4.53	-31.45

**Tabla 10.** Desviaciones isotópicas de deuterio y oxígeno-18 y exceso de deuterio en siete muestras de agua del área estudiada. Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Aplicaciones Isotópicas del CEDEX. Las desviaciones isotópicas de los isótopos estables del agua se midieron en alícuotas de las muestras. Las medidas se realizaron mediante un espectrómetro de masas ligeras modelo Delta Plus Advantage de la marca Finnigan. Las incertidumbres son de  $\pm 0,2\%$  para  $\delta^{18}O$ ‰ y de  $\pm 1,5\%$  para  $\delta^2H$ ‰. Los resultados analíticos se expresan como desviación de las relaciones isotópicas de la muestra con respecto a las de una escala de patrones VSMOW-SLAP (Viena-Standard Mean Ocean Water-Standard Light Antarctic Precipitation).

**Table 10.** Isotopic deviations of deuterium and oxygen-18 and excess deuterium in seven water samples of the studied area. The determinations were made by the Laboratory of Isotopic Applications of CEDEX. Isotopic deviations of stable water isotopes were measured in aliquots of the samples. The measurements were made using a light mass spectrometer model Delta Plus Advantage of the Finnigan brand. Uncertainties are  $\pm 0.2\%$  for  $\delta^{18}O$  / ‰ and  $\pm 1.5\%$  for  $\delta^2H$  / ‰. The analytical results are expressed as a deviation from the isotopic ratios of the sample in relation to those of a VSMOW-SLAP (Vienna-Standard Mean Ocean Water-Standard Light Antarctic Precipitation) pattern scale.

**Conclusiones**

Las formaciones carbonatadas cretácicas al SE de la ciudad de Cuenca constituyen el “acuífero cretácico de Cuenca”, diferenciándose subacuíferos independientes entre sí, así como distintos horizontes en vertical, escasamente interconectados. Las variaciones litológicas y el diferente grado de fracturación y karstificación condicionan espacialmente la conexión vertical de los acuíferos, definiéndose unas franjas acuíferas de mayor porosidad secundaria que funcionarán a modo de acuífero semiconfinado.

La circulación de las aguas subterráneas es, principalmente, hacia los cauces superficiales que ejercen como colectores de aguas y a manantiales aislados o desconectados por la litología.

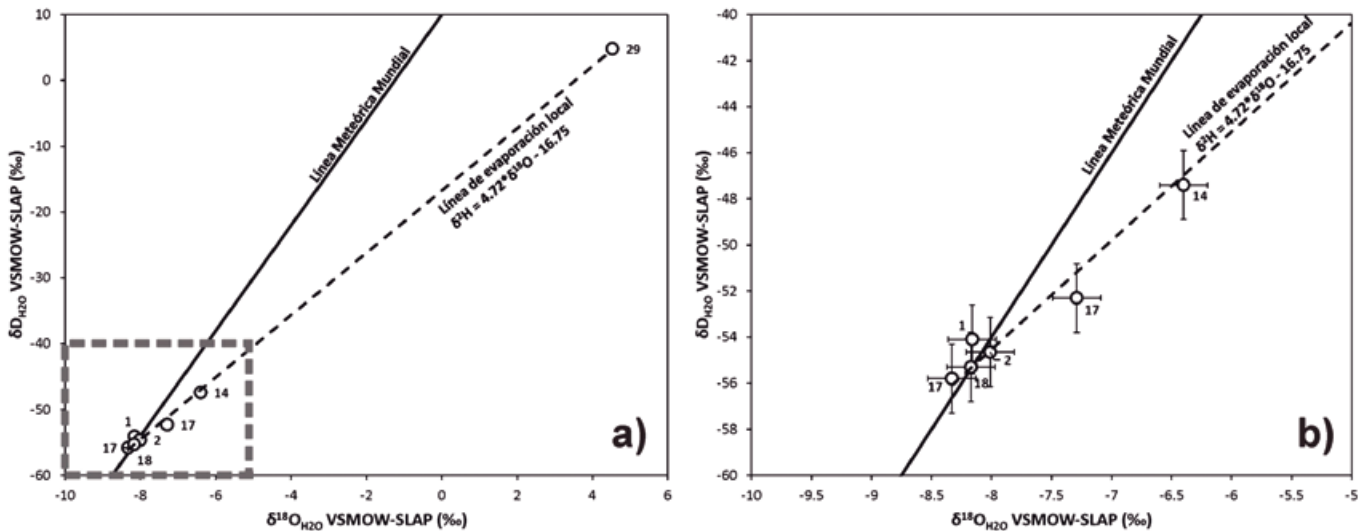
El flujo hidrodinámico muestra una combinación de flujo pistón y mezcla, asociado a manantiales de carácter regional con una amplia red de drenaje.

La piezometría muestra descensos suaves, de orden métrico, en periodo estival y ascensos rápidos en época húmeda.

Las lagunas asociadas tienen una alimentación por tramos acuíferos locales, independizados por la diferente litología existente.

No existe conexión hidrológica entre la zona de las torcas y la de las lagunas, correspondiendo a dos subacuíferos individualizados distintos.

Las aguas en el acuífero son de facies bicarbonatada cálcica y cálcico-magnésica y en las lagunas de facies bicarbonatada magnésica. Aunque influye en la



**Figura 16.** Diagrama  $\delta^{18}O$ -  $\delta^2H$  de las muestras tomadas en la zona estudiada a) Conjunto de las muestras. b) Zona resaltada en el diagrama a).  
**Figure 16.** Diagram  $\delta^{18}O$ -  $\delta^2H$  of the samples taken in the studied area a) Set of the samples. b) Area highlighted in the diagram a).

composición de las aguas el tiempo de residencia y circulación, también influye la litología existente.

Los fenómenos de evaporación y precipitación de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  observados y descritos en las aguas de las lagunas, evidencian que se produce una desconexión hidráulica temporal con respecto a las formaciones acuíferas locales o bien que su tasa de alimentación proveniente de estas formaciones es inferior a la evaporación que se produce en las mismas. Ello se evidencia por la variación del contenido químico de las aguas de las lagunas con un enriquecimiento del agua en  $\text{Mg}^{2+}$ .

Las relaciones iónicas permiten diferenciar las distintas influencias en la composición de sus aguas, tanto las litológicas como la desconexión hidráulica y los procesos de evaporación y precipitación. Así, en las lagunas de Cañada del Hoyo se produce una desconexión respecto a las formaciones acuíferas locales que las alimentan, como indican (1) el distinto contenido en  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  entre las aguas en lagunas y manantiales, (2) la relación iónica entre  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  y (3) los isótopos estables.

## Agradecimientos

A los revisores, por sus interesantes observaciones. Al Dr. Silvino Castaño, por sus comentarios sobre la hidrología isotópica. Las determinaciones isotópicas se realizaron en el Laboratorio de Aplicaciones Isotópicas del CEDEX. Dedico este artículo a Julián Carretero, gran conocedor de la hidrogeología de la provincia de Cuenca, que nos dejó en la primavera de 2020.

## Referencias

- Alonso, F. 1991. La Serranía de Cuenca. In: González Marín, J.A. y Vázquez González, A. (Coord.) *Guías de Espacios Naturales*. Castilla La Mancha publicaciones. 261-284.
- Armengol, J. 1997. *Caracterización estructural del zooplankton de las lagunas cársticas de Cuenca, con especial atención a su distribución vertical*. Tesis doctoral. Universitat de Valencia.
- Barreiro-Lostres, F., Moreno, A., Giralt, S. and Valero-Garcés, B.L. 2013. Evolución sedimentaria del lago kárstico de La Parra (Cuenca) durante los últimos 1600 años: Paleohidrología, clima e impacto humano. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 39(1), 179-193. ISSN 0211-620.
- Boronat, M.D. 2003. *Distribución de los microcrustáceos en lagunas de Castilla-La Mancha. Ciclos estacionales y migración vertical en lagunas cársticas estratificadas*. Tesis doctoral. Universitat de Valencia.
- Camacho, A. 1997. *Ecología de los microorganismos fotosintéticos en las aguas microaerobias y anóxicas de la laguna de Arcas*. Tesis Doctoral. Universitat de Valencia.
- Camacho, A., Wurtsbaugh, W., Miracle, M., Armengol, X. and Vicente, E. 2003. Nitrogen limitation of phytoplankton in a Spanish karst lake with a deep chlorophyll maximum: a nutrient enrichment bioassay approach. *Journal of plankton research*, v.25, 4, 397-404.
- Camacho, A., Picazo, A. and Rochera, C. 2007. *Limnología de las lagunas de la Provincia de Cuenca: recopilación y síntesis de información científica hasta 2006*. Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva y Departamento de Microbiología y Ecología de la Universitat de València, Burjassot (València)- Consejería de medio Ambiente y Desarrollo Rural de la Junta de Comunidades de castilla- La Mancha. Delegación Provincial de Cuenca. Edición en formato CD.
- Casado, S. and Montes, C. 1995. *Guía de lagos y humedales de España*. J.M. Reyero editor. Madrid. 225 pp.
- Carmona, J.M. and Bitzer, K. 2001. Los sistemas cársticos de lagunas de Cañada del Hoyo y Torcas de los Palancares (Serranía de Cuenca, España). In: Medina, A; Carrera, J.; Vives, L. (coord.) *Las caras del agua subterránea: congreso, en memoria de Germán Alfonso Galarza López* Vol. 1, 2001, 451-460.
- Cirujano, S. 1995. *Flora y vegetación de las lagunas y humedales de la provincia de Cuenca*. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha - CSIC – Real Jardín Botánico de Madrid. 224 pp.
- Clark, I., and Fritz P. 1997 *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Lewis Publishers. 342 pp.
- Confederación Hidrográfica del Júcar. 2015. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de Planificación Hidrológica 2015-2021. Memoria y Anexos (12). <https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Paginas/PHC-2015-2021-Plan-Hidrologico-cuenca.aspx>
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, Vol. 133, 1702-1703.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16, 436-468.
- Del Olmo, P. and Álvaro, M. 1989. *Memoria y Mapa Geológico de España Escala 1:50.000 n° 610 "Cuenca"*. Segunda serie-Primera edición. IGME. Madrid.
- Eraso, A., López-Acevedo, V., López, M.; Navarro, V., Suso, J. and Santos, V. 1979. Estudio de las torcas de los Palancares y Cañada del Hoyo en el karst de la serranía de Cuenca. *Kobie*. Boletín n° 9. 7-69.
- Ford, D.C. and Williams, P.W. 1989. *Karst geomorphology and hydrology*. Ed Chapman & Hall. 601 pp.
- Gutiérrez-Elorza, M. and Valverde, M. 1994. El sistema de poljes del río Guadazaón (Cordillera ibérica, Provincia de Cuenca). *Cuaternario y geomorfología* 8 (1-2), 87-95.
- IGME 1980. *Estudio hidrogeológico preliminar de la cabecera del Júcar. Sistema 18*. Informe inédito. Centro de documentación del IGME.

- IGME 1982. *Proyecto de investigación de infraestructura hidrogeológica en el sistema 18 y zonas adyacentes en la provincia de Cuenca*. Informe inédito. Centro de documentación del IGME.
- IGME-Confederación Hidrográfica del Júcar 1992. *Propuesta de normas de explotación de Unidades Hidrogeológicas en el Sistema Hidráulico Alarcón-Contreras. 1991-1992*. Informe inédito. Centro de documentación del IGME.
- Kiraly, L. 1975. Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. In: Burger, A.; Dubertret, L. (eds.) *Hydrogéologie des terrains karstiques*. IAH, Paris, 53-67.
- Junta de Comunidades de Castilla La Mancha JCCM. 1995. *Proyecto de mejora y ampliación del abastecimiento a Cuenca*. Expediente nº HV-CU93/175. Informe inédito.
- Junta de Comunidades de Castilla La Mancha- Universitat de València JCCM-UV. 2007. *Limnología de las lagunas de la provincia de Cuenca: recopilación y síntesis de información científica hasta 2006*. CD-ROM interactivo.
- Marqués de Cantarranas. 2001. *Paisaje lacustre de Cañada del Hoyo*. Publicaciones de la Excma. Diputación Provincial de Cuenca. Serie Paleontología nº 2. 214 pp.
- Martínez-Parra, M. 2014. *Hidrogeología de la Serranía de Cuenca*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. 2 tomos.
- Martínez-Parra, M., López-Pamo, E., De la Hera, A. and Santofimia, E. 2011. Main characteristics of ponds associated with gypsum karst aquifer in the Arcas pond complex (Cuenca, Spain). *Carbonates and Evaporites* 26:47-60 DOI 10.1007/s13146-011-0045-6.
- Miracle, M.R.; Vicente, E. and Pedrós-Alió, C. 1992. Biological studies of Spanish meromictic and stratified karstic lakes. *Limnetica* 8. 59-77.
- Morata, S. 2016. *Ecología del fitoplancton de una laguna cárstica estratificada: distribución vertical, estacionalidad y limitación por nutrientes*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- Ramírez, J., Portero, J.M. and Olivé, A. 1975. *Memoria y Mapa Geológico de España Escala 1:50.000 n° 635 "Fuentes"*. Segunda serie-Primera edición. IGME. Madrid.
- Rodrigo, M.A. 1997. *Limnología comparada de las lagunas de dos sistemas cársticos de Cuenca. Bacterias fotosintéticas de la laguna de la Cruz y la Laguna Arcas-2*. Tesis Doctoral. Universitat de Valencia.
- Rodrigo, M.A.; Vicente, E. and Miracle M.R. 2003. Short-term calcite precipitation in the karstic meromictic lake La Cruz. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 25. 711-719.

Recibido: julio 2019

Revisado: noviembre 2019

Aceptado: enero 2020

Publicado: marzo 2021