

Trabajo de Fin de Máster

**Caracterización geomorfológica, hidrogeológica y ambiental
del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep
(La Vall d'Uixó, Castellón)**

Facultad de Ciencias – Universidad de Málaga – UMA



2023

Tutores:

(UMA)

(IGME-CSIC)



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Máster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente

(RHYMA)

Recomendación de cita de este trabajo:

(2023) *Caracterización geomorfológica, hidrogeológica y ambiental del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Castellón)*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad de Málaga. Málaga. 122 pp.

Fotografías de la portada y contraportada:

Vistas del interior de las Coves de Sant Josep - Ayuntamiento de La Vall d'Uixó

Caracterización geomorfológica, hidrogeológica y ambiental del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Castellón)



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

**Máster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente
(RHYMA)**

**Universidad de Málaga
Curso 2022/2023**

**Tutora de la Universidad de Málaga
(UMA)**

**Tutores del Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España
(IGME-CSIC)**





Málaga, 2023

*“...Él, que fue testigo
Generación tras generación
Él se fue contigo, en el río
Las libélulas volaron al exilio, en el río
De su cauce ha quedado solo un hilo...
Y ese hilo grita:
Asesinos...”*

En el río – Amaral (2005)

Índice

Resumen	i
Palabras clave.....	i
Abstract	ii
Key words.....	ii
Agradecimientos	iii
I. Primera parte: aspectos generales.....	1
1. Introducción	1
1.1. Justificación.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Antecedentes.....	3
2. Delimitación del área de estudio y descripción del sistema kárstico ..9	
2.1. Límites y contexto geográfico del área de estudio.....	9
2.2. Geometría del sistema kárstico	11
3. Marco geológico, climático e hidrogeológico del área de estudio.....16	
3.1. Marco geológico.....	16
3.1.1. Estratigrafía y litología.....	18
3.1.2. Geología del entorno inmediato de la cavidad	22
3.1.3. Geomorfología	23
3.2. Caracterización climática.....	24
3.2.1. Temperatura	24
3.2.2. Precipitación	28
3.3. Marco hidrogeológico	30
3.3.1. Caracterización general de los acuíferos	30
3.3.2. La relación entre el Río Subterráneo y el nivel freático	32
3.3.3. Esquema hidrogeológico de las Coves de Sant Josep	34

4. Metodología.....	37
4.1. Trabajo de gabinete.....	37
4.1.1. Recopilación de información.....	37
4.1.2. Tratamiento de datos.....	37
4.2. Trabajo de campo.....	39
4.2.1. Metodología para los trabajos geomorfológicos.....	40
4.3. Trabajo de laboratorio.....	42
II. Segunda parte: estudio geomorfológico, hidrogeológico y ambiental del sistema kárstico	45
5. Estudio geomorfológico de las Coves de Sant Josep	45
5.1. Descripción geomorfológica de las Coves de Sant Josep	47
5.1.1. Galería activa habilitada al turismo	52
5.1.2. Galería Seca habilitada al turismo	55
5.1.2.1. Sector Bloques.....	55
5.1.2.2. Cara del Diablo.....	58
5.1.3. Galería activa en la zona no visitable	61
5.2. Génesis y evolución espacio-temporal del sistema endokárstico .	64
6. Hidroquímica del agua subterránea	66
6.1. Elementos mayoritarios	69
6.1.1. Muestras puntuales	69
6.1.2. Evolución temporal	75
6.2. Isótopos estables	78
6.3. Otras consideraciones hidroquímicas.....	81
6.3.1. Análisis de las Tierras Raras (REE)	81
6.3.2. Fluorescencia natural de las aguas.....	83
7. Características geoquímicas de la atmósfera subterránea	87
7.1. Análisis de los parámetros ambientales	88
7.1.1. Análisis espacial	89
7.1.2. Análisis temporal	92

7.1.2.1. Temperatura del aire.....	92
7.1.2.2. Concentración de CO ₂	94
7.2. La señal isotópica del CO ₂	95
III. Tercera parte: discusión, modelos y conclusiones	99
8. Discusión y limitaciones	99
8.1. Modelos conceptuales del sistema kárstico	100
8.1.1. Modelo hidrogeológico y geomorfológico.....	101
8.1.2. Modelo hidroquímico	105
8.1.3. Modelo de funcionamiento de la atmósfera subterránea	107
8.2. Aplicación a la gestión y la conservación de la cavidad	109
9. Conclusiones	112
10. Referencias.....	115
11. Anexos	122

Caracterización geomorfológica, hidrogeológica y ambiental del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Castellón)

Resumen

Las Coves de Sant Josep son la parte espeleológica de un sistema kárstico desarrollado en las dolomías tríasicas de la Sierra del Espadán, en el borde meridional del Parque Natural homónimo. La cueva presenta un desarrollo de unos 3000 metros de desarrollo, y su boca, por la que surge un manantial importante (de un caudal medio entre 100 y 200 L/s) se halla en el término municipal de La Vall d'Uixó (Castellón). Está recorrida por un río subterráneo parcialmente habilitado al turismo, que se recorre en barca, con unos 250.000 visitantes anuales. La cavidad se encuentra próxima al Río Belcaire, en el dominio suroriental de la Cordillera Ibérica, cercana a la terminación costera en la Plana de Castellón. La estructura geológica consiste en una sucesión de pliegues de orientación subparalela y fallas NW-SE y NE-SW; uno de los pliegues sinclinales condiciona el trazado y la geomorfología de la cavidad. En este trabajo se ha realizado la caracterización geomorfológica e hidrogeológica de la cueva, mediante cortes geomorfológicos y análisis hidroquímicos e isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de las aguas presentes en la cavidad, tanto del río subterráneo como de los goteos. Además, se han analizado diversos parámetros ambientales de la atmósfera subterránea, como la concentración de gases (CO_2) y su caracterización isotópica ($\delta^{13}\text{C}$), con el objetivo de establecer su interacción en el sistema roca-aire-agua. Con dicha información se apuntan a varios modelos conceptuales del sistema kárstico: un modelo hidrogeológico-geomorfológico, un modelo sintético de la hidroquímica de las aguas, y un modelo simple de la distribución y dinámica temporal de los gases de la atmósfera subterránea. Finalmente, se han establecido unas líneas de integración del trabajo científico-técnico realizado en la mejora de la gestión turística y la conservación de la cueva del espacio natural.

Palabras clave

Cuevas turísticas, espeleogénesis, hidroquímica, karst, parámetros ambientales

Geomorphological, hydrogeological, and environmental characterization of the Coves de Sant Josep karstic system (La Vall d'Uixo, Castellón, Eastern Spain)

Abstract

Coves de Sant Josep, with an approximate length of 3000 meters, is the main cave of a karstic system excavated in triassic dolostones, in the western part of the Sierra del Espadán Natural Park. The cave entry is an important spring (with an average flow of 100-200 L/s), located in La Vall d'Uixó, Castellón (Eastern Spain). Along the cave, an underground river flows, partially used for tourism as a show cave with small boats, with 250.000 visitors yearly. It is located near the Belcaire River, in the southwestern area of the Iberic Range, close to its coastal end in the Plana de Castellón. The geological structure is a series of parallel folds and faults that strike roughly NW-SE and NE-SW. One of the syncline folds conditions the layout and the geomorphology of the cave. This work compiles the geomorphological and hydrogeological characterization of the cave, carried out with geomorphological sections and hydrochemical and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) analysis of the water inside the cave: the underground river and the drip water. Other environmental parameters from the underground atmosphere have also been analysed, such as the concentration of gases (CO_2) and its isotopic characterization ($\delta^{13}\text{C}$), with the aim of stablishing their interaction in the rock-air-water system. With this information, some conceptual models of the karstic system have been introduced: a hydrogeological and geomorphological model, a hydrochemical synthetic model of the water, and a simple model of the spatial and temporal dynamics of the gases in the underground atmosphere. Lastly, some lines of research about the technical and scientific studies carried out have been stablished in order to integrate them in the touristic management and improve the conservation of the cave and the natural park.

Key words

Environmental parameters, hydrochemistry, karst, show caves, speleogenesis

Agradecimientos

Detrás de todo trabajo se encuentra el esfuerzo y la colaboración de muchas personas que, de una u otra forma han hecho que sea posible. Por ello, el capítulo de Agradecimientos es uno de los más importantes en cualquier estudio de carácter científico, y en este caso, no podría ser de otra manera.

Este trabajo se ha estructurado en tres bloques o partes principales. En la primera se describen los aspectos generales del trabajo: los objetivos, antecedentes, el marco geológico, climático e hidrogeológico de la zona de estudio, y las metodologías que se han empleado.

La segunda parte contempla los aspectos descriptivos del trabajo realizado y los resultados, referentes a la geomorfología, la hidrogeología y la atmósfera subterránea de la cavidad.

La tercera y última parte abarca la discusión, el desarrollo de modelos sintéticos, la posible aplicación de mejoras a la gestión y conservación de la cueva y, finalmente, las conclusiones principales.

I. Primera parte: aspectos generales

A continuación, se expone una introducción sobre los aspectos formales de los trabajos llevados a cabo para la realización del Trabajo de Fin de Máster, así como una justificación del interés científico del mismo, los objetivos principales y los antecedentes históricos más destacados sobre el conocimiento del manantial y de la Cueva de Sant Josep.

1. Introducción

El presente Trabajo de Fin de Máster (en adelante, TFM) ha sido realizado durante el curso académico 2022/2023, como trabajo principal de la asignatura “Trabajo de Fin de Máster” del Máster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente (RHYMA) de la Universidad de Málaga.

El TFM se ha realizado bajo la supervisión académica de la Doctora Lucía Ojeda Rodríguez, del Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga; y bajo la supervisión científico-técnica de la Licenciada Raquel Morales García y del Doctor Pedro Agustín Robledo Ardila, del Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC).

Los trabajos han sido llevados a cabo en el seno de la Unidad Asociada IGME-UMA: “Unidad de Estudios Hidrogeológicos Avanzados (UEHA)”, ubicada en el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. El marco de investigación ha sido el Convenio entre el Excelentísimo Ayuntamiento de La Vall d'Uixó y la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), a través del Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC) para el estudio científico técnico de las Coves de Sant Josep (Castellón), que ha sido la fuente principal de financiación de los trabajos.

El trabajo ha consistido en la caracterización geomorfológica, hidrogeológica y ambiental de las Coves de Sant Josep, una cavidad kárstica emplazada en materiales carbonáticos, habilitada parcialmente para su visita turística y gestionada por el Ayuntamiento de La Vall d' Uixó, en Castellón, lugar donde se abre la misma.

Ha sido llevado a cabo durante un periodo de tres meses de realización de las prácticas curriculares del Máster, repartidos entre mayo y septiembre de 2023, aunque el registro de algunos de los datos abarca un rango temporal mayor, así como algunas de las campañas de toma de muestras, realizadas previamente al comienzo del periodo de prácticas.

1.1. Justificación

Los estudios de la geomorfología kárstica presentan un elevado interés, ya que sirven para entender la génesis y la geometría de las redes endokársticas, los patrones de flujo del agua a través del sistema kárstico, cómo interacciona el sistema roca-aire-agua, y qué formas se generan, en consecuencia (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2019). Trabajos como los de Robledo Ardila *et al.* (2018), Robledo y Durán (2012) y tesis doctorales como la de Arrese (2009) y Ballesteros (2016), desarrollan la geomorfología de cavidades como tema central, y son antecedentes fundamentales de los estudios llevados a cabo en España en las últimas décadas.

El conocimiento de la hidroquímica de los diferentes tipos de agua presentes en las cuevas es importante, ya que sirve para entender la hidrodinámica de la cueva y del acuífero, como indicador del estado del acuífero, de su evolución y de su potencial contaminación o afección por actividades antrópicas. La monitorización de algunos de los parámetros hidroquímicos adquiere mayor interés en cavidades con aprovechamiento turístico.

Además, el estudio hidroquímico de una cavidad proporciona información acerca de la génesis del sistema espeleológico y de su estado general de conservación. En este aspecto, trabajos como el de Morales *et al.* (2018), detalla los estudios hidroquímicos llevados a cabo durante los trabajos de habilitación turística de la Cueva de S'Aigua, en Menorca. Los estudios hidroquímicos en esta cavidad se han desarrollado posteriormente con más detalle por Robledo Ardila *et al.* (2022), para caracterizar oscilaciones del nivel del mar y su afección en cavidades litorales con lagos endokársticos.

Respecto a los parámetros ambientales de las cavidades, existen numerosos trabajos centrados en la monitorización de gases de la atmósfera subterránea, especialmente en cuevas turísticas. Algunos ejemplos destacados son la Cueva de Nerja (Málaga), donde se ha realizado una tesis doctoral que estudia los gases de efecto invernadero (Ojeda Rodríguez, 2022), la Cueva de Castañar de Ibor, en Cáceres (Muñoz Barco *et al.*, 2006), o la Geoda de Pulpí y Mina Rica, en Almería (Calaforra *et al.*, 2022), entre otras. Estos

estudios están especialmente dedicados a la conservación de los elementos geológicos, y en su caso, arqueológicos, presentes en las cavidades y al estudio general de la atmósfera subterránea.

1.2. Objetivos

Se han establecido tres objetivos principales para este Trabajo de Fin de Máster, vinculados con las distintas fases de trabajo.

Estos objetivos generales se basan en la necesidad de conocer los aspectos clave en el desarrollo de un sistema kárstico en general y de la evolución espacio-temporal del endokarst en particular.

Para ello, se ha diseñado el estudio bajo tres perspectivas distintas, la geomorfológica, la hidrogeológica (con especial énfasis en la hidroquímica) y la ambiental. Se ha establecido, por tanto, que los objetivos principales del trabajo son los siguientes:

- La caracterización geomorfológica de las Coves de Sant Josep, y el establecimiento de la influencia en el flujo del agua subterránea de la geomorfología exterior y la geometría del sistema kárstico y de la red espeleológica en él desarrollada.
- La caracterización hidrogeológica del sistema kárstico de las Coves, y del Manantial de Sant Josep, en especial, desde el punto de vista de la hidroquímica de las aguas presentes en la cavidad, tanto las del río subterráneo, como la de los goteos de la zona vadosa.
- La caracterización de los parámetros ambientales de la atmósfera subterránea, a través del estudio de la concentración de CO₂ y de la temperatura del aire, para entender su dinámica espacio-temporal.

Estos objetivos principales, de carácter más científico, han sido complementados con otros más aplicados, entre los que destaca la integración de los resultados en la gestión y la conservación de la cavidad.

1.3. Antecedentes

Desde los albores de la humanidad hasta la actualidad, la relación del ser humano con las cuevas ha cambiado notablemente, y el manantial de Sant Josep y las cuevas asociadas al mismo (las Coves de Sant Josep y otras cavidades anejas) no son una excepción. Existen diversos periodos históricos caracterizados por el uso y las actividades realizadas en tanto en el interior de las cuevas, como en su entorno inmediato.

El manantial de Sant Josep y sus cuevas debían ser conocidas desde la Prehistoria, como evidencian los restos arqueológicos y las pinturas rupestres encontrados en las galerías

cercanas a la entrada de la cueva (figura 1.1.) y en la cueva de Can Ballester (yacimiento que fue vaciado en el pasado siglo XX para construir el actual restaurante *La Gruta*).

También los restos del poblado ibérico del primer milenio a.n.E., ubicado en una elevación topográfica a escasos metros por encima del manantial, y algunos restos arqueológicos romanos cercanos permiten asegurar que el poblamiento humano fue continuado en el tiempo en la vecindad inmediata del manantial y de las cuevas.

Este hecho se encuentra estrechamente vinculado a la posibilidad de tener garantizado el suministro hídrico de buena calidad. Relacionado con el poblado ibérico, está el yacimiento de la boca de la Cova dels Orguens (Cueva de los Órganos), la tercera paleoboca del antiguo sistema de drenaje del río subterráneo de Sant Josep.



Figura 1.1. Pinturas rupestres paleolíticas en la entrada del Río subterráneo de Sant Josep

Oliver (2010) sugiere la posibilidad de que en época ibérica existiera un santuario dedicado al culto al agua en este lugar. Sin embargo, hay que esperar hasta finales del siglo XVIII para encontrar una referencia escrita relativa al manantial (Cavanilles, 1795-1797):

“Hanse aprovechado para el riego las aguas que nacen por la raíz del cerro de San Joseph que tendrá unos sesenta pies de altura y se compone de bancos calizos inclinados al horizonte. Al mediodía y casi al nivel de la rambla o bien rio Belcaire, que corre por su derecha, tiene dos cuevas que se comunican; por la occidental aún en estaciones muy secas sale un pide cúbico de agua, que recibida en un canal corre hacia la villa y fecunda sus huertas. Cuando llueve mucho se aumentan las aguas brotando por las grietas de las paredes y bóvedas de las cuevas, bien que cesa el aumento poco después de las lluvias. Las porciones de bancos de que forman las cuevas están descarnadas y casi sueltas; algunas cayeron ya al fondo, cuyos cantos embarazan el curso de las aguas.”

Esta descripción del famoso naturalista valenciano contiene ya algunos elementos de interés hidrogeológico, como el caudal de base del manantial, establecido en un pie cúbico (aproximadamente 28 litros por segundo), y el elevado carácter kárstico del mismo, con crecidas casi instantáneas tras lluvias intensas y decrecidas igualmente rápidas.

El siglo XIX ofrece algunas menciones al manantial y a la cueva por parte de varios historiadores-geógrafos, en sus respectivas obras de síntesis: Miñano (1826-1829), Madoz (1845-1850) y Mundina (1873), aunque sus textos repiten mayoritariamente la información de Cavanilles. Este último autor ofrece un dato del caudal del manantial de 2 dm³, o lo que es lo mismo, unos 20 litros por segundo.

También Puig y Larraz (1896) cita, en su conocida obra *Cavernas y simas de España*, las Coves de Sant Josep:

“Es una caverna natural bastante espaciosa, con dos bocas: de la más occidental sale un arroyo, cuyo nacimiento se halla en el interior de la cavidad, con un caudal de unos 20 centímetros cúbicos por segundo”.

Posiblemente este autor tuvo algún problema con los factores de conversión de unidades, puesto que 2 dm³ no son equivalentes a 20 cm³.

Hay que esperar a que entrara el siglo XX para tengan noticias sobre las primeras incursiones de carácter espeleológico más allá del sifón existente en la denominada “Boca del Horno” (el “nacimiento” del arroyo dentro de la cueva), a poca distancia de la boca por donde surgían las aguas al exterior de la red endokárstica.

Durante el primer tercio del siglo XX se suceden varias exploraciones, publicándose algunas descripciones del sector conocido hasta entonces de la cueva, junto con algunas fotografías (figura 1.2. Sarthou, 1920). Hacia finales de la década de los 20 se lleva a cabo la primera “habilitación” turística, compuesta por unas pasarelas de madera que facilitaban la visita.

En el año 1936 se llevó a cabo la primera habilitación con tintes modernos: se tendió una instalación eléctrica interior para su iluminación, se dragaron algunos puntos del río y se construyó una pequeña represa para dotar de un nivel del agua adecuado para la visita con barcas, que se constituyó como seña de identidad de la cueva a partir de ese momento.

En la década de los 50 se ensancha la Boca del Horno con barrenos, ampliándose el recorrido turístico a unos 300 metros navegables. A finales de esa década y principios de la siguiente, se llevan a cabo las primeras exploraciones espeleológicas por colectivos organizados, logrando sobrepasar otros tres sifones y descubriendo la denominada actualmente Galería Seca, ampliándose el recorrido turístico nuevamente.

Donat y Bartolomé (1961) publican la primera topografía de la cueva que engloba todo el sector turístico actual. En 1963, un libro divulgativo (Anónimo, 1963) ofrece un dato

muy preciso del caudal, medido en tres puntos diferentes, mediante aforos, con una media de 70 L/s.



Figura 1.2. Fotografía titulada “Entrada de la cueva de San José, en Vall de Uxó” donde aparece la boca de la Cueva y, bajo esta, el manantial de Sant Josep, hacia 1920 (Sarhou, 1920)

Durante las décadas de los 70 y 80 se suceden las exploraciones espeleológicas de la parte no visitable de la cavidad, en las que se superan nuevos sifones (incluido el denominado Sifón Gran, de 35 metros de longitud subacuática y 7 metros de profundidad), y se descubren galerías laterales y algunas pequeñas salas (figura 1.3.). La cueva se configura como una de las grandes cavidades de la Comunidad Valenciana, con 2750 metros de recorrido topografiado (Borrás, 1981).

También se empieza a entrever la complejidad hidrogeológica de la misma, con el descubrimiento de simas (*avencs*), que se sitúan en el cauce del río Belcaire, situado por encima del Río subterráneo en gran parte de su recorrido, conectadas con la Cueva de Sant Josep. Algunas de ellas conectan prácticamente con la Cueva de Sant Josep (Sima de Alfondegulla o Avenc de la Riera) y otras lo hacen hidrogeológicamente, conexión constatada mediante el ensayo con trazadores (fluoresceína, la Sima de Guilla; Morell *et al.*, 1986). En el año 1992, el ITGE y la Diputación de Castellón (ITGE-Diputación de Castellón, 1992) llevan a cabo un estudio de estabilidad de las Cuevas de Sant Josep.

Un hito importante en el conocimiento de la cueva y su encuadre geológico e hidrogeológico en un marco regional es la tesis doctoral de Policarp Garay (Garay, 2000), junto con una serie de publicaciones vinculadas a los trabajos realizados para su ejecución (Obartí *et al.* 1986, Garay *et al.* 1987, 1992, Blázquez *et al.* 1994; Esteller *et al.* 1996, Garay y Medina, 1997) y otros trabajos posteriores derivadas de la misma (Garay, 2003; Garay, 2007).



Figura 1.3. Exploraciones de los sifones terminales en la zona no visitable mediante técnicas de espeleobuceo, fotografía tomada de Ballesteros y Durán (2004)

Posteriormente, Del Val *et al.* (2007) llevan a cabo un notable trabajo de síntesis, vinculado al posible impacto ambiental que las obras del proyectado y no ejecutado trasvase del Ebro podrían suponer sobre la cueva y el río subterráneo de San José, con un análisis de las diferentes topografías llevadas a cabo hasta el momento y la ejecución de labores de radiolocalización para poder superponer adecuadamente las topografías del exterior y del interior.

Robledo *et al.* (2016) llevan a cabo las primeras dataciones absolutas e interpretaciones paleoclimáticas sobre un espeleotema de la cavidad (estalagmita sobre sedimentos detríticos fluviales en el sector no habilitado al turismo), arrojando edades en la franja temporal comprendida entre *ca.* 5 ka B.P y *ca.* 2 ka B.P.

Con ocasión de la celebración del VII Congreso Español sobre Cuevas Turísticas en La Vall d'Uixó en 2018, se publicaron en las actas de dicho congreso una serie de trabajos sobre la gestión turística de la cavidad (Fas, 2018) y las posibilidades de aprovechamiento de los caudales de crecida del manantial para actuaciones de recarga artificial en el aluvial del río Belcaire (García Menéndez *et al.*, 2018). También se publican trabajos de carácter arqueológico, sobre los asentamientos más antiguos (*ca.* 20 ka B.P) localizados en las excavaciones del caos de bloques de la entrada de la cueva de San José y los escasos restos conservados del expolio de la Cueva de can Ballester (Casabó y Rovira, 2018). Además, se estudia la relación entre las cuevas de Can Ballester y dels Orguens con el poblado ibérico, reinterpretadas como espacios auxiliares del poblado, más que como espacios sagrados o rituales (Machause, 2018).

En los últimos años se han llevado a cabo nuevas exploraciones espeleológicas en el extremo oeste de la cavidad, mediante métodos de espeleobuceo, con el descubrimiento de algunas nuevas galerías y, recientemente, alguna pequeña sala, resultando un recorrido conocido de más de 3000 metros, convirtiendo a la cueva de San José en la tercera cueva de mayor desarrollo de la Comunidad Valenciana (Almela, 2017), por detrás de la Cova de l'Autopista y de la Sima Posos.

2. Delimitación del área de estudio y descripción del sistema kárstico

Pese a que el presente estudio se centra en la cueva de Sant Josep, esta forma parte de un sistema kárstico más amplio, cuya delimitación debe ser abordada por criterios hidrológicos, geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos.

2.1. Límites y contexto geográfico del área de estudio

La zona de estudio se encuentra en la provincia de Castellón, perteneciente a la *Comunitat Valenciana*, en la zona oriental de la Península Ibérica. Concretamente, se sitúa entre dos municipios pertenecientes a la comarca de la Plana Baja, el municipio de La Vall d'Uixó, al Este, y el municipio de Alfondeguilla, al Oeste (figura 2.1.). Estos dos municipios se encuentran atravesados por el Río Belcaire, en dirección Oeste-Este, que desemboca en el Mar Mediterráneo en el sector de la Plana de Castellón (figura 2.2.).



Figura 2.1. Panorámica de la zona de estudio. De izquierda a derecha, el municipio de Alfondeguilla, el Río Belcaire y el macizo carbonático triásico, La Vall d'Uixó, la Plana de Castellón y el Mar Mediterráneo. En primer plano, la cima del pico Pipa.

La vía de comunicación principal de la zona de estudio es la carretera CV-230, que atraviesa la zona en dirección Este-Oeste, paralela al Río Belcaire.

Las áreas topográficamente más elevadas de la zona de estudio se encuentran protegidas bajo la figura del Parque Natural de la Sierra del Espadán, cuyos límites terminan en el término municipal de Alfondeguilla. Este Parque Natural es el segundo espacio natural protegido de la comunidad autónoma en extensión, con 31.180 hectáreas protegidas, ligeramente por detrás del Parque Natural de las Hoces del Cabriel.

Geográficamente, la Sierra del Espadán corresponde con la terminación oriental de la Cordillera Ibérica en su Rama Castellana, muy cercana ya al contacto con la Plana de Castellón, que termina en el Mar Mediterráneo.

La mayoría de los valles se alinean según una dirección principal Oeste-Este, ya que todos los ríos de este sector desembocan en el Mar Mediterráneo, y pertenecen administrativamente a la Confederación Hidrográfica del Júcar.

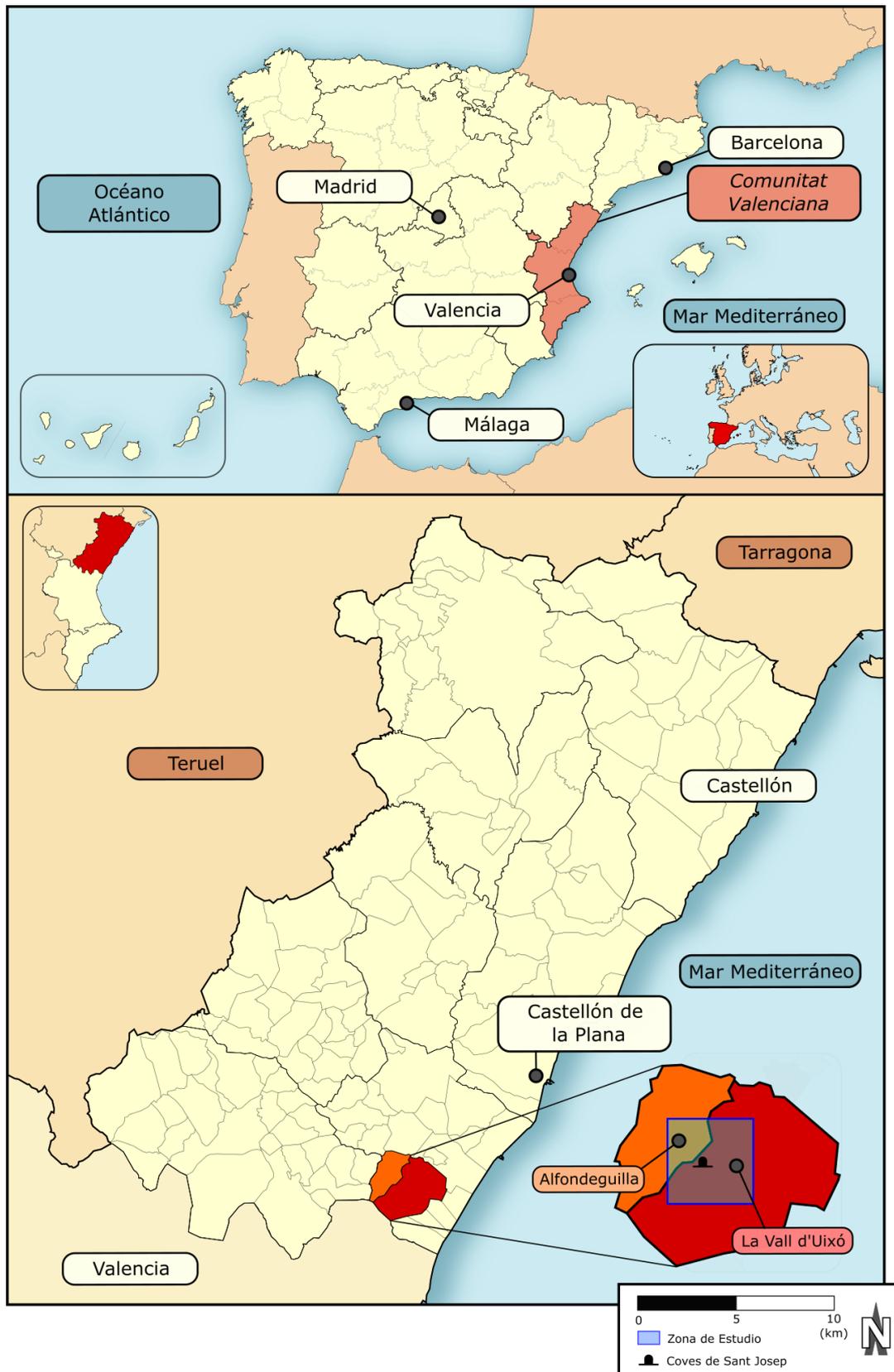


Figura 2.2. Mapa de localización de la zona de estudio. Los términos municipales en los que se encuentra la zona de estudio aparecen en naranja (Alfondeguilla) y en rojo (La Vall d'Uixó)

Aunque la cueva principal del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep no se encuentra dentro del Parque Natural, una parte muy importante del sistema kárstico relacionado con ella, sus cavidades asociadas y gran parte del acuífero en el que se desarrollan sí lo están.

La definición de los límites de los espacios naturales protegidos como espacios aislados no siempre es la más efectiva para la protección de sus valores naturales, ya que aquellas actuaciones que se den en un punto fuera del entorno de protección pueden tener afección en este. Por esta razón, para la realización de cualquier estudio de carácter hidrogeológico en un espacio natural, o su entorno inmediato, como en este caso, es necesario tener en cuenta su hidrosistema, en el sentido de De la Hera *et al.* (2006).

El hidrosistema teórico de las Coves de Sant Josep, se corresponde con la cuenca de drenaje superficial ubicada aguas arriba (la cuenca del río Belcaire), cuya escorrentía superficial llega hacia el interior del sistema. Junto a esto hay que tener en cuenta la escorrentía subterránea, por lo que el hidrosistema abarca también el acuífero donde se desarrolla la cueva, de superficie mayor que la cuenca vertiente.

Por estas circunstancias, la zona de estudio presenta una extensión considerable, dada la necesidad de una adecuada contextualización hidrogeológica.

2.2. Geometría del sistema kárstico

El sistema kárstico de las Coves de Sant Josep está compuesto por varias cavidades con recorrido espeleológico. La principal de ellas, y la que da nombre al sistema es el Río subterráneo de Sant Josep, y la cueva asociada a éste, con algo más de tres kilómetros de recorrido espeleológico conocido.



Figura 2.3. Barcas con las que se hace el recorrido turístico a través del río subterráneo

Aproximadamente un kilómetro de su desarrollo está habilitado para el uso turístico mediante el recorrido con barcas por el río (figura 2.3.), y un tramo de doscientos metros aproximados en una de las galerías laterales, seca. La cueva tiene aproximadamente 250.000 visitantes al año, concentrados especialmente en el periodo estival, y es gestionada por una empresa pública dependiente del Ayuntamiento de La Vall d’Uixó.

La entrada al Río subterráneo se realiza por el manantial principal, punto principal de drenaje del sistema. Cerca de esta entrada, se encuentran otras cavidades asociadas espeleológicamente al sistema kárstico, topográficamente elevadas unos metros respecto al manantial de Sant Josep y a la galería principal de las Coves de Sant Josep.

Aunque estas cavidades presentan también recorrido espeleológico, se encuentran altamente modificadas para su aprovechamiento antrópico. Son la Cueva del Can Ballester, cuyo interior está habilitado como restaurante (La Gruta), y la Cueva de los Órganos, o Cova dels Orguens, habilitada para uso turístico y como galería de arte. Estas cavidades son interpretadas como paleobocas, o antiguas surgencias abandonadas del sistema kárstico (figura 2.4.) en el curso de su evolución.

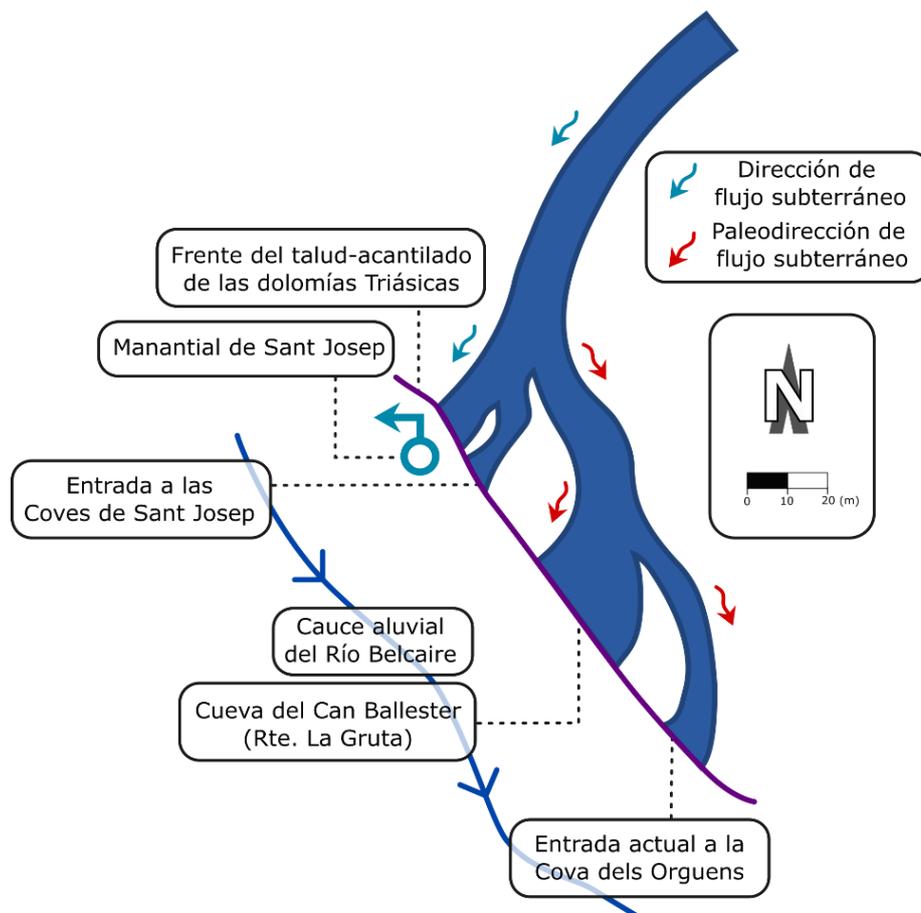


Figura 2.4. Reconstrucción hipotética de la antigua polisurgencia del Manantial de Sant Josep

En la misma rambla del Río Belcaire, en dirección Oeste, aguas arriba, se pueden encontrar tres cavidades cercanas a la Cueva de Sant Josep, que forman también parte del sistema kárstico. Una de ellas, la Sima o Avenc de la Riera se encuentra a 700 metros de la boca principal de las Coves de Sant Josep, en la margen derecha del Río Belcaire. Cercana a esta, se encuentra otra pequeña sima, entre los términos municipales de Alfondeguilla y de la Vall d'Uixó, la Sima del T.M.

Completa el sistema kárstico, en este sector, la que se ha denominado en este trabajo como la Sima del P.k. 17, una pequeña cavidad ubicada en el borde de la carretera CV-230, que une la Vall d'Uixó y Alfondeguilla, cerca del punto kilométrico 17, que le proporciona el nombre (figura 2.5).

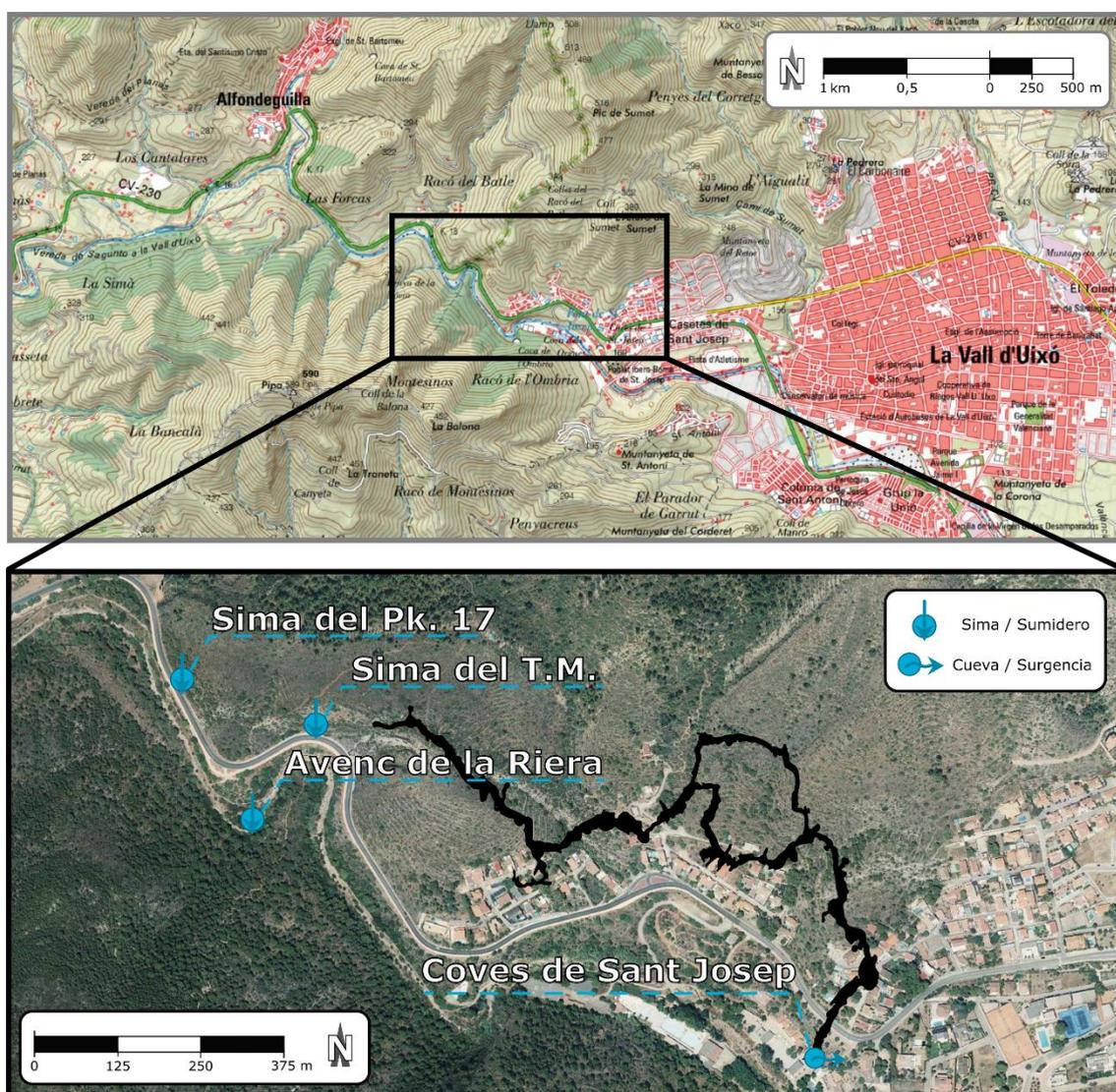


Figura 2.5. Mapa topográfico de la zona y ortofoto con la ubicación de las principales cavidades del sistema kárstico. Aparece sombreada la proyección aproximada de la topografía de la cavidad principal, hasta el primer sifón

Por último, más alejada de la Cueva de Sant Josep, pero ubicada también muy cerca del cauce del Río Belcaire, al Oeste de Alfondeguilla, en el paraje denominado La Sima, se encuentra la Sima o Avenc de la Guilla. Esta cavidad funciona también como sumidero ocasional, en aguas altas, del caudal extraordinario circulante por el río.

Según Nebot y Borrás (1981) forma parte también de las cavidades vinculadas al sistema kárstico de Sant Josep, circunstancia que quedó acreditada desde el punto de vista hidrogeológico por el ensayo de trazadores con floresceína llevado a cabo por Morell *et al.* (1986), que demostró la conexión entre esta sima y el manantial de Sant Josep.

Las tres simas que se han localizado (figura 2.6.) presentan un desarrollo principalmente vertical. El Avenc de la Riera es el de mayor desarrollo topografiado, unos 132 metros en dirección Noreste, y un gran pozo de entrada de 6 metros de profundidad (Nebot y Borrás, 1981). Esta cavidad ejerce de sumidero del agua del Río Belcaire cuando este presenta grandes caudales asociados a eventos de precipitaciones intensas. No se ha encontrado conexión espeleológica penetrable con las Coves de Sant Josep al presentar galerías muy estrechas en su zona final y restos de vegetales, sedimentos, aunque su conexión es segura, a la altura del Sifón Gran, en la Cueva de Sant Josep.

La Sima del P.k. 17 no presenta mucho desarrollo, y se encuentra actualmente en exploración.



Figura 2.6. Bocas de las cavidades del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep. A: Boca de la Sima del P.k. 17, cegada con bloques. B: Boca de la Sima del Término Municipal. C: Boca de la Sima de la Riera. D: Manantial de Sant Josep, anexo a la boca del Río subterráneo de Sant Josep

Las Coves de Sant Josep corresponden con la cavidad espeleológica asociada al Río Subterráneo de Sant Josep, que presenta un gran desarrollo horizontal, superior a los 3000 metros. Actualmente se mantiene en exploración, con el descubrimiento reciente (junio de 2023) de una gran sala hasta ahora desconocida en la Galería del Fang.

La cavidad presenta múltiples sifones, en los que el avance espeleológico se encuentra interrumpido por la presencia de agua, por lo que es necesario el equipo de espeleobuceo para su exploración. Algunos tramos que se encontraban sifonados en el primer kilómetro de desarrollo fueron dinamitados a mediados del siglo XX, para permitir el tránsito de las barcas en el sector turístico.

Este trabajo se ha centrado, en lo relativo a las labores realizadas en el interior de la cueva, en el tramo limitado por la entrada del río subterráneo (el manantial de Sant Josep), y el primer sifón actual, que se encuentra en la zona no visitable. Este tramo se corresponde aproximadamente con unos 1.500 metros de desarrollo.

3. Marco geológico, climático e hidrogeológico del área de estudio

Como se ha indicado previamente, para contextualizar el estudio en las Coves de Sant Josep, es necesario establecer el marco geológico del entorno, especialmente aguas arriba del Río Belcaire, que se describe a continuación.

Por otra parte, también es necesario el contexto climático, el régimen de precipitaciones y de temperatura en el entorno.

La última parte de este capítulo corresponde con la descripción de los rasgos hidrogeológicos más importantes de las masas de agua relacionadas con las Coves de Sant Josep, en especial las masas de agua subterráneas de Azuébar-La Vall d'Uixó y las masas de agua subterránea de la Plana de Castellón.

3.1. Marco geológico

La zona de estudio se encuentra en la Rama Suroriental de la Cordillera Ibérica. Concretamente, se encuentra en las estructuras correspondientes a la terminación costera de la Cordillera en contacto con la Plana de Castellón.

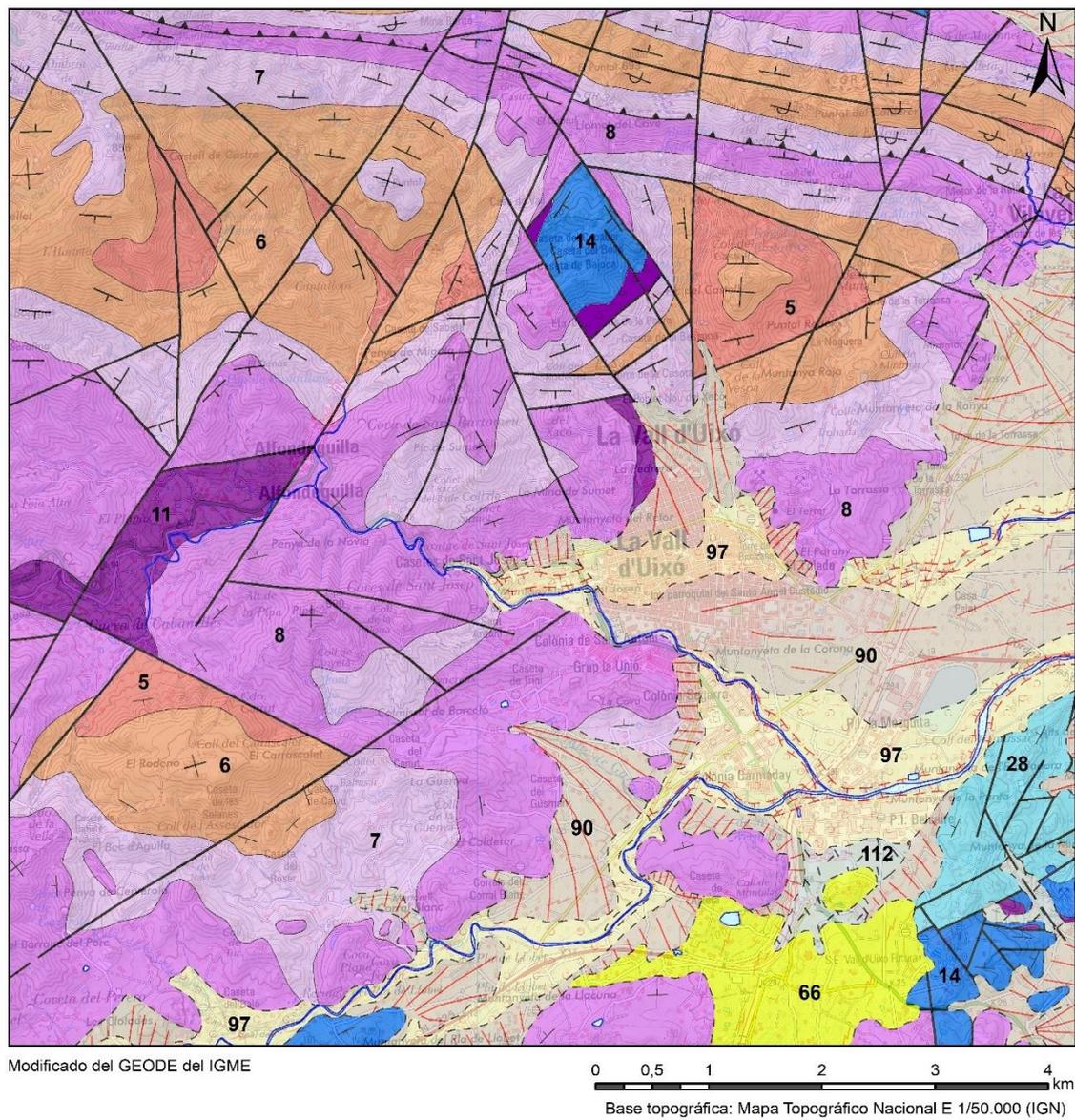
Las principales directrices estructurales siguen la orientación general NW-SE. El estilo tectónico abarca un zócalo constituido por materiales de edad paleozoica afectados por la orogenia Hercínica. Sobre estos, materiales del Mesozoico y Cenozoico, afectados a su vez por la orogenia Alpina.

En la cobertera mesozoica aparecen una sucesión de pliegues anticlinales y sinclinales, con cabalgamientos de orientación principal NW-SE, y una intensa fracturación, producto de las etapas distensivas posteriores y con las mismas directrices principales de orientación, NW-SE y su complementaria, NE-SW.

Goy *et al.* (1972) y Gutiérrez y Pedraza (1972) confeccionan la cartografía geológica a escala 1:50.000 (MAGNA) de las hojas de Sagunto y Segorbe. En la figura 3.1. puede observarse la síntesis geológica confeccionada a partir de la cartografía continua digital (GEODE) del Mapa Geológico Nacional del IGME.

Se observa que las principales directrices estructurales son los pliegues de orientación subparalelas y la fracturación según dos familias conjugadas de orientación nortada, que afectan a los materiales mencionados anteriormente.

Caracterización geomorfológica, hidrogeológica y ambiental del sistema kárstico de las
Coves de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Castellón)



Leyenda

- 112. HOLOCENO. Aluvial coluvial
- 97. PLEISTOCENO - HOLOCENO. Terrazas aluviales y fondos de valle
- 90. PLEISTOCENO - HOLOCENO. Conos de deyección, abanicos aluviales y coluviones
- 66. MIOCENO INFERIOR. Arcillas y areniscas
- 28. JURÁSICO INFERIOR-SUPERIOR. Calizas, calizas margosas y margas
- 14. JURÁSICO INFERIOR. Dolomías carniolares y calizas bioclásticas
- 11. F. KEUPER. Arcillas y yesos
- 8. F. MUSCHELKALK. Dolomías y calizas margosas
- 7. F. BUNTSANDSTEIN. Argilitas y areniscas superiores
- 6. F. BUNTSANDSTEIN. Areniscas
- 5. F. BUNTSANDSTEIN. Argilitas y areniscas inferiores

Líneas

- Contacto normal o concordante
- - - Contacto discordante
- + + + Límite de terraza
- Masas de agua
- Falla
- ▲ Cabalgamiento

Símbolos

- ⊥ Estratificación subhorizontal
- ⊂ Estratificación invertida
- ⊥ Estratificación y buzamiento
- ⊥ Estratificación subvertical

Figura 3.1. Mapa geológico simplificado de la zona de estudio. En el centro del mapa se sitúan las Coves de Sant Josep, cercanas a la rambla del Río Belcaire (modificado del GEODE del IGME)

3.1.1. Estratigrafía y litología

La columna estratigráfica sintética de la Sierra del Espadán puede observarse en la figura 3.2. En la parte montañosa de la zona de estudio afloran fundamentalmente los términos más bajos de la serie, mayoritariamente, los tramos del Triásico (Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper) y en menor medida, del Jurásico Inferior. En la zona costera, son los materiales del Mioceno y del Pliocuatnario los que afloran.

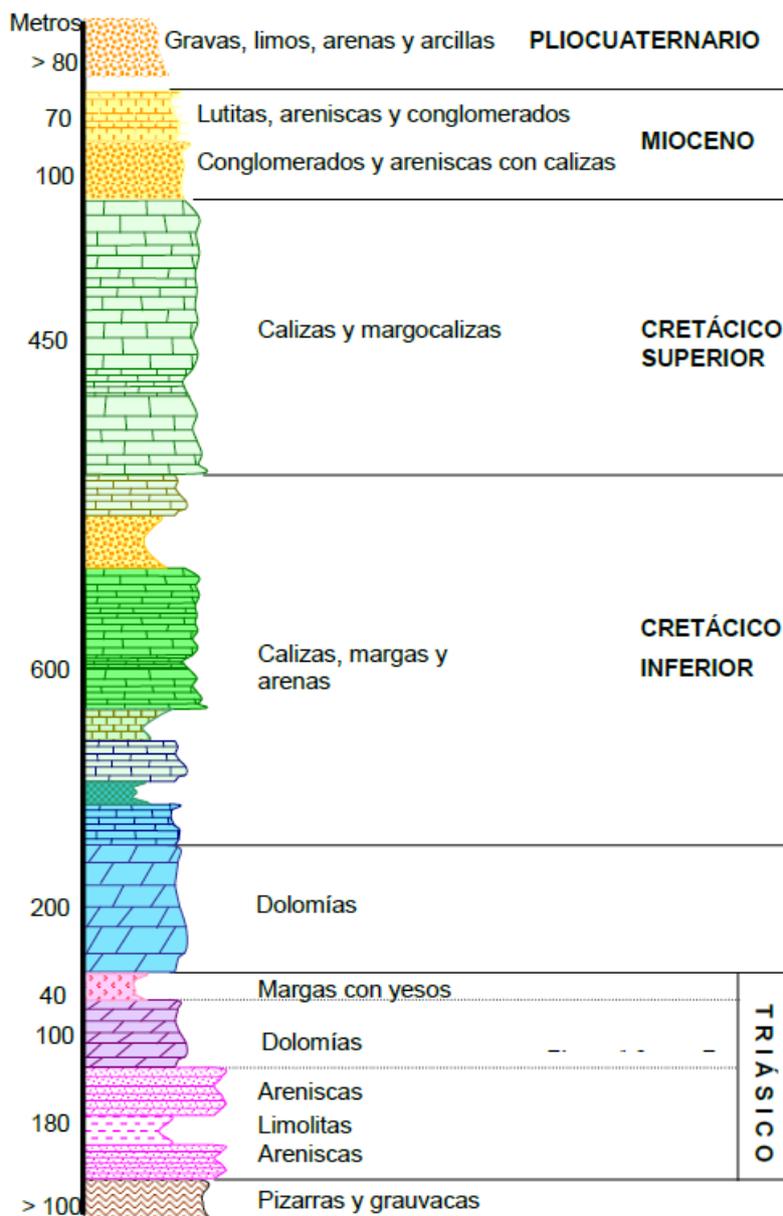


Figura 3.2. Columna litoestratigráfica sintética de la Sierra del Espadán y su entorno, modificada de Renau-Llorens, (2010)

La descripción litológica por tramos de la serie estratigráfica del Triásico es la siguiente, tomada principalmente de la síntesis de Ballesteros y Durán (2004):

➤ Facies Buntsandstein (Triásico inferior)

Argilitas y areniscas. Corresponden al término 5 de la figura 3.1. Arcillas rojas muy compactadas con frecuentes intercalaciones de areniscas micáceas rojizas. Con una potencia de 80 a 150 metros. Equivale a la formación Limos y Areniscas de Alcotas (también denominada Formación Lutitas y Areniscas de Marines).

Areniscas. Corresponden al término 6 de la figura 3.1. Areniscas ortocuarcíticas muy compactas, en bancos gruesos de tonos rojos, violáceos y blancos. Su potencia es del orden de 150 a 200 metros. Equivalente a la Formación Areniscas del Cañizar o Formación Areniscas del Garbí.

Alternancia de argilitas y areniscas. Corresponden al término 7 de la figura 3.1. Arcillas arenosas y areno-limosas rojas, a veces pizarrosas, con alternancias de areniscas micáceas (figura 3.3.). La potencia es de 150 a 200 metros. Equivalente a la Formación Limos y Areniscas de Eslida o Formación Lutitas y Areniscas de Serra. A techo, existe un tramo evaporítico (Formación Marines), de 10 a 30 metros de potencia, formado por margas y arcillas abigarradas.



Figura 3.3. Aspecto de campo de las lutitas y areniscas rojas de las facies Buntsandstein aflorantes en el entorno de la cueva

➤ Facies Muschelkalk (Triásico Medio)

Corresponde al tramo 8 de la figura 3.1. Son dolomías, margas, margas y arcillas con yesos y calizas dolomíticas, con una sucesión de cuatro tramos litológicos:

- a) Dolomías de color pardo rojizo, con intensa karstificación, dispuestas en bancos de 50 centímetros a 1 metro de espesor, con una potencia de unos 150 metros (también denominado este tramo como Formación Landete y como Formación Dolomías de l'Oronet). Es el tramo donde se desarrolla mayoritariamente la Cueva de Sant Josep (figura 3.4.).



Figura 3.4. Uno de los taludes de la CV-230, donde se pueden observar las estructuras de plegamiento de las dolomías del Muschelkalk, en las que se desarrolla la cavidad

- b) Arcillas margosas de tonos grises claros, con niveles más calcáreos, con yesos y una potencia muy variable, de entre 40 y 150 metros, donde en algunos lugares falta el tramo (Formación Arcillas, Margas y Yesos del Mas o Formación Arenas, Lutitas y Carbonatos de Azuébar).
- c) Calizas dolomíticas tableadas, en bancos de unos 10 centímetros que aumentan de espesor hacia techo y muro, con una potencia del tramo muy variable según las zonas, que puede estimarse en unos 80 a 100 metros (Formación Dolomías y Calizas de Cañete, también denominado Formación Dolomías de Cirat).
- d) Alternancia de calizas micríticas y pelesparíticas, con micritas arcillosas y, ocasionalmente, niveles de margas arcillosas intercaladas (Formación Calizas y Margas de Pina de Montalgrao), tramo fuertemente recristalizado y con pizarrosidad en algunos niveles, con una potencia de unos 50 metros.

➤ Facies Keuper (Triásico Superior)

Corresponde con el término 11 de la figura 3.1. Son fundamentalmente margas y arcillas abigarradas (figura 3.5.), con yesos grises en potentes bancos y gran profusión de cuarzos autigénicos, con intercalaciones ocasionales de niveles carbonatados de escaso espesor (Grupo Valencia). Su potencia máxima es del orden de 100 metros.



Figura 3.5. Alternancia de lutitas versicolores y margas yesíferas de la facies Keuper

Además de los materiales triásicos, en la zona de estudio afloran sedimentos del Mioceno (correspondientes con el término 66 de la figura 3.1.) y del Pleistoceno-Holoceno (términos 90, 97 y 112 de la figura 3.1.):

➤ Sedimentos pertenecientes al Mioceno

Conglomerados, areniscas y arcillas con numerosos cambios laterales de facies entre los distintos afloramientos, constituidos por depósitos fluviales y calizas y calizas arcillosas, masivas y oquerosas, de origen lacustre, con algunas pasadas de calizas arenosas conglomeráticas.

➤ Sedimentos del Pleistoceno y Holoceno

Mayoritariamente depósitos de pie de monte, coluviones, conos de deyección y glacia, a veces encostrados; y terrazas y depósitos aluviales actuales, de fondos de valle, asociados a la red fluvial (figura 3.6.).



Figura 3.6. Terrazas pleistocenas, con sedimentos detríticos granodecrecientes hacia techo, formadas por cantos heterométricos imbricados en sentido W-E

Aparecen hasta cinco niveles de terraza a alturas medias de 30 a 25 metros, 20 a 18 metros, 11 metros, 7 a 5 metros, y 3 a 2 metros sobre los cauces actuales. Están formadas por arcillas arenosas y limos con cantos, a veces con cemento carbonatado. Son de edad Pleistoceno medio a Holoceno.

3.1.2. Geología del entorno inmediato de la cavidad

Con motivo de las posibles obras del transvase del Ebro (que no se llegó a ejecutar), se realizaron hace algunos años, distintos trabajos cartográficos a escala 1:5.000 que cubren el área sobre la que se desarrolla la Cueva de Sant Josep, así como varios sondeos geotécnicos.

Algunos de estos sondeos atravesaban cavidades de varios metros de diámetro, algunas de ellas sospechadas de corresponder a la prolongación de la Cueva de Sant Josep hacia el Oeste (Del Val *et al.*, 2007).

En las labores de campo llevadas a cabo durante la realización del trabajo se ha observado que localmente, en el entorno de las Coves de Sant Josep, la disposición geométrica de los tramos triásicos, pertenecientes a las facies del Muschelkalk, se encuentran en disposición inversa, sin aflorar el segundo tramo, de margas y evaporitas.

Concretamente, en el límite entre los términos municipales de Alfondeguilla y de La Vall d'Uixó, por la carretera CV-230, en una de las curvas de la carretera, asociada a un

meandro del Río Belcaire, se pueden apreciar calizas micríticas con abundantes icnofósiles y bioturbación en la base. Sobre éstas, se encuentran las capas de dolomías tableadas, con espesor decimétrico, y a su vez, sobre estas, la Formación Dolomías de l'Oronet, con capas de mayor potencia.

Es en ésta última formación, donde se desarrolla la karstificación principal del sistema.

Un aspecto relevante en los afloramientos cercanos es la presencia de numerosos rellenos de paleocavidades, compuestos por lutitas y conglomerados.

En ocasiones también se encuentran espeleotemas, a veces con texturas de redisolución. Algunas de estas cavidades antiguas presentan dimensiones considerables, en algunos casos con una reexcavación, que puede hacer que estas cavidades sean consideradas como cuevas o simas potencialmente penetrables, como ocurre con la Sima del P.k. 17.

3.1.3. Geomorfología

La geomorfología de la zona se caracteriza por presentar rasgos propios del relieve kárstico. No se han podido identificar grandes formas exokársticas, ya que, en las partes topográficamente más elevadas, al norte de la población de La Vall d'Uixó, afloran las areniscas del Buntsandstein. En la vertiente sur, sin embargo, en las cercanías del pico Pipa, sí es posible encontrar algunas formas exokársticas, tales como campos de lapiaces, y ciudades de piedra de escaso desarrollo, en las dolomías y calizas del Muschelkalk.

El Río Belcaire presenta una morfología de río encajado meandriforme, con un cierto control estructural condicionado por las familias de fracturas presentes, especialmente la dirección NW-SE y su complementaria, la NE-SW, en el desarrollo de algunos tramos lineales del río.

En el entorno de La Vall d' Uixó, y aguas arriba, hacia Alfondeguilla, el río no presenta un desarrollo considerable de depósitos aluviales de fondo de valle, ya que en varios puntos se puede observar directamente el sustrato rocoso, que principalmente corresponde con los carbonatos del Muschelkalk.

Los escasos sedimentos que rellenan la rambla del río corresponden con bloques de gran tamaño, muchos de ellos mayores de un metro de diámetro, de escasa esfericidad, aunque presentan cierta redondez (figura 3.7.).

Al abrirse la rambla del río, en las cercanías del núcleo urbano de la Vall d'Uixó, se encuentran terrazas fluviales colgadas sobre el cauce actual, con un depósito de fondo de valle más potente, y una granulometría del sedimento más variable. En la carretera entre Alfondeguilla y la Vall d'Uixó es posible encontrar alguna terraza colgada unos metros por encima de la actual, relleno un paleorrelieve que podría corresponder con un meandro abandonado del río Belcaire.

Esta terraza se caracteriza por presentar un relleno de cantos heterogéneo, con algunos bloques de gran tamaño, semejante al aspecto del depósito aluvial actual y otros más pequeños hacia el techo de la terraza.



Figura 3.7. Sedimentos polimícticos heterométricos aluviales en el cauce del Río Belcaire, sedimentados directamente sobre las dolomías triásicas

Estos sedimentos detríticos aluviales son muy similares a algunas de las terrazas colgadas existentes en el interior de la Cueva de Sant Josep, en especial entre la Sala de los Murciélagos y la entrada (Garay, 2000).

3.2. Caracterización climática

La zona de estudio se caracteriza por presentar un clima mediterráneo costero, con temperaturas suaves a lo largo del año y precipitaciones estacionales, que pueden llegar a producirse en grandes episodios, proporcionando un marcado carácter torrencial a sus precipitaciones y, en consecuencia, a la escorrentía superficial.

Estos episodios de precipitación suelen estar ligados a Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANA), que han llegado a descargar hasta 210 mm en un día, en concreto el día 14 de octubre de 1962 (datos recogidos en la serie histórica por García Menéndez, 2018).

3.2.1. Temperatura

La estación meteorológica de la red de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) más cercana se encuentra en el municipio de Almassora, a 25 kilómetros al Norte de la zona de estudio, ubicada en la Plana de Castellón. Esta estación recoge datos de una zona con menores diferencias altitudinales que la zona de estudio, al encontrarse en la llanura costera de la Plana, sin embargo, sus valores de temperatura son útiles para la contextualización climática general de este estudio (figura 3.8.).

La temperatura media anual en la Plana de Castellón es de 17,5 °C, temperaturas suaves propias del clima Mediterráneo Costero. La media de las temperaturas mínimas mensuales es de 12,7 °C, con la temperatura mínima absoluta mensual en el mes de enero, con 5,8 °C.

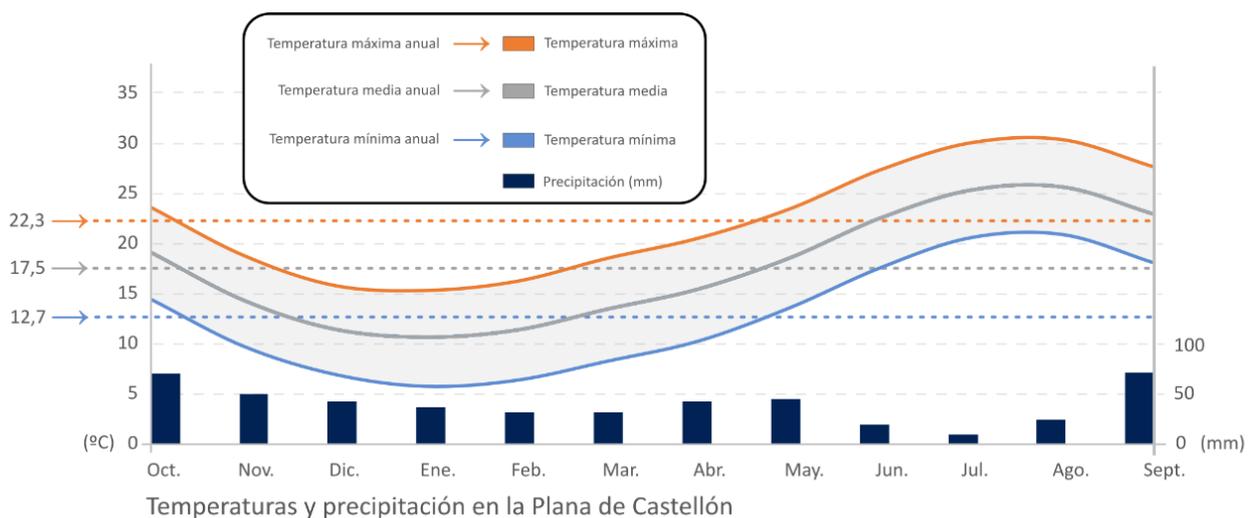


Figura 3.8. Distribución histórica mensual de temperaturas máximas, medias, mínimas y sus medias anuales en la Plana de Castellón, con datos hasta 2015 (tomados de García Menéndez, 2018)

La media de las temperaturas máximas mensuales es de 22,3 °C, y su máxima absoluta se registra en el mes de agosto, con 30,3 °C. Este registro de temperatura corresponde a una distribución estacional, con las temperaturas más altas en los meses de verano y las temperaturas más bajas en los meses de invierno.

En esta estación meteorológica se han recogido también valores de precipitación, representativos de la llanura costera de la Plana de Castellón, ligeramente diferentes a la zona de estudio, que presenta una orografía más compleja.

La precipitación anual recogida en la serie histórica de esta estación es de 467 mm, distribuidos a lo largo del año, sin una época destacada de lluvias, aunque en los meses de verano la cantidad de precipitación se ve reducida, con mínimos de 9 mm en el mes de julio.

En la figura 3.9. aparecen en detalle las temperaturas registradas en la estación en el año hidrológico 2022/2023. Se observa que durante el periodo de estudio se ha seguido una tendencia similar a la que presenta el registro histórico, con una anomalía notable en el mes de marzo, donde destaca un pico de temperaturas, cercanas a los 25 °C, mientras que la media histórica se encuentra unos 10 °C más baja.

Los valores máximos de temperatura se han recogido a finales del mes de agosto, con 31,2 °C, y las mínimas a finales del mes de febrero, con 6,3 °C. Esta temperatura máxima se encuentra ligeramente por encima de la máxima histórica, de 30,3 °C.

La temperatura media en el año hidrológico ha sido de 19,4 °C, y la media en el periodo de estudio (de octubre de 2022 a junio de 2023) ha sido de 16,8 °C.

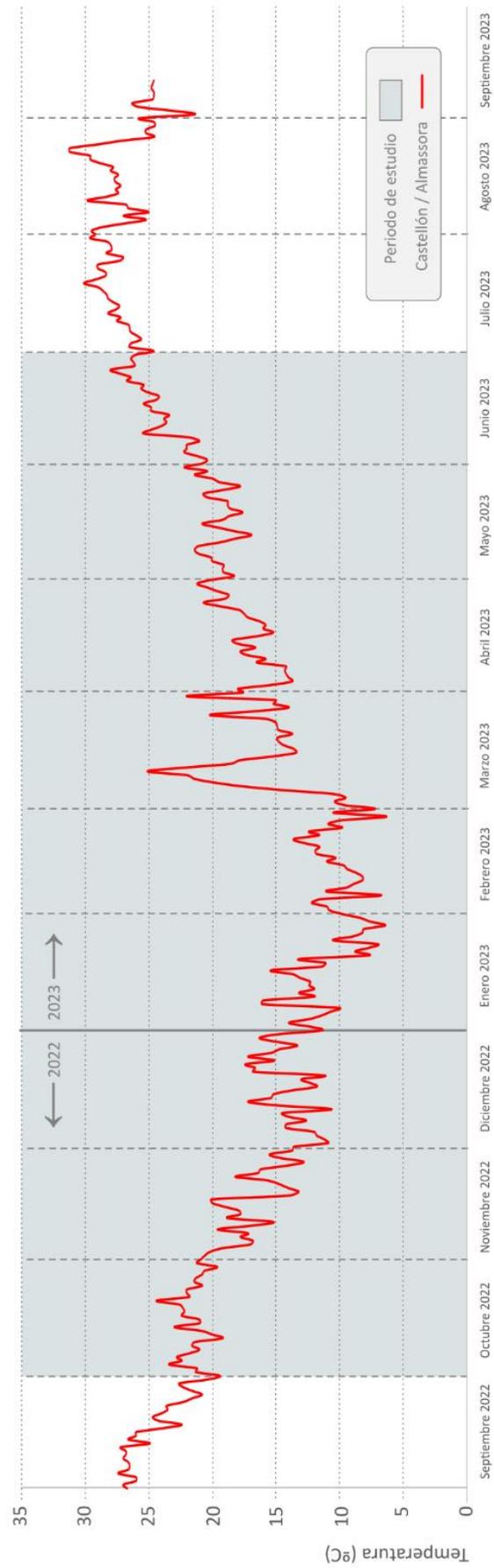


Figura 3.9. Registro de temperaturas diarias en la estación meteorológica de Castellón/Almassora para el año hidrológico 2022/2023, con el periodo de estudio sombreado

3.2.2. Precipitación

Para la caracterización pluviométrica se ha considerado la precipitación recogida en una estación cercana a las Coves de Sant Josep. Debido a la relativamente pequeña extensión de la zona de estudio, la única estación pluviométrica de la que se disponen registros directos es la de Alfondeguilla, ubicada aproximadamente a 2 kilómetros al noroeste de la entrada principal de las Coves de Sant Josep.

Según los datos diarios recogidos en la estación pluviométrica de Alfondeguilla, integrada en el SAIH de la Confederación Hidrográfica del Júcar, se han obtenido los valores de precipitación anuales. Estos datos se han representado en un hietograma, y se han señalado los años secos y los años húmedos (figura 3.10.).

Para ello, se ha seleccionado una serie de 30 años hidrológicos completos de los datos históricos, que comprende entre el 1992 y 2022. La precipitación media de la serie presenta un valor de 522 mm/año. Los años secos y húmedos se han calculado aplicando un margen de un 15% respecto a la media de la serie.

Así, los años secos corresponden a aquellos con una precipitación anual inferior a los 444 mm, mientras que los años húmedos son aquellos con una precipitación anual superior a los 600 mm. La serie escogida presenta nueve años húmedos, nueve años secos, y doce años medios. El año hidrológico 2013/2014 fue el más seco, con 204 mm, y dos años más tarde, se encuentra el más húmedo, el año hidrológico 2016/2017, con 931 mm.

Debido a que el periodo de estudio del TFM ha comprendido desde noviembre de 2022 a julio de 2023, sin alcanzar un año hidrológico completo, la precipitación caída en este periodo se ha analizado con más detalle. En la figura 3.10. se ha representado la precipitación diaria recogida en la estación pluviométrica, donde se han señalado los distintos episodios de precipitación más intensa.

Se han identificado cuatro episodios, representados con las letras desde la A a la D, de los cuales, el más intenso ha sido el último, el D, con 60 mm caídos durante los últimos días de mayo de 2023. Este periodo se ha utilizado para la realización de un quimiograma, representativo de una crecida ordinaria del manantial de Sant Josep.

Además, en esta figura se han indicado con una flecha los meses en los que se han realizado los muestreos para los distintos análisis hidroquímicos recogidos en este trabajo.

Estos muestreos se han realizado en distintos momentos del año hidrológico, durante un periodo de lluvias (el de diciembre de 2022), durante un periodo sin lluvias (el muestreo de marzo de 2023), e inmediatamente después de un episodio de lluvias (el de junio de 2023), además del ya citado episodio D.

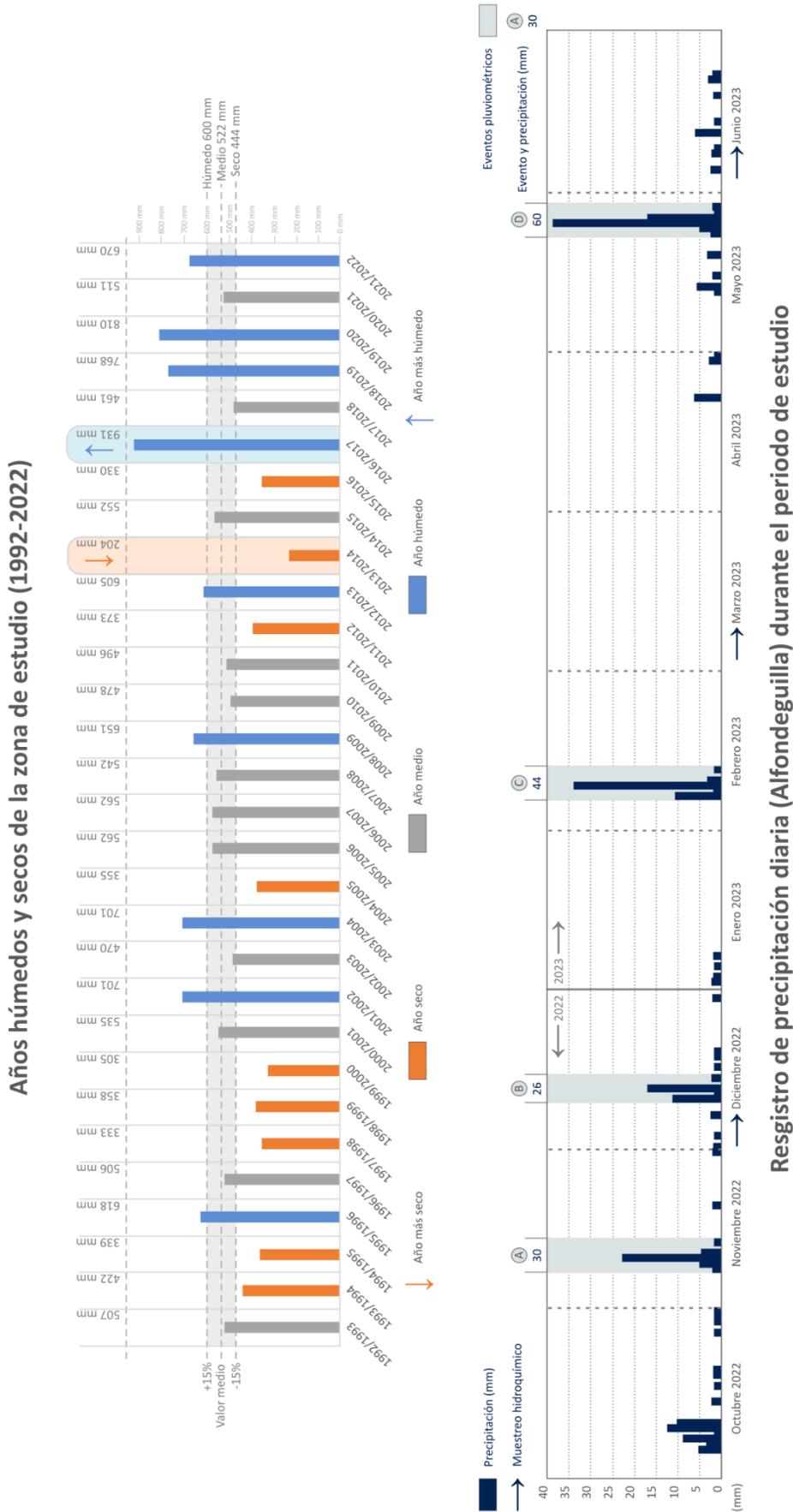


Figura 3.10. Arriba, hietograma de la estación pluviométrica de Alfonso de Alfondeguilla, en el periodo 1992-2022, representativo de la precipitación en la zona de estudio. Abajo, registro pluviométrico diario de la estación de Alfonso de Alfondeguilla durante el periodo de estudio (octubre 2022 - junio 2023)

Durante el episodio de lluvias intensas de marzo de 2023 (episodio D), se han tomado muestras diarias para su análisis hidroquímico. Este aspecto se encuentra desarrollado en este trabajo en su apartado correspondiente (apartado 6.1.2.).

3.3. Marco hidrogeológico

La zona de estudio se encuentra en la Cuenca Hidrológica del Júcar. Su hidrogeología es variada, al estar constituida por varios acuíferos de formaciones geológicas de características muy diferentes, carbonáticas y detríticas.

Parte de los acuíferos se encuentran en espacios naturales protegidos, con poca o nula infraestructura que permita el estudio directo de parámetros hidrogeológicos. A continuación, se realiza un resumen de los aspectos hidrogeológicos fundamentales de la zona de estudio.

3.3.1. Caracterización general de los acuíferos

En el extremo sureste de la Sierra del Espadán confluyen acuíferos correspondientes a tres masas de agua subterránea diferentes (figura 3.11.):

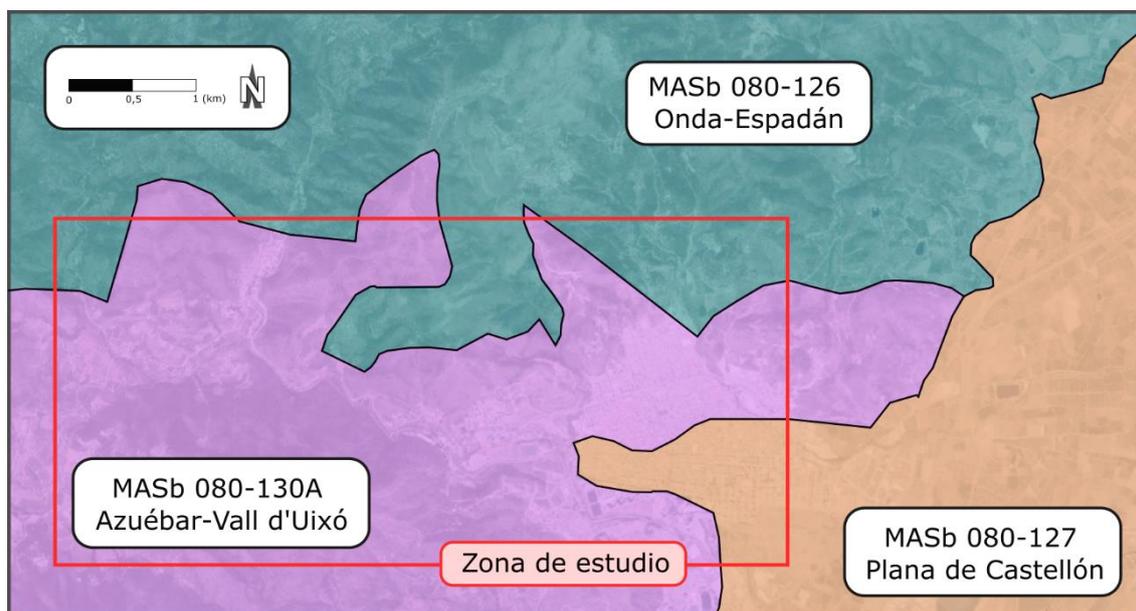


Figura 3.11. Delimitación y nombre de las Masas de Agua Subterráneas que se encuentran en la zona de estudio

- MASb 080-126, Onda-Espadán, constituida fundamentalmente por los afloramientos carbonáticos del Muschelkalk y, en menor medida, de las areniscas del Buntsandstein de la Sierra del Espadán.

- MASb 080-130A, Azuébar-Vall d'Uixó, también de carácter carbonático, corresponde parcialmente a la antigua MASb 080-130, Medio Palancia. En esta masa se enclava el sistema kárstico de Sant Josep.
- MASb 080-127, Plana de Castellón, que corresponde a los sedimentos detríticos plio-pleistocenos y holocenos de la plana litoral. Esta masa está fuertemente antropizada, por lo que presenta problemas tales como el elevado contenido en nitratos, plaguicidas y de intrusión salina.

Como puede observarse los límites entre estas masas subterráneas definidas en la actualidad no se corresponden claramente con criterios geológicos ni hidrogeológicos claros.

Dentro de la MASb Azuébar-Vall d'Uixó el acuífero principal es el correspondiente a los carbonatos del Muschelkalk, las Dolomías de l'Oronet y otras formaciones calizo-dolomíticas estudiadas en detalle por Garay (2000), en su tesis doctoral. Este autor delimita lo que denomina "Unidad de drenaje de Alfondeguilla-Sant Josep", con una superficie de 31 kilómetros cuadrados como la cuenca vertiente del manantial de Sant Josep, tanto subterránea como superficial.

Las líneas principales de flujo del agua subterránea se orientan en dirección Sureste, hacia el Mar Mediterráneo. En las zonas de cabecera de las cuencas, la dirección de flujo es hacia el Sur, hasta llegar al valle principal del Río Belcaire.

Se establece una estrecha vinculación entre la hidrogeología y la geomorfología de la zona, con una relación entre la escorrentía superficial y subterránea marcada por la presencia de sumideros en la zona. Estos sumideros se encuentran conectados con el manantial principal del acuífero, el Manantial de Sant Josep. Esta conexión hidráulica se demostró gracias a los ensayos de trazadores realizados en el entorno del Río Belcaire, principalmente, fluoresceína (Morell *et al.*, 1986).

El acuífero carbonático se encuentra también en conexión hidrogeológica con el acuífero detrítico de la Plana de Castellón (figura 3.12.). El contacto entre estos materiales es de borde de cuenca, por lo que debe darse una importante transferencia lateral de agua subterránea entre estos dos acuíferos.

El acuífero detrítico de la Plana de Castellón ha sido estudiado con mayor detalle en las últimas décadas (García Menéndez, 2018), al presentar mayor capacidad de almacenamiento y permeabilidad, así como facilidad para su explotación, con abundantes puntos de agua inventariados utilizados para la agricultura y la industria.

Como consecuencia, la calidad de las aguas de este acuífero se ha visto afectada por esta actividad (López-Gutiérrez *et al.*, 2007), además de estar condicionada por la presencia de una importante cuña de intrusión salina, la interfase entre el agua dulce y el agua salada.

En el acuífero carbonático se encuentran muy pocos puntos de agua inventariados, por lo que la información piezométrica es escasa. En el entorno de las Coves de Sant Josep se localizan dos sondeos de abastecimiento de la empresa pública de aguas (FACSA), denominados Sondeo Pipa 1 y Sondeo Pipa 2, de los que no se ha podido obtener su ubicación exacta pero sí sus valores hidroquímicos, que nos proporcionan información interesante sobre el acuífero.

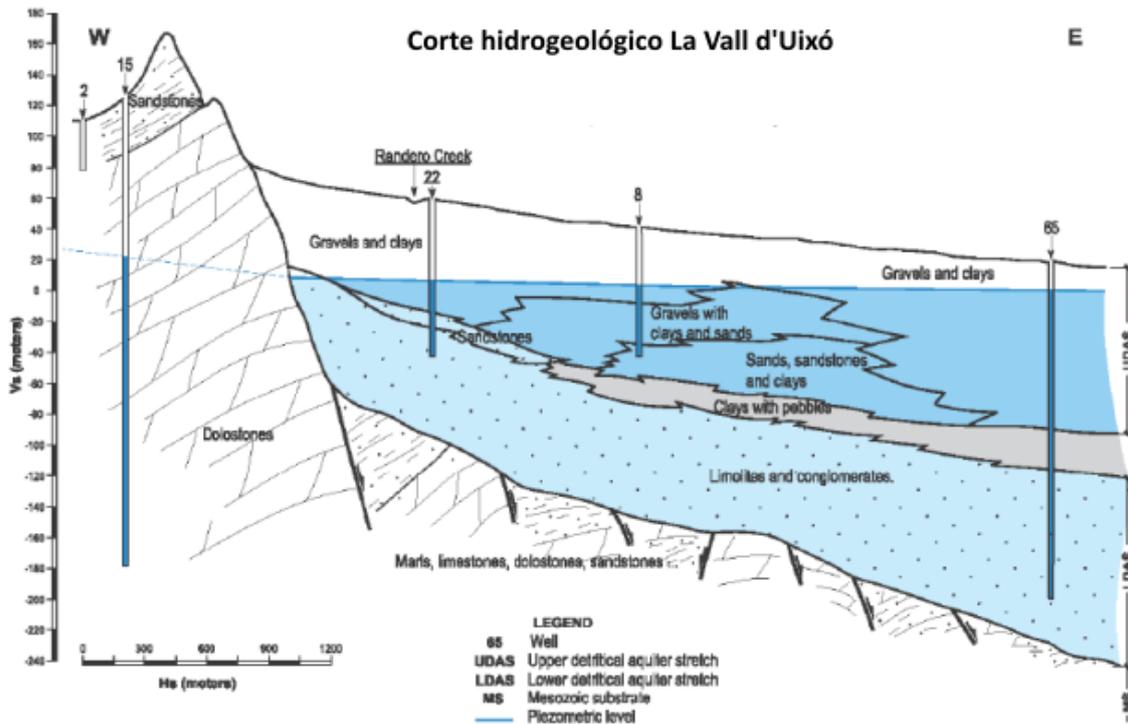


Figura 3.12. Corte hidrogeológico del contacto entre los materiales detríticos de relleno de la Plana de Castellón y el acuífero carbonático de La Vall d'Uixó (García Menéndez, 2018)

Respecto a los puntos con posibles impactos sobre el sistema kárstico destaca la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Alfondeguilla, ubicada a escasos metros del Río Belcaire, sobre el que vierte sus aguas. Este punto se encuentra a unos dos kilómetros del Manantial de Sant Josep.

Además, como se ha indicado anteriormente en este trabajo, los abundantes sumideros y morfologías kársticas de la zona son puntos de inyección directa de agua al acuífero, por lo que son puntos relativamente sensibles a la contaminación y a las actividades antrópicas.

3.3.2. La relación entre el Río Subterráneo y el nivel freático

A grandes rasgos la relación entre el Río Belcaire, el Río Subterráneo de Sant Josep y el acuífero es compleja, pero muy interesante, por su singularidad. En las zonas de

cabecera, y hasta el tramo medio, el Río Belcaire actúa como río perdedor, ya que éste solo presenta agua durante los eventos intensos de precipitación, en los que recoge la escorrentía superficial.

En su desembocadura, emplazado ya en el acuífero detrítico de la Plana de Castellón, sí presenta agua, por lo que su relación puede ser de río ganador, con una clara influencia de los aportes de las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas a lo largo del río en este tramo.

En la figura 3.13. se representa un perfil topográfico con las cotas del río Belcaire, de carácter torrencial, desde su cabecera hasta la desembocadura. Sobre este, se representa un perfil con las cotas aproximadas del Río Subterráneo de Sant Josep, de carácter permanente.

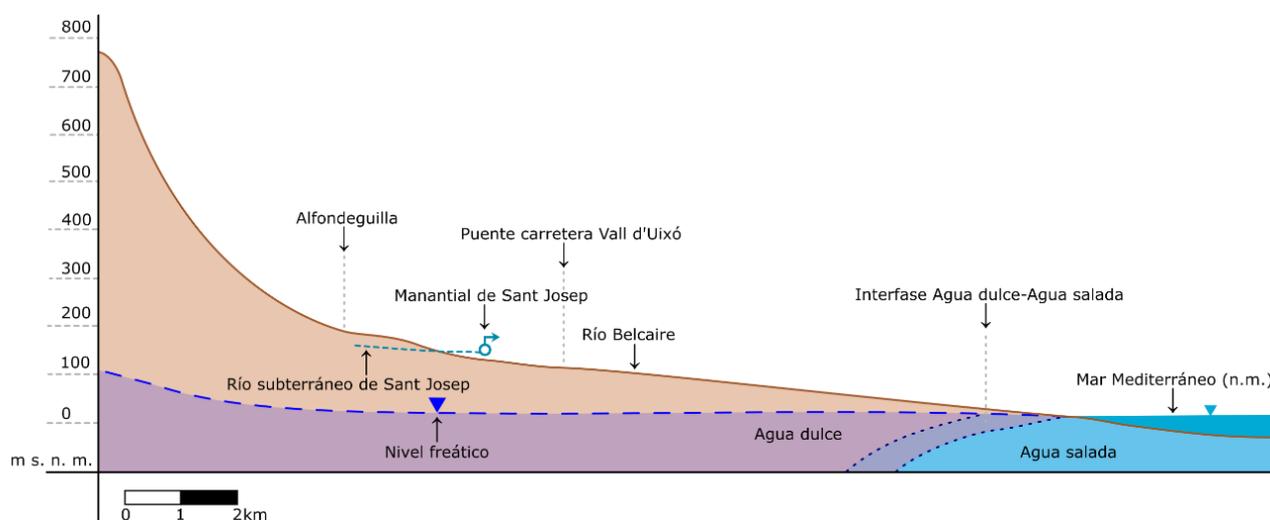


Figura 3.13. Perfiles topográficos del Río Belcaire desde su nacimiento en la cabecera de la cuenca hasta su desembocadura en el Mar Mediterráneo, y del Río Subterráneo de Sant Josep. Las escalas horizontal y vertical son diferentes. Elaboración propia, con datos de la posición del nivel freático y de la interfase de agua dulce-agua salada tomados de García Menéndez (2018)

La intersección entre estos dos perfiles debería representar el punto de tránsito entre el Río Belcaire como río perdedor, a río ganador. Sin embargo, esto no ocurre. Un estudio llevado a cabo por García Menéndez (2018) establece el nivel freático en el entorno cercano a 10 m s.n.m., con medidas directas en el acuífero detrítico (en teoría, en continuidad hidráulica con el acuífero carbonático), cota muy inferior a la del Río Subterráneo de Sant Josep.

Como se considera que existe continuidad entre el acuífero carbonático y el detrítico, la cota del nivel freático se supone ligeramente por encima a los 10 m s.n.m., aunque este dato no se ha podido comprobar durante la realización de este trabajo, dada la inexistencia de sondeos en la formación carbonática.

Se puede considerar, por tanto, que el Río Belcaire cede agua al Río Subterráneo, que es el que actúa *de facto* como un río "colgado" de carácter permanente, aunque

subterráneo, en el sentido de Martel (1911). Es decir, el río subterráneo actúa como un dren transmisivo situado por encima del nivel freático del acuífero carbonático.

3.3.3. Esquema hidrogeológico de las Coves de Sant Josep

Para entender el funcionamiento hidrodinámico del Río Subterráneo de Sant Josep, se han realizado dos esquemas hidrogeológicos, uno perpendicular al desarrollo principal de las Coves de Sant Josep, y otro longitudinal. En estos esquemas, representados en la figura 3.14., se ha interrelacionado la cavidad, los sumideros presentes en la zona, el río subterráneo, el manantial, el cauce del Río Belcaire, y el nivel freático local.

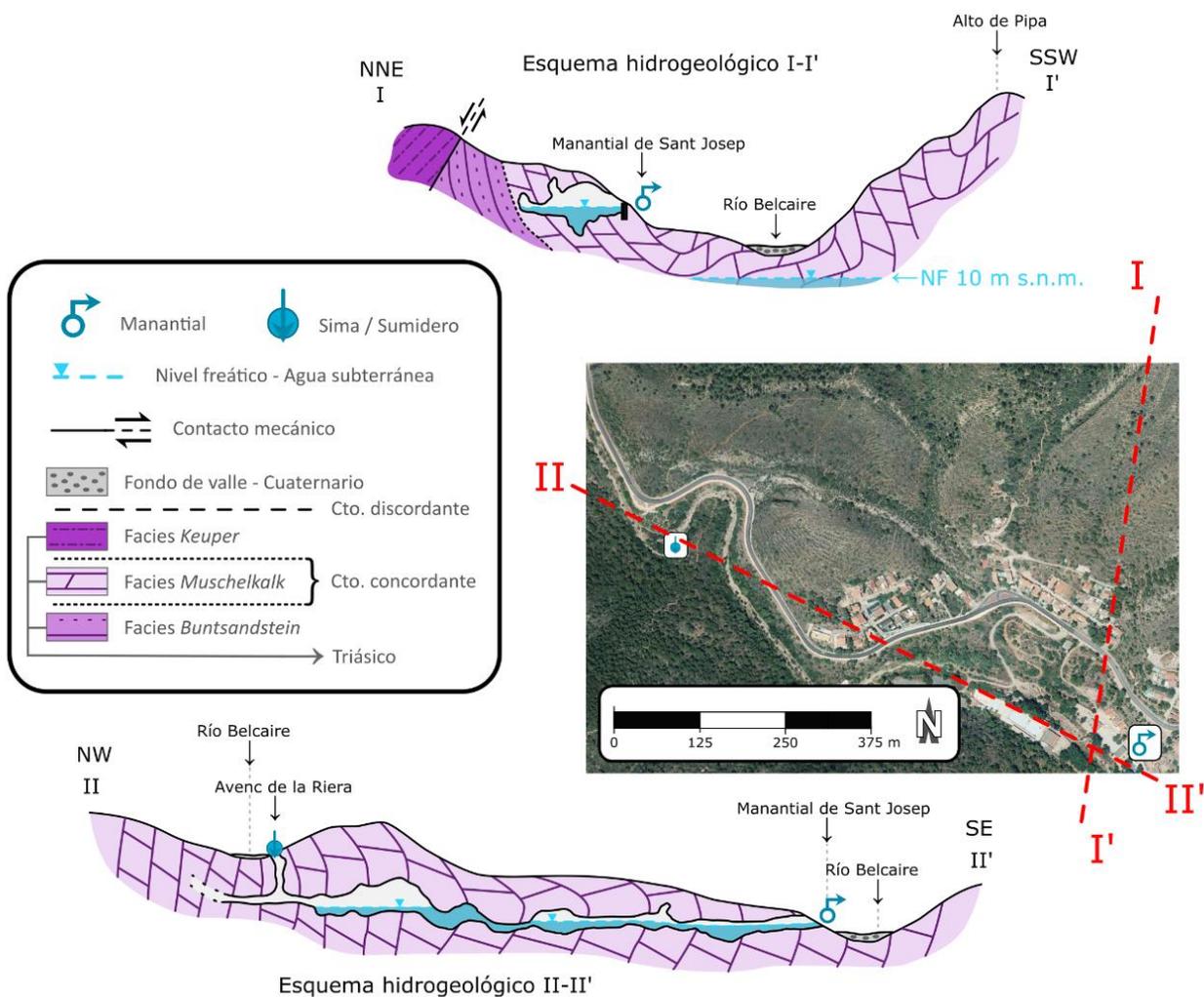


Figura 3.14. Esquemas hidrogeológicos de la relación entre el Río Subterráneo de Sant Josep, el Río Belcaire y el nivel freático del acuífero

El Manantial de Sant Josep presenta un caudal base de 50 L/s, un caudal medio de 100 L/s y un caudal máximo de 7 m³/s, muy variable debido a los episodios pluviométricos,

con una rápida respuesta kárstica (Garay, 2000). Su elevada modificación antrópica para el aprovechamiento de sus aguas dificulta su estudio en estado natural, y actualmente no se realizan medidas de caudal en el manantial, ni en la antigua estación de aforos ubicada más de un kilómetro en el interior de la cavidad, actualmente en estado de abandono.

En el esquema hidrogeológico I-I' se observa como el manantial se encuentra ligeramente (unos 5 metros) por encima del cauce del Río Belcaire, sin existir una relación directa entre ambos, a excepción de la que se produce durante los grandes episodios de crecidas, en los que el manantial presenta un gran caudal (figura 3.15.), que es vertido al cauce del río mediante una canalización artificial. Ciertamente es que normalmente el agua que surge del manantial no aporta su caudal al río porque es desviada para el abastecimiento de la localidad de la Vall d'Uixó.



Figura 3.15. Aguas altas durante un importante evento de precipitaciones. A: Cauce del Río Belcaire a la altura de las Coves de Sant Josep; en primer plano se localiza una señal de "Cauce Inundable". B: Manantial de Sant Josep con un caudal surgente importante. C: La galería de entrada a las Coves de Sant Josep, inundada

El caudal del manantial no responde únicamente al agua subterránea "recolectada" desde el acuífero, si no que, especialmente durante estos eventos intensos de precipitación, las Coves de Sant Josep actúan de *bypass* del Río Belcaire, como aparece representado en el esquema hidrogeológico II-II' de la figura 3.14. De esta manera se incorpora la escorrentía superficial al sistema, con el consecuente aumento casi instantáneo del caudal circulante.

Este aumento de caudal se ve limitado por la distribución de los sumideros en la zona y al caudal que éstos pueden incorporar al sistema kárstico. A su vez, este caudal se ve condicionado por la geomorfología y por los depósitos detríticos que rellenan algunos

de los conductos kársticos, condicionando la existencia de velocidades de flujo distintas, como es el caso de las zonas con sifones, o en los tramos represados.

4. Metodología

Las metodologías que se han seguido durante la realización del trabajo se han diferenciado en tres tipos principales: el trabajo de gabinete, el trabajo de campo y el trabajo de laboratorio.

Las actividades llevadas a cabo en cada uno de estos tipos de trabajo están estrechamente vinculadas al lugar donde se han realizado, motivo principal de la separación tipológica de estas metodologías.

4.1. Trabajo de gabinete

Los trabajos de gabinete han tenido lugar en las instalaciones del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), donde se ubica la Unidad Asociada IGME-UMA de Estudios Hidrogeológicos Avanzados, y han consistido en dos fases: recopilación de información y tratamiento de datos.

4.1.1. Recopilación de información

Para la recopilación de la información se ha realizado una búsqueda exhaustiva de la documentación preexistente, tanto de la cueva y su entorno, como de las técnicas empleadas en la realización de este trabajo, que han completado de esta forma la formación recibida durante el Máster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente.

Para ello, se han extraído artículos científicos de las principales bases bibliográficas, tanto en revistas nacionales como internacionales, así como manuales científicos, libros antiguos, artículos en revistas técnicas, cartografías temáticas, informes científico-técnicos, memorias espeleológicas, planos de cavidades, Trabajos de Fin de Máster y Tesis Doctorales.

Además de la información publicada, se ha dispuesto de material inédito relacionado con los temas principales del trabajo, tanto del Instituto Geológico y Minero de España, como de otras entidades colaboradoras, como el Ayuntamiento de la Vall d'Uixó.

Otra de las principales fuentes de información ha sido la recogida directamente desde la sociedad, proporcionada por los integrantes del equipo de trabajo de la cueva turística, y por las personas del municipio en general, cuyo conocimiento popular es de vital importancia en la realización de cualquier trabajo relacionado con el medio natural.

4.1.2. Tratamiento de datos

A caballo entre los trabajos de campo y los trabajos de gabinete se encuentra el tratamiento de los datos recogidos por los sensores en continuo instalados en la cueva. Para los estudios referentes a la hidrogeología y la atmósfera subterránea se han empleado los datos recogidos en continuo mediante el uso de distintos *dataloggers*

instalados en la cavidad en noviembre de 2022. Estos registran de manera sistemática, a intervalos de 10 minutos, diferentes parámetros hidrogeológicos y ambientales. Los datos de los sensores instalados aparecen en la tabla 1.

Modelo	Tipo	Marca	Rango	Precisión
9655	CR310	Campbell	Datalogger	
009541-005	Sonda HC2A	Rotronic	Temp -40 a 60°C	Temp 0,1°C
			Humedad 0 a 100%	Humedad 0,8%
11386	GMP252 CO2 Probe	Vaisala	CO2 0 a 10000ppm	+40ppm o 2% de la medida
PF-CAP-C-00162	pH-ORP SENSOR	Aqualabo	pH 0 a 14	pH +-0,1
			Redox -999 a 999mV	Redox +-2mV
			Temp agua 0 a 50°C	Temp agua +-0,5°C
6303800190-10-5-1-P-M-S	PLS-C	OTT	Nivel 0 a 10m	Nivel +-0,05% medida
			Cond agua 0 a 100mS/cm	Cond agua +-0,5% medida
			Temp agua -25 a 70°C	Temp agua +-0,1°C
Windsonic	Anemometro	Gill	Velocidad viento 0 a 60m/s	Velocidad viento +- 2%
			Direccion 0 a 360°C	Direccion +-2°
				El error puede aumentar al estar cerca del valor mínimo de detección

Tabla 1. Detalles de los sensores instalados para la medida de parámetros ambientales y físico-químicos

Los sensores han sido instalados en tres puntos de la cavidad, bajo lámina de agua y en la pared de la cavidad, a excepción de uno de los puntos, que se encuentra en un sector por encima del nivel del agua, por lo que mide únicamente los parámetros del aire (figura 4.1.).



Figura 4.1. Sensores de medida de parámetros ambientales instalados en la Galería Seca

Los sensores ambientales miden temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del aire, dirección principal del aire y la concentración de CO₂; y los sensores de agua miden altura de la lámina de agua, temperatura, conductividad eléctrica, salinidad y total de sólidos disueltos.

Los datos recogidos de los sensores en continuo, así como los datos de las distintas campañas de muestreo realizadas han sido tratados mediante distintos *softwares* (Excel, Inaquas, Grapher) con los que se han desarrollado gráficas y figuras, junto con *softwares* de tratamiento gráfico (Inkscape) y *softwares* de información geográfica (SIG), QGIS y ArcGIS.

4.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo ha sido la pieza fundamental sobre la que se han realizado las investigaciones. Abarca no únicamente las actividades realizadas en la cavidad, sino también en su entorno (figura 4.2.).



Figura 4.2. Trabajos de campo llevados a cabo para este trabajo. A: Trabajos en el exterior, de reconocimiento geológico y medidas estructurales. B: Trabajos en el interior de la cavidad, de medida de la concentración de CO₂. C: Trabajos geomorfológicos en la Galería Seca

Las actividades principales del trabajo de campo se pueden dividir a su vez en los bloques científico-técnicos investigados. Respecto a la geomorfología de la cavidad, se ha realizado el inventario de formas espeleológicas *in situ*, mediante la catalogación de los elementos espeleológicos durante las visitas cursadas a la cueva. La realización de cortes geomorfológicos se ha realizado de manera sincrónica a la catalogación geomorfológica.

Para la realización de los cortes geomorfológicos se ha empleado un distanciómetro láser LEICA DISTO D5, y una brújula SILVA Expedition S, siguiendo la metodología de manera similar a la usada en la realización de secciones espeleológicas; para con posterioridad a

la traza de la sección, añadir los elementos geológicos observables, tales como la litología, estructuras sedimentarias y tectónicas, y los elementos sedimentarios de relleno de la cavidad que se puedan observar directamente sobre el terreno.

Esta metodología aparece detallada más adelante, en un subapartado específico.

Respecto a la hidroquímica, en las visitas a la cavidad se han tomado muestras sistemáticas de agua cada tres meses, tanto del agua del río subterráneo como del agua de goteo, representativa de la zona no saturada (ZNS) o zona vadosa situada por encima de la cueva.

Se han tomado muestras para el análisis hidroquímico de elementos mayoritarios en botes de PET de 1 litro, y en dos botes de PET de 250 ml, uno para el análisis de los isótopos estables de la molécula del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), y el otro acidificado con ácido nítrico, para el análisis de los metales disueltos. Además, en los mismos puntos de muestreo, se han tomado medidas *in situ* de los parámetros físico-químicos del agua, con el uso de un equipo multiparamétrico HACH HQ4000, para determinar la conductividad eléctrica del agua (C.E.), la temperatura, el pH, y el oxígeno disuelto (O.D.).

En el bloque de la investigación de la atmósfera subterránea se ha realizado la toma de muestras de aire para la determinación isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) del CO_2 presente en la cavidad. Para ello se han usado viales Labco Exetainer a los que previamente se le ha realizado el vacío. Una vez tomada la muestra se han sellado los viales con una lámina de sellado Parafilm, para evitar el escape del gas durante el traslado al laboratorio. Además, se han realizado medidas de la concentración de CO_2 a lo largo de la cavidad, con un equipo de medición portátil Vaisala GM70.

Además de los trabajos de campo de estos bloques generales, se han realizado jornadas de reconocimiento geológico, litológico y tectónico tanto del entorno de la cavidad, como de la cavidad en sí misma, con la finalidad de completar la información bibliográfica de la que se disponía.

4.2.1. Metodología para los trabajos geomorfológicos

Debido a la particular metodología de elaboración de cortes geomorfológicos, ésta se describe pormenorizadamente en este apartado.

La metodología de realización de cortes geomorfológicos que se ha utilizado en este trabajo es la desarrollada por el IGME, (Robledo *et al.*, 2012; 2018) y que aparece desarrollada en Durán Laforet *et al.*, 2022.

Se considera un corte geomorfológico endokárstico como la síntesis entre una sección espeleológica y un corte geológico, de manera que se obtiene la representación de un espacio tridimensional en uno en dos dimensiones.

Un corte geomorfológico es, por tanto, la representación morfológica de la cueva en un plano vertical.

Normalmente, se llevan a cabo aprovechando las secciones espeleológicas preexistentes, que se realizan perpendiculares a la dirección principal del desarrollo de la cavidad. En este caso, los cortes geológicos se han realizado *ex professo*, posterior al trabajo de gabinete de selección de las ubicaciones, en función de la representatividad de los rasgos geomorfológicos observables en el desarrollo de la cavidad.

También existen secciones geomorfológicas longitudinales, alzados, realizados en la dirección principal de la cavidad, de forma que se puedan integrar con los cortes ortogonales a la dirección principal (Robledo y Durán, 2012).

Una vez se ha seleccionado la ubicación de los cortes geomorfológicos, se representan *in situ* en el corte los siguientes aspectos:

- Representación del espacio ocupado por el vacío de la cavidad, con la geometría correspondiente a la zona en la que se encuentre la sección. Esto debe incluir las morfologías propias de la disolución y formación de la cavidad (erosivas). Este espacio geométrico es lo que se conoce como la atmósfera subterránea, ya que es el lugar físico en el que ocurren los procesos relacionados con la dinámica de los fluidos presentes en la cueva, ya sean líquidos (agua) o gaseosos.
- A esto, se le debe añadir la litología correspondiente a la roca en la que se desarrolla la cavidad, con las estructuras geológicas que se puedan observar, como el buzamiento de las capas, el plegamiento o la fracturación, de igual forma que se realizaría en un corte geológico.
- Una vez representadas las características geológicas propias de la cavidad, se representan sobre las secciones geomorfológicas, los elementos que se encuentran rellenando el espacio de la cavidad (sedimentos detríticos y espeleotemas).
- En el caso de las cuevas turísticas, como es este caso, es importante representar, además, las estructuras y elementos antrópicos presentes en esta.

Realizados estos pasos, a continuación, se obtiene un corte sintético en el que aparecen representados, al menos, los siguientes elementos: los materiales en los que se desarrolla la cavidad y su estructura, la geometría erosiva primaria de la cavidad; y los distintos elementos sedimentarios que se encuentran en el interior de ésta, como espeleotemas y sedimentos detríticos, además de las estructuras antrópicas.

La información obtenida se digitaliza posteriormente en gabinete, y se obtiene como resultado la composición final, sobre la que se puede plasmar otra información adicional, procedente de fotografías de detalle o croquis ampliados.

De esta manera es posible representar la evolución geomorfológica de la cavidad a lo largo del tiempo y del espacio, para lo que se pueden representar en los cortes otro tipo de datos como dataciones absolutas de espeleotemas, o características físico-químicas del medio, tanto de la atmósfera subterránea, como del agua presente en la cavidad, en el caso de que exista.

Como muchas de estas estructuras o elementos clave que se encuentran en las cavidades no suelen encontrarse directamente en el plano vertical representado por el corte, habitualmente se realiza una proyección de los elementos cercanos más importantes sobre el plano, de forma que el corte geomorfológico presente una mayor representatividad.

4.3. Trabajo de laboratorio

Los análisis llevados a cabo se han realizado en tres laboratorios distintos, en función de las necesidades técnicas y tecnológicas de los mismos.

Los análisis de las aguas muestreadas de componentes mayoritarios se han realizado en los Laboratorios Centrales de Tres Cantos, en Madrid, del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), junto con los análisis de componentes minoritarios y de metales.

Los análisis de los isótopos estables del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) se han realizado en el Laboratorio de Aguas del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). Finalmente, los análisis de la isotopía del CO_2 ($\delta^{13}\text{C}$) del aire de la atmósfera subterránea de la cavidad se han realizado en el Laboratorio de Espectrometría de Masas de los Servicios de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Málaga (SCAI).

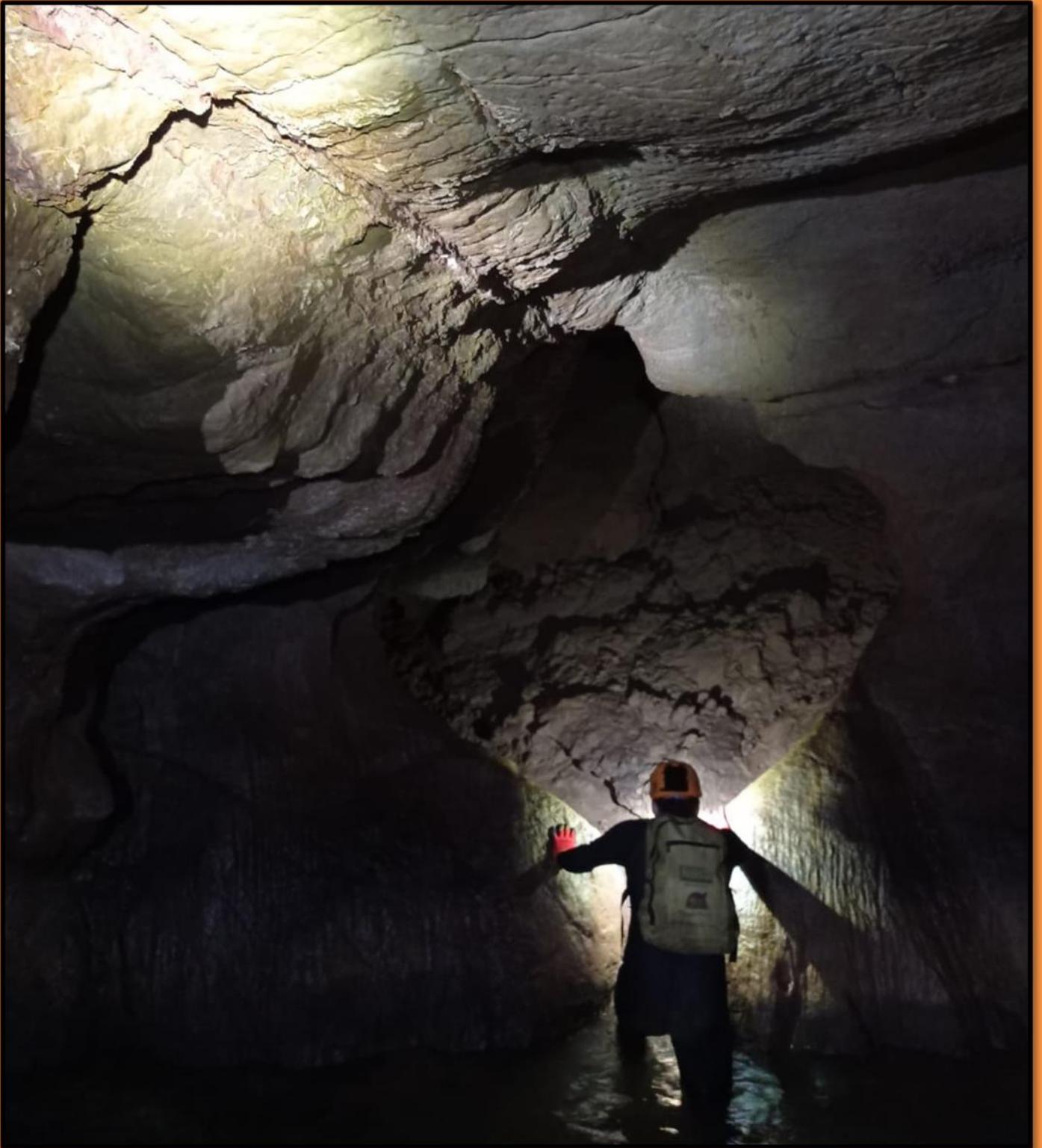
En detalle, las analíticas llevadas a cabo en el IGME se han realizado mediante el uso de técnicas de Espectrometría de Absorción Iónica, Espectrometría de Emisión Atómica, Electrometría, Volumetría, Absorción Molecular en flujo continuo, Cromatografía Iónica, Cromatografía GS/MS/MS y Espectrometría ICP/MS e ICP/AES.

Todas estas técnicas han sido realizadas con los siguientes equipos: Equipo de Absorción Atómica (Varían FS 330), Autoanalizador de flujo continuo (Alliance Integral e Integral Futura), Analizador de Carbono Orgánico Total [TOC] (Shimadzu TOC-Vcph), Cromatógrafo Iónico (Dionex 600 de Vertex), Espectrómetro UV-VIS (Perkin Elmer Lambda EZ 210) y Cromatógrafo GS/MS/MS (Varian 4000).

Las analíticas llevadas a cabo en el CEHIUMA se han realizado mediante el uso de técnicas de Espectrometría láser con tecnología CRDS para la determinación de los isótopos estables del agua (Oxígeno 18 [^{18}O], y deuterio [^2H]). Para ello se ha empleado un equipo PICARRO CRDS L1102-i con automuestreador, que emplea un patrón equivalente al estándar isotópico de referencia Vienna *Standard Mean Ocean Water* (VSMOW).

Las analíticas llevadas a cabo en el SCAI se han realizado mediante el uso de técnicas de espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS), con un analizador GasBench GC-MS (GB-IRMS Thermo Electron Corporation) equipado con un automuestreador GC PAL (CTC Analytics), interfaz ConFlo IV y Espectrometría de Masas de Relación Isotópica (IRMS) Delta V Advantage (Thermo Scientific).

Junto al equipo, se ha usado material de referencia certificado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA; NBS-18 Calcita y NBS-19 TS-Piedra Caliza; estándares de laboratorio: Mármol de Carrara, Microanálisis Elemental y Na₂CO₃ Sigma Aldrich), y calibrados con respecto a la relación estándar *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB).



Galería hidrogeológicamente activa en la zona no turística de las Coves de Sant Josep
Fotografía: Alba Manjón Linares

II. Segunda parte:

Estudio geomorfológico, hidrogeológico y ambiental del sistema kárstico

II. Segunda parte: estudio geomorfológico, hidrogeológico y ambiental del sistema kárstico

Este segundo bloque corresponde al cuerpo principal del Trabajo de Fin de Máster, en el que se muestran los estudios llevados a cabo en las Coves de Sant Josep. Se tratan tres aspectos distintos que componen el sistema roca-aire-agua de las cavidades kársticas.

El primero de estos estudios responde a la contribución al conocimiento de la geomorfología endokárstica de las Coves de Sant Josep, donde se han caracterizado los distintos procesos geomorfológicos, y su evolución en la historia geológica reciente, a través de los cortes geomorfológicos como herramienta principal.

El segundo, responde a la hidrogeología del sistema, mediante la caracterización de la química del agua en el sistema. El agua es uno de los agentes principales en la formación del paisaje kárstico superficial y subterráneo, por lo que se ha realizado un estudio a la hidroquímica de las Coves de Sant Josep.

Así, se ha estudiado el agua con múltiples técnicas analíticas, el agua presente en el río subterráneo y en los goteos, y se han utilizado los datos históricos, así como datos recogidos *ex professo* en las campañas llevadas a cabo en el periodo de estudio.

El último de los aspectos que se ha estudiado es el aire del interior de las Coves de Sant Josep y otras cavidades relacionadas. El estudio de parámetros característicos de la atmósfera subterránea de la cavidad, como la temperatura y la dinámica del CO₂ han sido las líneas de trabajo llevadas a cabo.

5. Estudio geomorfológico de las Coves de Sant Josep

El estudio de las morfologías presentes en ambientes kársticos tanto superficiales como subterráneos es complejo. El karst en general presenta una gran heterogeneidad de formas y ambientes, y se encuentra sometido a diferentes procesos a lo largo de la historia geológica. Además, las formas del relieve kárstico se presentan tanto en superficie (morfologías exokársticas) como en profundidad (morfologías endokársticas), que están muchas veces estrechamente interrelacionadas.

Las formas exokársticas suelen ser fácilmente identificables, al estar en superficie, ya sea por métodos de teledetección o mediante observación directa de las mismas, utilizando las técnicas clásicas de la geomorfología kárstica (Cvijić, 1893; Ford y Williams, 2007), o métodos geomatemáticos más actuales (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2014a).

Por su lado, la caracterización de las morfologías endokársticas es más compleja, debido a varios factores, entre ellos, la limitada accesibilidad al medio subterráneo, la ausencia

de luz natural, y la singularidad de los procesos geomorfológicos que ocurren en el endokarst, con escasos análogos en superficie.

Dichos procesos deben, por tanto, ser estudiados detenidamente y, en posteriormente, ordenados en el tiempo, para poder establecer una secuencia evolutiva para el correcto entendimiento de la secuencia geomorfológica. Una de las herramientas más útiles de las que se dispone y que se ha empleado en este trabajo, es la realización de cortes geomorfológicos, en los que se refleja la representación de los elementos característicos del medio subterráneo.

Las formas endokársticas son el resultado de la sucesión temporal en el subsuelo kárstico de procesos erosivos químicos (disolución) y físicos, por la propia acción tractiva del agua; y de sedimentación que, a su vez, pueden ser tanto químicos (precipitación), como físicos, dando lugar a la arquitectura que define el modelado actual de una cavidad natural.

En las cavidades hay dos tipos de elementos principales: erosivos/disolutivos y sedimentarios, que corresponden, respectivamente, a formas y sedimentos. Los primeros responden a morfologías que pueden ser erosivas, por acción del agua *sensu stricto*, o disolutivas, por interacción química entre el agua (y otros fluidos) y la roca. Los sedimentos son clasificables como sedimentos detríticos, que pueden ser autóctonos o alóctonos; o sedimentos por precipitación química (espeleotemas).

Como sedimentos detríticos autóctonos se pueden encontrar aquellos causados por procesos gravitacionales, como colapsos, caídas de bloques o derrumbes, y como alóctonos se pueden encontrar los sedimentos tractivos transportados mediante un flujo de agua, ya sea laminar, o turbulento.

En este apartado se han esbozado los principales rasgos endokársticos del sistema kárstico, especialmente en las Caves de Sant Josep, en las que se han realizado 4 cortes geomorfológicos, donde se han representado todos los elementos descritos anteriormente, con la finalidad de identificar los procesos que han operado en la cavidad y ordenarlos espacial y temporalmente.

Existe cierta literatura científica sobre la geomorfología endokárstica (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2004; Arrese González, 2009; Ballesteros, 2016) aunque en comparación con la geomorfología del karst superficial, los trabajos son escasos. Fue Cvijić (1893) el primer autor que desarrolló las pautas básicas de la geomorfología del medio kárstico como una disciplina específica, detallando las morfologías que componen el endokarst, como resultado de procesos singulares y propios de dicho medio.

En los últimos años, se ha encontrado que la caracterización de la geomorfología endokárstica proporciona información útil sobre la espeleogénesis de las cavidades, y se ha utilizado como paradigma en la descripción del karst hipogénico mediante el uso combinado de evidencias geomorfológicas e hidrogeológicas (Klimchouk, 2007 y 2009), que pueden responder a una amplia variedad de procesos de espeleogénesis, así como

a diferentes entornos geológicos, que no necesariamente deben ser kársticos *sensu stricto* (Durán Laforet *et al.*, 2022), aspecto a considerar en este estudio.

Por tanto, en este trabajo se ha tratado de identificar los elementos geomorfológicos, que pueden ser empleados como evidencias de la espeleogénesis del sistema, combinadas con algunos aspectos hidrogeológicos del entorno, y la caracterización hidroquímica, tanto del río subterráneo como del agua de los goteos.

5.1. Descripción geomorfológica de las Coves de Sant Josep

En las Coves de Sant Josep se han diferenciado tres zonas geomorfológicamente diferentes, representadas en la topografía que se ha digitalizado *ad hoc* para este trabajo:

- Galería activa, habilitada para la visita turística

Este tramo, de unos 800 metros, presenta la práctica totalidad del suelo bajo lámina de agua, hasta una cota marcada por las represas del manantial de Sant Josep. Su travesía se realiza sobre las barcas (figura 5.1.), desde las que se han realizado los trabajos, aunque puntualmente se ha trabajado fuera de estas.



Figura 5.1. Tramo de la cavidad con el río subterráneo represado, habilitado para su visita con barcas

- Galería seca, habilitada para la visita turística

Este tramo de 250 metros se encuentra unos metros más elevado respecto a la galería principal, por lo que se encuentra seca en situaciones normales. Comienza y termina en la galería principal, ya que su trazado presenta dos bruscos giros de 90°. Este tramo es el que menos dificultades presenta para la realización de los trabajos, ya que se puede

recorrer fácilmente a pie, al estar habilitada para su visita turística (figura 5.2.) y no presentar agua a excepción de los goteos.



Figura 5.2. Tramo seco de la cavidad, topográficamente elevado respecto a la galería principal, activa

➤ Galería activa, en la zona no visitable

Este tramo comprende desde la sala en la que se encuentra el último embarcadero, hasta el primero de los sifones actuales de la cueva. La cota es ligeramente superior a las represas del manantial, por lo que sus aguas no están embalsadas y discurren, en algunos puntos, a gran velocidad, a través de sus salas de la galería principal.

Esta circunstancia obliga a trabajar con neopreno, ya que para su travesía es necesario atravesar algunos puntos en los que la lámina de agua es profunda. Los espeleotemas son más abundantes en este tramo (figura 5.3.) y la ausencia de instalación de luz eléctrica condiciona también los trabajos de campo.



Figura 5.3. Abundantes espeleotemas en la galería activa de la zona no visitable

Es este tramo se encuentran los restos de una antigua estación de aforo, a aproximadamente un kilómetro respecto a la entrada de la cueva.

En cada una de estas zonas se ha realizado, al menos, un corte geomorfológico representativo del sector, de forma que se han descrito las morfologías características de cada uno de estos tramos establecidos (figura 5.4.).

Se pueden observar los tramos de la galería activa, representados por el trazado base del río subterráneo, en color azul, y los tramos de cavidad turística, y no visitable, separados por una línea roja.

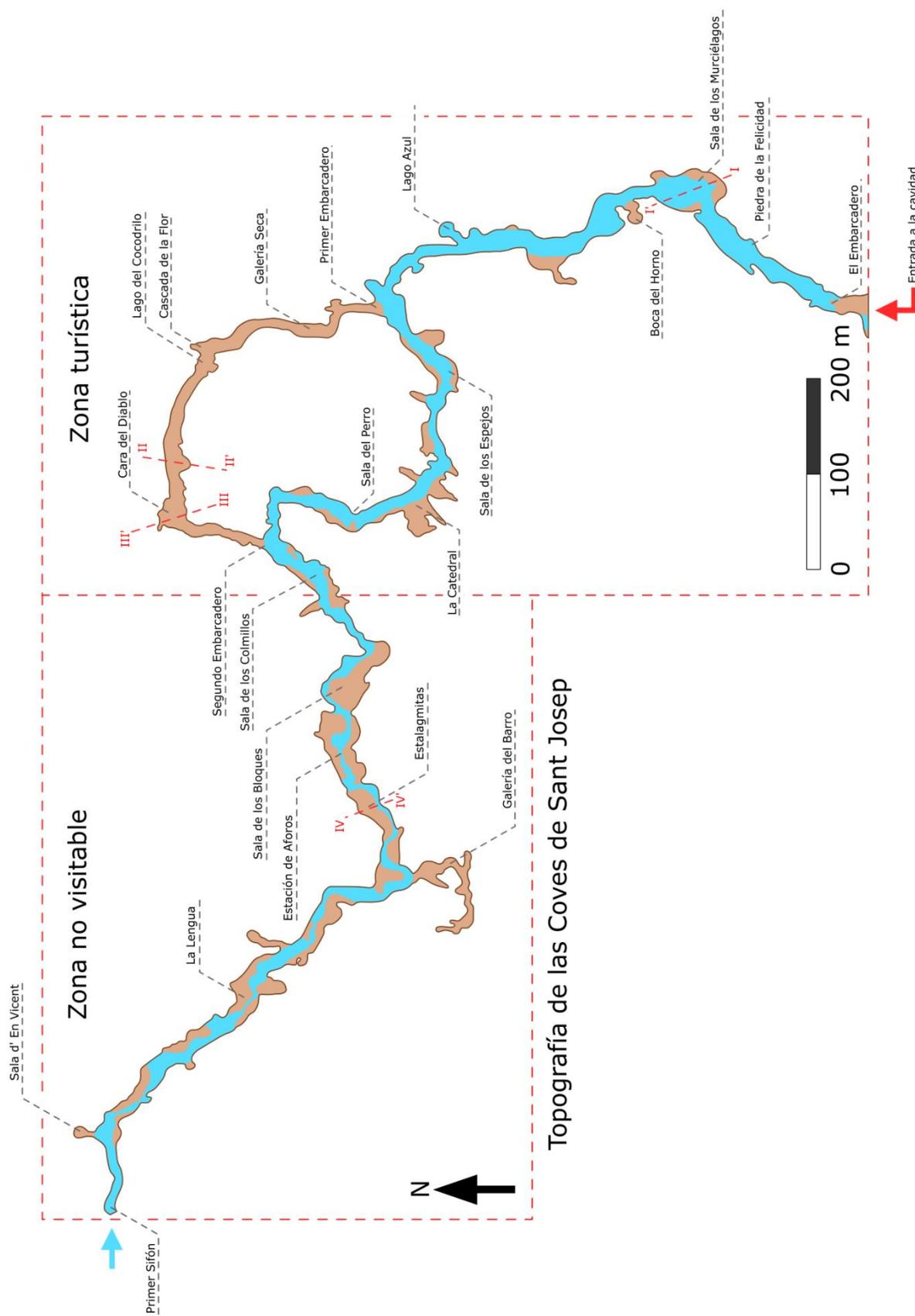


Figura 5.4. Topografía de las Coves de Sant Josep, con la toponimia de los lugares más relevantes para este trabajo y la traza de los cortes geomorfológicos realizados en su interior (I-I' a IV-IV')

Las galerías activas son aquellas que presentan de manera permanente agua perteneciente al río subterráneo, frente a la Galería Seca, topográficamente más elevada y por encima del nivel estable del agua del río subterráneo. Pese a esto, en alguna de las crecidas ordinarias, y en las extraordinarias, el agua del río subterráneo llega a superar el umbral y alcanza la Galería Seca.

Las zonas habilitadas para la visita turística presentan modificaciones antrópicas propias de la habilitación para su uso turístico. La galería activa se encuentra cubierta en su práctica totalidad por una lámina de agua de tipo "lago", ya que existen modificaciones del curso natural del río subterráneo (represas) para permitir la visita en barca a las Coves de Sant Josep.

En la zona no visitable encontramos la galería principal, como galería activa, ya que es a lo largo del curso del río subterráneo donde se desarrollan las principales salas y galerías. Sin embargo, este sector no se encuentra represado en la actualidad, por lo que el río presenta un carácter natural más tractivo, sin zonas remansadas, a excepción de los sifones presentes en la parte final de la zona no visitable. En este sector es posible encontrar algunas salas y galerías laterales de menor tamaño, aledañas al curso activo actual del río subterráneo, como la Galería del Barro o del Fang. La mayor parte de estas galerías son aportes hídricos ocasionales, provenientes desde el Sur.

A grandes rasgos, y en función de lo observado en superficie, la karstificación del macizo está estrechamente vinculada a la fracturación regional. Garay (2003) indica que existen varias etapas de deformación, con fracturas de extensión que favorecen la infiltración y disolución. En la cueva, se observan fracturas que marcan en el detalle la orientación de algunos tramos de galería.

De esta manera, la disposición final de la cavidad presenta una gran variedad morfológica, con grandes salas conectadas por galerías sinuosas o que se benefician de fracturas para su desarrollo (figura 5.5).

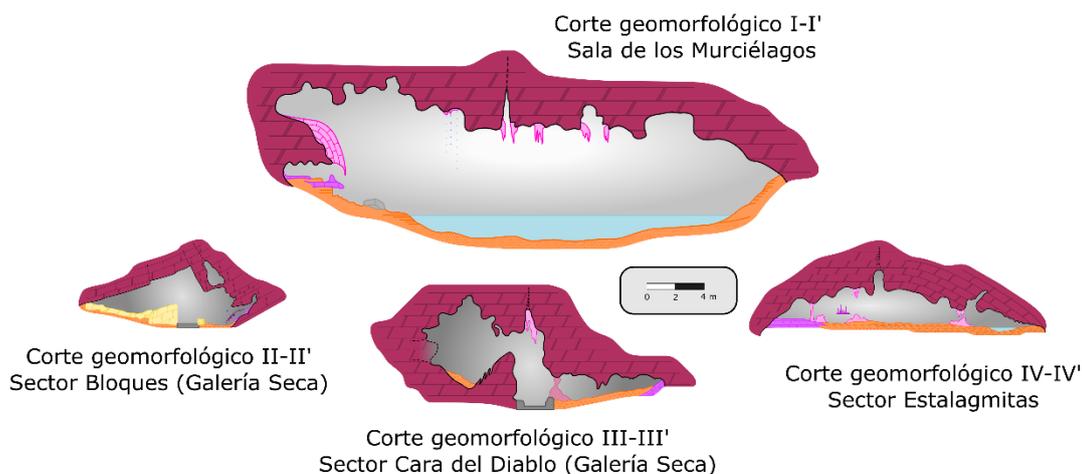


Figura 5.5. Cortes geomorfológicos representados a la misma escala, con la finalidad de indicar la heterogeneidad de los volúmenes de algunas de las salas y galerías de la cavidad

5.1.1. Galería activa habilitada al turismo

En este tramo se ha realizado el corte geomorfológico (I-I'), denominado "Murciélagos" realizado en la Sala de los Murciélagos (figura 5.6. A), una de las grandes salas de la cavidad, representada en la figura 5.7. La principal complejidad de esta sección es que la gran mayoría de la sala se encuentra ocupada por el agua, lo que dificulta técnicamente la realización del corte geomorfológico, y también la determinación de los procesos geomorfológicos que han tenido lugar en las estructuras que se encuentran por debajo de la lámina de agua (figura 5.6. B).

La sección presenta una morfología controlada principalmente por la estratificación, prácticamente horizontal, y fácilmente observable en el techo de la propia Sala de los Murciélagos.

Pese a que la mayor parte de la sección presenta una superficie erosiva a techo que es la mayoritaria en la sala como conjunto, pueden observarse otras dos superficies, una más alta, encajada respecto a la anterior, visible en la parte sur del corte geomorfológico, y otra por debajo, también observable en la zona sur del corte geomorfológico. Esta última superficie se encuentra ubicada a muro del espeleotema tan característico existente en la sala, una colada de gran tamaño, en forma de campana, cuya parte inferior presenta evidencias de corrosión (figura 5.6. C).

Las tres superficies erosivas se encuentran retocadas por morfologías menores, de tipo cupuliforme, con mayor o menor desarrollo, desde algunos decímetros, hasta los tres metros de diámetro.

En la parte central del corte geomorfológico, existen algunas chimeneas que se desarrollan a favor de una fractura subvertical identificada. Esta fractura, junto a otra ortogonal, con una dirección paralela al corte geomorfológico, controlan el desarrollo de espeleotemas de pequeño tamaño (estalactitas centimétricas a decimétricas) y los goteos activos, importantes en esta sala.

El piso de la sala se encuentra casi en su totalidad cubierto por el agua del río subterráneo, que en este sector se encuentra remansada y sobreelevada, por las pequeñas represas construidas en el siglo pasado en la entrada principal de la cavidad.

Los sedimentos característicos del fondo de la sala en este sector son arenas finas y limos, con menor predominio de algunos depósitos clásticos tractivos de gran tamaño. La excepción son las orillas, las márgenes sur y norte de la sala, que se encuentran por encima de la lámina de agua.

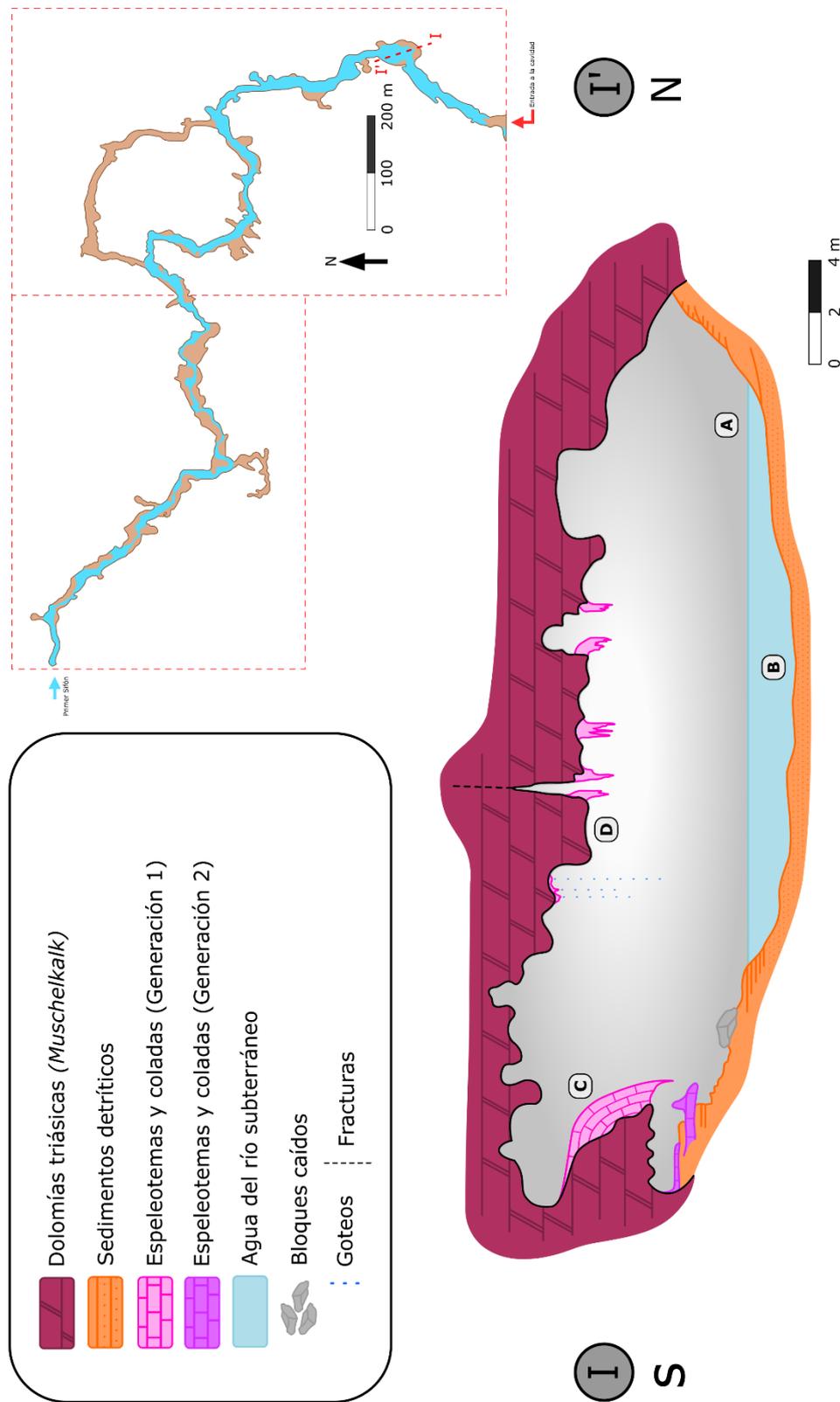
En la orilla meridional se observan una potente serie de sedimentos de unos cuatro metros de espesor, coronada por el desarrollo de suelos estalagmíticos, situados bajo una colada de apariencia "antigua", que ofrece una morfología muy característica.

En el techo aparecen pequeños conjuntos de estalactitas aisladas, especialmente en la parte central, como se ha indicado antes, más fracturada. Algunos de estos grupos de

espeleotemas presentan goteos activos intensos (figura 5.6. D), uno de ellos de origen antrópico, como se desarrollará más adelante.



Figura 5.6. Fotografías de detalle de los elementos principales del sector "Murciélagos" A: Panorámica general de la Sala de los Murciélagos. B: Extremo oeste del corte, con el nivel actual del lago, que inunda casi completamente la sala. C: Detalle de la gran campana sobre los sedimentos detríticos, con morfologías de corrosión en su base y en su lateral. D: Techo de la Sala de los murciélagos con morfologías erosivas y algunos espeleotemas en su lado derecho. En el centro, se observa la gran colada con sedimentos detríticos interestratificados



Corte geomorfológico I-I'
Sala de los Murciélagos

Figura 5.7. Corte geomorfológico I-I', Sala de los Murciélagos

5.1.2. Galería Seca habilitada al turismo

En este segundo tramo se han realizado dos cortes geomorfológicos, el (II-II'), denominado "Sector Bloques" y el (III-III'), denominado "Sector Cara del Diablo". Ambos han sido realizados en la Galería Seca.

5.1.2.1. Sector Bloques

La geomorfología de este sector está controlada por la estratificación, que buza unos 20° hacia el Sur, formando parte del sinclinal que condiciona el tramo final de la galería visitable y el sector oeste de la Galería Seca.

Pueden observarse dos tipos de morfologías diferentes. Hacia el sur, existe un claro predominio de las formas producidas por procesos gravitacionales, de desprendimientos y caída de bloques. La galería responde a un colapso de los estratos del techo, que reposan casi sin desarticularse en el suelo (figura 5.8. A y B), compuesto por sedimentos detríticos de tamaño fino, principalmente arcillas y arenas de grano fino.



Figura 5.8. Fotografías de detalle de los elementos principales del sector "Bloques" A: Gran bloque desprendido del techo, cuyas caras corresponden a planos de estratificación. B: Extremo sur del corte geomorfológico, donde se puede observar uno de los bloques in situ, fracturado. C: Sedimentos detríticos del extremo norte y el criptolapiaz desarrollado sobre estos. D: Detalle de los coraloides existentes en la base de extremo norte

Hacia el norte, sin embargo, son las morfologías erosivas las que predominan, con cúpulas, túneles y chimeneas ascendentes. En este extremo se puede encontrar una galería superior de poco desarrollo horizontal, asociada a una fractura de igual dirección que las que condicionan la caída de los bloques del techo.

En esta pequeña galería, ubicada a menos de un metro del techo de la galería principal, es posible encontrar abundantes morfologías erosivas cupuliformes, de tamaño decimétrico, tanto en el techo como en las paredes.

El aspecto general de esta galería corresponde con un *dead end*, característico del Cortejo Morfológico de Flujos Ascendentes o MSRF, por sus siglas en inglés, *Morphologic Suit of Rising Flows* (Klimchouck, 2007).

En la zona norte de la galería principal es posible encontrar un pequeño canal ascendente con cúpulas de pequeño tamaño, y en la parte inferior, cercana al suelo de la galería, se encuentran dos elementos geomorfológicos notables.

El primero de ellos es un criptolapiaz bien desarrollado, producido por el enterramiento y la disolución progresiva durante las fases de inundación y sedimentación de la galería, lo que indicaría la presencia de una lámina de agua relativamente estable a esta cota. La galería actualmente está seca, a excepción de durante los grandes eventos de desbordamiento del río subterráneo, asociados a importantes episodios pluviométricos, que provocan la existencia de sedimentos detríticos tractivos en el suelo de la galería, y a cotas ligeramente superiores (figura 5.8. C).

El otro elemento corresponde a un conjunto espeleotémico compuesto por coraloides de pequeño tamaño (figura 5.8. D), que no llegan a los 5 centímetros de desarrollo. Estos coraloides son espeleotemas que precipitan por capilaridad cerca del nivel del agua (Durán *et al.*, 2000), y son posteriores a la formación del criptolapiaz, aunque indican igualmente la presencia cercana del nivel del agua.

El corte geomorfológico se representa en la figura 5.9.

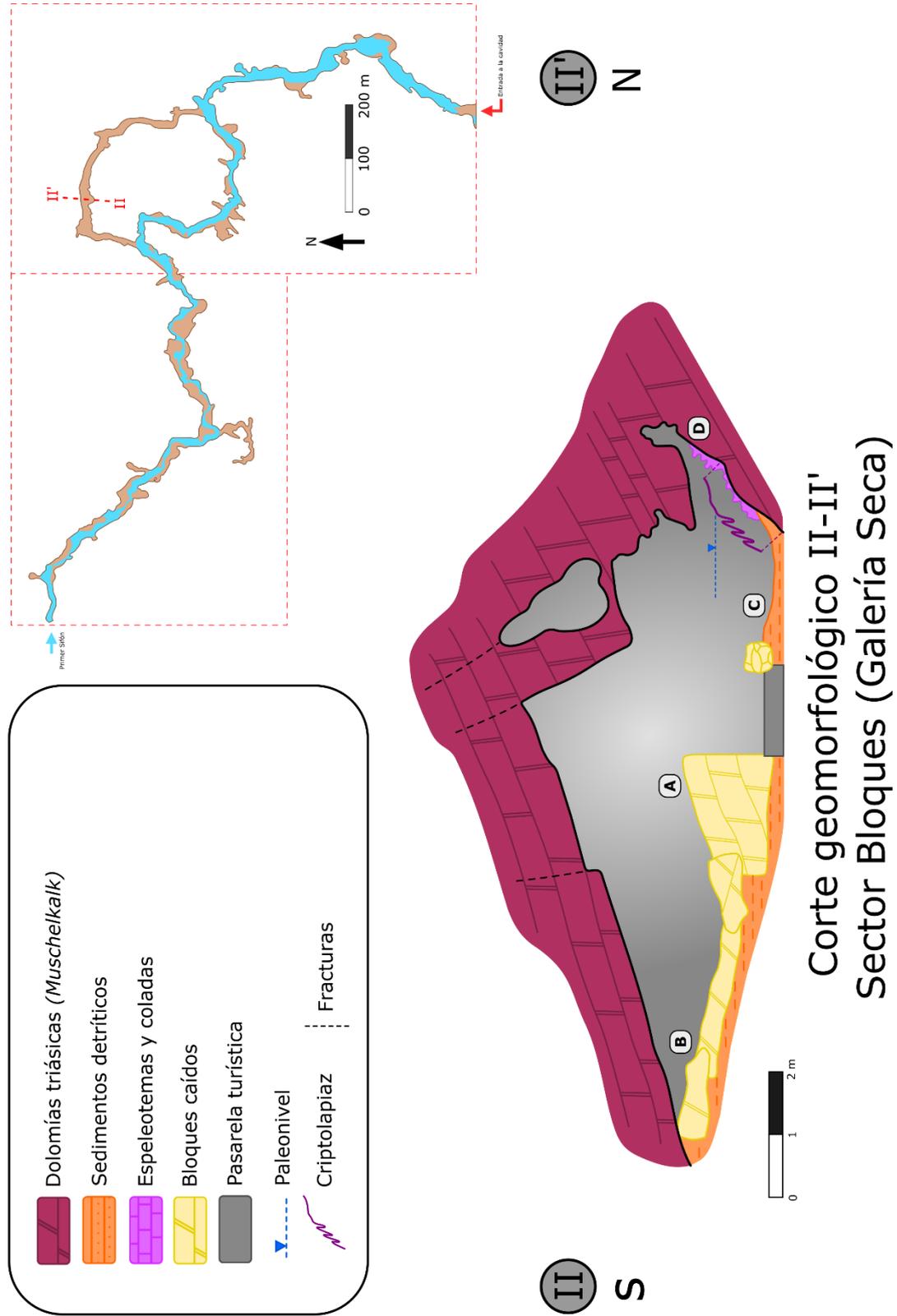


Figura 5.9. Corte geomorfológico II-II': Sector Bloques (Galería Seca)

5.1.2.2. *Cara del Diablo*

Esta sección presenta una geomorfología general compleja; la estratificación de la roca es generalmente horizontal e influye en la geometría del extremo noroeste, que muestra una superficie erosiva subhorizontal a techo, aunque retocada por cúpulas de poca profundidad y algunos *pendants*.

La parte central de la sección está condicionada por una importante fractura subvertical, que se observa bien en el techo a lo largo de una parte importante de la Galería Seca, y que contribuye a la forma ojival de este sector de la galería. La parte cercana al extremo sureste muestra, sin embargo, una morfología más desarrollada en todas las direcciones del espacio (figura 5.10. A), con numerosas cúpulas y *pendants* de formas complejas.

En este sector se localiza, en el extremo inferior, un criptolapiaz ligado a la presencia de sedimentos detríticos relacionados con la inundación ocasional que sufre esta galería cuando se producen crecidas extraordinarias de la galería activa del Río Subterráneo de Sant Josep (figura 5.10. B).

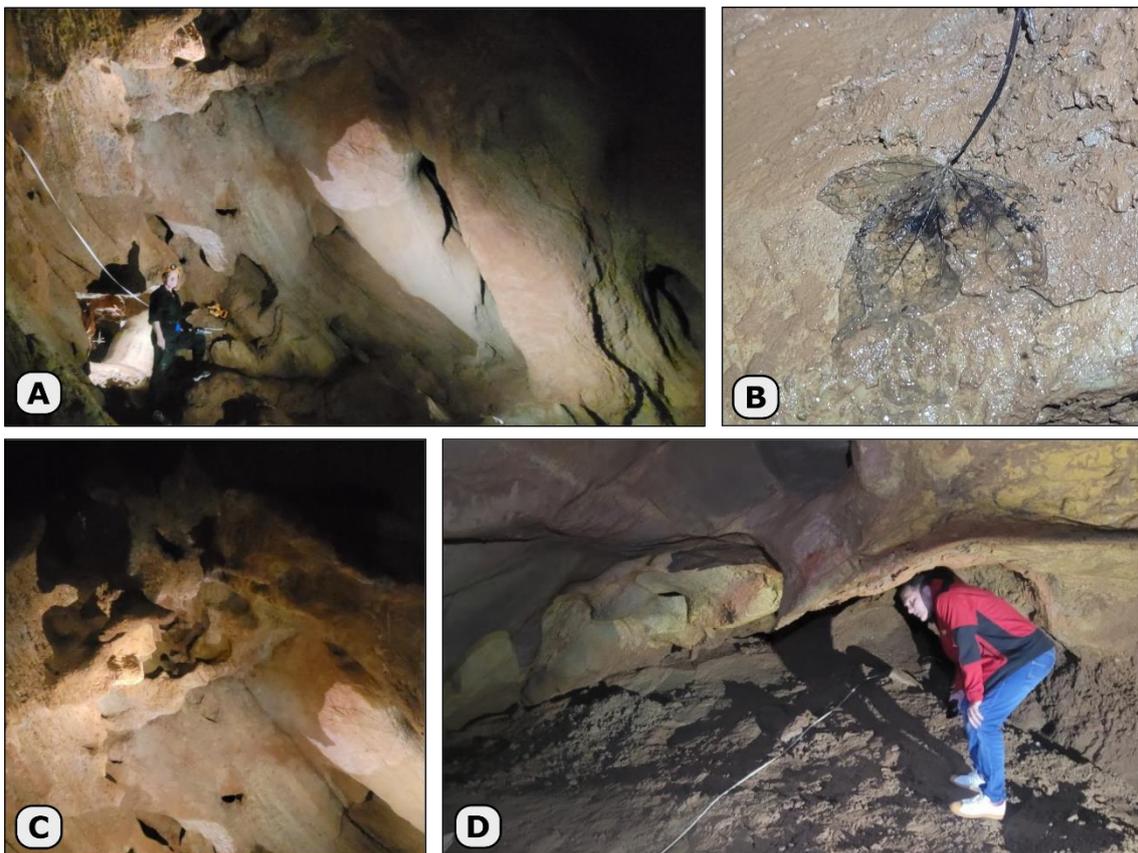


Figura 5.10. Fotografías de detalle de los elementos principales del sector “Cara del Diablo” A: Cierre del extremo este, con un criptolapiaz en su parte inferior; en el fondo, se pueden observar los sensores de medida de parámetros ambientales instalados. B: Hoja transportada por una crecida y depositada en los sedimentos finos de la galería. C: Morfologías de cúpulas erosivas en el techo del sector. D: Cierre del extremo oeste, con sedimentos detríticos finos sobre una colada estalagmítica

Existe continuidad hacia el sureste en esta zona, donde existe una pequeña galería horizontal de difícil acceso, que se desarrolla paralela a la Galería Seca, en dirección Este. Es en este lugar donde se encuentra la denominada "Cara del Diablo", unas morfologías erosivas de pequeño tamaño, que dan nombre a este sector (figura 5.10. C).

Además, en esta pequeña galería lateral, interconectada en algunos puntos con la Galería seca, es donde están instalados los sensores de medición en continua de los parámetros ambientales de la Galería Seca.

En el extremo noroeste, a la derecha del camino construido para el tránsito de los visitantes, aparece también una cantidad importante de sedimentos detríticos (figura 5.10. D), situados claramente por encima de una colada estalagmítica, que indica un aporte lateral de agua sobresaturada, procedente de la pared noroeste.

Existen algunos edificios de espeleotemas, vinculados a la importante fractura del techo de la galería en este sector, como la gran bandera que se encuentra en el centro, llamada "Ala del Ángel", que se encuentra fracturada en su ápice y presenta signos de corrosión.

Junto al borde del camino, también en su lado derecho, se encuentra una partición rocosa erosiva, proyectada en el corte geomorfológico, de aproximadamente dos metros de altura, ubicada cerca de los sedimentos detríticos, y conectando dicha zona con la galería ojival.

El corte geomorfológico se encuentra representado en la figura 5.11.

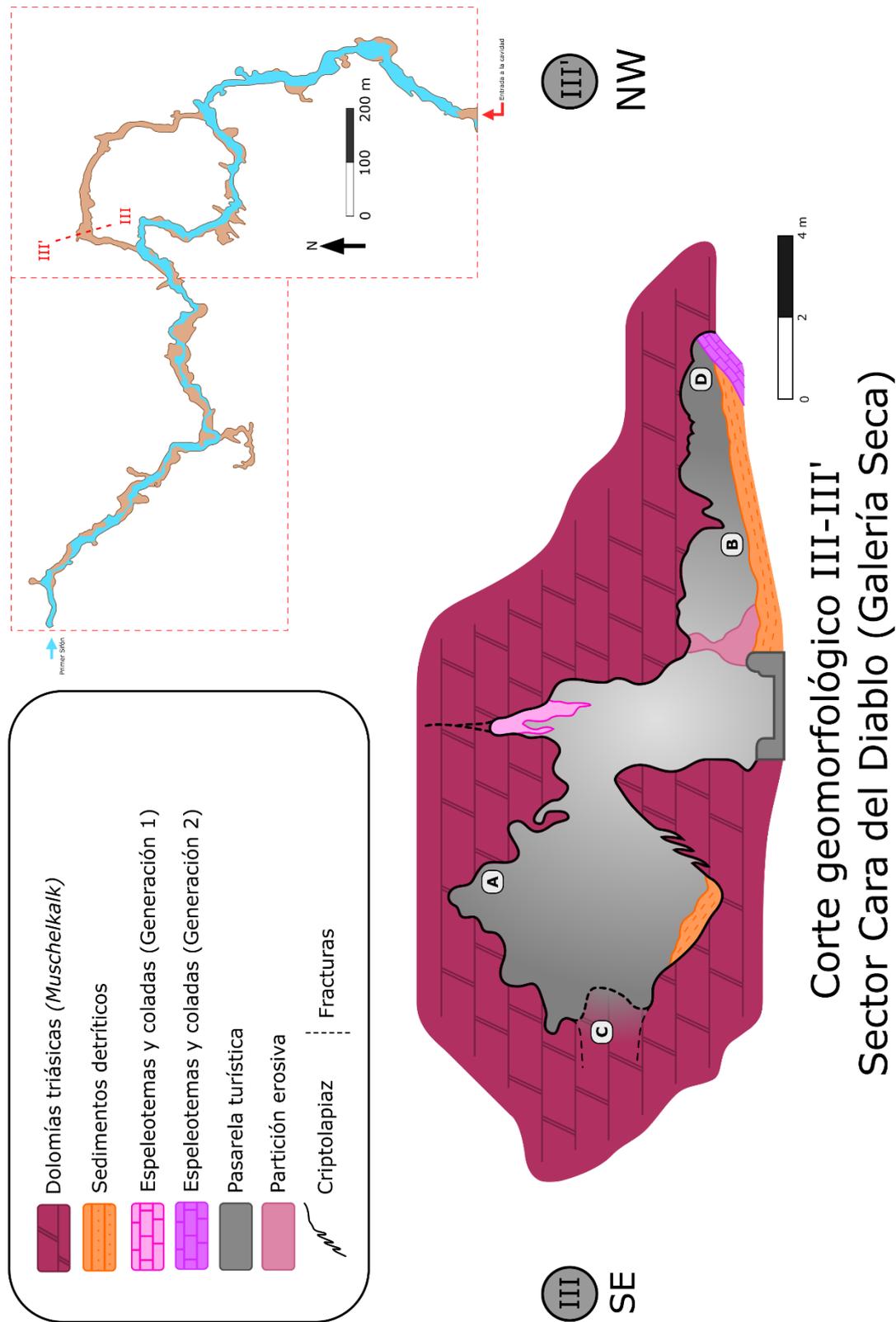


Figura 5.11. Corte geomorfológico III-III': Sector Cara del Diablo (Galería Seca)

5.1.3. Galería activa en la zona no visitable

En el tercer tramo se ha realizado un corte geomorfológico, el (IV-IV'), denominado "Sector Estalagmitas", realizado en la zona no visitable (figura 5.11. A).

Esta sección geomorfológica está condicionada, como es habitual, por la estructura geológica, en este caso un pliegue anticlinal de pequeña escala. Las formas erosivas predominantes son las cúpulas, de orden submétrico. Algunas de estas están desarrolladas a favor de las fracturas subverticales existentes, que en ocasiones presentan estructuras complejas, en flor.



Figura 5.12. Fotografías de detalle de los elementos principales del sector "Estalagmitas" A: Vista hacia el extremo norte del corte. B: Lapiaz en la parte inferior de la pared, junto al cauce activo del río subterráneo. C: Detalle de los espeleotemas activos sobre los sedimentos aluviales groseros. D: Espeleotemas sobre los sedimentos detríticos recientes.

En el extremo Sur, se puede observar una serie de criptolapiaces a techo, hasta una cota determinada (figura 5.12. B), asociados a los depósitos detríticos existentes junto al cauce del río subterráneo. Los sedimentos detríticos ocupan prácticamente toda la base de la sección, mostrando una clara gradación lateral del tamaño de grano, con los clastos más gruesos (tamaño grava) más cerca del cauce activo del río subterráneo, y los de tamaño más fino situados más lejos del cauce, en el extremo Norte, y topográficamente más altos. Estos sedimentos pueden ser considerados análogos a los *point bars* fluviales de los ríos de superficie. Todos los sedimentos detríticos parecen corresponder a una etapa subactual de sedimentación, ligados a la actividad fluvial reciente del río subterráneo.

En lo relativo a los espeleotemas, existen algunos edificios en el extremo norte y un conjunto de suelo estalagmítico interestratificado con los sedimentos detríticos de base. El conjunto culmina con una serie de columnas y estalagmitas situadas por encima de los sedimentos detríticos (figura 5.12. C). Estos depósitos interestratificados indican un

aporte lateral de agua sobresaturada, que originó el suelo estalagmitico, distinta a la del río subterráneo, agente tractivo que generó el depósito de las terrazas compuestas por sedimentos detríticos.

Proyectado sobre la sección, y ubicado unos metros al este de la sección IV-IV', se encuentra un conjunto de estalagmitas aisladas, individualizadas, con alturas de hasta 60-70 centímetros (figura 5.12. D). Una de ellas, ha sido datada mediante el método geocronológico de U-Th, lo que ha proporcionado una edad absoluta comprendida entre 4700 años B.P., en la base, y 2050 años B.P., en su ápice (Robledo *et al.*, 2016).

También en el extremo meridional del corte hay un pequeño conjunto espeleotémico depositado por encima de los sedimentos detríticos más cercanos al cauce, probablemente de la misma generación que los anteriores. Estos, sin embargo, se encuentran basculados, ya que el encajamiento reciente del río subterráneo ha erosionado parte de los sedimentos detríticos que ejercían de base de los espeleotemas, lo que ha provocado un colapso de la estructura de los espeleotemas, por lo que los ápices de las estalagmitas se encuentran actualmente desplazados respecto a la línea vertical de los goteos.

Al otro lado del río subterráneo, pegada a la pared sur, se encuentra una terraza litificada, colgada por encima del nivel del agua en el momento de realizar el corte geomorfológico. Esta terraza es de aproximadamente cinco centímetros de espesor.

En la figura 5.13. puede observarse el corte geomorfológico.

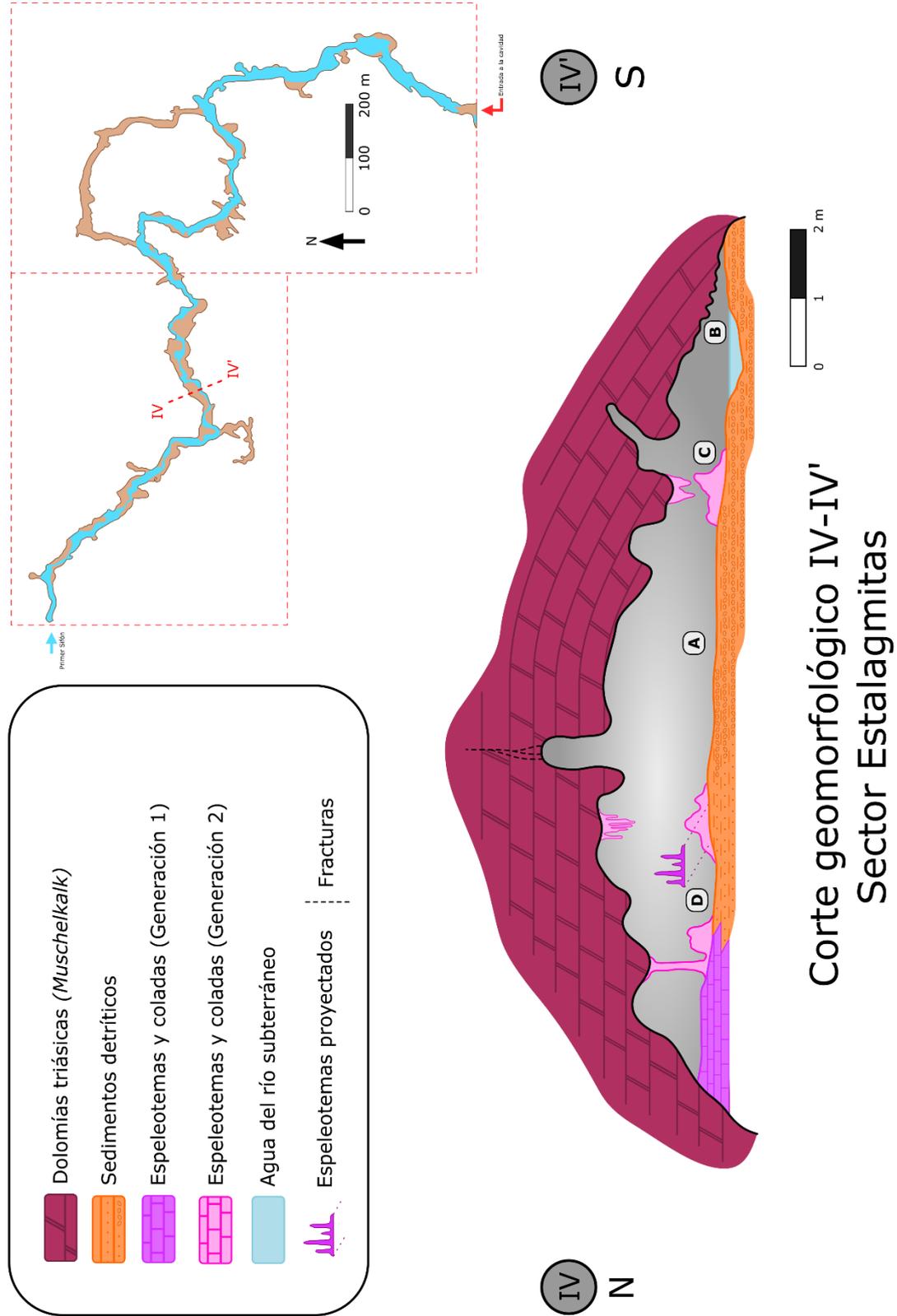


Figura 5.13. Corte geomorfológico IV-IV': Sector Estalagmitas

5.2. Génesis y evolución espacio-temporal del sistema endokárstico

Del estudio de los distintos tramos geomorfológicos en los que se ha dividido la cavidad, y con los cortes geomorfológicos como herramienta fundamental para la integración de los elementos geomorfológicos singulares que se encuentran en la misma, se han obtenido las siguientes deducciones geomorfológicas:

- La morfología de la cavidad está controlada de manera importante por la estructura tectónica (pliegue sinclinal de fondo y fracturas distensivas), que ejerce de factor explicativo de la geometría general de la red endokárstica y, a la vez, a escala de cada sala o galería, donde se puede observar cómo los procesos erosivos se benefician de los planos de tránsito preferencial de fluidos, producidos por la disposición estructural de la roca.
- La dimensión fractal propia del modelado kárstico (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2014b) implica que las estructuras observadas a escala local, a mesoescala y a microescala son indicadoras de los procesos geomorfológicos que han dado lugar al aspecto actual del karst. Las microformas erosivas están presentes en todos los cortes realizados, y son predominantes en relación con el resto de los elementos, lo que aporta en consecuencia, evidencias del origen de la cavidad. Las más abundantes en techo y paredes son las cúpulas, *pendants*, chimeneas y criptolapiaces, lo que indica un origen inicial o bien hipogénico o freático confinado, con una evolución posterior epigénica.
- Los sedimentos detríticos recientes no son muy abundantes. Los vinculados a la acción deposicional del actual curso del Río Subterráneo de Sant Josep. Únicamente en la Sala de los Murciélagos aparece un conjunto de depósitos más potentes y colgados a cierta altura, sellados por una potente colada espeleotémica, que parece evidenciar una etapa de sedimentación más antigua. Existen otros depósitos, más antiguos aún, de carácter conglomerático, de los que quedan unos pocos testimonios preservados en algunos enclaves puntuales de la cueva.
- Los espeleotemas son muy escasos en toda la red endokárstica. En general, parecen existir al menos dos generaciones: una más antigua, situada bajo los sedimentos detríticos subactuales, o interestratificada con estos. También aparece colgada en niveles altos, y en ocasiones, fuertemente corroída, como la gran colada en la Sala de los Murciélagos, o los espeleotemas de la Galería Seca. De estos espeleotemas no se ha podido establecer su antigüedad, por no existir dataciones absolutas sobre estas, y presentar, además, los espeleotemas corroídos, una dificultad intrínseca en la determinación de la edad absoluta por métodos de desintegración radiactiva (Gázquez Sánchez *et al.*, 2022). La otra generación es relativamente más reciente (Holoceno), localizada sobre los sedimentos detríticos fluviales recientes, con un recrecimiento reciente y/o

actual. Esto se ha observado en el Sector Estalagmitas, en la zona no visitable de la cavidad.

- En definitiva, no existen unas evidencias geomorfológicas claras de una gran antigüedad general de la red endokárstica, pese a la anterior atribución llevada a cabo por otros autores (Garay, 2000) de edad Plioceno, sin que se puedan aportar datos más precisos sobre su origen y cronología con los trabajos realizados hasta el momento.

6. Hidroquímica del agua subterránea

La hidroquímica del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep se ha estudiado en diversas publicaciones científicas (Garay *et al.*, 1987; 1992), y más recientemente, en un informe realizado por el IGME (Ballesteros y Durán, 2004), aunque es una línea de trabajo poco desarrollada hasta el momento.

En estos documentos se señala que la facies hidroquímica del manantial de Sant Josep es bicarbonatada cálcica ligeramente magnésica y la conductividad eléctrica es del orden de 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

También se destaca en varios de estos trabajos la presencia de un ligero termalismo del agua y los valores relativamente altos de SiO_2 , del orden de 10 mg/L.

En este trabajo se han llevado a cabo varias campañas de muestreo del agua subterránea de las Coves de Sant Josep, del manantial (figura 6.1.) y de los goteos existentes en el techo de la cavidad (figura 6.2.).



Figura 6.1. Muestreo del río subterráneo en la zona turística (A) y en la zona no visitable (B). Enel C: muestras diarias de la crecida del manantial durante el periodo comprendido entre los días 26 de mayo y 7 de junio de 2023

Las campañas de muestreo se han realizado en los meses de diciembre de 2022, marzo de 2023 y junio de 2023, incluyendo un muestreo diario durante una crecida ocurrida durante los últimos días de mayo de 2023.

En total, se han analizado 99 muestras, de las cuales 38 han sido de elementos mayoritarios y minoritarios, 26 de isótopos estables, 25 de metales, 8 de fluorescencia y 2 de tierras raras.



Figura 6.2. Algunos de los puntos donde se ha procedido al muestreo del agua de goteo en el sector turístico (A) y en la zona no visitable (B)

Las muestras se han tomado en los puntos definidos en los trabajos de gabinete, representados en la figura 6.3., donde se han medido también los parámetros físico-químicos *in situ*.

En todos los puntos se ha realizado el muestreo para análisis de elementos mayoritarios, minoritarios y traza, metales (aunque estos no se han usado para este trabajo) y para análisis de los isótopos estables. Para los análisis de fluorescencia y de tierras raras, únicamente se han realizado en algunos de los puntos, específicamente seleccionados. Respecto a las muestras tomadas durante la crecida, se han analizado sus elementos mayoritarios y minoritarios.

También se ha contado con la información de dos sensores de medida en continuo ubicados en el interior de la Cueva de Sant Josep, el S-1, y el S-3, que han registrado la conductividad eléctrica y la temperatura del agua del río subterráneo.

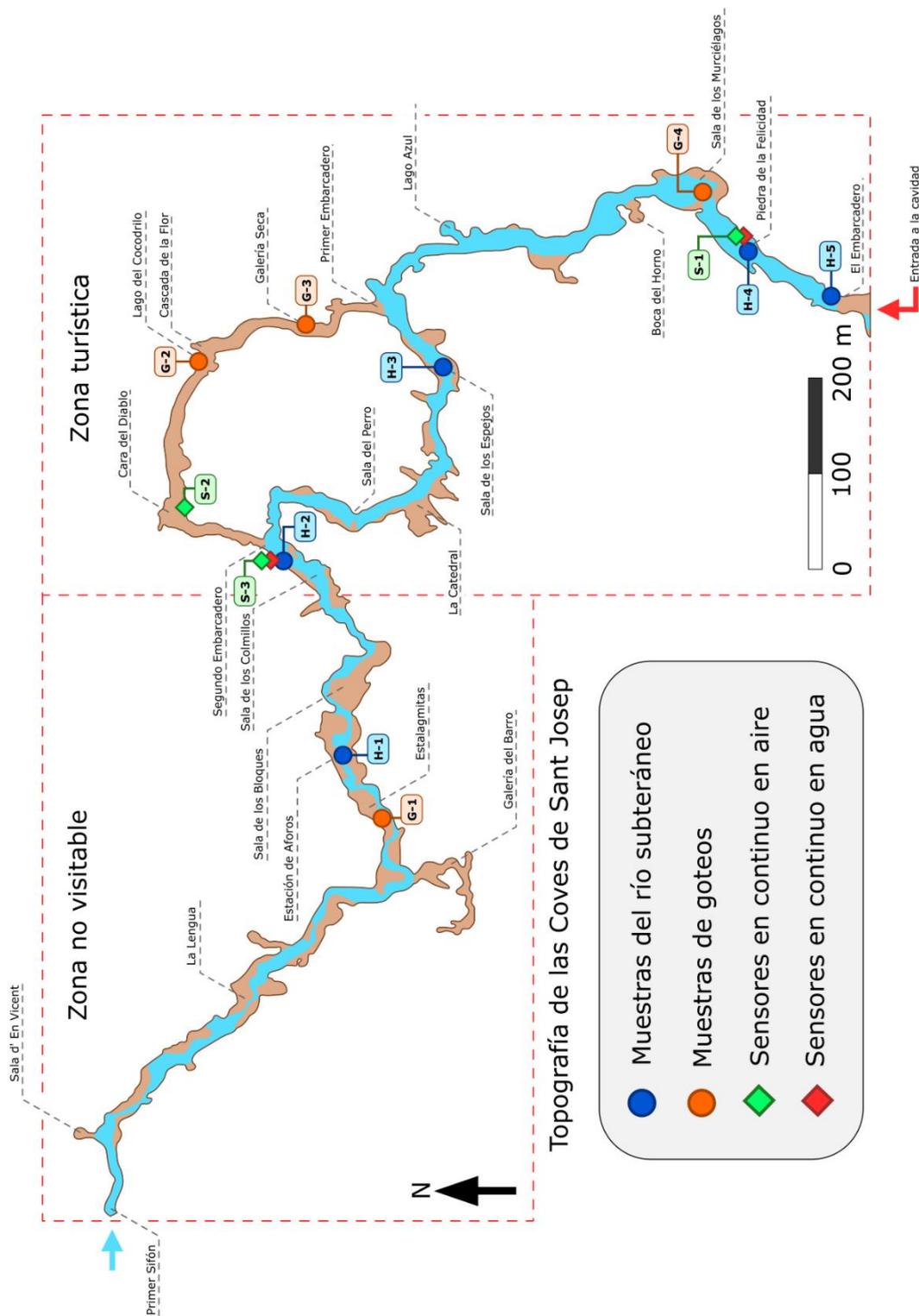


Figura 6.3. Topografía de las Coves de Sant Josep, con la toponimia de los lugares más relevantes para este trabajo

La presentación e interpretación de los resultados se han agrupado en varios conjuntos: elementos mayoritarios, con la asignación de facies hidroquímicas y el análisis temporal de una crecida (quimiograma); análisis isotópicos, con el estudio de los isótopos estables del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$); y, finalmente, una aproximación al contenido en tierras raras y a la fluorescencia natural de las aguas.

Los resultados de los análisis realizados se pueden consultar en los Anexos correspondientes.

6.1. Elementos mayoritarios

Para el estudio de los elementos mayoritarios presentes en las aguas subterráneas de la cueva, se han realizado dos tipos de muestreos. El primero de ellos para caracterizar de manera general las aguas y determinar su facies hidroquímica, fundamentalmente, y su distribución espacial, y el segundo centrado en un solo punto, el manantial de Sant Josep, para estudiar su evolución temporal durante un episodio de crecida.

6.1.1. Muestreos puntuales

En el diagrama de Schöeller-Berkaloff representado en la figura 6.5. se puede observar como la amplitud de la representación de las muestras varía en función del tipo de agua. Esta amplitud también está afectada por el número de muestras de cada tipo de agua.

Del sondeo Pipa se han representado dos análisis, del año 2004, junto con las muestras del Manantial de Sant Josep (1997-2000), tomadas del informe de Ballesteros y Durán (2004).

Los análisis de las muestras tomadas en este trabajo de los goteos, la lluvia y el río subterráneo corresponden a las campañas de enero y marzo de 2023.

Dentro de cada grupo, el que más variabilidad presenta es el de las aguas de los goteos. Las muestras del manantial de Sant Josep, y las dos campañas del Río Subterráneo muestran una tendencia similar, con facies hidroquímicas muy parecidas, que marcan un claro carácter bicarbonatado cálcico-magnésico.

En la campaña de marzo, mes en el que no se registraron precipitaciones en la zona, se aprecia una menor concentración de cloruros en el agua, lo que puede indicar que el cloruro proviene de los aerosoles marinos transportados por la lluvia. Respecto a las muestras del sondeo Pipa, estas tienen un mayor contenido en magnesio frente al calcio, que proporcionan una facies bicarbonatada magnésica al agua.

La única muestra de lluvia, recogida en enero de 2023, no presenta una alta mineralización, pero es destacable su elevado contenido en magnesio frente a otros cationes, en especial el sodio, posiblemente por la incorporación de aerosoles marinos a la lluvia.

Dado que el contenido medio en sulfatos en el agua del río subterráneo es relativamente elevado (60-70 mg/L), en la figura 6.6. se ha representado un diagrama con la siguiente relación:

$$[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] - [HCO_3^-] \text{ vs } [SO_4^{2-}]$$

En la gráfica se aprecia como la gran mayoría de los puntos, a excepción de los dos puntos del sondeo Pipa y uno de los históricos del manantial de Sant Josep, no presentan exceso de sulfatos.

Posiblemente, el origen de estos sulfatos sea litológico, debido a la presencia de yesos en la serie triásica.

Sin embargo, en el diagrama de relaciones iónicas de la halita $[Na^+] \text{ vs } [Cl^-]$, los puntos no se alinean claramente a lo largo de la línea 1:1, lo que sugiere que estos iones no provienen del sustrato geológico, por lo que su fuente puede provenir de aerosoles marinos transportados por la lluvia y sujetos a procesos de evaporación e interacción química con el suelo y el epikarst, lo que provoca un comportamiento diferencial del sodio frente al cloruro, más conservativo.

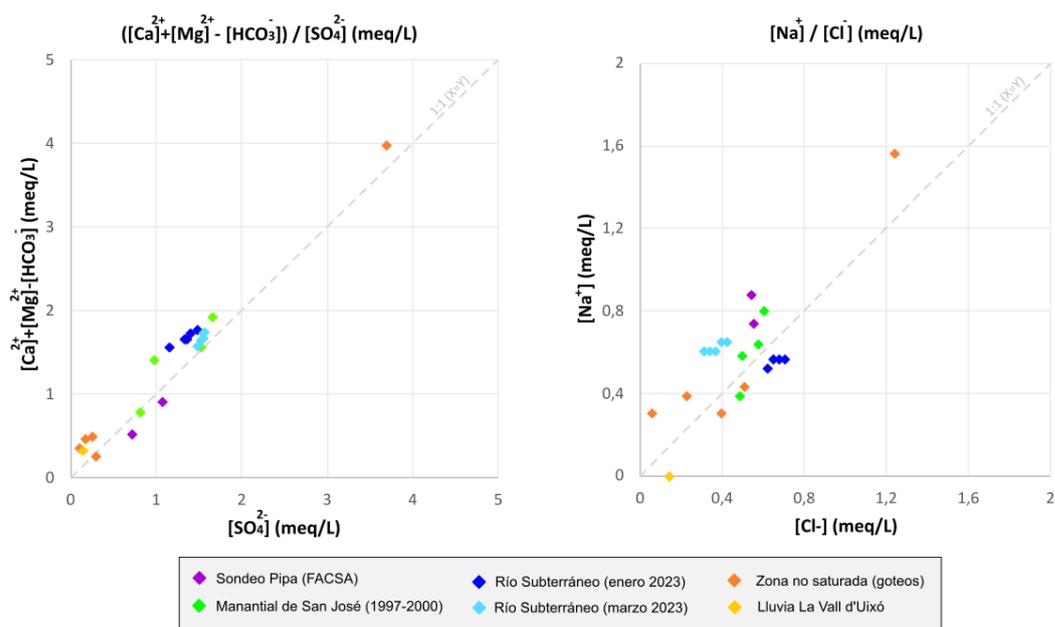


Figura 6.6. A la izquierda, diagrama con las relaciones iónicas para el cálculo de sulfatos no procedentes del sustrato litológico. A la derecha, diagrama con la relación iónica para la disolución de halita (NaCl)

En el diagrama de Piper (figura 6.7.) se pueden discriminar las aguas en función de sus facies hidroquímicas. Prácticamente todas corresponden a aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas, a excepción del agua de lluvia, con un carácter de facies mixta, sulfatada-clorurada magnésica. Debido a la baja mineralización del agua de lluvia ($\approx 40 \mu S/cm$) resulta poco convincente la asignación de su facies hidroquímica.

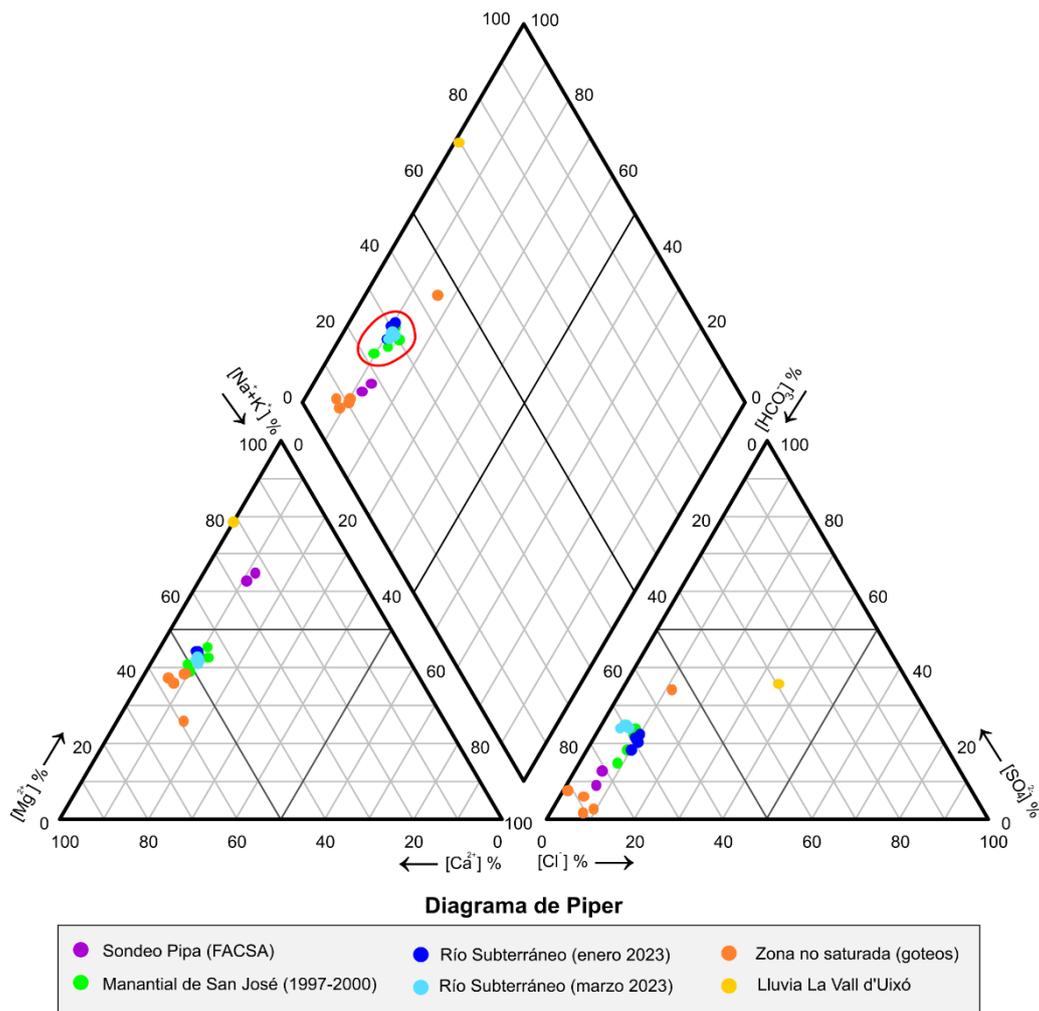


Figura 6.7. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la zona de estudio. Señaladas en rojo aparecen las muestras correspondientes al Río Subterráneo, tomadas durante el periodo de estudio y su manantial asociado, recogidas de datos históricos

Las muestras del sondeo Pipa, ubicado en las cercanías a la cavidad, presentan como catión predominante el magnesio (Mg^{2+}), debido a su emplazamiento en las Dolomías de l'Oronet, la formación en la que se desarrolla mayoritariamente la cavidad, y que constituye la mayor parte del acuífero carbonático del entorno de La Vall d'Uixó.

Respecto a las aguas correspondientes a los goteos más importantes del interior de las Coves de Sant Josep, presentan unas características hidroquímicas similares muy homogéneas, con una facies bicarbonatada cálcica-magnésica, a excepción de uno de los puntos que se encuentra bastante alejado de la media.

Este punto es el correspondiente al goteo G-4, ubicado en la Sala de los Murciélagos, que presenta más mineralización y una conductividad eléctrica más elevada ($\approx 800 \mu S/cm$). Su composición hidroquímica se puede observar con más detalle en el diagrama de Stiff de la figura 6.8.

En este punto, la concentración aniónica se encuentra más repartida, con un valor de bicarbonato más elevado que el resto de los goteos (5,67 meq/L o 346 mg/L), que convierte su facies hidroquímica en bicarbonatada-cálcica.

Los valores de cloruro y de sulfatos son, de igual manera, bastante más elevados que los de los demás goteos estudiados, especialmente los sulfatos, con valores de 3,69 meq/L o 177 mg/L, el valor más elevado de los puntos estudiados. En los valores de los cationes se aprecia una mayor cantidad relativa de calcio respecto a los demás cationes principales representados, lo que le proporciona al agua en este punto un marcado carácter cálcico que destaca frente al resto, que presentan una facies cálcica-magnésica, característica de los procesos kársticos en dolomías.

Debido a la caracterización hidroquímica general de este punto, y su singularidad, se han realizado análisis adicionales a sus aguas, que indicaron la presencia de compuestos orgánicos volátiles, en concreto triclorometano (0,2 µg/L), y bromodichlorometano (0,22 µg/L).

Estos compuestos indican procesos incipientes de contaminación antrópica (Morales *et al.* 2018), provocada posiblemente por una fuga en las tuberías de abastecimiento, que se infiltra desde las zonas urbanizadas directamente sobre la cavidad, al tratarse dichos compuestos de subproductos de la cloración del agua.

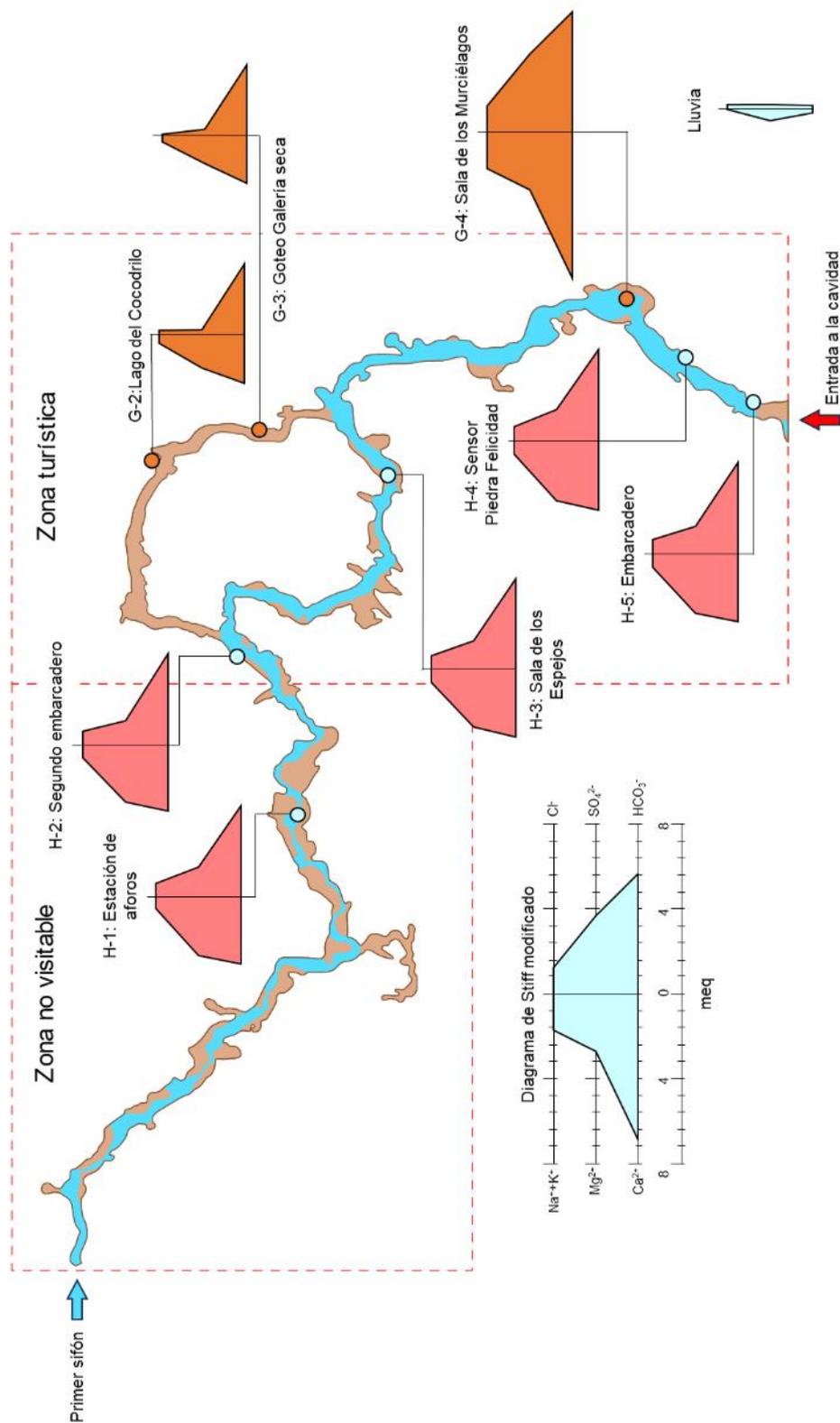


Figura 6.8. Mapa de los puntos de muestras de hidroquímica y su representación en diagramas de Stiff modificados. Los puntos representados en el diagrama en color rosa son de agua freática, del río subterráneo; los representados en naranja corresponden a goteos, característicos de la zona no saturada por encima de la cueva. La escala de las representaciones es de 8 meq/L a excepción de la muestra de lluvia, que es de 4 meq/L

6.1.2. Evolución temporal

Durante los días 24 de mayo hasta el 9 de junio de 2023 se produjo una crecida en el manantial de Sant Josep, que obligó al Ayuntamiento de La Vall d'Uixó a cerrar temporalmente la cueva para las visitas turísticas. Esta crecida tuvo como origen un episodio de lluvias muy importante en la cabecera del Río Belcaire, es decir, en la zona de recarga del Río Subterráneo de Sant Josep.

Dado que no existía ningún registro hidroquímico de una crecida del manantial, se decidió realizar un muestreo diario durante 13 días del manantial, para realizar un quimiograma basado en los elementos mayoritarios y en los parámetros físico-químicos medidos en continuo por los sensores instalados en la cavidad.

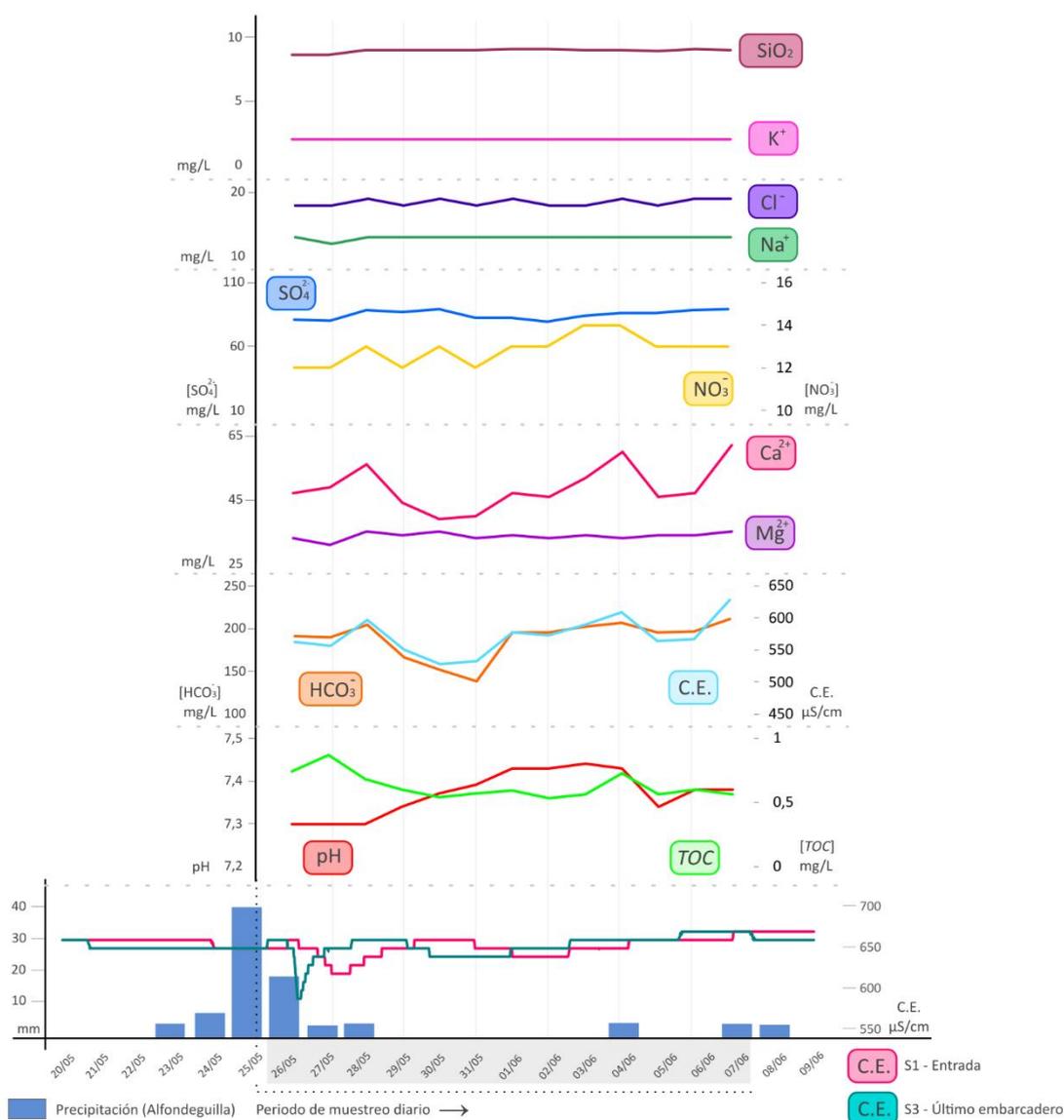


Figura 6.9. Quimiograma con la representación de la evolución temporal de los elementos mayoritarios del agua de las Coves de Sant Josep, tomados diariamente después de un evento de fuertes precipitaciones

Los valores obtenidos de los análisis efectuados aparecen en el Anexo III, y se han representado en la figura 6.9., junto con las precipitaciones registradas en la estación meteorológica de Alfondeguilla, situada en el centro de gravedad de las precipitaciones registradas.

En el quimiograma pueden observarse una serie de comportamientos de gran interés:

- Existe un paralelismo en el comportamiento de la conductividad eléctrica, el bicarbonato y el calcio, por lo que existe una relación estrecha entre estos.
- Por otro lado, el magnesio, el cloruro, el sodio, el potasio y la sílice no muestran una respuesta clara ante la crecida, sus valores se mantienen durante todo el episodio.
- El sulfato y el nitrato presentan un comportamiento opuesto, mientras que el primero de estos aumenta al principio de la crecida, el segundo disminuye, y al final de la crecida, su comportamiento es inverso.
- Esta situación es similar en el pH y el TOC, aunque aún más acentuada, con un aumento brusco y un descenso progresivo del TOC a lo largo la crecida, y el pH, al contrario.

Esta marca hidroquímica durante la crecida parece indicar que existen ciertos elementos que se incorporan al sistema a través de la escorrentía superficial de manera muy rápida, como el TOC, otros más lentos, como el nitrato y otros que aumentan en pulsos, como el calcio, el bicarbonato y que tienen como respuesta un aumento en la conductividad eléctrica.

Otros elementos, por el contrario, se mantienen sin perturbación a lo largo de la crecida, lo que puede significar que provienen de los flujos de base del manantial, con un origen propio de la escorrentía subterránea y su interacción litológica, como son el magnesio, el potasio o la sílice.

También existe otro comportamiento a caballo entre estos dos, con ligeras ondulaciones en su concentración, como el sulfato, el cloruro y el sodio, que dificulta caracterizar su origen y su evolución.

Además de analizar la evolución temporal de los parámetros químicos del agua de la cueva, se han comparado los resultados con la evolución temporal de la temperatura en los sensores de registro continuo (figura 6.10.).

La variación de la temperatura del agua y de la conductividad eléctrica durante un periodo de tiempo determinado proporciona información adicional del funcionamiento hidrogeológico del sistema kárstico (Barberá, 2014).

Si se obtiene además información con suficiente precisión temporal, es posible establecer tiempos de tránsito del agua, si se analiza detalladamente la recarga inducida por la precipitación durante un evento de lluvias significativas.

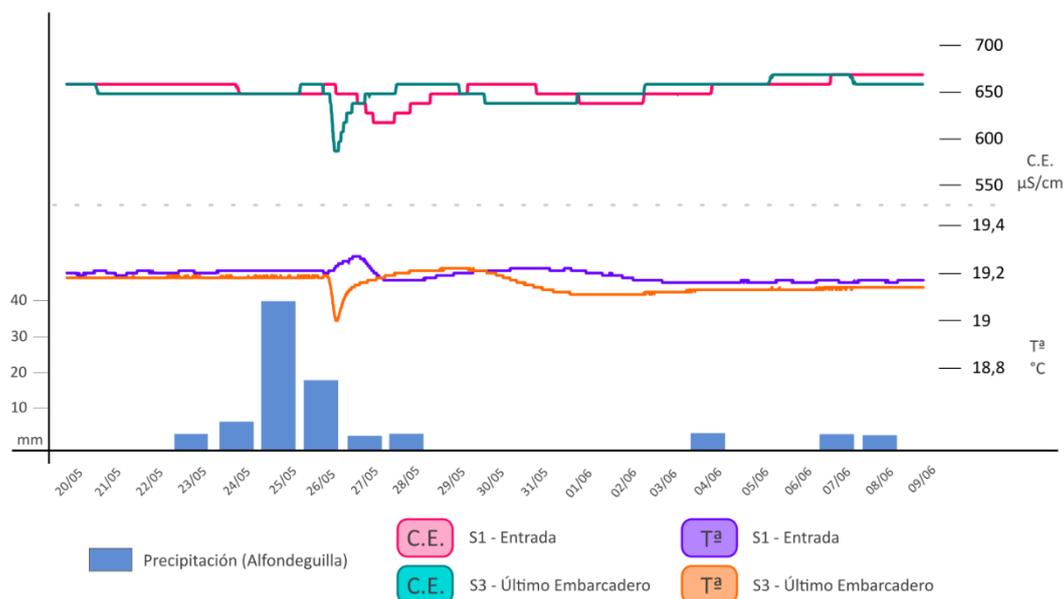


Figura 6.10. Evolución temporal de la conductividad eléctrica y de la temperatura del agua en los dos sensores instalados en la cavidad en los días previos, durante el evento de precipitación intensa y en los días posteriores

En los días previos al evento de precipitación y en líneas generales, la temperatura del agua en la entrada de la cueva (S-1) se encuentra muy ligeramente por encima (0,05 °C) a la que se registra en el último sensor (S-3). Durante la mayor parte del evento, los valores no se ven modificados hasta el final del cuarto día de precipitación, en el que los dos puntos responden de manera diferente.

El S-3 responde con una rápida bajada de la temperatura, en la que alcanza los 19 °C, seguido de una subida progresiva de la temperatura durante los siguientes días. Por su parte, el S-1 responde de manera opuesta, con un aumento de temperatura más progresivo a lo largo del día, seguido de una bajada de la temperatura.

Varios días después del evento principal de precipitación, se observa otra ligera oscilación en las temperaturas registradas, en las que se vuelven a dar comportamientos opuestos en los dos puntos, una ligera bajada de temperatura en el S-3, y un ligero aumento en el S-1, hasta alcanzar las condiciones previas al evento, consideradas las temperaturas en situación normal.

La conductividad eléctrica presenta un comportamiento similar, con unos valores previos al evento de precipitación cercanos en los dos puntos ($\approx 660 \mu\text{S}/\text{cm}$). Inmediatamente detrás del evento más importante de precipitación, la conductividad baja rápidamente en el S-3, para subir progresivamente y volver a descender al cabo de cuatro días. En el

S-1 el comportamiento es exactamente el contrario: una bajada notable posterior a las precipitaciones y una subida posterior, para volver al cabo de una semana a niveles similares al periodo anterior a la crecida.

Este comportamiento tan singular, totalmente distinto en los sensores situados al inicio de la zona turística y en el manantial, llevan a dos reflexiones importantes. La primera es que la interpretación de un quimiograma en un único punto del sistema endokárstico (generalmente el manantial, o punto de descarga) puede llevar a interpretaciones diferentes y contradictorias.

La segunda es que, en este caso, las diferentes ondas de C.E. y temperatura tienen comportamientos distintos porque, en el sensor situado aguas arriba (S-3) se detecta la respuesta hidrodinámica natural del sistema (bajada rápida de la conductividad eléctrica y de la temperatura del agua), debido al aporte de aguas superficiales, mientras que en el otro sensor (S-1), ya muy cerca del manantial, se da un efecto similar a un efecto pistón (Liñán *et al.*, 2009), en el que la temperatura sube porque la onda de crecida empuja el agua almacenada en la parte turística, represada y con mayor temperatura.

6.2. Isótopos estables

Se ha determinado el incremento de los isótopos estables (Oxígeno ^{18}O y Deuterio ^2H) de la molécula del agua, el $\delta^{18}\text{O}$ y el $\delta^2\text{H}$, referidos en tanto por mil (‰), de muestras de los goteos y del agua del Río Subterráneo de Sant Josep en distintos momentos del periodo de estudio. Además, se ha determinado el valor isotópico del agua de lluvia, y se ha contado con datos bibliográficos del agua del manantial de Sant Josep.

Las muestras se han analizado tomando como patrón el VSMOW (*Viena Standard Mean Ocean Water*) al que se refieren los cálculos de las relaciones isotópicas $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^2\text{H}/^1\text{H}$ determinadas respectivamente. Los valores obtenidos se han representado en un gráfico (figura 6.11.). Una tabla con los valores de las muestras puede consultarse en el Anexo IV.

En la figura, además de indicar los valores de las muestras, se han trazado las líneas meteóricas determinadas experimentalmente, la Línea Meteórica Mundial, LMM (Craig, 1961), representativa de precipitaciones provenientes de frentes atlánticos, y la Línea Meteórica del Mediterráneo Occidental, LMMO (Celle-Jeanton *et al.*, 2001), característica de frentes propios de la zona occidental del Mediterráneo. Son los valores de exceso de deuterio +10‰ y +15‰, los que caracterizan, respectivamente la procedencia de los frentes de precipitación.

Se puede ver como las muestras del río subterráneo se encuentran agrupadas, con muy poca variabilidad entre ellas. Sin embargo, sí se encuentran algo separadas de los datos históricos del manantial (Ballesteros y Durán, 2004), con un ligero enriquecimiento en ^2H , y un empobrecimiento en ^{18}O .

Respecto a los datos de los goteos, estos presentan una gran variabilidad, aunque parecen distribuirse a lo largo de una línea relativamente paralela a las líneas meteóricas, ambas de igual pendiente.

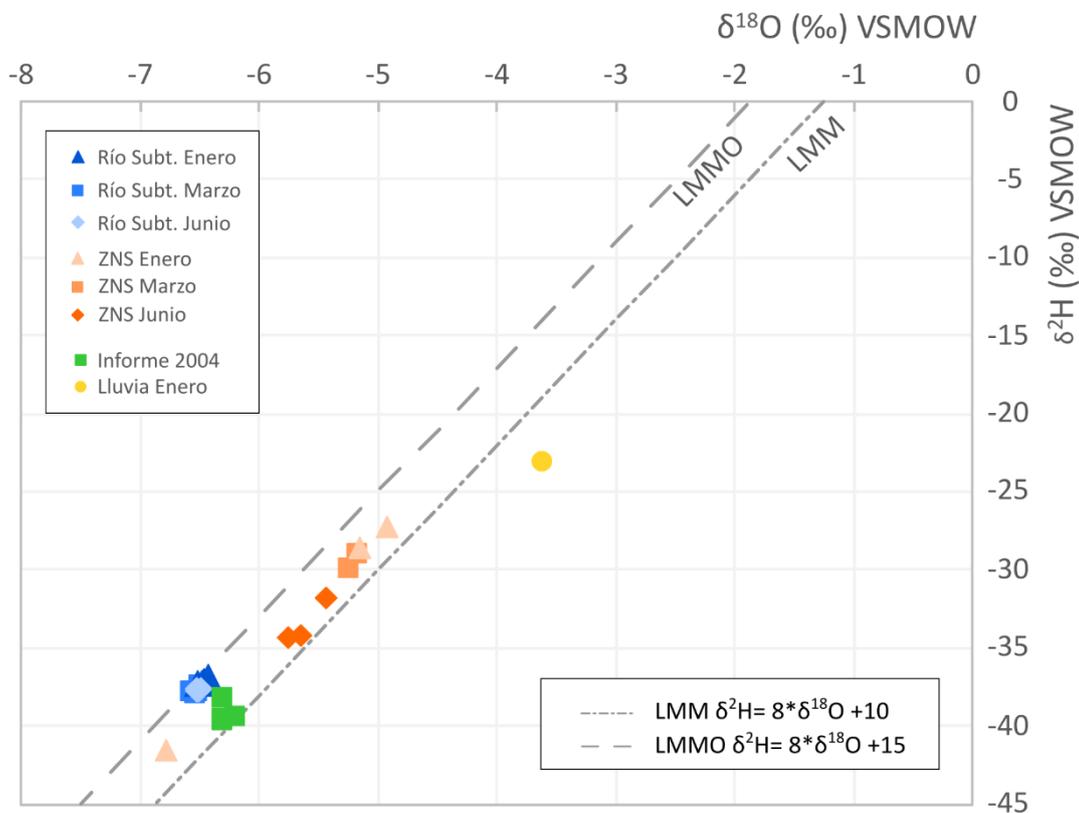


Figura 6.11. Representación de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) VSMOW frente a los de $\delta^2\text{H}$ (‰) VSMOW de las muestras de las Coves de Sant Josep y su entorno.

Uno de estos puntos, correspondiente a uno de los goteos muestreados (G-4) destaca por encontrarse muy alejado a los demás, con unos valores más negativos, tanto de $\delta^{18}\text{O}$ como de $\delta^2\text{H}$. Este goteo es consecuencia de una fuga en la red de abastecimiento de las zonas urbanizadas sobre la cavidad y, por tanto, no presenta valores propios de los goteos naturales presentes en la cueva.

El punto que representa la muestra de agua de lluvia se encuentra muy alejado de todos los demás: se encuentra enriquecida en isótopos pesados y por debajo de la LMM. Al tomar esta muestra de lluvia se dispuso de muy poca cantidad, tomada de uno de los regueros de un tejado cercano a la cavidad. Esta muestra se almacenó en un recipiente que no fue llenado en su totalidad, por lo que es probable que la muestra haya sufrido fraccionamiento isotópico por evaporación.

Para su interpretación, se ha considerado que las muestras de los goteos, a excepción del G-4 son representativas de la precipitación en el área de estudio. Se ha interpretado que los procesos de fraccionamiento isotópico en estas muestras son mínimo debido a

su rápida infiltración, la escasa presencia de vegetación en la superficie y la posición somera a la que se encuentra la cavidad.

Por ello se ha trazado una Línea Isotópica Local, LISL, tomando las muestras de los goteos, para emplearla como análoga a una Línea Meteorológica Local, que no ha podido realizarse debido a la ausencia de precipitaciones durante gran parte de la duración del trabajo (figura 6.12.).

Esta línea isotópica local presenta una pendiente más pronunciada que la LMM y la LMMO, y presenta la siguiente ecuación:

$$\text{LISL } \delta^2\text{H} (\text{‰}) = 9,4 * \delta^{18}\text{O} + 19,3$$

El valor de exceso de deuterio en esta ecuación (+19,3‰) se encuentra próximo al valor característico de los frentes de precipitación del Mediterráneo oriental (Cruz-Sanjulián *et al.*, 1992), cercanas al +20‰.

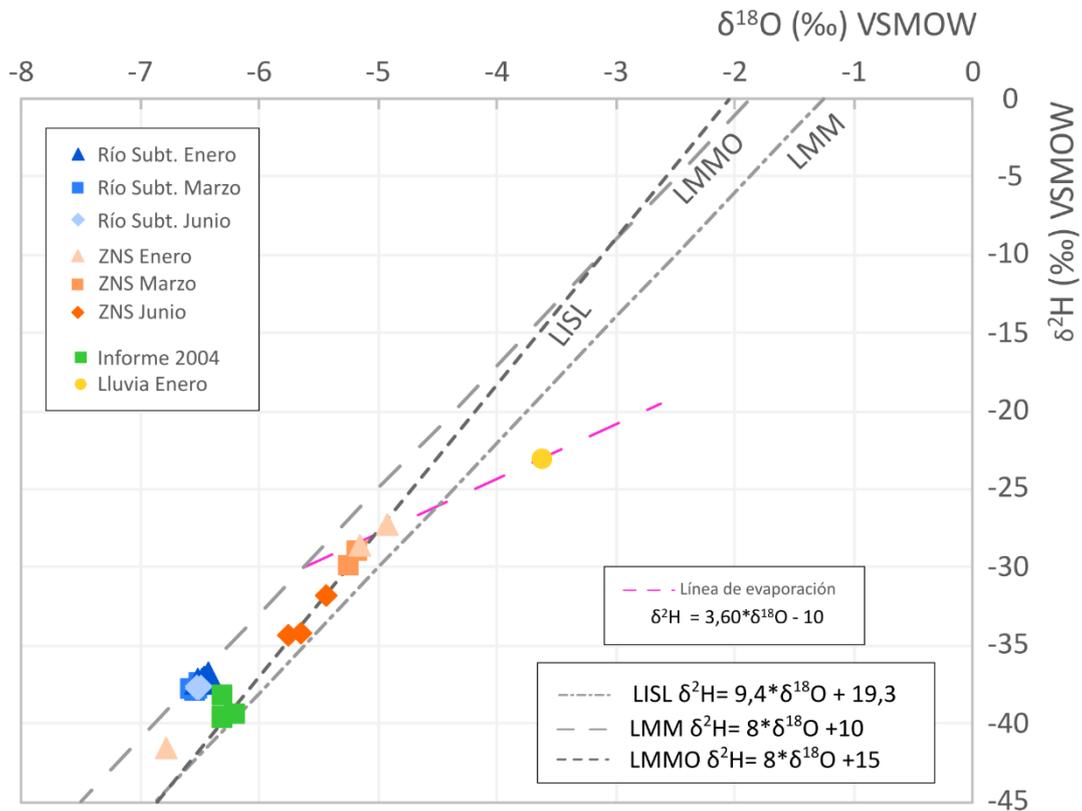


Figura 6.12. Interpretación de los valores isotópicos de las muestras provenientes de las Coves de Sant Josep y su entorno

Con la interpretación de la muestra de lluvia y la Línea Isotópica Local, se ha trazado una línea de evaporación, que puede explicar el fraccionamiento que han sufrido algunas de las muestras de agua, con la siguiente ecuación:

$$\text{Línea de evaporación } \delta^2\text{H} (\text{‰}) = 3,6 * \delta^{18}\text{O} - 10$$

La relación entre los puntos del río subterráneo y la línea isotópica local se puede explicar mediante el efecto altitud.

A cotas más altas, los frentes de precipitación se encuentran progresivamente más empobrecidos en los isótopos estables más pesados, espacialmente notable en casos donde se encuentran grandes diferencias orográficas (Gonfiantini *et al.*, 2001).

En este caso, se encuentran valores un poco más empobrecidos, por lo que se puede interpretar que la zona de recarga de la cuenca del Río Belcaire, a cotas elevadas (600-700 m s.n.m.) corresponde con el origen de las aguas subterráneas drenadas por el río subterráneo y, en consecuencia, por el manantial.

Aun así, es importante destacar que, al introducirse directamente parte de la escorrentía superficial por los abundantes sumideros de la zona durante las épocas de más lluvias, se deben dar procesos de mezcla en el río subterráneo, con agua de diversos orígenes y que, por tanto, presentan valores isotópicos distintos.

6.3. Otras consideraciones hidroquímicas

Además de las técnicas hidroquímicas generales aplicadas, descritas en los apartados anteriores, se han aplicado otras técnicas para el estudio hidroquímico de las aguas del en el sistema kárstico de las Coves de Sant Josep. Destacan la caracterización de las tierras raras (REE, *Rare Earth Elements*) presentes en las aguas subterráneas, y la caracterización de la materia orgánica presente en las aguas subterráneas mediante el uso de la fluorescencia natural de las aguas.

6.3.1. Análisis de las Tierras Raras (REE)

El análisis de la concentración de algunos elementos dentro del grupo de los compuestos minoritarios, que se encuentran disueltos en el agua, puede proporcionar información de la evolución que ha tenido el agua.

Concretamente, los elementos pertenecientes al grupo de las Tierras Raras (*Rare Earth Elements* o *REE*) se encuentran vinculados al sustrato geológico que presenta la cuenca de los ríos (Goldstein y Jacobsen, 1988), siempre y cuando nos encontremos en un sistema en estado natural, sin contaminación, y sin actividad minera (Protano y Riccobono, 2002) y puedan relacionarse con un origen geogénico. Sin embargo, existen otros casos en los que estos elementos se encuentran relacionados con zonas de actividad minera (León *et al.*, 2023) o como producto de la actividad humana.

Para la campaña de análisis de tierras raras se han tomado dos muestras, una del río subterráneo, y otra de la zona no saturada. Estas muestras se han completado con duplicados, y con una muestra de “blanco” para su calibración. Los resultados de los análisis se pueden observar en la tabla 2, en la que se han destacado los resultados positivos, por encima del límite de detección, especificado para cada elemento.

Los elementos analizados pueden separarse en dos subgrupos, las Tierras Raras Ligeras (LRRE) y las Tierras Raras Pesadas (HREE). Se separan en función de su número atómico y, además, de su abundancia relativa en la corteza terrestre, ya que los primeros son más comunes que los segundos.

El grupo de las Tierras Raras Ligeras incluye los siguientes elementos: Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Samario (Sm), Europio (Eu) y Gadolinio (Gd).

Por su parte, el grupo de las Tierras Raras Pesadas incluye los siguientes: Ytrio (Y), Terbio (Tb), Disprosio (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb) y Lutecio (Lu).

El Escandio (Sc) no siempre aparece clasificado dentro del grupo de los Lantánidos, por lo que se encuentra separado, en un subgrupo propio.

La distinción entre tierras raras ligeras y pesadas se realiza también porque sus radios iónicos se asemejan al del Calcio (Ca) y al del Uranio (U), respectivamente. El radio iónico de un elemento es un valor útil para entender su movilidad y su incorporación a las aguas subterráneas, así como para entender los procesos hidrogeoquímicos a los que estos elementos están sujetos.

REE								
Nombre	Sc (ng/L)	%RSD Sc	Y (ng/L)	%RSD Y	La (ng/L)	%RSD La	Ce (ng/L)	%RSD Ce
Blanco	ND		ND		ND		ND	
G3	ND		ND		ND		3,55	5,25
	ND		ND		ND		5,51	3,42
H5	ND		15,91	2,91	9,56	3,60	12,90	3,25
	ND		14,62	2,01	7,67	1,61	8,52	2,65
LD	LD = 400		LD = 3,0		LD = 2,0		LD = 2,0	
	Pr (ng/L)	%RSD Pr	Nd (ng/L)	%RSD Nd	Sm (ng/L)	%RSD Sm	Eu (ng/L)	%RSD Eu
Blanco	ND		ND		ND		ND	
	ND		ND		ND		ND	
G3	ND		ND		ND		ND	
	ND		ND		ND		ND	
H5	2,08	2,11	8,44	1,76	2,28	1,78	1,40	1,78
	1,77	7,12	7,23	5,50	2,07	1,82	1,40	4,08
LD	LD = 0,7		LD = 2,0		LD = 0,7		LD = 0,8	
	Gd (ng/L)	%RSD Gd	Tb (ng/L)	%RSD Tb	Dy (ng/L)	%RSD Dy	Ho (ng/L)	%RSD Ho
Blanco	ND		ND		ND		ND	
	ND		ND		ND		ND	
G3	ND		ND		ND		ND	
	ND		ND		ND		ND	
H5	2,97	7,58	ND		1,75	8,69	ND	
	2,68	2,96	ND		1,51	0,56	ND	
LD	LD = 1,6		LD = 0,7		LD = 1,40		LD = 0,8	
	Er (ng/L)	%RSD Er	Tm (ng/L)	%RSD Tm	Yb (ng/L)	%RSD Yb	Lu (ng/L)	%RSD Lu
Blanco	ND		ND		ND		ND	
	ND		ND		ND		ND	
G3	ND		ND		ND		ND	
	ND		ND		ND		ND	
H5	1,57	3,41	ND		ND		ND	
	1,53	4,56	ND		ND		ND	
LD	LD = 0,9		LD = 0,9		LD = 1,9		LD = 0,8	

Tabla 2. Resultados de los análisis de Tierras Raras en las muestras analizadas (G3: Agua de la ZNS, H5: Agua del río subterráneo). En color verde aparecen los valores que se encuentran por encima del límite de detección (LD) de cada elemento.

En la muestra proveniente de uno de los goteos (G-3) únicamente se ha detectado la presencia de un elemento, el Cerio (Ce), correspondiente al grupo de las tierras raras ligeras, por lo que su movilidad se asemeja a la del calcio, que es el catión mayoritario en los goteos presentes en la cavidad.

En la muestra del río subterráneo (H-5), se encuentra una mayor variedad de tierras raras, tanto ligeras como pesadas.

Uno de los elementos que nos indican un posible origen antrópico es el Gadolinio (Gd), que se encuentra en la muestra proveniente del río subterráneo, cuyo origen puede proceder de las aguas de la EDAR (Boester y Rúde, 2020) ubicada aguas arriba, en el cauce del Río Belcaire.

6.3.2. Fluorescencia natural de las aguas

La presencia de materia orgánica en los sistemas kársticos tiene un papel importante en el desarrollo de la karstificación, tanto en entornos epigénicos, o de karst clásico (Benavente *et al.*, 2010), como en entornos hipogénicos, (González Ramón *et al.*, 2018), especialmente aquellos vinculados con un sustrato yesífero o evaporítico.

Por ello se ha realizado la caracterización de la materia orgánica disuelta en las aguas presentes en el sistema kárstico de Sant Josep, mediante el uso de la fluorescencia natural de las aguas.

El estudio de la fluorescencia natural en las aguas proporciona información sobre el origen de la materia orgánica presente en las aguas. Se basa en el escáner de las longitudes de onda de emisión y excitación, con lo que se generan matrices de emisión/excitación (EEM). En dichas matrices se puede observar la presencia de picos, que pueden ser de los tipos A, B, C, T₁ y T₂, que en aguas no contaminadas corresponden con determinadas sustancias susceptibles a la fluorescencia.

La presencia de los picos A y C indican la existencia de sustancias atribuibles al tránsito del agua a través del suelo, producto de la descomposición incompleta de materia orgánica, como los ácidos húmicos y fúlvicos, que presentan un papel importante en la pedosfera y, en consecuencia, en la zona vadosa de los acuíferos kársticos. Los picos T₁ y T₂, son representativos de la presencia de aminoácidos en el agua, concretamente de triptófano; y el pico B, de otro aminoácido, la tirosina (Baker y Genty, 1999).

Estos picos producidos por la presencia de aminoácidos en las aguas son producto de la actividad microbiológica propia, que puede provenir tanto del propio sistema (actividad microbiológica autóctona) como del exterior, transportada hasta el sistema (actividad microbiológica alóctona).

La fluorescencia natural de las aguas se ha empleado para diversos objetivos en aguas de orígenes distintos, marinas, fluviales y lacustres, así como en aguas subterráneas y en el estudio de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas. En acuíferos

carbonáticos y, especialmente, en el estudio del agua presente en las cavidades kársticas, se ha mostrado como una herramienta idónea para el estudio del agua de infiltración, como potencial trazador temporal y espacial (Mudarra *et al.* 2011).

Sin embargo, el estudio de la fluorescencia debe ser comparado con otros trazadores naturales, como la concentración de Carbono Orgánico Total (TOC, por sus siglas en inglés), y la de nitratos, característicos también del tránsito de agua por la zona no saturada de los acuíferos kársticos.

En este caso, se han analizado ocho muestras de las Coves de Sant Josep, tres de la zona no saturada (G-1, G-2 y G-3), correspondientes con goteos localizados, tanto en la galería principal como en la galería seca, y cinco del agua del río subterráneo, en los puntos habituales de muestreo hidroquímico sistemático (H-1, H-2, H-3, H-4 y H-5). Los resultados se muestran en la tabla 3.

Fluorescencia natural		Picos					
		T1	T2	A	B	C	
G1	Detección		*	✓	✓	*	✓
	Coordenadas	X	-	396	410	-	417
		Y	-	225	230	-	325
	Intensidad		-	322,5	309,3	-	91,1
G2	Detección		*	*	✓	*	✓
	Coordenadas	X	-	-	426	-	427
		Y	-	-	225	-	320
	Intensidad		-	-	341,9	-	158,1
G3	Detección		*	✓	✓	*	✓
	Coordenadas	X	-	352	411	-	416
		Y	-	225	225	-	330
	Intensidad		-	144,9	149,2	-	70,25
H1	Detección		*	✓	✓	*	✓
	Coordenadas	X	-	365	430	-	415
		Y	-	225	235	-	320
	Intensidad		-	87,39	123,7	-	52,85
H2	Detección		*	✓	✓	*	✓
	Coordenadas	X	-	353	430	-	423,5
		Y	-	225	235	-	320
	Intensidad		-	72,68	125,9	-	52,72
H3	Detección		*	✓	✓	*	✓
	Coordenadas	X	-	356	427	-	428
		Y	-	225	225	-	325
	Intensidad		-	70,35	124,7	-	57,62
H4	Detección		*	*	✓	*	✓
	Coordenadas	X	-	-	432	-	429,5
		Y	-	-	240	-	320
	Intensidad		-	-	125,2	-	52,94
H5	Detección		*	*	✓	*	✓
	Coordenadas	X	-	-	410	-	408
		Y	-	-	230	-	295
	Intensidad		-	-	166,8	-	141,3

Tabla 3. Resultado de la detección de picos de fluorescencia en las matrices de emisión/excitación (EEM) de las muestras de agua. Se ha representado la detección de los picos T1, T2, A, B y C, con sus coordenadas, en nanómetros (nm) de longitud de onda y la intensidad de sus picos

Una vez identificados los picos que aparecen en las EEM, y cuantificada la intensidad de dichos puntos, se han normalizado sus valores respecto a la intensidad del pico Raman que presenta el fluorímetro. De esta forma se transforman las unidades de intensidad de los picos de unidades arbitrarias a Unidades Raman (tabla 4).

Normalización	nº	Unidades Raman					[NO ₃]	[SO ₄ ²⁻]	Oxd.	TOC
Pico Raman		T1	T2	A	B	C	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
48,65	G1	*	6,63	6,38	*	1,87				
47,29	G2	*	*	7,23	*	3,34	15,00	8,00	0,70	1,87
47,29	G3	*	3,06	3,16	*	1,49	7,00	5,00	0,60	0,71
47,29	H1	*	1,85	2,62	*	1,12	11,00	67,00	0,60	0,58
47,29	H2	*	1,54	2,66	*	1,11	10,00	55,00	0,50	0,50
47,29	H3	*	1,49	2,64	*	1,22	10,00	65,00	0,60	0,60
47,29	H4	*	*	2,65	*	1,12	10,00	71,00	0,50	0,74
47,46	H5	*	*	3,51	*	2,98	11,00	64,00	0,50	0,69

Tabla 4. Normalización de la intensidad de los picos detectados a Unidades Raman (U.R.). Se ha utilizado la intensidad del pico Raman del fluorímetro empleado en el análisis para la normalización de las unidades. En la tabla aparecen también los valores de nitratos, sulfatos, oxidabilidad y Carbono Orgánico Total (TOC) de las muestras

Con los datos normalizados, se han realizado una serie de gráficos relacionándolos con parámetros hidroquímicos, en la figura 6.13. vinculados con la interacción del agua y el suelo, el nitrato, el sulfato, la oxidabilidad y el carbono orgánico total.

Generalmente el parámetro de correlación R² es bajo en todas las gráficas, principalmente debido al bajo número de muestras. Aún así, es notable la relación entre el pico A con el TOC, con un valor de R² de 0,9623. Esto evidencia que el carbono orgánico total y los ácidos húmicos y fúlvicos (el pico A) del agua subterránea tienen un origen común, probablemente el suelo y el epikarst, con el que interacciona el agua durante la infiltración.

A grandes rasgos, se aprecia que los valores más altos de los picos A y C, procedentes de la interacción del agua en el suelo, son mayores en las aguas de goteo que en las del río subterráneo, coherente con los procesos generales de infiltración en un ambiente kárstico.

Respecto al pico T2, las intensidades más altas se dan en los goteos, aunque este parámetro puede estar vinculado con actividad bacteriana y la actividad antrópica producida en las zonas urbanizadas sobre la cavidad, sin tener realmente un registro representativo de los goteos en estado natural.

Las relaciones de las intensidades de los picos con los parámetros hidroquímicos presentan una tendencia prácticamente igual, a excepción del pico T2 y el nitrato, cuya tendencia es inversa. Esto puede ser debido al bajo número de datos disponibles o a la doble procedencia de los datos, de los goteos y del río subterráneo, que pueden falsear algunas relaciones.

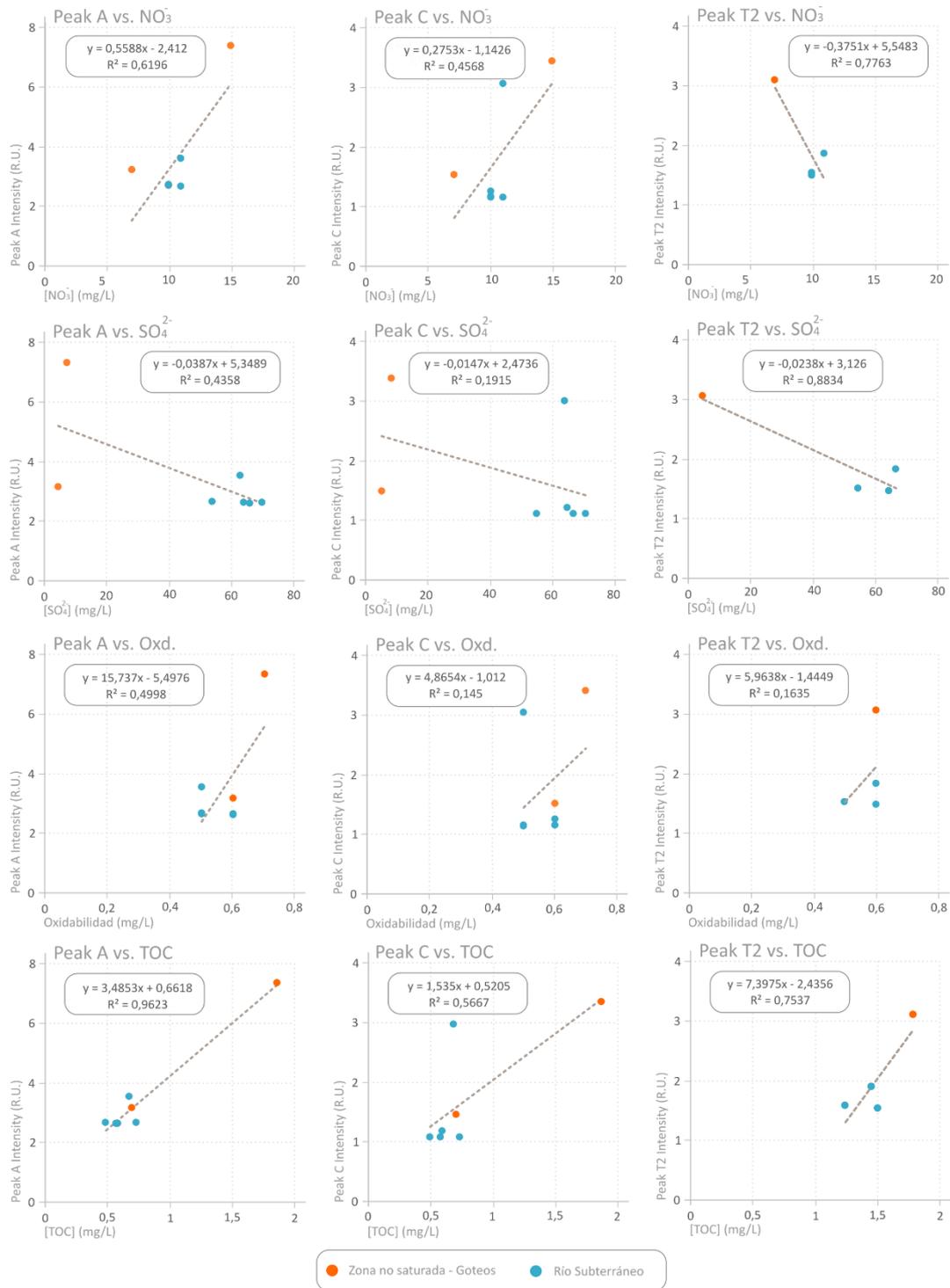


Figura 6.13. Gráficos de correlación entre distintos compuestos con los picos de fluorescencia presentes en las muestras analizadas

7. Características geoquímicas de la atmósfera subterránea

La subesfera (Robledo *et al.*, 2022) es un subsistema propio, que se compone de elementos geológicos, gases, agua y otros fluidos, que proporcionan unas características geoquímicas particulares que la distinguen de otros sistemas terrestres. Estas características deben ser estudiadas para entender la interacción entre las fases del sistema geoquímico roca-aire-agua.

Uno de los gases más destacados en los estudios recientes de la atmósfera subterránea endokárstica, en el marco del cambio global, es el CO₂, un gas con un papel importante en la dinámica planetaria y con papel destacable en el denominado efecto invernadero. Las cuevas kársticas pueden actuar como sumideros de CO₂ o, por el contrario, como puntos de emanación.

Además, en las cuevas turísticas, el CO₂ es un parámetro importante para su gestión, tanto en lo relativo a la conservación de la propia cavidad como en lo referente a la seguridad y el confort de los visitantes.

También es importante la monitorización de este gas para la conservación de la cavidad, por su interacción con los espeleotemas y su potencial corrosión. En el caso de una cueva turística, como las Coves de Sant Josep, también tiene implicaciones en su gestión y la monitorización de sus visitas.

Por todo ello, es importante analizar la distribución espacial y temporal de este gas, así como conocer las potenciales fuentes de introducción del gas al sistema kárstico (figura 7.1.).



Figura 7.1. Toma de muestra de gases para su análisis isotópico y medida de concentración de CO₂. A: Toma de muestras en la Sima del P.k. 17. B: Medida de concentración de CO₂ en la zona no visitable de las Coves de Sant Josep. C: Toma de muestras desde la barca en la zona visitable de las Coves de Sant Josep

Para este estudio se han realizado medidas puntuales de CO₂ con un medidor portátil, que se han complementado con los datos de medida en continuo de los sensores instalados, y se han tomado muestras de gas para la caracterización isotópica del CO₂. Estos datos se ha integrado para establecer una potencial fuente de este gas.

Para a la determinación de los orígenes del gas, se ha realizado una campaña de muestreo de gas para la determinación del incremento isotópico (¹³C /¹²C) del carbono de la molécula de CO₂. A partir de los valores de δ¹³C VPDB obtenidos, se ha interpretado el posible origen de este gas.

Finalmente, se han interrelacionado todos estos aspectos para obtener información de los mecanismos de ventilación del sistema en el periodo de tiempo estudiado.

7.1. Análisis de los parámetros ambientales

Los primeros análisis de los parámetros ambientales de la cavidad corresponden a un informe inédito de Barragán y Cantavella (2014), donde ofrecen una serie de datos puntuales de concentración de CO₂, de O₂, temperatura del aire y del agua.

Recientemente, en noviembre de 2022, se han instalado en el interior de la cueva, tres sensores de medición en continuo, que recogen a intervalos regulares de 10 minutos diferentes parámetros propios de la atmósfera subterránea, como la humedad relativa, la temperatura, o la concentración de CO₂, entre otros, que no se han estudiado en el paquete de trabajo.

Los sensores están dispuestos en tres puntos singulares de las Coves de Sant Josep, como se ha indicado anteriormente (figura 3.14.). El primero de ellos (S-1), cercano al primer embarcadero, a unos 50 metros de la entrada de la cueva. El segundo (S-2), en la Galería Seca, y el tercero de ellos (S-3), a escasos metros del último embarcadero, en el límite entra la zona turística y la zona no visitable.

Los datos recogidos por estos sensores se han usado para la caracterización de la distribución temporal del CO₂ en estos tres puntos del sistema, representativos de los sectores en los que están instalados.

Para complementarlos se ha utilizado un medidor portátil para describir la distribución espacial del gas en el sistema, midiendo los valores existentes en un momento concreto (a lo largo del día), a intervalos regulares del desarrollo de la cavidad.

El periodo de tiempo estudiado incluye dos momentos en los que la cavidad ha estado cerrada al público. El primero de ellos corresponde con la parada técnica que se realiza periódicamente para la limpieza de la cavidad y tareas de mantenimiento, que se realizó durante dos semanas en el mes de enero de 2023. El segundo fue durante el evento de precipitaciones intensas ocurrido a final de mayo de 2023, cuando se cerró la cavidad por riesgo de inundación.

7.1.1. Análisis espacial

En el mes de julio de 2023 se ha realizado la medida sistemática de la concentración del CO₂ a lo largo de la cavidad a intervalos regulares (figura 7.2.).

Dicha concentración presenta una variación, desde las 750-800 ppm en el exterior, ligeramente superior a la media atmosférica global de CO₂, de 420 ppm aproximadamente (Keeling y Keeling, 2017), hasta una concentración de 8000 ppm, en el límite entre la zona turística y la zona no visitable.

A lo largo de la galería de la entrada se aprecia un importante incremento en la concentración del CO₂, con un brusco gradiente, en el que la concentración pasa en unos metros de 750 ppm a 3600 ppm en el embarcadero de la entrada.

Este gradiente se encuentra menos marcado a lo largo de la galería principal de la cavidad, con una notable separación entre la concentración que se encuentra antes de la Galería de los Sifones y el Lago Azul, de 6300 ppm, respecto a las que se dan después, hasta el final de la zona turística. En esta zona los valores son más homogéneos, entre 7800 y 8000 ppm.

A lo largo de la zona no visitable de la cavidad se han realizado medidas tanto en la galería principal, como en la Galería del Fang.

También se han representado las concentraciones de CO₂ de la Sima de la Riera y de la Sima del P.k. 17, cavidades cercanas a la Cueva de Sant Josep.

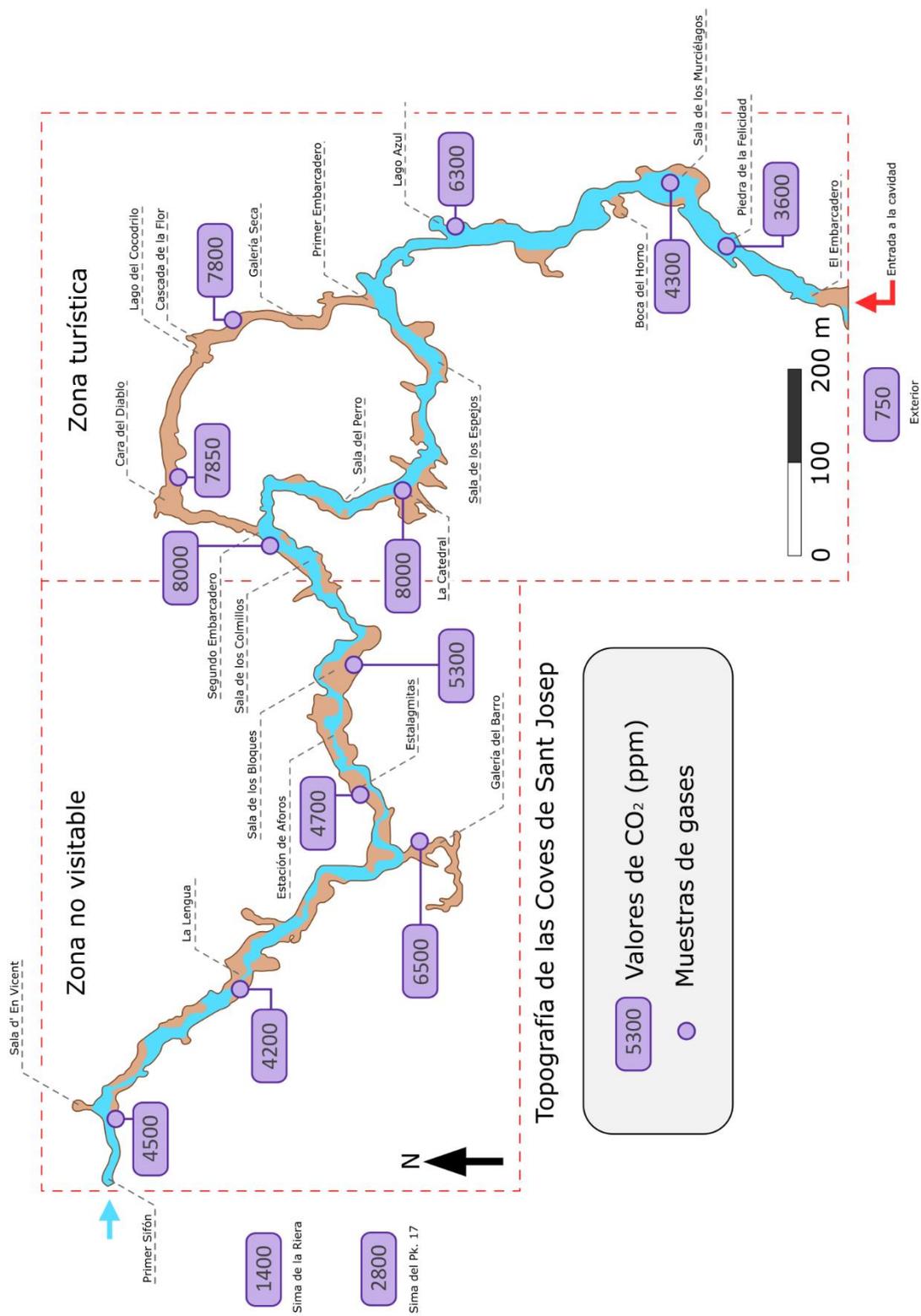


Figura 7.2. Ubicación de los puntos de muestreo de gases de la atmósfera subterránea en las Caves de San Josep, con la concentración de CO₂ medida en los respectivos puntos

Además de los datos del interior de la cavidad, se han tomado datos complementarios en la Sima de la Riera y la Sima del P.k. 17. Con estos datos se ha realizado un mapa de contornos, que representa las isoconcentraciones de CO₂, mediante el uso de técnicas geoestadísticas de interpolación. Este mapa aparece representado en la figura 7.3.

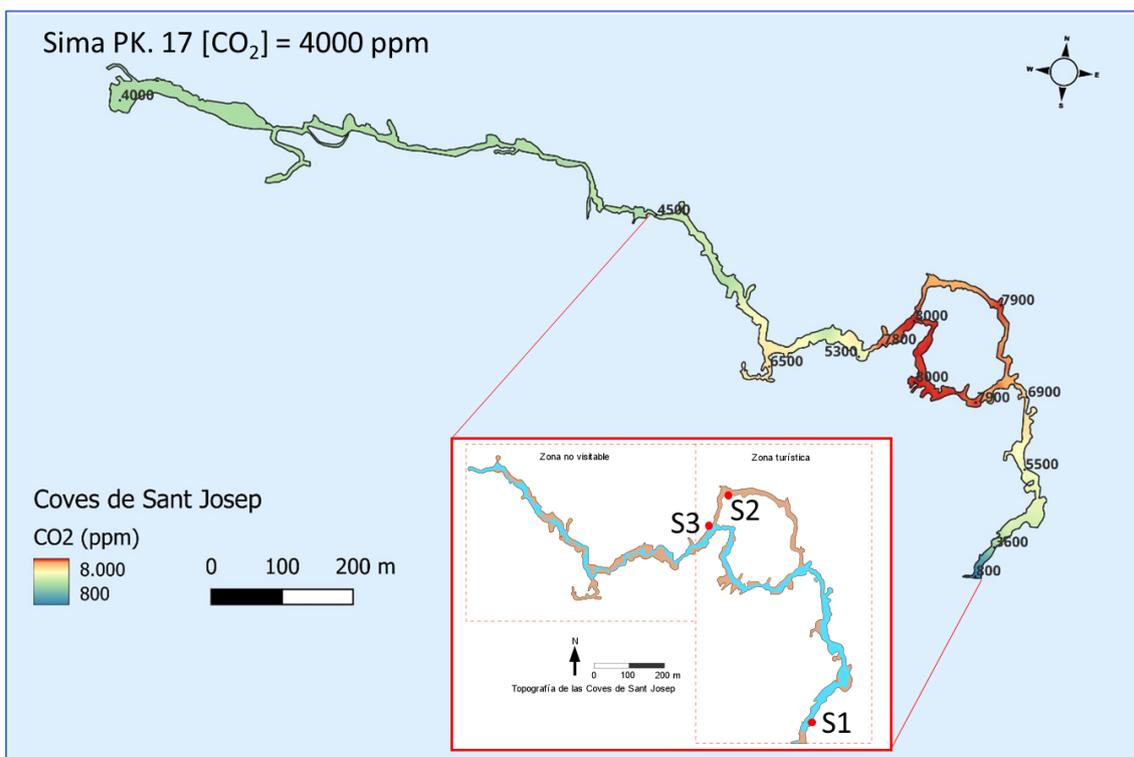


Figura 7.3. Distribución espacial de la concentración de CO₂ el día 7 de junio de 2023. En el recuadro rojo aparece el tramo de la cavidad estudiado, entre la entrada de las Coves de Sant Josep, y el primer sifón, ya en la zona no visitable. En esta figura aparecen marcados los puntos donde se encuentran los sensores de medida en continuo (S1, S2 y S3)

La distribución de la concentración del CO₂ en el tramo estudiado en la cavidad presenta una gran heterogeneidad. En el mapa de concentración realizado se puede observar que existe un claro “punto caliente”, en la parte final de la zona visitable, y, en menor medida, en la Galería Seca, donde aparecen las concentraciones máximas, entre 7000 y 8000 ppm en el entorno inmediato a los sensores instalados en el segundo embarcadero (S-3).

A partir de esa zona y hasta el primer sifón (ya en la zona no visitable) se encuentra una gradación descendente en la concentración del CO₂, en la que se alcanzan valores de 4500 ppm en el tramo final. Esta gradación es progresiva, aunque es muy notable en los primeros metros de la zona no visitable, donde pasa de valores de 8000 ppm en el último embarcadero, a valores de 5300 ppm en la Sala de los Bloques, la primera sala de la zona no visitable de la cavidad.

En el trayecto por la zona no visitable existe un único punto donde la concentración de CO₂ presenta valores anómalos en la gradación, la Galería del Fang, una de las galerías laterales de la cavidad, en dirección Sur. En este punto los valores de CO₂ son mayores

que en la galería principal, ya que en la Galería del Fang la concentración del CO₂ es de 6500 ppm, y en la Galería principal es de 4500 ppm aproximadamente.

Una posible explicación de esta circunstancia es el aporte de materia orgánica atrapada en la importante cantidad de sedimentos finos existentes en dicha galería, aunque esta hipótesis necesita ser convenientemente contrastada. También puede corresponder con una zona más aislada, alejada del flujo principal de ventilación de la cavidad.

El valor que aparece en el extremo oeste de la cavidad es el correspondiente al medido en la Sima del PK. 17, ubicada en la carretera desde la Vall d'Uixó a Alfondguilla (CV-230), que se ha interpretado como una conexión al exterior del sistema de las Coves de Sant Josep.

7.1.2. Análisis temporal

Los tres sensores de medición en continuo, ubicados en la zona turística de la cavidad realizan medidas sistemáticas de los parámetros ambientales de la cavidad a intervalos de 10 minutos. Debido a ciertas limitaciones técnicas, este trabajo se han utilizado los datos de la temperatura del aire y de la concentración de CO₂, aunque los sensores registran otros parámetros adicionales.

Con los datos registrados se puede construir la evolución temporal de la temperatura del aire y de la concentración de CO₂ que aparecen en la figura 7.4.

7.1.2.1. Temperatura del aire

La temperatura media en el periodo estudiado en el interior de la cavidad varía, en el punto más cercano a la entrada de la cavidad (S-1), es de 20,43°C, en la Galería Seca (S-2) es de 21,61°C, y en el Último Embarcadero (S-3), la temperatura es de 19,78°C.

Esta distribución de la temperatura indica un comportamiento diferencial entre la galería activa atravesada por el río subterráneo, y la galería seca. En el primer caso, existe un descenso notable de la temperatura, mientras que en la galería seca se observa un incremento de la temperatura.

Respecto a la temperatura media de la zona, detallada en el apartado 3.2.1. del presente trabajo, se observa que todas las temperaturas medias registradas del interior de la cueva se encuentran por encima. La temperatura media histórica (17,5°C), la media del año hidrológico 2022/2023 (19,4°C) y la media en el periodo estudiado (16,8°C) son más bajas que la temperatura en el interior.

Es importante destacar que la temperatura del interior de la cavidad se ve claramente afectada por las visitas turísticas, ya que presenta picos de temperatura coincidentes con ciclos diarios de visitas, ligeramente más acentuados los fines de semana y durante la temporada estival, periodos en los que aumentan las visitas.

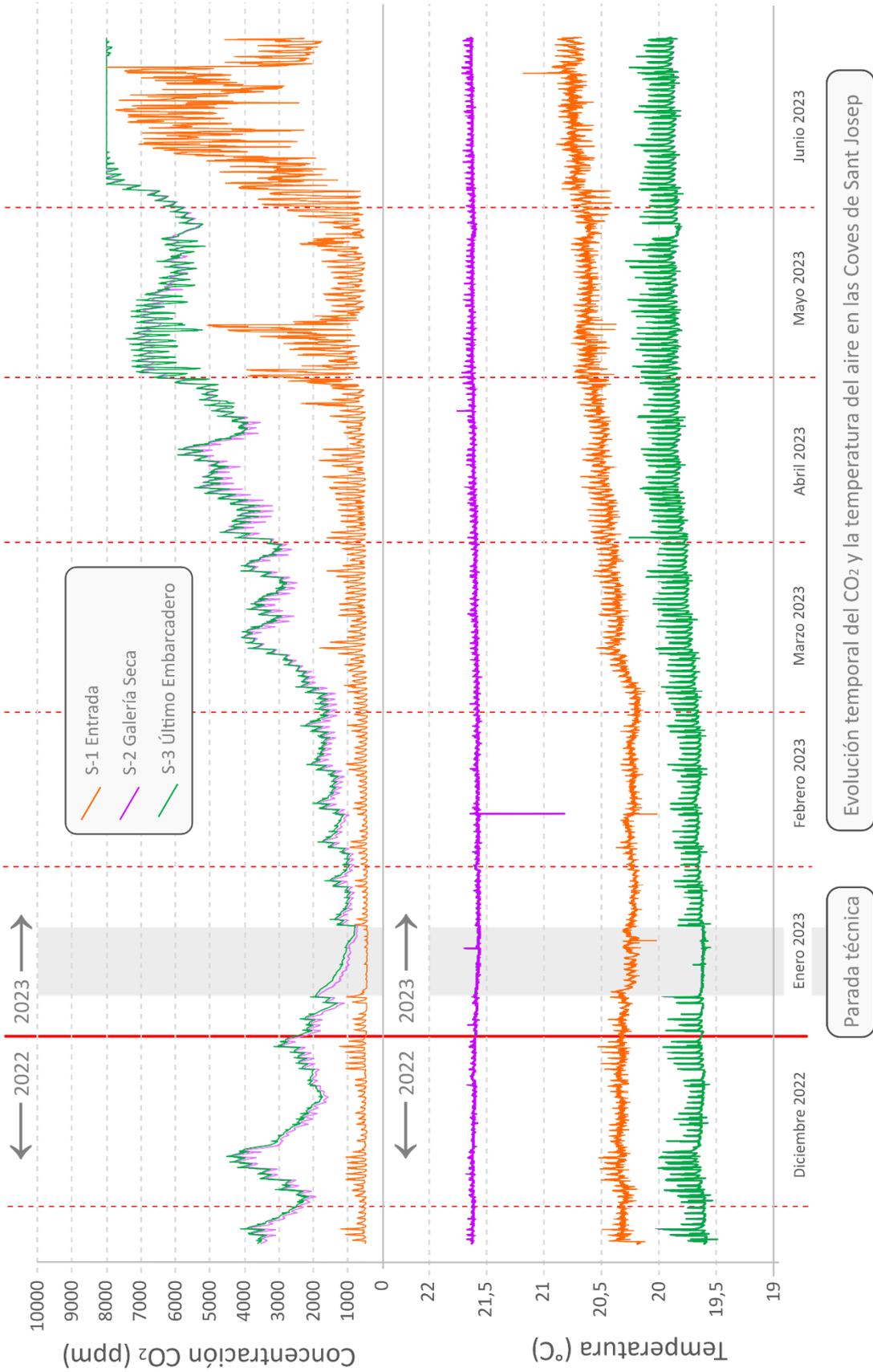


Figura 7.4. Gráficas con la evolución temporal de la concentración del CO₂ (arriba) y de la temperatura del aire (abajo) en los distintos sensores del interior de las Coves de Sant Josep

Los datos de la Galería Seca se ven menos afectados por las visitas, ya que los picos que presenta el registro de aumento de la temperatura están menos acentuados.

Respecto a las tendencias que presentan los datos, los tres sensores muestran un incremento en la temperatura durante el periodo de estudio, más acentuado en el más cercano a la entrada, con un incremento de 1,17°C entre su valor mínimo y su máximo. El sensor de la Galería Seca presenta un incremento de 0,89°C, y el del Último embarcadero, un incremento de 0,76°C.

Es importante destacar que durante la parada técnica y los días finales de mayo en los que la cavidad estuvo cerrada al público los picos de temperatura atribuidos a las visitas dejan de aparecer.

7.1.2.2. Concentración de CO₂

Respecto a la concentración de CO₂, se observa un periodo con una tendencia decreciente en la primera parte del periodo de estudio (desde noviembre de 2022 a enero de 2023), y un periodo posterior marcado por una tendencia ascendente (desde enero hasta junio).

Entre estos dos periodos se encuentra la parada técnica, durante la cual la concentración de CO₂ se redujo muy rápidamente. Una situación similar, aunque más limitada en el tiempo ocurre durante la parada realizada en mayo de 2023, en la que no se reduce tanto la concentración de CO₂.

Los valores son mucho más elevados en los dos sensores ubicados en la parte más interna de la cavidad, el S-3 y el S-2, con valores máximos de 8000 ppm y mínimos de 1500 ppm durante la parada técnica. Los valores del S-1 son generalmente más bajos, en torno a 700 ppm a lo largo del año, a excepción de los meses estivales, en los que la concentración es bastante más variable, por lo que presenta una amplitud mucho mayor.

En los tres sensores se nota una clara influencia de las visitas, ya que existen unos marcados picos coincidentes con los periodos de visita. Es posible distinguir ciclos diarios, y semanales, al igual que un máximo en las concentraciones durante el periodo estival.

Es importante destacar la presencia de una notable meseta en los datos del mes de junio, sin el registro real de la concentración de CO₂, ya que el límite superior de detección del equipo estaba establecido en 8000 ppm. Esta situación implica que no se conocen los máximos reales que se han podido alcanzar durante este periodo, únicamente que se encuentran por encima de las 8000 ppm.

7.2. La señal isotópica del CO₂

Durante los días 6 y 7 de junio de 2023 se realizó una campaña de muestreo de CO₂ en el aire del sistema de las Coves de Sant Josep. Para ello, se llenaron viales con el aire presente en la atmósfera subterránea de la cavidad para el posterior análisis isotópico del carbono de la molécula de CO₂, obteniéndose el valor de $\delta^{13}\text{C}$ VPDB.

Además de tomar la muestra, *in situ* se realiza la medida de la concentración del CO₂ en el entorno inmediato del lugar en el que se toma la muestra, para la calibración del equipo de laboratorio y la determinación de valores límite.

En total, se han tomado 15 muestras de gases. Doce de estas muestras se tomaron repartidas entre la zona turística de las Coves de Sant Josep y la zona no turística, en la que se pudo acceder hasta el límite con el primer sifón. Otra muestra fue tomada en el exterior, de la concentración atmosférica de CO₂ en el entorno inmediato a la boca habilitada de la cueva.

Otra muestra fue tomada en el Avenc de la Riera, una sima ubicada a 750 metros de la boca de las Coves de Sant Josep en dirección Este, en la rambla del Río Belcaire, a una cota de 160 m s.n.m.

Una última muestra fue tomada en la Sima del P.k. 17, ubicada a una distancia de 950 metros desde la boca de las Coves de Sant Josep en dirección Este, en el borde derecho de la carretera que une el municipio de la Vall d' Uixó con Alfondeguilla, la CV-230, en el kilómetro 17. Estas dos últimas muestras ya se encuentran en el término municipal de Alfondeguilla.

Respecto a las muestras tomadas en las Coves de Sant Josep, la mayoría de ellas se tomaron en la galería principal, a intervalos aproximadamente iguales. En la figura 7.5. se encuentran representados los valores isotópicos obtenidos y los puntos de muestreo.

Complementarios a estos, se tomaron muestras en la Galería Seca, y en la Galería del Fango, ya en la Zona no visitable. Estas Galerías son galerías laterales que se alejan de la galería principal, en la que se encuentra el río subterráneo.

En el Anexo V se pueden observar el listado de todas las muestras tomadas en la campaña y su concentración de CO₂, numeradas del M-1 al M-30, ya que el protocolo de muestreo indica que es necesario tomar duplicados de cada muestra, por lo que para 15 muestras se han necesitado 30 viales.

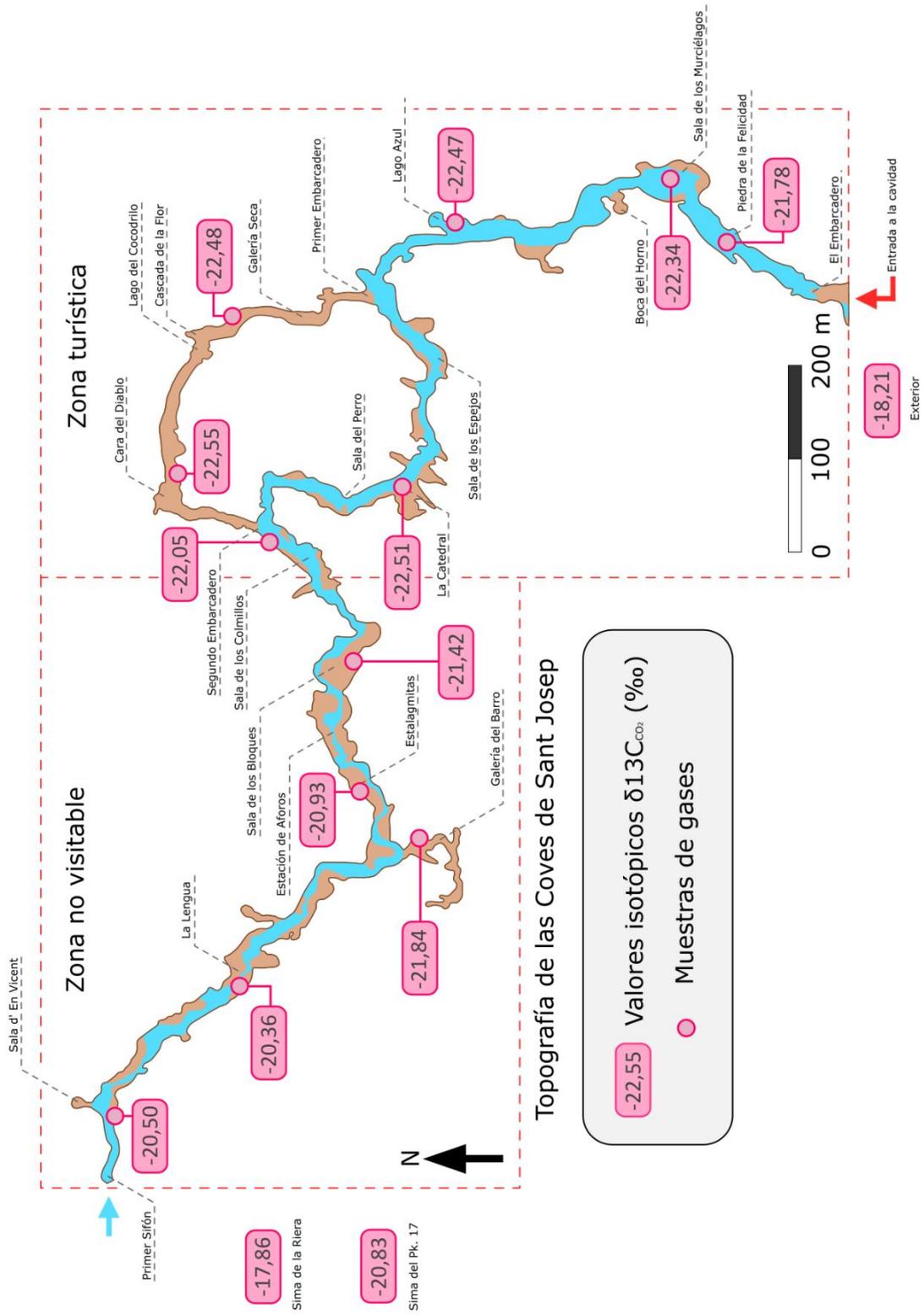


Figura 7.5. Valores de $\delta^{13}C$ VPDB (‰) en los puntos de muestreo tanto del interior de las Caves de Sant Josep como en las cavidades cercanas

Los valores detallados de los análisis isotópicos se pueden consultar en el Anexo VI, y aparecen representados en la figura 7.6., en la que se relacionan con la distancia relativa a la entrada de las Coves de Sant Josep, y con la concentración de CO₂ medida en el momento de la toma de muestra.

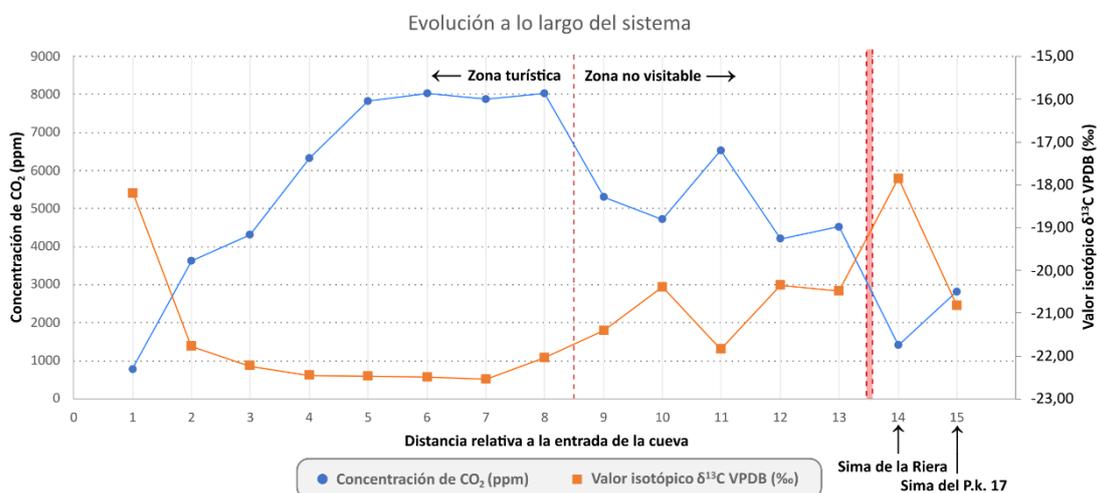


Figura 7.6. Evolución de la concentración de CO₂ y de los valores isotópicos de δ¹³C a lo largo de las Coves de Sant Josep y otras cavidades del entorno inmediato

La práctica totalidad de los valores isotópicos de δ¹³C de las muestras se encuentran cercanos a la señal producida por la respiración humana, de aproximadamente -21 ‰ VPDB (Affek y Eiler, 2006), especialmente en la zona turística de la cueva.

Los valores isotópicamente más ligeros presentan una clara relación con los puntos con las concentraciones de CO₂ más elevadas (figura 7.7.), lo que refuerza la marca antrópica de sus valores isotópicos, especialmente al observar la particular distribución de la concentración del CO₂ en la cueva, centrada en la zona turística.

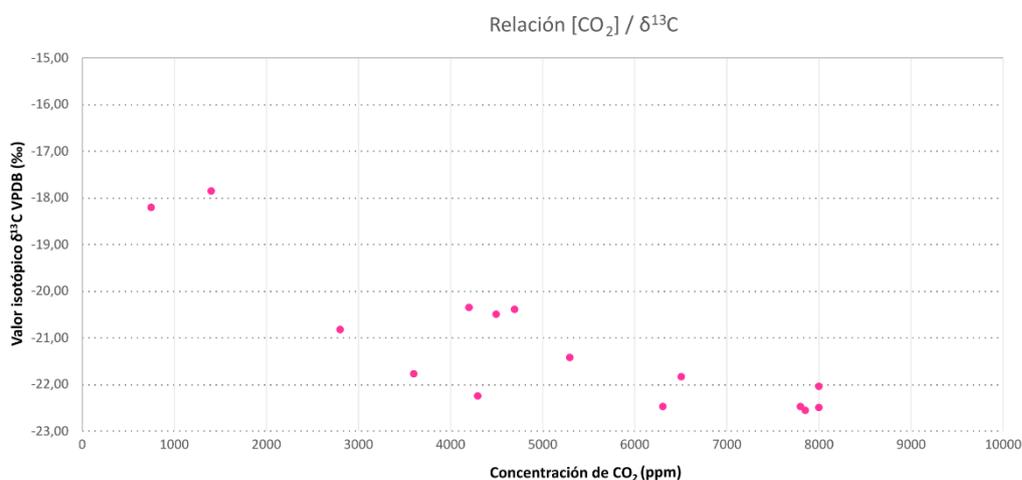


Figura 7.7. Relación entre los valores isotópicos de δ¹³C y la concentración de CO₂ de las muestras analizadas

A lo largo de la zona no visitable se observa un marcado enriquecimiento en ^{13}C , a excepción de la muestra de la Galería del Fang, que puede estar relacionada con una ventilación muy limitada, con la presencia de materia orgánica en el barro de la galería, o con la señal isotópica del epikarst, del suelo y de las plantas tipo C3, de aproximadamente -27‰ VPDB (Deines, 1980).

Debido a la notable afección a la atmósfera subterránea de la respiración de los visitantes, el papel del CO_2 del suelo y del epikarst es difícil de establecer. Es posible, sin embargo, indicar que los valores isotópicamente ligeros presentes en la zona no turística provienen de la zona visitable, de manera que se establece un flujo de aire hacia el interior de la cavidad, evidenciado también por la elevada concentración de CO_2 .

Las muestras del exterior de la cavidad, tanto la de la boca de la cueva como la de la Sima de la Riera son más ligeras que la media correspondiente con el CO_2 atmosférico, cercana al -9‰ VPDB (Deines, 1980). Esto puede ser debido a la mezcla de gases en el entorno inmediato, provenientes de diversas fuentes, sin una marca clara de CO_2 atmosférico.

En la Sima del P.k. 17, si es posible establecer su valor isotópico cercano al de la respiración humana, aunque este dato puede presentar incertidumbres en su interpretación por estar ubicada contigua a una carretera.

Esta caracterización isotópica y su evolución a lo largo del sistema es coherente con el modelo de ventilación que se desarrollará más adelante.



Detalle de los espeleotemas de la Cascada de la Flor, en la Galería Seca de las Coves de Sant Josep
Fotografía: Sergio Raúl Durán Laforet

III. Tercera parte: **Discusión, modelos y conclusiones**

III. Tercera parte: discusión, modelos y conclusiones

La tercera y última parte del trabajo, después de la exposición de los resultados principales, abarca una discusión de las limitaciones más importantes encontradas, y el establecimiento de tres modelos conceptuales que pretenden ilustrar el funcionamiento del sistema kárstico, así como una serie de las principales conclusiones alcanzadas en este estudio.

Los modelos conceptuales representan la hidrogeología y la geomorfología general del sistema, un modelo sintético de la evolución hidroquímica, y un modelo conceptual de la atmósfera subterránea de la cavidad y su ventilación.

8. Discusión y limitaciones

En los capítulos correspondientes a la segunda parte del trabajo se han esbozado algunas discusiones y conclusiones parciales de los resultados obtenidos. En este apartado, y antes de establecer los modelos conceptuales a los que se ha llegado, se pretende discutir, aunque sea brevemente, sobre la representatividad de los resultados obtenidos y los registros empleados, en base de algunas limitaciones encontradas.

Por lo general, los datos obtenidos en el apartado de la geomorfología endokárstica son sólidos, aunque carecen de datos geocronológicos, que permitan establecer una evolución temporal precisa.

Los registros hidroquímicos han sido parciales (tan solo tres campañas, repartidas de diciembre a junio, de las cuales se han empleado los datos de las dos primeras), sin dar cuenta, por tanto, de un año hidrológico completo. No obstante, se han podido utilizar datos históricos, procedentes de autores y trabajos anteriores, que matizan, aunque sea parcialmente esta limitación.

Los parámetros isotópicos de la atmósfera subterránea son los menos representativos, debido al limitado número de muestras analizadas (en una única campaña) y la variabilidad en la dinámica de los flujos gaseosos, estacionalmente característica de cavidades con conexiones al exterior a distintas cotas.

Otro aspecto fundamental para el estudio de la cavidad es el conocimiento preciso de su geometría, incluida la tridimensional. En este sentido, las topografías existentes hasta el momento presentan limitaciones para su uso en algunos de los objetivos planteados (cortes geomorfológicos, cálculos volumétricos). En estos momentos se está realizando una nueva topografía de alta precisión que permitirá la realización de modelos 3D y secciones longitudinales y transversales de suficiente representatividad.

Es importante destacar un asunto de interés, el cálculo volumétrico del agua existente en la zona turística. Mediante el uso de varios métodos, se ha estimado que el volumen de la cavidad en la zona turística es del orden de los 100.000 m³ y el volumen ocupado por el agua en dicha zona del orden de 20.000-25.000 m³.

Estos datos son importantes para entender la dinámica de los gases, ya que, durante ciertos momentos del año, de cara a los trabajos de mantenimiento (la denominada parada técnica) se produce la evacuación casi total del agua embalsada. De esta forma, se produce una importante dispersión de los gases contenidos en la cavidad, lo que implica una bajada en la concentración efectiva de CO₂.

Otro aspecto que condiciona la interpretación hidrodinámica del sistema es la ausencia de datos continuos y fiables de caudal. En este aspecto se han dispuesto únicamente de los datos históricos provenientes de la tesis doctoral de Garay (2000), tomados en la antigua estación de aforos de la zona no visitable.

Recientemente, se han instalado dos sensores de medida de la altura de lámina de agua, en los sensores S-1 y S-3, dentro de la zona turística. En los próximos meses está previsto realizar la curva de gastos de estos puntos para traducir los datos de nivel a caudales circulantes.

El objetivo de la instalación de estos sensores es la creación de un sistema de alerta temprana frente a las potenciales inundaciones que, en la actualidad, afectan a la actividad turística de la cavidad, obligando a cerrar la misma algunos días del año.

8.1. Modelos conceptuales del sistema kárstico

Una vez establecidas estas consideraciones y limitaciones, se exponen los modelos conceptuales que pretenden ilustrar el conocimiento del funcionamiento del sistema kárstico, obtenido durante la realización de estos trabajos.

Un modelo, según la Real Academia Española, en su cuarta acepción, es un esquema teórico de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.

Siguiendo esta definición de modelo, se han definido los siguientes:

- Modelo hidrogeológico y geomorfológico
- Modelo hidroquímico
- Modelo de ventilación de la cavidad

8.1.1. Modelo hidrogeológico y geomorfológico

Con la caracterización hidrogeológica de la zona de estudio y los estudios geomorfológicos de este trabajo se ha desarrollado un modelo conceptual que recoge los aspectos más relevantes de la evolución hidrogeológica y geomorfológica de las Coves de Sant Josep.

Con este modelo, se pretende expresar la espeleogénesis, la evolución espacial y temporal y el funcionamiento hidrogeológico del sistema. En la figura 8.1. se ha representado el modelo.

Este modelo se ha dividido en cinco esquemas:

- A. Origen y fases evolutivas
- B. Procesos de erosión-sedimentación
- C. Relación entre la red de drenaje superficial y subterránea
- D. Velocidades relativas de flujo del agua subterránea
- E. Migración del punto de surgencia del río subterráneo

En el esquema **A** está representado el origen de la cavidad, que se remonta al Plioceno (Garay, 2000). Está relacionado con una etapa geológica en la que el acuífero kárstico se encontraba en una situación de confinamiento o semi-confinamiento. Sobre esta formación, se encontraba una formación detrítica pliocena que ejercía de acuitardo, por lo que el flujo en el interior del acuífero kárstico se encontraba limitado, y la posición del nivel freático por encima de la cota de la cavidad. Esta circunstancia marca una fase espeleogénica caracterizada por la hipogénesis.

Posteriormente, la progresiva bajada del nivel del mar y del nivel freático, y el consecuente encajamiento de la red de drenaje durante el Pleistoceno, condicionan el tránsito hacia una fase espeleogénica caracterizada por los procesos epigénicos. Entre estos destacan el emplazamiento final del manantial de Sant Josep, al interceptar dicho encajamiento fluvial de la red superficial, a la cavidad, y formarse un punto de salida del agua subterránea del sistema, y el desarrollo de morfologías fluviales en el interior de la cavidad, con un encajamiento del río subterráneo.

El esquema **B**, relativo a los aspectos geomorfológicos endokársticos, representa fundamentalmente los diversos ciclos de erosión y sedimentación que se ven reflejados

en los cortes geomorfológicos llevados a cabo. En estos se han identificado morfologías hipogénicas en los techos, y varios niveles erosivos, demostrando la existencia de sucesivas fases de encajamiento.

Se han detectado varias generaciones de sedimentos detríticos, sin dataciones absolutas, algunos de ellos colgados muchos metros respecto al cauce del río subterráneo actual. Respecto a los espeleotemas, aunque no son muy abundantes en la cueva se observan algunas generaciones antiguas, con evidencias de procesos de corrosión, y una generación moderna, holocena, que ha sido datada por métodos geocronológicos absolutos (Robledo *et al.*, 2018).

El esquema **C** representa la relación entre la red de drenaje superficial y subterránea. El Río subterráneo de Sant Josep está íntimamente ligado a la red de drenaje superficial, representado fundamentalmente por el Río Belcaire y sus tributarios. Ambos ríos (superficial y subterráneo) presentan un trazado general condicionado por la estructura geológica de base, y una morfología meandriforme en planta.

Los dos ríos están conectados a través de diversas simas o cavidades verticales, que actúan como sumideros o enlaces hidrogeológicos entre la red superficial y subterránea. Estas conexiones han sido evidenciadas por métodos espeleológicos, como la Sima de la Riera, o mediante ensayos de trazadores, como la Sima de la Guilla (Morell *et al.* 1986). La mayor parte de los aportes hidrogeológicos al sistema provienen del sur y del oeste.

En el esquema **D** se reflejan las velocidades de flujo del agua subterránea. El río subterráneo es un dren transmisivo colgado por encima del nivel freático del acuífero carbonático en el que se aloja. Las experiencias llevadas a cabo para la estimación de las distintas velocidades de flujo a lo largo del dren, y las propuestas por Obartí *et al.* (1986) y Morell *et al.* (1987) permiten comprobar que se dan diferencias considerables a lo largo de su trazado.

Existen cuatro tipos de situaciones diferentes que condicionan las velocidades de flujo hídrico: (V1) Tramo con conductos rellenos por sedimentos detríticos, entre la sima de la guilla y el caos de bloques final, que da término al sector conocido de las Coves de Sant Josep. (V2) Tramo del río subterráneo donde los sifones son especialmente abundantes (tramos del dren totalmente rellenos de agua), sector comprendido en la zona no visitable entre el quinto y el primer sifón. (V3) Tramo con circulación libre del agua, entre el primer sifón y el límite entre la zona no visitable y la turística. (V4) Tramo con el agua represada en la zona turística y hasta el manantial.

En función de los diversos datos recopilados en el trabajo, las relaciones entre las velocidades relativas es la siguiente: $V1 < V4 < V2 < V3$.

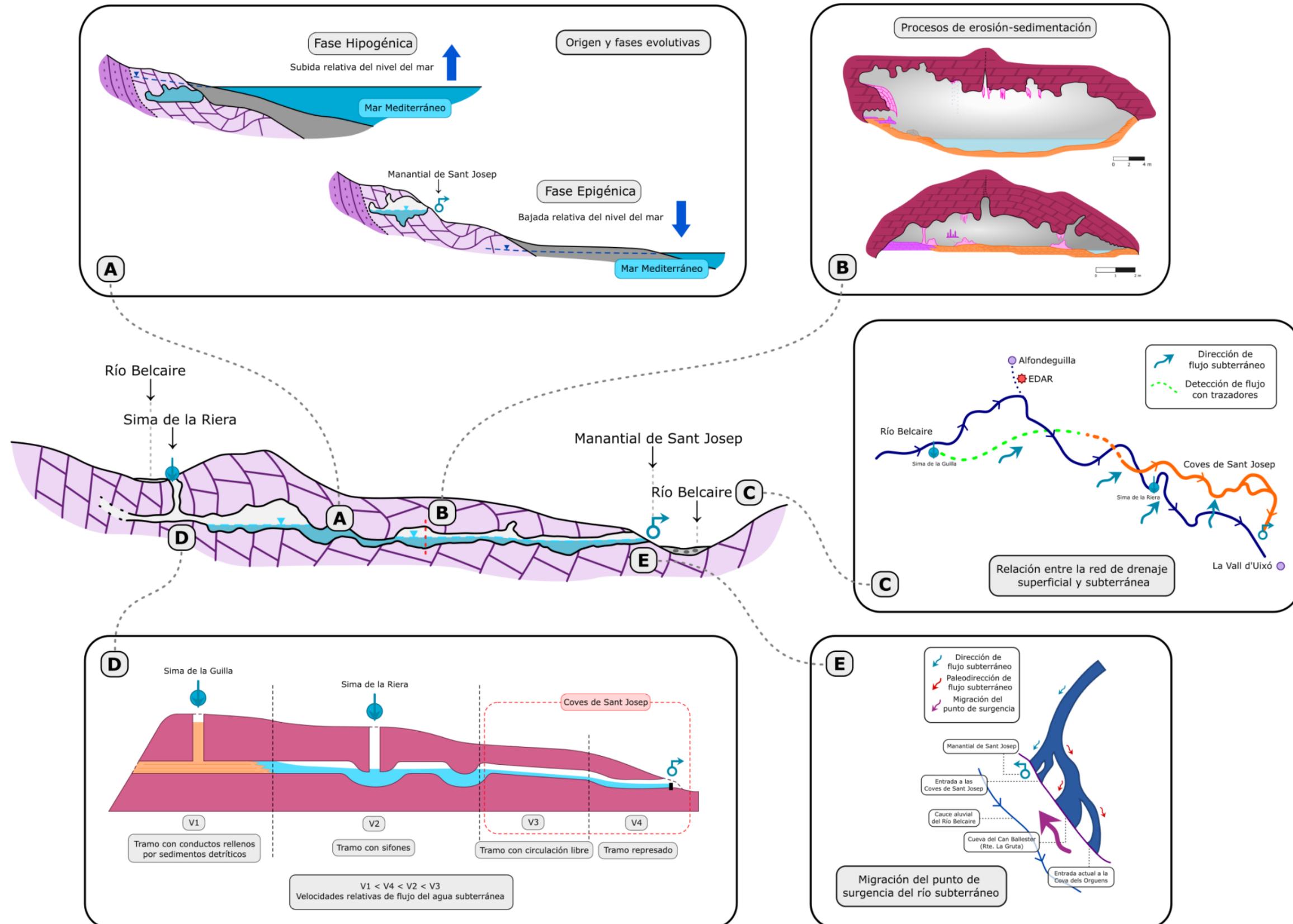


Figura 8.1. Modelo conceptual hidrogeológico y geomorfológico del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep

En el esquema E se pretende representar un ejemplo concreto de la evolución reciente del punto de surgencia del sistema, el manantial de Sant Josep. La posición de este punto ha ido migrando desde posiciones ligeramente más elevadas y hacia el este a través de sucesivas paleobocas, dejando abandonadas las galerías correspondientes a las actuales Cueva de los Órganos y Cueva de Can Ballester, hasta emplazarse finalmente en su posición actual. En los últimos 20.000 años se han generado importantes procesos de relleno detrítico de estas paleobocas abandonadas, tanto de origen natural, como antrópico (Casabó y Rovira, 2018).

Esta migración es debida al fuerte encajamiento en los tiempos recientes del Río Belcaire, que ha llegado a dejar colgado al manantial unos cinco metros por encima del cauce actual.

8.1.2. Modelo hidroquímico

Con los resultados de los análisis realizados se ha elaborado un modelo conceptual de la evolución hidroquímica del sistema, desde las zonas de recarga hasta su salida.

La recarga del río subterráneo de Sant Josep se realiza a cotas más elevadas, en la cabecera de la cuenca del Río Belcaire, evidenciado por los valores isotópicos de la lluvia, que son más ligeros, debido al efecto altitud.

El agua durante su tránsito por la zona no saturada aumenta su mineralización (y su conductividad eléctrica) e incorpora elementos característicos del suelo, como evidencian los goteos en la cavidad, y también elementos propios de la interacción roca-agua. Al alcanzar el río subterráneo, que ejerce funcionalmente como un dren transmisivo colgado en la zona no saturada, sus aguas presentan una facies bicarbonatada cálcica-magnésica, con una notable marca litológica de los valores de sulfato.

También es posible encontrar otros flujos menores, cuantitativamente poco importantes, pero que evidencian procesos incipientes de contaminación. La caracterización hidroquímica del agua de un goteo proveniente de una fuga de las redes públicas, ha mostrado que esta es muy diferente del resto de las aguas presentes en el sistema.

El agua bicarbonatada cálcico-magnésica que discurre a lo largo del río subterráneo es la que finalmente sale por el manantial de Sant Josep. Es muy distinta a la extraída de los sondeos (muy escasos) ubicados en su entorno, bombeada de la zona saturada, por debajo del nivel freático del acuífero carbonático. Ésta presenta una facies bicarbonatada magnésica, propia del sustrato dolomítico.

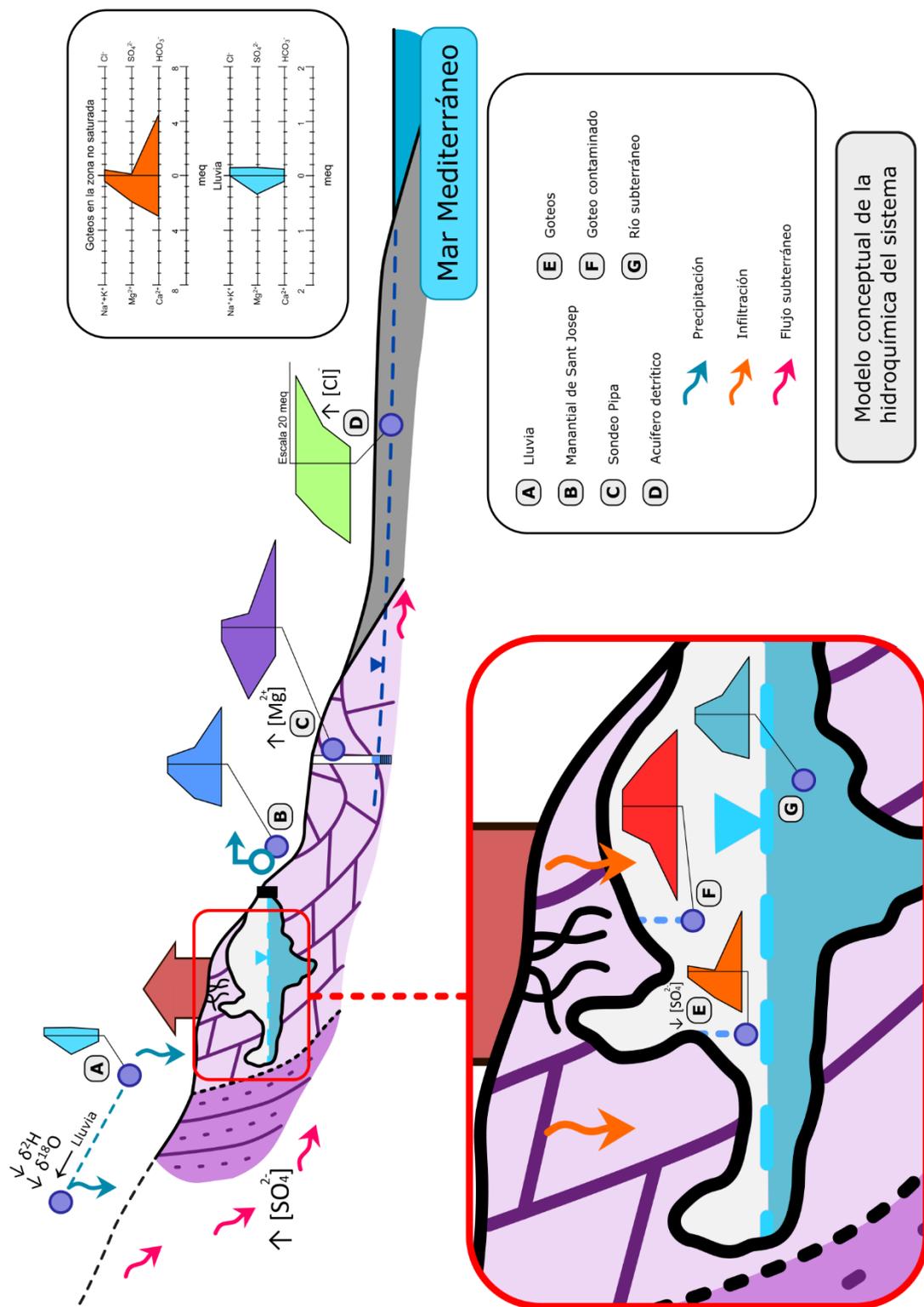


Figura 8.2. Modelo conceptual de la hidroquímica del sistema kárstico

Esta marca hidroquímica evidencia un mayor tiempo de residencia del agua en la zona saturada y, por tanto, de interacción con la litología, donde se incorporan al agua iones menos solubles, como el magnesio, lo que responde a la marcha de enriquecimiento catiónico propia de los acuíferos kársticos ($\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^+$).

Posteriormente, a lo largo de la línea de flujo se produce el tránsito entre el acuífero carbonático y el detrítico de la Plana de Castellón. Aquí se dan procesos de mezcla de aguas de diferente origen, donde se aprecia un predominio de facies sulfatadas provenientes del acuífero carbonático, que responden a la Secuencia de Chevotareb, de evolución aniónica ($\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$). Los valores de cloruro elevados evidencian que el acuífero se encuentra salinizado por la intrusión marina (García Menéndez, 2018).

8.1.3. Modelo de funcionamiento de la atmósfera subterránea

El último de los modelos conceptuales planteados es el de funcionamiento de la atmósfera subterránea. Este modelo conceptual de los flujos gaseosos de ventilación de la cavidad es pionero, nunca se había planteado hasta el momento. Para confeccionarlo se han empleado los datos de temperatura del aire, de concentración de CO_2 y los valores isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$ del CO_2) del interior de la cavidad.

La concentración de CO_2 es mucho mayor en el interior de la cavidad que en el exterior, con un marcado "punto caliente" al final de la zona turística, con concentraciones que llegan a superar 8000 ppm, que progresivamente disminuye a lo largo de la zona no visitable, hasta estabilizarse en torno a 4500 ppm. La actividad turística de las Coves de Sant Josep tiene un marcado papel en la dinámica del CO_2 , al ser introducido de manera artificial por la respiración de las visitas, como indica su marca isotópica y la particular distribución de la concentración del CO_2 a lo largo de la zona turística.

Esta condición dificulta la determinación del papel del CO_2 proveniente del suelo y del epikarst, ya que sus valores quedan enmascarados al existir solapes composicionales en sus valores isotópicos.

Se han establecido las líneas de flujo gaseoso a lo largo del eje longitudinal de las Coves de Sant Josep: el aire se introduce por la boca de la cueva, en el manantial de Sant Josep, hacia las partes más internas de la cueva, cargándose progresivamente en CO_2 proveniente de la respiración humana. En el límite de la zona turística empieza a producirse la difusión de este aire rico en CO_2 , al dejar de introducirse más aportación de origen antrópico a lo largo de la zona no visitable.

A partir del tramo donde aparecen los sifones, el flujo se ve restringido, con una dinámica más compleja. La Sima de la Riera y la Sima del P.k. 17, topográficamente elevadas respecto al manantial de Sant Josep, se han interpretado como la salida del flujo gaseoso hacia el exterior del sistema, debido a sus valores de concentración del CO_2 y su marca isotópica.

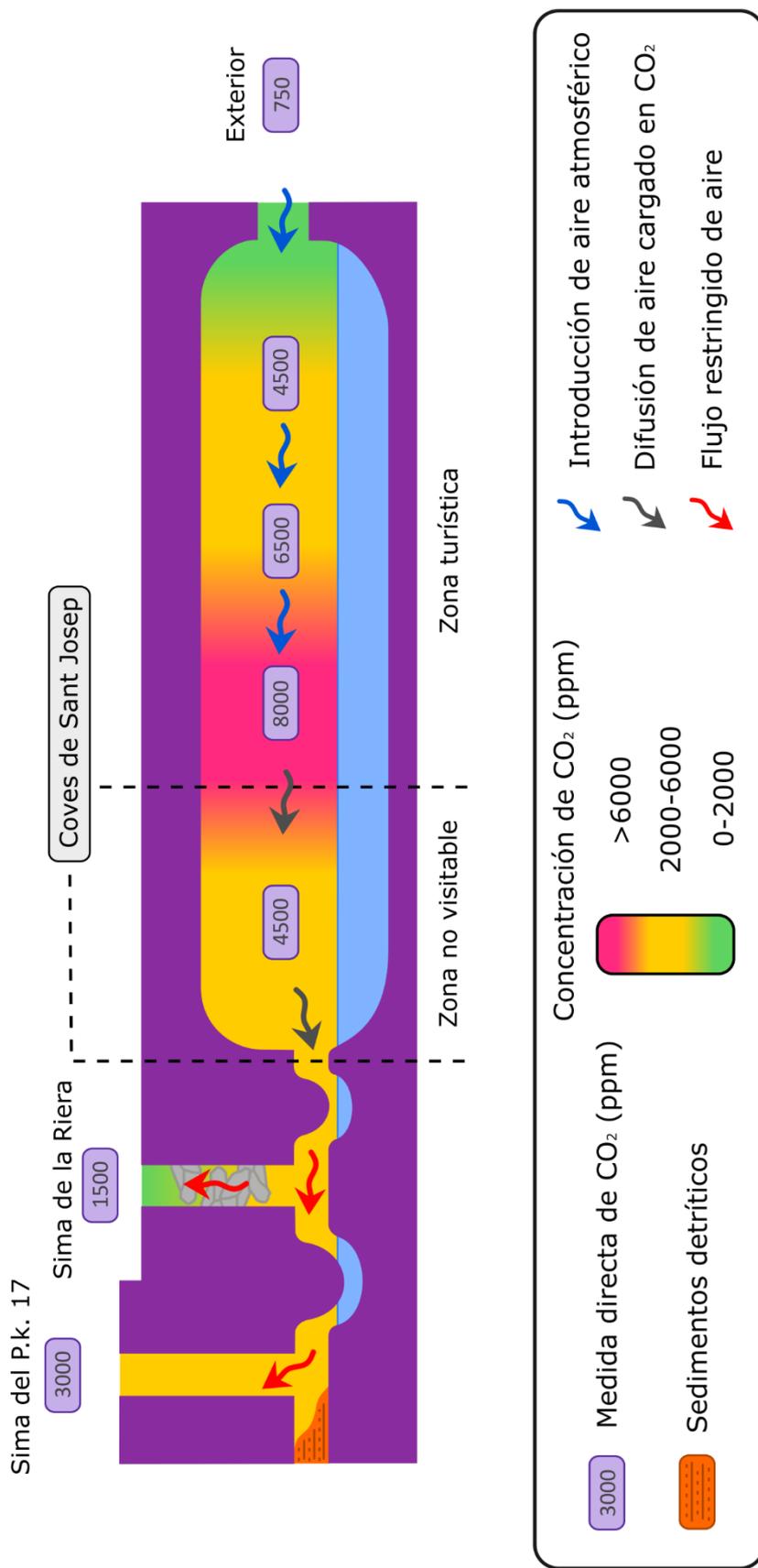


Figura 8.3. Modelo conceptual de ventilación de la atmósfera subterránea en las Caves de Sant Josep, basada en la concentración de CO₂ medida en los respectivos puntos

Se interpreta que la Sima de la Riera posee un flujo más restringido, debido a que conecta con el sifón más grande del Río Subterráneo y a la presencia de numerosos sedimentos detríticos, bloques y restos vegetales que taponan la parte final de la sima (Nebot y Borrás, 1981).

Otra evidencia de este sentido del flujo es que, durante la parada técnica anual llevada a cabo para el mantenimiento de la cueva, las concentraciones de CO₂ disminuyeron de manera drástica. Esta disminución se debió, en parte, a la difusión debida a la evacuación del agua embalsada en la zona turística, y a la movilización de la pluma de aire rica en CO₂ de la zona turística. Si esta pluma se hubiera desplazado hacia el manantial de Sant Josep, los sensores ubicados en la galería de la entrada habrían registrado el paso de la pluma, con un incremento en la concentración de CO₂; sin embargo, sus valores no se vieron modificados, por lo que se interpreta que su movilización fue hacia el interior del sistema.

Es importante destacar que este tipo de modelo de ventilación presenta, en cavidades similares con varias entradas en cotas distintas, un comportamiento estacional (Ojeda, 2022), por lo que es posible que el modelo planteado sea representativo solo de un periodo concreto del año.

8.2. Aplicación a la gestión y la conservación de la cavidad

El agua subterránea es fundamental en la gestión de cualquier cueva turística. Adquiere un peso mayor en el caso de una cueva recorrida por un río subterráneo, y cuya visita se realiza con barcas, a través de sus salas y galerías, como es el caso de las Coves de Sant Josep.

De acuerdo con los postulados establecidos en la “Carta de Campanet sobre el Turismo Subterráneo del Siglo XXI” (ACTE, 2021), la gestión de una cueva turística que pretende alcanzar niveles de excelencia en la conservación de su patrimonio y en la calidad de la visita, debe basarse en la aplicación de los resultados obtenidos en los estudios científico-técnicos que se lleven a cabo.

Por todo ello, se puede establecer las siguientes consideraciones de cara a gestión y la conservación de las Coves de Sant Josep.

- La cueva presenta una dilatada historia desde su descubrimiento y puesta en valor en el primer tercio del siglo XX, lo que ha conllevado a una serie de impactos antrópicos y modificaciones en su funcionamiento natural, tanto en los aspectos geomorfológicos, su hidrodinámica y su atmósfera subterránea.
- La cueva de Sant Josep es la única cueva habilitada para el turismo en España cuyo argumento básico es el agua subterránea, y su visita se realiza mediante la puesta en valor de la misma, con el recorrido turístico en barca por el río subterráneo. Esta circunstancia provoca la necesidad de un control científico

exhaustivo y constante, en relación con la hidrodinámica (caudal circulante por el río subterráneo) y con la calidad de sus aguas.

- Una parte de las Coves de Sant Josep se desarrolla bajo una zona urbanizada, con los consecuentes impactos y presiones antrópicas sobre el sistema endokárstico. En este sentido, la caracterización hidroquímica de las aguas de los goteos ha permitido la identificación de una potencial fuente de contaminación, y su consecuente remediación.
- La monitorización continua del nivel del agua en el río subterráneo y de sus parámetros físico-químicos, complementados con la hidroquímica, puede servir como un sistema de alerta temprana de cara a los posibles episodios de inundación que afectan a la cavidad. En este aspecto, es necesario establecer un sistema de medida continua de caudales, tanto en la zona no visitable de la cavidad (rehabilitación de la antigua estación de aforos) como en el manantial de Sant Josep. Además, se recomienda establecer una estación meteorológica en el entorno inmediato a la cavidad, y otra en las cotas más elevadas del hidrosistema de las Coves de Sant Josep.
- El contenido del CO₂ de la atmósfera subterránea es un parámetro fundamental en el equilibrio del sistema roca-aire-agua, importante para la conservación de los espeleotemas de la cavidad, así como para el confort y la salud de trabajadores y visitantes. Por ello, dado que se alcanzan valores superiores a 8000 ppm en los tramos finales y en la Galería Seca, se recomienda un seguimiento exhaustivo de este parámetro y sus variaciones temporales y espaciales y la aplicación de medidas de actuación frente a estos episodios de altas concentraciones, que deberán ser estudiados en detalle.
- Los cortes geomorfológicos se han mostrado como herramientas eficaces para la identificación de elementos geológicos destacados del interior de la cavidad (Durán-Laforet, 2022). Se recomienda que estos se integren como elementos de apoyo en el discurso de la visita por parte de los guías, así como en otras actuaciones de carácter divulgativo.
- La interpretación científica de los datos y el establecimiento de canales de comunicación efectivos entre la comunidad científica y los gestores de la cavidad tiene que establecerse con carácter permanente, ya que es una herramienta básica de apoyo a la gestión y la conservación de la cueva, así como a la salud y seguridad tanto de los trabajadores como de los visitantes.
- El uso dual de las Coves de Sant Josep, como recurso turístico y como punto de abastecimiento de agua para la red de La Vall d'Uixó presenta unas implicaciones en su uso conjunto. Las actividades derivadas de la visita turística al río

subterráneo y sus tareas de mantenimiento deben hacerse compatibles con el doble uso del agua, sin que suponga un perjuicio cualitativo y cuantitativo en el abastecimiento urbano.

- En el marco del Cambio Global los recursos hídricos adquieren un carácter estratégico. Esto debería ir ligado a la elaboración de un plan estratégico por parte de los gestores de la cueva, que contemple la potencial reducción en las precipitaciones, el incremento en su torrencialidad y la disminución del caudal circulante.
- La cueva se sitúa cercana al límite del Parque Natural de la Sierra del Espadán (aunque fuera de este), posee importantes valores patrimoniales (pinturas rupestres, yacimientos arqueológicos desde el Paleolítico hasta la protohistoria), y se encuentra recogida en el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG), con el código "IB221 Cuevas de San José de Vall d'Uixó". Estos aspectos apuntan a la necesidad de la instauración de una figura de conservación propia para la cueva. Se sugiere la figura de Monumento Natural, que poseen otras cavidades de elevado interés geológico.
- Debido a las características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas de la cueva y su entorno, de las que destaca la fuerte interrelación entre la red de drenaje superficial y el río subterráneo, el acuífero kárstico presenta una alta vulnerabilidad intrínseca. A esto hay que añadirle las presiones existentes en el hidrosistema. Por todo ello, se recomienda hacer un análisis exhaustivo de la vulnerabilidad específica de las Coves de Sant Josep que integre todos estos aspectos, para poder desarrollar actuaciones de remediación y mitigación, si fuesen necesarias.

9. Conclusiones

En el apartado anterior se han avanzado las conclusiones sobre la gestión y la conservación de la cavidad. A continuación, se exponen las principales conclusiones en relación con los tres aspectos principales analizados en este trabajo, la geomorfología, la hidrogeología, y la atmosfera subterránea del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep.

En relación con la geomorfología se destacan las siguientes:

- El río subterráneo de Sant Josep es un cauce permanente, con un caudal base de 50 L/s, un caudal medio entre 100 y 200 L/s y un caudal máximo de hasta 12 m³/s, que fluye por una cavidad con una morfología lineal y un trazado en planta meandriforme, similar al de muchos ríos superficiales.
- Este río subterráneo mantiene una importante conexión con el Río Belcaire. Este, también meandriforme en su tramo bajo, tiene carácter torrencial, y ejerce como río perdedor. Durante los periodos de intensas precipitaciones la escorrentía superficial se introduce directamente en el sistema a través de los Avencs, o sumideros ubicados adyacentes al cauce.
- La génesis y evolución de la cavidad es compleja y dilatada en el tiempo. Su origen está posiblemente vinculado a un alto nivel del mar Plioceno (generalizado en otros sistemas kársticos del Mediterráneo *ca.* 100-150 m s.n.m.), que dio lugar a una fase espeleogénica hipogénica, en principio, y posteriormente a otra fase epigénica, provocada por el encajamiento de la red fluvial y la bajada del nivel del mar.
- Los cortes geomorfológicos llevados a cabo muestran que son una herramienta muy eficaz para la identificación de los procesos que se han sucedido a lo largo de su evolución hasta el momento actual. De esta manera se han podido identificar diferentes morfologías erosivas, sedimentos litoquímicos y detríticos, que permiten la integración ordenada en el tiempo de sucesivos ciclos paleoambientales.

En relación con la hidrogeología, se destacan las siguientes:

- Las Coves de Sant Josep forman parte de un sistema kárstico complejo, donde el funcionamiento natural del acuífero kárstico se ve alterado por un río subterráneo represado, un manantial dedicado al abastecimiento de la localidad de La Vall d'Uixó, y una cueva parcialmente habilitada al turismo.

- Se ha demostrado que el río subterráneo de Sant Josep constituye un dren transmisivo dentro del acuífero de las dolomías triásicas de la Sierra del Espadán, que no constituye el nivel freático del acuífero. Es decir, se trata de un nivel colgado dentro de la zona no saturada del acuífero kárstico.
- Desde el punto de vista hidroquímico, en las Coves de Sant Josep se han podido caracterizar dos familias de aguas, la del río subterráneo y las de los goteos. Los resultados de los análisis llevados a cabo indican que las primeras son homogéneas en el espacio y el tiempo, facies hidroquímica bicarbonatada cálcico-magnésica, y unas concentraciones de sulfatos destacables. Por su parte las aguas de goteo son más heterogéneas, tanto espacial como temporalmente, con una facies bicarbonatada cálcica.
- Se ha llevado a cabo el análisis de un episodio de altas precipitaciones que dio lugar a una crecida en el manantial durante el periodo de estudio. El análisis del quimiograma de elementos mayoritarios y de sus parámetros físico-químicos ha permitido observar que hay respuestas diferenciales entre el manantial y el agua del interior de la cavidad, lo que refleja un comportamiento más complejo del inicialmente pensado, con tramos con diferentes velocidades de flujos y comportamientos hidrodinámicos.

En relación con la atmósfera subterránea se destacan:

- La temperatura del aire del interior de la cueva presenta un patrón heterogéneo, con la temperatura media más alta (21,6°C) en la Galería Seca y la más baja en el Último embarcadero (19,8°C), situado en la galería activa, entre la zona turística y la no visitable. Las oscilaciones diarias que se observan en su evolución temporal se atribuyen a las visitas turísticas, que afectan en menor medida al sensor de la Galería Seca.
- En la cavidad se alcanzan valores elevados de concentración de CO₂, de hasta 8000 ppm en la parte final del recorrido turístico, con una importante aportación producida por la respiración de los visitantes. El modelo de ventilación propuesto indica que existe un flujo de aire desde esta zona hacia el interior del sistema, donde progresivamente disminuye la concentración de CO₂, hasta su salida por alguno de los sumideros ubicados aguas arriba.
- Los valores más elevados de CO₂ se han registrado en los meses de verano, coincidentes con los meses de mayor afluencia de visitantes, y de mayor temperatura exterior. Los valores más bajos se han producido durante el periodo de mantenimiento (la parada técnica) en el que la cavidad se encontraba cerrada al público. En este periodo se procedió al vaciado del agua represada en la zona

turística de la cueva, por lo que los procesos de difusión gaseosa han debido tener un papel importante.

- Los valores isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$ del CO_2) del aire de la cavidad se han mostrado útiles para la caracterización del origen del CO_2 en el sistema, que mayoritariamente es compatible con la respiración humana, aunque los solapes composicionales implican cierta incertidumbre en su interpretación.

Finalmente, es importante destacar que, aunque las investigaciones llevadas a cabo en este Trabajo de Fin de Máster han generado un modesto avance en el conocimiento científico (en relación con el sistema kárstico de las Coves de Sant Josep), son necesarios estudios posteriores que continúen las investigaciones para dar respuesta a muchos de los interrogantes planteados.

10. Referencias

- ACTE. 2021. *Carta de Campanet sobre el Turismo Subterráneo del Siglo XXI*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE). Documento en línea (www.cuevasturisticas.es)
- Affek H. P. y Eiler J. M. 2006. Abundance of mass 47 CO₂ in urban air, car exhaust, and human breath. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 1–12.
- Anónimo. 1963. *El Río Subterráneo de la Cueva de San José en Vall de Uxó*. Imprenta La Gavina, 49 pp. Castellón.
- Almela, J. 2017. Propuesta de una clasificación espeleogenética para las cavidades de la provincia de Castellón. *Berig*, 17, pp. 3-25.
- Arrese, B. 2009. *Geomorfología, evolución geológica y condiciones ambientales actuales de la Cueva de Nerja, Málaga*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, 304 pp.
- Baker, A. y Genty, D. 1999. Fluorescence wavelength and intensity variations of cave waters. *Journal of Hydrology* 217. p 19–34.
- Ballesteros, B. y Durán, J.J. (Coords.) 2004. *Informe de valoración del impacto de las obras del trasvase del Ebro sobre el sistema kárstico de la Cueva de Sant Josep, Vall d'Uixó (Castellón)*. Informe técnico. IGME, 2 volúmenes (memoria, anexos y planos). Madrid.
- Ballesteros, D. 2016. *Geomorfología y evolución de cuevas alpinas en los Picos de Europa, Cordillera Cantábrica (España)*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. 370 pp.
- Barberá, J.A. 2014. Investigaciones hidrogeológicas en los acuíferos carbonáticos de la Serranía Oriental de Ronda (Málaga). Tesis Doctoral, Universidad de Málaga. 620 pp.
- Barragán, A. y Cantavella, S. 2014. *Mediciones de CO₂, O₂, temperatura del aire y temperatura del agua en les Coves de Sant Josep*. Informe inédito, 11 pp. Castellón.
- Benavente, J., Vadillo, I., Carrasco, F., Soler, A., Liñán, C. y Moral, F. 2010. Air CO₂ contents in the vadose zone of a mediterranean karst: field measurements and hydrochemical implications (Nerja Cave experimental site, southern Spain). *Vadose Zone Journal*, 9 (1). Soil Science Society of America. 126-136.
- Blázquez, A., Garay, P. y Medina, R. 1994. Estudio de la Cova de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Comarca de la Plana Baixa). Parte 1: Topografía. *Lapiaz*, 23, pp. 19-34.
- Boester, U. y Rúde, T.R. 2020. Utilize gadolinium as environmental tracer for surface water-groundwater interaction in Karst. *Journal of Contaminant Hydrology* 235.
- Borrás, J. 1981. La Cova de Sant Josep. *Sotaterra*, 2, pp. 28-37. Barcelona.
- Calaforra, J.M., Carretero, M., Martegani, L., Gazquez, F. y Fernández Cortés, A. 2022. Evaluación dosimétrica por exposición a gas radón en la Mina Rica – Geoda de Pulpí

(Almería). En: *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 14-26. Pulpí (Almería).

Casabó, A. y Rovira, M.L. 2018. Los primeros asentamientos humanos en les Coves de Sant Josep (La Vall d' Uixó, Castelló). En: P. A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación Cuevas Turísticas Españolas, pp. 407-420. La Vall d' Uixó (Castellón).

Cavanilles, A. 1795-1797. *Observaciones sobre la Historia Natural, geografía, agricultura, población y frutos del Reyno de Valencia*. 2 vols., 236 pp. y 338 pp. Imprenta Real, Madrid.

Celle-Jeanton, H., Travy, Y., Blavoux, B. (2001). Isotopic typology of the precipitation in the Western Mediterranean region at three different time scales. *Geophysical Research Letters* 28, 1215–1218.

Craig, H. (1961) Isotopic Variations in Meteoric Waters, *Science*, 133, 1702–1703 p.

Cruz San Julián, J., Araguás, L., Rozanski, K., Benavente, J., Cardenal, J., Hidalgo, M.C., García-López, S., Martínez-Garrido, J.C., Moral, F. y Olías, M. (1992). Sources of precipitation over South-Eastern Spain and groundwater recharge. An isotopic study. *Tellus* 44B, 226-236.

Cvijić, J. 1893. Das Karstphanomen. Versuch einer morphologischen Monographie. *Geographischen Abhandlung*, V 3, pp. 218-329. Viena.

De la Hera, A., Durán, J.J., Del Val, J. y Vías, J.M. 2006. Hidrosistemas y espacios naturales protegidos en un paso hacia la gestión integrada del medio natural en Andalucía. *V Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua: "Cuencas compartidas. Claves para la gestión sostenible del agua y del territorio"*. Universidad Algarve, Faro.

Deines, P. (1980): The isotopic composition of reduced organic carbon. In Fritz, P. y Fontes, J. (Eds.) *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Elsevier, 329–406.

Del Val, J., Durán, J.J., Ballesteros, B. y López Gutiérrez, J.C. 2007. Análisis de impacto ambiental de una obra lineal en la cueva de Sant Josep (Vall d' Uixó, Castellón). En: *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, IGME, nº 24, pp. 291-306. Madrid.

Donat, J. y Bartolomé, J. 1961. Estudio geoespeleológico de la Cueva de San José (Vall de Uxó-Castellón). *Notas y Comunicaciones del IGME*, 64, pp. 175-195. Madrid.

Durán, J.J., Vallejo, M. y López-Martínez, J. (2000) Propuesta de una nueva clasificación de espeleotemas. *Geo-Temas* 1, vol. 3, pp. 337-340.

Durán Laforet, S.R., Durán, J.J., Morales, R. y Robledo, P.A. 2022. Mapas y cortes geomorfológicos, elementos clave de la divulgación geológica en cuevas turísticas. En:

Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 59-70. Pulpí (Almería).

Durán-Laforet, S.R., Durán, J.J., Morales, R., Robledo, P.A. 2023. Evidences of Past and Present Hypogenesis in the Serrezuela De Carratraca Massif (Málaga, Southern Spain). En: Andreo, B., Barberá, J.A., Durán, J.J., Gil-Márquez, J.M. y Mudarra, M. (Eds.) *EuroKarst 2022, Málaga. Advances in Karst Science*, pp. 193-199. Springer

Esteller, M.V., Morell, I., Antigüedad, I. y Garay, P. 1996. Comportamiento del sistema kárstico drenado por el manantial de Sant Josep (Vall d'Uixó, Castellón). *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, pp. 381-398. Vitoria-Gasteiz.

Fas, A. 2018. La gestión de las Coves de Sant Josep: hacia una nueva cultura del turismo subterráneo. En: P. A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 293-304. La Vall d'Uixó (Castellón).

Ford, D.C. y Williams, P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley & Sons Ltd, 562 pp.

Garay, P. 2000. *El dominio triásico Espadán-Calderona. Contribución a su conocimiento geológico e hidrogeológico*. Tesis doctoral, Universitat de Valencia, 754 pp.

Garay, P. 2003. Ensayo sobre la anisotropía del sistema kárstico drenado por el manantial de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Provincia de Castellón de la Plana). *Boletín de la SEDECK*, 4, pp. 70-79.

Garay, P. 2007. Coves i avencs del domini triàsic Espadà-Calderona, *Camp de l'Espadar*, 10, pp. 22-36.

Garay, P. y Medina, R. 1997. Estudio de la Cova de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Comarca de la Plana Baixa). Parte 2: Geomorfología. *Lapias*, 24, pp. 3-16.

Garay, P., Morell, I. y Obartí, J. 1987. Analysys of the hydrodynamic and hydrochemical characteristics of a rise in the karstic spring of Sant Josep (Vall d'Uixó, Castellón; Spain). *20st I.A.H. Congress*. Roma.

Garay, P., Morell, I., Obartí, J. y Hernández, F. 1992. Hydrochemical behaviour of the karstic system of Sant Josep (Castellón, Spain). *I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst*, pp. 17-28. Matanzas (Cuba).

García Menéndez, O. 2018. *Evaluación multiparamétrica de un esquema MAR (Managed Aquifer Recharge) en un acuífero costero salinizado (Plana de Castellón, España)*. Tesis Doctoral, Universitat Jaume I, 316 pp.

García Menéndez, O., Morell, I., Ballesteros, B. y Renau, A. 2018. Aprovechamiento de las aguas de crecida del sistema kárstico de San José para recarga artificial de acuíferos, Vall d'Uixó, Castellón. En: P. A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha*

del tiempo, de la prehistoria a la actualidad. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 111-122. La Vall d'Uixó (Castellón).

Gázquez Sánchez, F., Fernández Cortés, A., Martegani, L., González Ramón, A., Hsun Ming, H., Chuan Chou, S. y Calaforra Chordi, J.M. 2022. *Monitorización ambiental y dataciones preliminares de espeleotemas en la Cueva de los Órganos (Sierra de Mollina, Málaga)*. En: Calaforra, J.M. y Durán, J.J. (Eds.), *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 225-237. Pulpí (Almería).

Goldstein, S.J. y Jacobsen, S.B. 1988. Nd and Sr Isotopic Systematics of River Water Suspended Material - Implications for Crustal Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 87(3), pp. 249-265.

Gonfiantini, R., Roche, M-A., Olivry, J.C., Fontes, J.C. y Zuppi, G.M. 2001. The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology*, v. 18, 1-4, pp. 147-167.

González Ramón, A., Pedrera Parias, A., Martos Rosillo, S., Jiménez de Cisneros Vencelá C. y Ruíz Constán, A. 2018. Espeleogénesis de las cavidades de la Sierra de Mollina (Málaga, sur de España). Implicaciones hidrogeológicas y geomorfológicas. En: Robledo, P.A. y Durán, J.J. (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 15-28.

Goy, J.L., Gutiérrez Elorza, M., Pedraza, J., Vegas, R. y Zazo, C. 1972. *Mapa geológico a escala 1: 50.000, hoja de Sagunto (668/29-26) y memoria*, 28 pp. IGME. Madrid.

Gutiérrez Elorza, M. y Pedraza, J. 1973. *Mapa geológico a escala 1: 50.000, hoja de Segorbe (640/29-25) y memoria*, 23 pp. IGME. Madrid.

ITGE-Diputación de Castellón. 1992. *Estudio de la estabilidad de la cueva de San José (Vall d'Uxó)*. Informe inédito. Madrid.

Jiménez Sánchez, M., Ballesteros, D., García Sansegundo, J., Giralt, S., Meléndez Asensio, M., Domínguez Cuesta, M.J., Rodríguez Rodríguez, L. 2019. Caracterización geomorfológica y geocronológica de cavidades kársticas en el Parque Nacional de los Picos de Europa: investigación y transferencia. En: Armengual Ramis, J.F. (coord.) *Proyectos de Investigación en Parques Nacionales 2013-2017*, pp. 79-93.

Jiménez Sánchez, M., Durán, J.J., López-Martínez, J., Martos, E., Arrese, B. 2004. Estudios geomorfológicos en cavidades kársticas de España. En: *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas, 12, pp. 333-349.

Keeling, R. F. y Keeling C. D. 2017. Atmospheric monthly in situ CO₂ data - Mauna Loa Observatory, Hawaii (Archive 2023-06-04). In: *Scripps CO2 Program Data*. UC San Diego Library Digital Collections.

Klimchouk, A. B. 2007. *Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective*. Special Paper no. 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, New Mexico, United States of America. 106 pp.

Klimchouk, A.B. 2009. Principal characteristics of hypogene speleogenesis. *Advances in Hypogene Karst Studies NCKRI Symposium*, 1, pp. 1-11.

León, R., Macías, F., Cánovas, C.R., Millán-Becerro, R., Pérez-López, R., Ayora, C y Nieto, J.M. 2023. Evidence of rare earth elements origin in acid mine drainage from the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Ore Geology Reviews* 154.

Liñán, C., Andreo, B., Mudry, J. y Carrasco, F. 2009. Groundwater temperature and electrical conductivity as tools to characterize flow patterns in carbonate aquifers: The Sierra de las Nieves karst aquifer, southern Spain. *Hydrogeology Journal* 17 (4), 843-853.

López-Gutiérrez, J., García Menéndez, O., Molinero, A., y Ballesteros, B. 2007. *Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por metales pesados en el acuífero de la Plana de Castellón. Aplicación al caso del mercurio*. Informe IGME. 556 pp. Madrid.

Machause, S. 2018. Las cuevas en torno al poblado ibérico de Sant Josep (La Vall d'Uixó): ¿Espacios rituales o auxiliares? En: P. A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 421-432. La Vall d'Uixó (Castellón).

Madoz, P. 1845-1850. *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de Ultramar*. 16 vols. Madrid.

Martel, E.A. 1911. *L'Évolution souterraine*. 301 pp. París.

Miñano, S. 1826-1829. *Diccionario geográfico y estadístico de España y Portugal*. 11 vols. Madrid.

Morales, R., Durán, J.J. y Robledo, P.A. 2018. Estudio hidroquímico de las aguas endokársticas de la cueva de s'Aigo, Ciutadella (Menorca). En: Robledo, P.A. y Durán, J.J. (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 55-68.

Morell, I., Obartí, J. y Garay, P. 1986. Utilización de fluoresceína en el sistema kárstico de Sant Josep. *Lapiaz*, 15, 3-5. Valencia.

Mudarra, M., Andreo, B. y Baker, A. 2011. Characterisation of dissolved organic matter in karst spring waters using intrinsic fluorescence: Relationship with infiltration processes. *The Science of The Total Environment*, 409 (18), pp. 3448-3462.

Mundina, B. 1873. *Historia, geografía y estadística de Castellón*. 639 pp. Castellón.

Muñoz Barco, P., Alonso-Zarza, A.M., Sánchez-Moral, S., Martínez Flores, E., Cueva, S., Gil-Peña, I., Lario, J. y Martín-Pérez, A. 2006. Los estudios científicos como

herramienta para la conservación y gestión del Monumento Natural Cueva de Castañar (Extremadura). *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 26, pp. 175-185.

Nebot, V y Borrás, J. (1981) Cavitats accesories al Riu de Sant Josep. *Sotaterra*, 2. Pp 20-27. Barcelona.

Obartí, J. Garay, P. y Morell, I. 1986. Definición y caracterización del sistema kárstico del manantial de Sant Josep. *Jornadas sobre el Karst en Euskadi*, pp. 171-185. San Sebastián.

Ojeda, L. 2022. *Behaviour of greenhouse gases (methane and carbon dioxide) in karst cave environments: the case of the Nerja Cave system (Southern Spain) and the Wombeyan Caves (NSW, Australia)*. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga.

Oliver, A. 2010. Cova dels Orguens, la Vall d'Uixó (Castellón). Un nuevo asentamiento ibérico en cueva. *Quaderns de Prehistòria i Arqueologia de Castelló*, 28, pp. 191-205.

Pardo-Igúzquiza E., Durán J.J., Robledo P., Guardiola C., Luque J.A. y Martos S. 2014a. *Fractal modelling of karst conduits*. En: Pardo-Igúzquiza, E. Guardiola-Albert, C., Heredia, J., Moreno-Merino, L., Durán, J.J. y Vargas-Guzmán, J.A. (Eds.), *Mathematics of Planet Earth*, pp. 217-220. Springer, Berlín.

Pardo-Igúzquiza, E., Durán, J. J. Luque, J. A. y Martos, S. 2014b. Análisis del relieve kárstico mediante el modelo digital de elevaciones. Aplicaciones a la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga). *Boletín Geológico y Minero*, v. 125, n. 3, pp. 381-389, 2014.

Protano, G. y Riccobono, F. 2002. High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu-Pb-Zn mining área. *Environmental Pollution*, 117(3), pp. 499-514.

Puig y Larraz, G. 1896. *Cavernas y simas de España*. Vda. e Hijos de M. Tello, 392 pp. Madrid.

Renau-Llorens, E.A. 2010. *Elementos minoritarios y traza en la masa de agua subterránea 080.021 (Plana de Castelló)*. Origen y procesos asociados. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I. 466 pp. Castellón.

Robledo, P.A. y Durán, J.J. 2012. *Cartografía geomorfológica de las galerías de la visita de turismo-pasarela y espeleo-aventura de la cueva El Soplao (Cantabria, España)*. Instituto Geológico y Minero de España. Informe técnico, 24 pp. Madrid.

Robledo, P.A., Durán, J.J. y Cheng, H. 2016. Deducciones paleoclimáticas a partir del estudio de una estalagmita en el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep, la Vall d'Uixó, Castellón, España. En: B. Andreo y J.J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 383-394. Nerja (Málaga).

Robledo, P.A., Durán, J.J. y Morales García, R. 2018. Geomorfología de la cueva de s' Aigo, Cala Blanca, Menorca. En: Robledo, P.A. y Durán, J.J. (Eds.) *Cuevas: la flecha del*

tiempo, de la prehistoria a la actualidad. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 79-94. La Vall d'Uixó (Castellón).

Robledo, P.A., Durán, J.J., Pardo Igúzquiza, E., Morales, R., Durán Laforet, S.R. and Álvarez Alonso, R. 2022. *Subsphere: an approach to the proposal for a new environmental system in the planet*. Póster-3rd Eurokarst, Málaga.

Sarthou, C. 1920. *Geografía General del Reino de Valencia. Provincia de Castellón*. 1087 pp. Barcelona

11. Anexos

En este apartado se recoge la información complementaria al cuerpo principal de la memoria.

Se han separado los siguientes Anexos:

- Anexo I. Datos hidroquímicos (Elementos mayoritarios)
- Anexo II. Datos hidroquímicos (Elementos minoritarios y trazas)
- Anexo III. Quimiograma (Elementos mayoritarios)
- Anexo IV. Datos isotópicos del agua
- Anexo V. Datos de las muestras de CO₂
- Anexo VI. Datos isotópicos del aire
- Anexo VII. Índice de figuras y tablas

ANEXO I. Datos hidroquímicos (Elementos mayoritarios)

Nombre Muestra Completo	Campaña	Fecha	Cationes										TOT CAT	NH4 (mg/L)	PO4 (mg/L)	SiO2 (mg/L)	Oxdb. (mg/L)	CE (µS/cm)	Laboratorio	pH
			Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (meq/L)	K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)								
Sondeo Pipa (FACSA)	1998		20.26	3.85	41.63	63.79	0.88	0.10	2.08	5.32	8.38									
Sondeo Pipa (FACSA)	2000		17.00	3.00	42.70	56.60	0.74	0.08	2.14	4.72	7.67									
Manantial San José (1997)	1998		13.40	1.20	51.80	30.10	0.58	0.03	2.59	2.51	5.71									
Manantial San José (1998)	1998		18.39	2.30	64.89	34.41	0.80	0.06	3.24	2.87	6.97									
Manantial San José (1999)	1999		14.70	2.70	75.30	32.20	0.64	0.07	3.77	2.68	7.16									
Manantial San José (2000)	2000		9.00	2.00	54.70	24.80	0.39	0.05	2.74	2.07	5.24									
H-1 (Est. Afros)	DICIEMBRE	13/12/2022	12.00	2.00	64.00	34.00	0.52	0.05	3.20	2.83	6.61	0.11	0.26	8.9	0.6	532	7.62			
H-2 (2º embarcadero)	DICIEMBRE	13/12/2022	13.00	2.00	63.00	33.00	0.57	0.05	3.15	2.75	6.52	0.00	0.17	8.9	0.5	537	7.59			
H-3 Sala de los Espejos	DICIEMBRE	13/12/2022	13.00	2.00	64.00	33.00	0.57	0.05	3.20	2.75	6.57	0.00	0.17	8.8	0.6	534	7.71			
H-4 (Sensor - piedra felicidad)	DICIEMBRE	13/12/2022	13.00	2.00	65.00	34.00	0.57	0.05	3.25	2.83	6.70	0.00	0.16	8.9	0.5	528	7.67			
H-5 (Embarcadero)	DICIEMBRE	13/12/2022	13.00	2.00	64.00	34.00	0.57	0.05	3.20	2.83	6.65	0.00	0.18	8.9	0.5	532	7.70			
H-1 (Est. Afros)	MARZO	14/03/2023	15.00	2.00	65.00	32.00	0.65	0.05	3.25	2.67	6.62	0.00	0.17	9.1	0.5	565	7.38			
H-2 (2º embarcadero)	MARZO	14/03/2023	15.00	2.00	65.00	31.00	0.65	0.05	3.25	2.58	6.54	0.00	0.15	9.1	0.5	558	7.40			
H-3 Sala de los Espejos	MARZO	14/03/2023	14.00	1.00	65.00	32.00	0.61	0.03	3.25	2.67	6.55	0.00	0.18	9.1	0.5	564	7.43			
H-4 (Sensor - piedra felicidad)	MARZO	14/03/2023	14.00	1.00	65.00	32.00	0.61	0.03	3.25	2.67	6.55	0.00	0.17	9.2	0.5	565	7.43			
H-5 (Embarcadero)	MARZO	14/03/2023	14.00	1.00	63.00	32.00	0.61	0.03	3.15	2.67	6.45	0.00	0.17	9.2	0.5	561	7.45			
G-2 (Lago cocodrilo)	DICIEMBRE	13/12/2022	10.00	2.00	59.00	24.00	0.43	0.05	2.95	2.00	5.44	1.00	1.15	6.4	0.7	460	7.67			
G-3 (Cubo)	DICIEMBRE	13/12/2022	7.00	0.00	60.00	22.00	0.30	0.00	3.00	1.83	5.14	0.10	0.00	6.0	0.6	433	7.62			
G-4 (Sala de los murciélagos)	DICIEMBRE	13/12/2022	36.00	6.00	138.00	33.00	1.57	0.15	6.90	2.75	11.37	0.68	0.00	7.7	0.8	791	7.47			
G-2 (Lago cocodrilo)	MARZO	14/03/2023	9.00	0.00	46.00	19.00	0.39	0.00	2.30	1.58	4.27	0.00	0.47	6.4	0.6	384	7.53			
G-3 (Cubo)	MARZO	14/03/2023	7.00	0.00	45.00	16.00	0.30	0.00	2.25	1.33	3.89	0.00	0.00	5.1	0.6	365	7.53			
Lluvia Vall de Uixó	DICIEMBRE	13/12/2022	0.00	0.00	2.00	4.00	0.00	0.00	0.10	0.33	0.43	0.00	0.39	0.2	3.2	42	8.05			
Aniones																				
Nombre Muestra Completo	Campaña	Fecha	Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	CO3 (mg/L)	NO3 (mg/L)	NO2 (mg/L)	Cl (mg/L)	SO4 (meq/L)	HCO3 (meq/L)	CO3 (meq/L)	NO3 (meq/L)	NO2 (meq/L)	TOT AN	BALANCE	COT (mg/L)			
			19.24	51.30	396.50	0.00	4.00	0.54	1.07	6.50	0	8.18	1.22							
Sondeo Pipa (FACSA)	1998		19.24	51.30	396.50	0.00	4.00	0	0.54	1.07	6.50	0	0.06	0	8.18	1.22				
Sondeo Pipa (FACSA)	2000		19.70	34.50	386.70	0.00	6.10	0	0.55	0.72	6.34	0	0.10	0	7.71	-0.28				
Manantial San José (1997)	1997		17.70	46.90	225.70	0.00	15.70	0	0.50	0.98	3.70	0	0.25	0	5.43	2.54				
Manantial San José (1998)	1998		21.49	73.02	277.60	0.00	18.50	0	0.61	1.52	4.55	0	0.30	0	6.98	-0.04				
Manantial San José (1999)	1999		20.50	79.40	276.00	0.00	14.90	0	0.58	1.65	4.52	0	0.24	0	7.00	1.13				
Manantial San José (2000)	2000		17.30	39.00	245.80	0.00	13.30	0	0.49	0.81	4.03	0	0.21	0	5.54	-2.78				
H-1 (Est. Afros)	DICIEMBRE	13/12/2022	22.00	67.00	265.00	0.00	11.00	0	0.62	1.40	4.31	0	0.18	0	6.50	0.78	0.58			
H-2 (2º embarcadero)	DICIEMBRE	13/12/2022	23.00	55.00	265.00	0.00	10.00	0	0.65	1.15	4.34	0	0.16	0	6.30	1.69	<0.5			
H-3 Sala de los Espejos	DICIEMBRE	13/12/2022	23.00	65.00	262.00	0.00	10.00	0	0.65	1.35	4.30	0	0.16	0	6.46	0.83	0.60			
H-4 (Sensor - piedra felicidad)	DICIEMBRE	13/12/2022	24.00	71.00	263.00	0.00	10.00	0	0.68	1.48	4.31	0	0.16	0	6.63	0.54	0.74			
H-5 (Embarcadero)	DICIEMBRE	13/12/2022	25.00	64.00	267.00	0.00	11.00	0	0.70	1.33	4.38	0	0.18	0	6.59	0.44	0.69			
H-1 (Est. Afros)	MARZO	14/03/2023	14.00	74.00	259.00	0.00	10.00	0	0.39	1.54	4.25	0	0.16	0	6.34	2.14	<0.5			
H-2 (2º embarcadero)	MARZO	14/03/2023	15.00	73.00	256.00	0.00	11.00	0	0.42	1.52	4.20	0	0.18	0	6.32	1.71	<0.5			
H-3 Sala de los Espejos	MARZO	14/03/2023	13.00	75.00	255.00	0.00	12.00	0	0.37	1.56	4.18	0	0.19	0	6.30	1.93	<0.5			
H-4 (Sensor - piedra felicidad)	MARZO	14/03/2023	12.00	74.00	255.00	0.00	12.00	0	0.34	1.54	4.20	0	0.19	0	6.27	2.19	<0.5			
H-5 (Embarcadero)	MARZO	14/03/2023	11.00	71.00	259.00	0.00	12.00	0	0.31	1.48	4.25	0	0.19	0	6.23	1.76	<0.5			
G-2 (Lago cocodrilo)	DICIEMBRE	13/12/2022	18.00	8.00	274.00	0.00	15.00	0.13	0.51	0.17	4.49	0	0.24	0	5.41	0.24	1.87			
G-3 (Cubo)	DICIEMBRE	13/12/2022	14.00	5.00	274.00	0.00	7.00	0	0.39	0.10	4.49	0	0.11	0	5.10	0.34	0.81			
G-4 (Sala de los murciélagos)	DICIEMBRE	13/12/2022	44.00	177.00	346.00	0.00	20.00	0	1.24	3.69	5.67	0	0.32	0	10.92	2.01	1.76			
G-2 (Lago cocodrilo)	MARZO	14/03/2023	8.00	12.00	207.00	0.00	12.00	0	0.23	0.25	3.39	0	0.19	0	4.06	2.55	0.65			
G-3 (Cubo)	MARZO	14/03/2023	2.00	14.00	203.00	0.00	4.00	0	0.06	0.29	3.33	0	0.06	0	3.74	1.93	<0.5			
Lluvia Vall de Uixó	DICIEMBRE	13/12/2022	5.00	7.00	7.00	0.00	1.00	0	0.14	0.15	0.11	0	0.02	0	0.42	1.85	3.04			

Anexo III. Quimiograma (Elementos mayoritarios)

Nombre Muestra Completo	Campaña	Fecha	Cationes										TOT CAT	NH4 (mg/L)	PO4 (mg/L)	SiO2 (mg/L)	Oxdb. (mg/L)	Laboratorio	
			Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (meq/L)	K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	CE (µS/cm)	pH							
QUIMIO 1	CRECIDA	26/05/2023	13,00	2,00	47,00	33,00	0,57	0,05	2,35	2,75	5,72	0	0	8,60	0,6	571	7,30		
QUIMIO 2	CRECIDA	27/05/2023	12,00	2,00	49,00	31,00	0,52	0,05	2,45	2,58	5,61	0	0	8,60	1,2	570	7,30		
QUIMIO 3	CRECIDA	28/05/2023	13,00	2,00	56,00	35,00	0,57	0,05	2,80	2,92	6,33	0	0	9,00	0,6	589	7,30		
QUIMIO 4	CRECIDA	29/05/2023	13,00	2,00	44,00	34,00	0,57	0,05	2,20	2,83	5,65	0	0	9,00	0,8	539	7,34		
QUIMIO 5	CRECIDA	30/05/2023	13,00	2,00	39,00	35,00	0,57	0,05	1,95	2,92	5,48	0	0	9,00	1,2	519	7,37		
QUIMIO 6	CRECIDA	31/05/2023	13,00	2,00	40,00	33,00	0,57	0,05	2,00	2,75	5,37	0	0	9,00	1,3	501	7,39		
QUIMIO 7	CRECIDA	01/06/2023	13,00	2,00	47,00	34,00	0,57	0,05	2,35	2,83	5,80	0	0	9,10	0,9	578	7,43		
QUIMIO 8	CRECIDA	02/06/2023	13,00	2,00	46,00	33,00	0,57	0,05	2,30	2,75	5,67	0	0	9,10	0,6	578	7,43		
QUIMIO 9	CRECIDA	03/06/2023	13,00	2,00	52,00	34,00	0,57	0,05	2,60	2,83	6,05	0	0	9,00	0,5	587	7,44		
QUIMIO 10	CRECIDA	04/06/2023	13,00	2,00	60,00	33,00	0,57	0,05	3,00	2,75	6,37	0	0	9,00	0,6	592	7,43		
QUIMIO 11	CRECIDA	05/06/2023	13,00	2,00	46,00	34,00	0,57	0,05	2,30	2,83	5,75	0	0	8,90	0,5	578	7,34		
QUIMIO 12	CRECIDA	06/06/2023	13,00	2,00	47,00	34,00	0,57	0,05	2,35	2,83	5,80	0	0	9,10	0,5	579	7,38		
QUIMIO 13	CRECIDA	07/06/2023	13,00	2,00	62,00	35,00	0,57	0,05	3,10	2,92	6,63	0	0	9,00	0,8	598	7,38		
Nombre Muestra Completo			Aniones										TOT AN		BALANCE		COT (mg/L)		
Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	CO3 (mg/L)	NO3 (mg/L)	NO2 (mg/L)	NO (mg/L)	Cl (meq/L)	SO4 (meq/L)	HCO3 (meq/L)	CO3 (meq/L)	NO3 (meq/L)	NO2 (meq/L)	NO (meq/L)	TOT AN (mg/L)	BALANCE (mg/L)				
18	81	184	0	12,00	0	0,51	1,69	3,02	0,19	0	0	0	5,40	2,81	1				
18	80	180	0	12,00	0	0,51	1,67	2,95	0,19	0	0	0	5,32	2,64	1				
19	88	210	0	13,00	0	0,54	1,83	3,44	0,21	0	0	0	6,02	2,53	1				
18	87	175	0	12,00	0	0,51	1,81	2,87	0,19	0	0	0	5,38	2,43	1				
19	89	158	0	13,00	0	0,54	1,85	2,59	0,21	0	0	0	5,19	2,75	1				
18	82	162	0	12,00	0	0,51	1,71	2,66	0,19	0	0	0	5,06	2,89	1				
19	82	196	0	13,00	0	0,54	1,71	3,21	0,21	0	0	0	5,67	1,16	1				
18	79	192	0	13,00	0	0,51	1,65	3,15	0,21	0	0	0	5,51	1,40	1				
18	84	205	0	14,00	0	0,51	1,75	3,36	0,23	0	0	0	5,84	1,73	1				
19	86	219	0	14,00	0	0,54	1,79	3,59	0,23	0	0	0	6,14	1,79	1				
18	86	186	0	13,00	0	0,51	1,79	3,05	0,21	0	0	0	5,56	1,70	1				
19	88	188	0	13,00	0	0,54	1,83	3,08	0,21	0	0	0	5,66	1,22	1				
19	89	234	0	13,00	0	0,54	1,85	3,84	0,21	0	0	0	6,44	1,52	1				

Anexo IV. Datos isotópicos del agua

Muestra	Campaña	d18O [‰]	d2H [‰]
H-1	MARZO	-6,50	-37,49
H-2	MARZO	-6,54	-37,91
H-3	MARZO	-6,56	-37,80
H-4	MARZO	-6,52	-37,79
H-5	MARZO	-6,56	-37,89
G-2	MARZO	-5,18	-29,05
G-3	MARZO	-5,25	-29,92
H-1	ENERO	-6,42	-36,92
H-2	ENERO	-6,46	-37,16
H-3	ENERO	-6,51	-37,31
H-4	ENERO	-6,49	-37,32
H-5	ENERO	-6,47	-37,27
G-2	ENERO	-5,15	-28,61
G-3	ENERO	-4,93	-27,31
G-4	ENERO	-6,78	-41,62
LLUVIA	ENERO	-3,62	-23,13
H-1	JUNIO	-6,53	-37,78
H-2	JUNIO	-6,52	-37,76
H-3	JUNIO	-6,52	-37,63
H-4	JUNIO	-6,52	-37,69
H-5	JUNIO	-6,50	-37,69
G-1	JUNIO	-5,75	-34,37
G-2	JUNIO	-5,66	-34,21
G-3	JUNIO	-5,43	-31,84
MSJ	1998	-6,30	-39,70
MSJ	1999	-6,20	-39,40
MSJ	2000	-6,30	-39,60
MSJ	2001	-6,30	-38,20

Anexo V. Datos de las muestras de CO₂

Sigla	Nombre	[CO ₂] ppm
M-1	Estalagmitas	4700
M-2	Estalagmitas (Duplicado)	4700
M-3	Lengua	4200
M-4	Lengua (Duplicado)	4200
M-5	Semisifón	4500
M-6	Semisifón (Duplicado)	4500
M-7	Galería del Fango	6500
M-8	Galería del Fango (Duplicado)	6500
M-9	Sala de los Bloques	5300
M-10	Sala de los Bloques (Duplicado)	5300
M-11	Exterior [Atmósfera]	750
M-12	Exterior [Atmósfera] (Duplicado)	750
M-13	Último Sensor	8000
M-14	Último Sensor (Duplicado)	8000
M-15	Catedral	8000
M-16	Catedral (Duplicado)	8000
M-17	Goteo Galería Seca	7800
M-18	Goteo Galería Seca (Duplicado)	7800
M-19	Cara del Diablo	7850
M-20	Cara del Diablo (Duplicado)	7850
M-21	Lago Azul	6300
M-22	Lago Azul (Duplicado)	6300
M-23	Sala de los Murciélagos	4300
M-24	Sala de los Murciélagos (Duplicado)	4300
M-25	Piedra de la Felicidad	3600
M-26	Piedra de la Felicidad (Duplicado)	3600
M-27	Sima del PK 17	2800
M-28	Sima del PK 17 (Duplicado)	2800
M-29	Avenc de la Riera	1400
M-30	Avenc de la Riera (Duplicado)	1400

Anexo VI. Datos isotópicos del aire

ID	Orden	Nombre	[CO2]	1/[CO2]	d13C	media
			(ppm)	(ppm)	vs VPDB	
M-12	1,00	Exterior [Atmósfera] (Duplicado)	750,0	0,0013333	-18,21	-18,21
M-29	14,00	Avenc de la Riera	1400,0	0,0007143	-17,78	-17,86
M-30		Avenc de la Riera (Duplicado)	1400,0	0,0007143	-17,94	
M-27	15,00	Sima del PK 17	2800,0	0,0003571	-21,04	-20,83
M-28		Sima del PK 17 (Duplicado)	2800,0	0,0003571	-20,62	
M-25	2,00	Piedra de la Felicidad	3600,0	0,0002778	-21,84	-21,78
M-26		Piedra de la Felicidad (Duplicado)	3600,0	0,0002778	-21,71	
M-3	12,00	Lengua	4200,0	0,0002381	-20,58	-20,36
M-4		Lengua (Duplicado)	4200,0	0,0002381	-20,14	
M-23	3,00	Sala de los Murciélagos	4300,0	0,0002326	-22,34	-22,25
M-24		Sala de los Murciélagos (Duplicado)	4300,0	0,0002326	-22,15	
M-5	13,00	Semisifón	4500,0	0,0002222	-20,60	-20,50
M-6		Semisifón (Duplicado)	4500,0	0,0002222	-20,40	
M-1	10,00	Estalagmitas	4700,0	0,0002128	-19,99	-20,40
M-2		Estalagmitas (Duplicado)	4700,0	0,0002128	-20,80	
M-9	9,00	Sala de los Bloques	5300,0	0,0001887	-21,55	-21,42
M-10		Sala de los Bloques (Duplicado)	5300,0	0,0001887	-21,28	
M-21	4,00	Lago Azul	6300,0	0,0001587	-22,49	-22,47
M-22		Lago Azul (Duplicado)	6300,0	0,0001587	-22,45	
M-7	11,00	Galería del Fango	6500,0	0,0001538	-22,23	-21,84
M-8		Galería del Fango (Duplicado)	6500,0	0,0001538	-21,45	
M-17	5,00	Goteo Galería Seca	7800,0	0,0001282	-22,46	-22,48
M-18		Goteo Galería Seca (Duplicado)	7800,0	0,0001282	-22,49	
M-19	7,00	Cara del Diablo	7850,0	0,0001274	-22,56	-22,55
M-20		Cara del Diablo (Duplicado)	7850,0	0,0001274	-22,54	
M-13	8,00	Último Sensor	8000,0	0,0001250	-22,35	-22,05
M-14		Último Sensor (Duplicado)	8000,0	0,0001250	-21,74	
M-15	6,00	Catedral	8000,0	0,0001250	-22,61	-22,51
M-16		Catedral (Duplicado)	8000,0	0,0001250	-22,40	

Anexo VII. Índice de figuras y tablas

Figura 1.1. Pinturas rupestres paleolíticas en la entrada del Río subterráneo de Sant Josep	4
Figura 1.2. Fotografía titulada “Entrada de la cueva de San José, en Vall de Uxó” donde aparece la boca de la Cueva y, bajo esta, el manantial de Sant Josep, hacia 1920 (Sarthou, 1920)	6
Figura 1.3. Exploraciones de los sifones terminales en la zona no visitable mediante técnicas de espeleobuceo, fotografía tomada de Ballesteros y Durán (2004)	7
Figura 2.1. Panorámica de la zona de estudio. De izquierda a derecha, el municipio de Alfonteguilla, el Río Belcaire y el macizo carbonático triásico, La Vall d’Uixó, la Plana de Castellón y el Mar Mediterráneo. En primer plano, la cima del pico Pipa.	9
Figura 2.2. Mapa de localización de la zona de estudio. Los términos municipales en los que se encuentra la zona de estudio aparecen en naranja (Alfonteguilla) y en rojo (La Vall d’Uixó)	10
Figura 2.3. Barcas con las que se hace el recorrido turístico a través del río subterráneo	11
Figura 2.4. Reconstrucción hipotética de la antigua polisurgencia del Manantial de Sant Josep	12
Figura 2.5. Mapa topográfico de la zona y ortofoto con la ubicación de las principales cavidades del sistema kárstico. Aparece sombreada la proyección aproximada de la topografía de la cavidad principal, hasta el primer sifón	13
Figura 2.6. Bocas de las cavidades del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep. A: Boca de la Sima del P.k. 17, cegada con bloques. B: Boca de la Sima del Término Municipal. C: Boca de la Sima de la Riera. D: Manantial de Sant Josep, anexo a la boca del Río subterráneo de Sant Josep	14
Figura 3.1. Mapa geológico simplificado de la zona de estudio. En el centro del mapa se sitúan las Coves de Sant Josep, cercanas a la rambla del Río Belcaire (modificado del GEODE del IGME)	17
Figura 3.2. Columna litoestratigráfica sintética de la Sierra del Espadán y su entorno, modificada de Renau-Llorens, (2010)	18
Figura 3.3. Aspecto de campo de las lutitas y areniscas rojas de las facies Buntsandstein aflorantes en el entorno de la cueva	19
Figura 3.4. Uno de los taludes de la CV-230, donde se pueden observar las estructuras de plegamiento de las dolomías del Muschelkalk, en las que se desarrolla la cavidad	20
Figura 3.5. Alternancia de lutitas versicolores y margas yesíferas de la facies Keuper	21
Figura 3.6. Terrazas pleistocenas, con sedimentos detríticos granodecrecientes hacia techo, formadas por cantos heterométricos imbricados en sentido W-E	22
Figura 3.7. Sedimentos polimícticos heterométricos aluviales en el cauce del Río Belcaire, sedimentados directamente sobre las dolomías triásicas	24
Figura 3.8. Distribución histórica mensual de temperaturas máximas, medias, mínimas y sus medias anuales en la Plana de Castellón, con datos hasta 2015 (tomados de García Menéndez, 2018)	25
Figura 3.9. Registro de temperaturas diarias en la estación meteorológica de Castellón/Almassora para el año hidrológico 2022/2023, con el periodo de estudio sombreado	27
Figura 3.10. Arriba, hietograma de la estación pluviométrica de Alfonteguilla, en el periodo 1992-2022, representativo de la precipitación en la zona de estudio. Abajo, registro pluviométrico diario de la estación de Alfonteguilla durante el periodo de estudio (octubre 2023 - junio 2023)	29
Figura 3.11. Delimitación y nombre de las Masas de Agua Subterráneas que se encuentran en la zona de estudio.....	30
Figura 3.12. Corte hidrogeológico del contacto entre los materiales detríticos de relleno de la Plana de Castellón y el acuífero carbonático de La Vall d’Uixó (García Menéndez, 2018).....	32

Figura 3.13. Perfiles topográficos del Río Belcaire desde su nacimiento en la cabecera de la cuenca hasta su desembocadura en el Mar Mediterráneo, y del Río Subterráneo de Sant Josep. Las escalas horizontal y vertical son diferentes. Elaboración propia, con datos de la posición del nivel freático y de la interfase de agua dulce-agua salada tomados de García Menéndez (2018)	33
Figura 3.14. Esquemas hidrogeológicos de la relación entre el Río Subterráneo de Sant Josep, el Río Belcaire y el nivel freático del acuífero	34
Figura 3.15. Aguas altas durante un importante evento de precipitaciones. A: Cauce del Río Belcaire a la altura de las Coves de Sant Josep; en primer plano se localiza una señal de “Cauce Inundable”. B: Manantial de Sant Josep con un caudal surgente importante. C: La galería de entrada a las Coves de Sant Josep, inundada	35
Figura 4.1. Sensores de medida de parámetros ambientales instalados en la Galería Seca	38
Figura 4.2. Trabajos de campo llevados a cabo para este trabajo. A: Trabajos en el exterior, de reconocimiento geológico y medidas estructurales. B: Trabajos en el interior de la cavidad, de medida de la concentración de CO ₂ . C: Trabajos geomorfológicos en la Galería Seca	39
Figura 5.1. Tramo de la cavidad con el río subterráneo represado, habilitado para su visita con barcas	47
Figura 5.2. Tramo seco de la cavidad, topográficamente elevado respecto a la galería principal, activa	48
Figura 5.3. Abundantes espeleotemas en la galería activa de la zona no visitable	48
Figura 5.4. Topografía de las Coves de Sant Josep, con la toponimia de los lugares más relevantes para este trabajo y la traza de los cortes geomorfológicos realizados en su interior (I-I' a IV-IV')	50
Figura 5.5. Cortes geomorfológicos representados a la misma escala, con la finalidad de indicar la heterogeneidad de los volúmenes de algunas de las salas y galerías de la cavidad	51
Figura 5.6. Fotografías de detalle de los elementos principales del sector “Murciélagos” A: Panorámica general de la Sala de los Murciélagos. B: Extremo oeste del corte, con el nivel actual del lago, que inunda casi completamente la sala. C: Detalle de la gran campana sobre los sedimentos detríticos, con morfologías de corrosión en su base y en su lateral. D: Techo de la Sala de los murciélagos con morfologías erosivas y algunos espeleotemas en su lado derecho. En el centro, se observa la gran colada con sedimentos detríticos interestratificados.....	53
Figura 5.7. Corte geomorfológico I-I', Sala de los Murciélagos	54
Figura 5.8. Fotografías de detalle de los elementos principales del sector “Bloques” A: Gran bloque desprendido del techo, cuyas caras corresponden a planos de estratificación. B: Extremo sur del corte geomorfológico, donde se puede observar uno de los bloques in situ, fracturado. C: Sedimentos detríticos del extremo norte y el criptolapiaz desarrollado sobre estos. D: Detalle de los coraloides existentes en la base de extremo norte.....	55
Figura 5.9. Corte geomorfológico II-II': Sector Bloques (Galería Seca)	57
Figura 5.10. Fotografías de detalle de los elementos principales del sector “Cara del Diablo” A: Cierre del extremo este, con un criptolapiaz en su parte inferior; en el fondo, se pueden observar los sensores de medida de parámetros ambientales instalados. B: Hoja transportada por una crecida y depositada en los sedimentos finos de la galería. C: Morfologías de cúpulas erosivas en el techo del sector. D: Cierre del extremo oeste, con sedimentos detríticos finos sobre una colada estalagmítica	58
Figura 5.11. Corte geomorfológico III-III': Sector Cara del Diablo (Galería Seca)	60
Figura 5.12. Fotografías de detalle de los elementos principales del sector “Estalagmitas” A: Vista hacia el extremo norte del corte. B: Lapiaz en la parte inferior de la pared, junto al cauce activo del río subterráneo. C: Detalle de los espeleotemas activos sobre los sedimentos aluviales groseros. D: Espeleotemas sobre los sedimentos detríticos recientes.....	61

Figura 5.13. Corte geomorfológico IV-IV': Sector Estalagmitas	63
Figura 6.1. Muestreo del río subterráneo en la zona turística (A) y en la zona no visitable (B). En el C: muestras diarias de la crecida del manantial durante el periodo comprendido entre los días 26 de mayo y 7 de junio de 2023.....	66
Figura 6.2. Algunos de los puntos donde se ha procedido al muestreo del agua de goteo en el sector turístico (A) y en la zona no visitable (B)	67
Figura 6.3. Topografía de las Coves de Sant Josep, con la toponimia de los lugares más relevantes para este trabajo.....	68
Figura 6.5. Diagrama de Schöeller-Berkaloff de los puntos de toma de muestras de agua (Río subterráneo, goteos y lluvia) en relación con los puntos de referencia del acuífero (Sondeo PIPA [FACSA], y el registro del Manantial de San José [1997-2000])	70
Figura 6.6. A la izquierda, diagrama con las relaciones iónicas para el cálculo de sulfatos no procedentes del sustrato litológico. A la derecha, diagrama con la relación iónica para la disolución de halita (NaCl)	71
Figura 6.7. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la zona de estudio. Señaladas en rojo aparecen las muestras correspondientes al Río Subterráneo, tomadas durante el periodo de estudio y su manantial asociado, recogidas de datos históricos.....	72
Figura 6.8. Mapa de los puntos de muestras de hidroquímica y su representación en diagramas de Stiff modificados. Los puntos representados en el diagrama en color rosa son de agua freática, del río subterráneo; los representados en naranja corresponden a goteos, característicos de la zona no saturada por encima de la cueva. La escala de las representaciones es de 8 meq/L a excepción de la muestra de lluvia, que es de 4 meq/L	74
Figura 6.9. Quimiograma con la representación de la evolución temporal de los elementos mayoritarios del agua de las Coves de Sant Josep, tomados diariamente después de un evento de fuertes precipitaciones	75
Figura 6.10. Evolución temporal de la conductividad eléctrica y de la temperatura del agua en los dos sensores instalados en la cavidad en los días previos, durante el evento de precipitación intensa y en los días posteriores	77
Figura 6.11. Representación de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) VSMOW frente a los de $\delta^2\text{H}$ (‰) VSMOW de las muestras de las Coves de Sant Josep y su entorno.	79
Figura 6.12. Interpretación de los valores isotópicos de las muestras provenientes de las Coves de Sant Josep y su entorno	80
Figura 6.13. Gráficos de correlación entre distintos compuestos con los picos de fluorescencia presentes en las muestras analizadas.....	86
Figura 7.1. Toma de muestra de gases para su análisis isotópico y medida de concentración de CO_2 . A: Toma de muestras en la Sima del P.k. 17. B: Medida de concentración de CO_2 en la zona no visitable de las Coves de Sant Josep. C: Toma de muestras desde la barca en la zona visitable de las Coves de Sant Josep.....	87
Figura 7.2. Ubicación de los puntos de muestreo de gases de la atmósfera subterránea en las Coves de Sant Josep, con la concentración de CO_2 medida en los respectivos puntos	90
Figura 7.3. Distribución espacial de la concentración de CO_2 el día 7 de junio de 2023. En el recuadro rojo aparece el tramo de la cavidad estudiado, entre la entrada de las Coves de Sant Josep, y el primer sifón, ya en la zona no visitable. En esta figura aparecen marcados los puntos donde se encuentran los sensores de medida en continuo (S1, S2 y S3)	91
Figura 7.4. Gráficas con la evolución temporal de la concentración del CO_2 (arriba) y de la temperatura del aire (abajo) en los distintos sensores del interior de las Coves de Sant Josep	93

Figura 7.5. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ VPDB (‰) en los puntos de muestreo tanto del interior de las Coves de Sant Josep como en las cavidades cercanas	96
Figura 7.6. Evolución de la concentración de CO_2 y de los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ a lo largo de las Coves de Sant Josep y otras cavidades del entorno inmediato	97
Figura 7.7. Relación entre los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y la concentración de CO_2 de las muestras analizadas	97
Figura 8.1. Modelo conceptual hidrogeológico y geomorfológico del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep.....	103
Figura 8.1. Modelo conceptual hidrogeológico y geomorfológico del sistema kárstico de las Coves de Sant Josep.....	103
Figura 8.2. Modelo conceptual de la hidroquímica del sistema kárstico	106
Figura 8.3. Modelo conceptual de ventilación de la atmósfera subterránea en las Coves de Sant Josep, basada en la concentración de CO_2 medida en los respectivos puntos	108
Tabla 1. Detalles de los sensores instalados para la medida de parámetros ambientales y físico-químicos	38
Tabla 2. Resultados de los análisis de Tierras Raras en las muestras analizadas (G3: Agua de la ZNS, H5: Agua del río subterráneo). En color verde aparecen los valores que se encuentran por encima del límite de detección (LD) de cada elemento.	82
Tabla 3. Resultado de la detección de picos de fluorescencia en las matrices de emisión/excitación (EEM) de las muestras de agua. Se ha representado la detección de los picos T1, T2, A, B y C, con sus coordenadas, en nanómetros (nm) de longitud de onda y la intensidad de sus picos	84
Tabla 4. Normalización de la intensidad de los picos detectados a Unidades Raman (U.R.). Se ha utilizado la intensidad del pico Raman del fluorímetro empleado en el análisis para la normalización de las unidades. En la tabla aparecen también los valores de nitratos, sulfatos, oxidabilidad y Carbono Orgánico Total (TOC) de las muestras	85



Ajuntament de
la Vall d'Uixó