

## MÉTODOS Y TÉCNICAS DE PROSPECCIÓN TOPOGRÁFICA APLICADA A LA ARQUEOLOGÍA EN CAVIDADES CÁRSTICAS SUMERGIDAS CON VISIBILIDAD CERO. EL PROYECTO FALCONERA

## METHODS AND TECHNIQUES OF TOPOGRAPHIC SURVEY APPLIED TO ARCHAEOLOGY IN SUBMERGED KARST CAVITIES WITH ZERO VISIBILITY. THE FALCONERA PROJECT

Manuel J. FUMÁS SOLDEVILLA

Escuela Internacional de Doctorado en Estudios del Mar (EIDEMAR-UCA)  
Correo electrónico: manuel.fumassoldevilla@alum.uca.es

**Resumen:** El propósito del presente trabajo consiste en mostrar el uso de una metodología de prospección arqueológica subacuática concreta, utilizada en la primera fase de estudio de una cavidad cárstica sumergida con poca o nula visibilidad, debido a la contaminación de sus aguas, denominada *Cueva de la Falconera*, la cual está ubicada en la costa del Garraf cerca de la localidad de Sitges, en la provincia de Barcelona. Para ello, la investigación ha utilizado diferentes técnicas topográficas y prospectivas aplicadas al estudio arqueológico preliminar del interior de esta cavidad submarina, usando una metodología innovadora que ha permitido desarrollar un mapa 3D de parte de la cavidad, como paso previo necesario para el geoposicionamiento de un área de intervención concreta en la que se pueda realizar un sondeo arqueológico. El presente estudio defiende una hipótesis histórica que pretende demostrar el uso de la cavidad como un hábitat temporal y como un punto de abastecimiento de agua potable para los antiguos pobladores del Garraf. Por esta razón, el geoposicionamiento de las posibles zonas arqueológicas fértiles, junto con un futuro estudio micro-geoarqueológico de los distintos estratos del paleosuelo enterrado bajo el sedimento arenoso, pueden demostrar la alta probabilidad de un uso antrópico de la cavidad. La finalidad última de la presente investigación es la validación de la definición de “prospección arqueológica topográfica subacuática”, como una fase preliminar necesaria ante cualquier estudio arqueológico subacuático en cavidades confinadas. Por esta razón, la innovación en las técnicas topográficas clásicas en la medición de poligonales, junto con el uso de herramientas tecnológicas como el AUV (Autonomous Underwater Vehicle) SPARUS II, el dispositivo de mapeo por hilo MNEMO y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han demostrado reducir el tiempo de inmersión, descartar procedimientos de trabajo obsoletos o poco rigurosos, corregir errores topográficos importantes, garantizar la seguridad del equipo científico de inmersión y mejorar la metodología arqueológica subacuática en cavidades cársticas sumergidas.

**Palabras Clave:** Prospección arqueológica subacuática, Cueva de la Falconera, AUV, MNEMO, visualización de datos en SIG, micro-geoarqueología.

**Abstract:** The purpose of this work is to show the use of a specific underwater archaeological survey methodology, used in the first phase of study of a submerged karst cavity with little or no visibility, due to the contamination of its waters, called *Cueva de la Falconera*, which is located on the Garraf coast near the town of Sitges, in the province of Barcelona. For this, the research has used different topographic and prospective techniques applied to the preliminary archaeological study of the interior of this underwater cavity, using an innovative methodology that has allowed the development of a 3D map of part of the cavity, as a necessary previous step for the geopositioning of an area of concrete intervention in which an archaeological survey can be carried out. The present study defends a historical hypothesis that aims to demonstrate the use of the cavity as a temporary habitat and as a drinking water supply point for the ancient inhabitants of Garraf. For this reason, the geopositioning of the possible fertile archaeological zones, together with a future micro-geoarchaeological study of the different layers of the paleosol buried under the sandy sediment, may demonstrate the high probability of an anthropic use of the cavity. The ultimate purpose of this research is to validate the definition of “underwater topographic archaeological prospecting”, as a necessary preliminary phase before any underwater archaeological study in confined

cavities. For this reason, the innovation in the classical topographic techniques in the measurement of traverse, together with the use of technological tools such as the AUV (Autonomous Underwater Vehicle) SPARUS II, the MNEMO wire mapping device and the Geographic Information Systems (GIS), have been shown to reduce immersion time, rule out obsolete or lax work procedures, correct important topographic errors, guarantee the safety of scientific immersion equipment, and improve underwater archaeological methodology in submerged karst cavities.

**Keywords:** Underwater archaeological prospecting, Falconera Cave, AUV, MNEMO, data visualization in GIS, micro-geoarchaeology.

**Sumario:** 1. Introducción. 2. El proyecto Falconera. Una investigación transversal en el marco de un estudio arqueológico prospectivo. 3. La Cueva de la Falconera. Un proyecto de prospección arqueológica en una cavidad sumergida con agua contaminada. 3.1. Historia de la exploración de la cavidad y la problemática de la topografía subacuática. 3.2. Hacia una hipótesis de estudio arqueológico. 4. Características técnicas de los dispositivos utilizados en la prospección arqueológica subacuática. 4.1. Prospección a través de representación digital escalada 3D. El AUV SPARUS II. 4.2. Topografía de mapeo por hilo. MNEMO. 5. Resultados de la prospección arqueológica subacuática. Objetivos y metodología usada en los trabajos de campo. 5.1. Método prospectivo de mapeo volumétrico con ecosonda multihaz. SPARUS II. 5.2. Método prospectivo de mapeo por hilo. MNEMO. 5.3. La utilización de topografía terrestre de precisión para la obtención de coordenadas. 5.4. Métodos prospectivos manuales complementarios. 5.5. Análisis de los resultados mediante técnicas SIG. 5.6. Resultados finales en la obtención de los puntos de control y referencia. 6. Discusión. 7. Conclusiones. 8. Agradecimientos. 9. Bibliografía.

## 1. Introducción

Desde hace tiempo, los estudios sobre prospección arqueológica en cavidades sumergidas coinciden en que los materiales antropogénicos son más difíciles de encontrar en la boca de las cuevas, debido a la erosión del suelo producida por la fuerza del mar o por el desprendimiento de rocas en la entrada de éstas (Flemming y Antonioli, 2017). Además, cualquier tipo de prospección o excavación en su interior se hace extremadamente difícil en su ejecución debido al sedimento en suspensión que, en contacto directo con el propio buzo o con el material que porta, crea una niebla que provoca la visibilidad cero.

Cuando se habla de arqueología subacuática en cavidades sumergidas, se debe hacer una pequeña reflexión sobre la terminología usada, según nos refiramos a cavidades subacuáticas litorales e interiores, normalmente de agua dulce, y cavidades submarinas, en las que el aumento del nivel del mar, producido a finales del Pleistoceno, provocó su inundación, cambiando su dinámica geológica de forma permanente (Gràcia, 2015). El caso de la cavidad que ocupa el presente trabajo conlleva aún más si cabe a complicar esta definición,

puesto que la Falconera es una cueva ubicada en el Macizo del Garraf, cerca del puerto deportivo de la localidad de Garraf (Barcelona), en la que su entrada se encuentra bajo el nivel del mar y donde existe una corriente de agua dulce que se origina en los niveles freáticos subterráneos. Esto provoca la existencia de diversas surgencias, tanto en el interior como en el exterior de la cueva y origina el denominado río subterráneo de la Falconera (Figura 1). Este río se abastece de la filtración de las aguas del Torrente de la Falconera y de las aguas pluviales, provocando una presión de salida que se contrarresta por la presión ejercida por el fuerte oleaje que golpea las costas rocosas del Garraf (Aymamí, 2007).

En general, en el estudio arqueológico de las cavidades sumergidas bajo el mar, se sabe que los indicios humanos son mucho más fáciles de conservar, cuanto más alejados se encuentran de la entrada de la cavidad rocosa y cuanto más protegidos se encuentran dentro de ésta (Flemming y Antonioli, 2017). Muchas veces este material se encuentra mimetizado, incrustado, cementando o concrecionado con las rocas o con el muro de la propia cueva, esto dificulta mucho su localización y su estudio. Los hándicaps muestran el



Figura 1. Mapa geográfico de la ubicación de las diferentes cuevas a lo largo de la costa del Garraf (Barcelona).

porqué de la escasa investigación en este campo desde los primeros estudios llevados a cabo en los años sesenta (Campbell, 2018). De igual manera y a modo de contextualización, se deben recordar los estudios realizados por la Dra. Holly Moyes en los que se concluye la importancia de la divisoria en tres partes distintas del uso de las cuevas por parte de los habitantes prehistóricos. Moyes analizó tres partes diferenciadas; una parte exterior a plena luz, en la que se ubicaría el área de despiece de animales y trabajos líticos diarios, una zona interior semiiluminada dentro de la cueva, pero no lejos de la entrada, la cual serviría como hogar y habitación, y por último, una zona oscura y lejana a la entrada de la cueva, en la que la espiritualidad, la religiosidad y la devoción daría lugar a pinturas y esculturas en busto redondo, donde los habitantes de estas cuevas, tuvieran o no un uso temporal, la utilizarían como santuario (Manning, 1999).

Es fácil que, de forma evidente, venga a la memoria el extraordinario hallazgo en la Grotte Cosquer con sus pinturas murales del Paleolítico superior, a 200 metros de la entrada de la cueva, la cual está sumergida a casi cuarenta metros de profundidad en la zona de Las Callanques en Marsella (Clottes *et al.*, 1992). Este, sin duda, es el hilo conductor del Proyecto Falconera realizado bajo las premisas seguidas por la *Carta Arqueológica*

*Subacuática de Sitges*. Este proyecto estudió la cavidad bajo una perspectiva prospectiva, al seguir con una serie de hipótesis que pretendían contextualizar y comprender arqueológicamente la cavidad y su área de influencia desde su formación hasta la actualidad.

En el contexto de la historia humana reciente, se sabe que el Holoceno temprano fue una época de gran difusión cultural mesolítica y neolítica, pero, también, de cambio ambiental global, causado por el aumento de las temperaturas al final de la última glaciación. La geomorfología y los cambios en el nivel del mar son importantes para explicar los impactos ambientales en los humanos que vivían en zonas costeras puesto que afectó considerablemente a las sociedades y a la migración humana (Benjamin *et al.*, 2017).

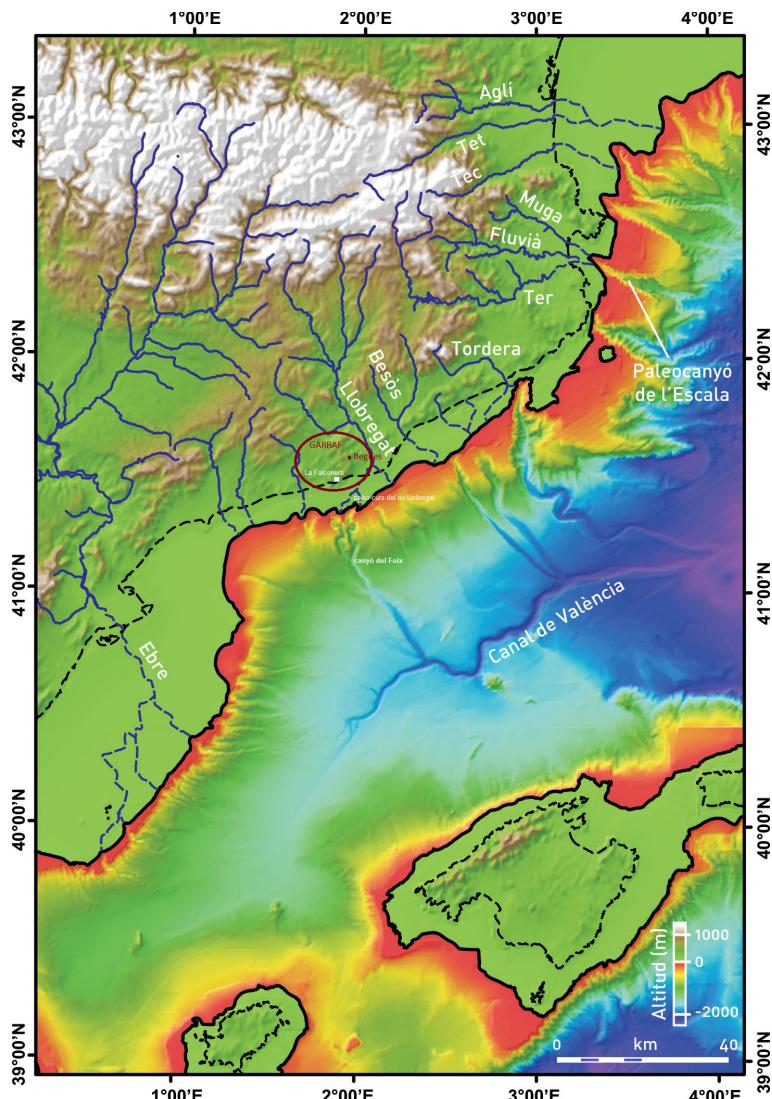
Las curvas globales del nivel del mar indican que durante los últimos 600.000 años (ka), el mar alcanzó una elevación máxima de 5 a 10 m sobre el nivel del mar actual al menos tres veces y descendió a más de 100 m por debajo del nivel actual del mar al menos cinco veces (Lichter *et al.*, 2010) (Gráfico 1). Esto, desde una perspectiva arqueológica y paleo ambiental, evidencia una clara preservación del paleo paisaje en forma de canales de ríos sumergidos, depósitos en terrazas asociadas, turbas y sedimentos terrestres. Pero, para saber

más sobre esto, es necesario el conocimiento de la geología del fondo marino (Figura 2).

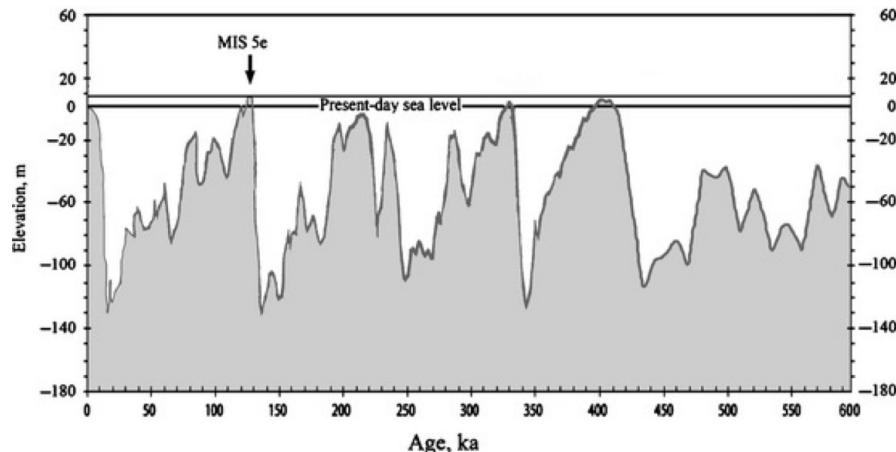
El área en la que se encuentra la Cueva de la Falconera se denomina Parque del Garraf y en él hay una gran cantidad de yacimientos arqueológicos de diversas cronologías (De Alcántara, 2004) (Figuras 1 y 7). Tras un estudio detallado de los yacimientos más cercanos a la cavidad, se encontraron cuevas prehistóricas habitadas en diferentes momentos de la antigüedad. Se citan a continuación cuatro de las más cercanas y más importantes; la Cueva del Gegant (Sitges), en la cual se encontraron, desde restos neandertales con cronologías superiores a los 60.000 años (Daura *et al.*, 2010), hasta restos de decoraciones epi campaniformes de la Edad del Bronce (Daura *et al.*, 2017); la Cueva de Coll Verdaguer (Cervelló), en la que se encontraron restos líticos en la Sala del Llop con una cronología del Paleolítico medio Musteriense

(Daura, 2010), la Cueva de Sant Llorenç (Sitges), con cronologías desde el Neolítico antiguo y Neolítico cardial hasta la época romana (Borrell *et al.*, 2014; Ferrán *et al.*, 2016); y por último, la Cueva de Sant Sadurní (Begues), con restos de industria lítica geométrica y laminar perteneciente a cazadores recolectores con cronologías que van desde el Epipaleolítico hasta el Neolítico Cardial (Millán *et al.*, 1981). Concretamente, en el Epipaleolítico fue cuando aumentó el nivel del mar e inundó la cavidad de la Falconera, al mezclar su agua salada con el agua dulce que brotaba en su interior y finalizó, de este modo, un posible uso de punto de abastecimiento de agua por parte de los antiguos habitantes del Garraf (Avmami, 2003; Vilà, 2004).

Sabedores que la arqueología es una ciencia social de interpretación histórica y la prospección una técnica concreta para obtener datos sobre una investigación, el presente trabajo apuesta por re-



**Figura 2.** Cartografía de altitud en metros con la ubicación exacta del Torrente de la Falconera.



**Gráfico 1.** Las curvas “globales” del paleo nivel del mar Mediterráneo indican que durante los últimos 600.000 años (ka), el mar alcanzó una elevación máxima de 5 a 10 m sobre el nivel del mar actual, al menos tres veces, y cayó a más de 100 m por debajo del nivel del mar actual, al menos cinco veces (Lichter *et al.*, 2010).

forzar la simbiosis entre topografía y prospección arqueológica. El objetivo final pretende conocer la ubicación exacta de una posible área arqueológica fértil, dentro de una cueva sumergida, validándola con la obtención de unas coordenadas verídicas que permitan una posible ubicación espacial de los diferentes restos arqueológicos o paleontológicos (Fumás, 2022). Pero, para esto, primero se deben cotejar los resultados topográficos obtenidos a través de diferentes mediciones manuales, mediante el uso del cálculo de las poligonales de las paredes de las cavidades respecto al centro de la galería o al hilo guía que la atraviesa, o mediante la utilización de distintos dispositivos electrónicos que faciliten una lectura comprobada y validada con el resto de los datos obtenidos por las otras técnicas utilizadas. Y, posteriormente, se deben extraer y analizar una serie de cores estratigráficos del paleosuelo que nos acoten, aún más si cabe, el área de un futuro sondeo arqueológico.

Hasta hace poco tiempo encontrar la ubicación exacta, dentro de una cavidad sumergida con poca o nula visibilidad, en un área de intervención concreta, era una tarea compleja que requería repetir la inmersión del buzo que había trabajado previamente en esa ubicación. Actualmente, gracias a las nuevas consolas de navegación, como la del ENC3 de SEACRAFT (<https://seacraft.eu/products/navigation-console/enc3/#full-set-dedicated-to-seacraft-scooters>), si somos conocedores de las coordenadas exactas del área de interés, podemos compartir la información con otros espeleo-buceadores, lo que garantiza la continuidad de los trabajos de prospección sin la necesidad de

contar con los buceadores primigenios de la exploración. Esto resulta muy útil si nuestra área de trabajo se encuentra muy alejada de la boca de la cueva submarina, debido a la dificultad para encontrar su ubicación exacta, sobre todo si las dimensiones de la cavidad son importantes o si la zona en concreto está alejada de la línea guía.

Por supuesto, la elección de la búsqueda de verificación de unas coordenadas dependerá del valor que se le otorgue a ese punto en concreto, en este caso, será la probabilidad de encontrar restos arqueológicos bajo el manto de arena que cubre el suelo de la cavidad. Para llevar a cabo el objetivo, se necesita conocer más sobre el pasado de la cavidad y sobre los estudios que se han llevado a cabo en esta materia. Por este motivo, se deben seguir las indicaciones del Dr. Flemming (Flemming, 2014), puesto que él observó que varios factores favorecían la supervivencia arqueológica de los restos arqueológicos durante la inundación de la cavidad, a medida que aumentaba el nivel del mar. Según sus estudios, los factores que favorecen la supervivencia arqueológica incluyen lo siguiente:

- Un gradiente costero bajo, de modo que la acción de las olas se atenúa en la entrada de la cavidad, si hay una construcción portuaria cercana, puesto que la amplitud de onda será mínima, la longitud de las olas corta y la acción de las olas en el fondo marino mínima.
- Una barrera de protección, puesto que todo posible depósito arqueológico en el interior de una cueva, solo se conservará si tiene un refugio de rocas caídas de techo, de escombros acumulados, de concreciones, brechas, de formación

de conglomerados e inundaciones por viento y arena. Todos y cada uno de éstos pueden servir para asegurar los estratos arqueológicos en el interior.

Por lo tanto, antes de realizar cualquier intervención, debemos preguntarnos ¿dónde prospectar? y para dar una respuesta científica rigurosa a esa pregunta, se necesita conocer todos los datos cronológicos, geológicos, hídricos, históricos y arqueológicos del área de intervención, además de la geo posición correcta de la misma.

## 2. El proyecto Falconera. Una investigación transversal en el marco de un estudio arqueológico prospectivo

El proyecto Falconera se incluye en el Proyecto de la Revisión de la *Carta Arqueológica Subacuática de Sitges*, dirigida por el arqueólogo Pere Izquierdo i Tugas, según la resolución de autorización de intervención arqueológica preventiva registrada en el expediente 470 K121 N-780 2015/1 (12155), la cual realiza la revisión arqueológico submarina de la costa de Sitges, desde las cuevas prehistóricas del Garraf y Colls Miralpeix hasta el estudio de la arqueología naval moderna de los barcos en el siglo XVII.

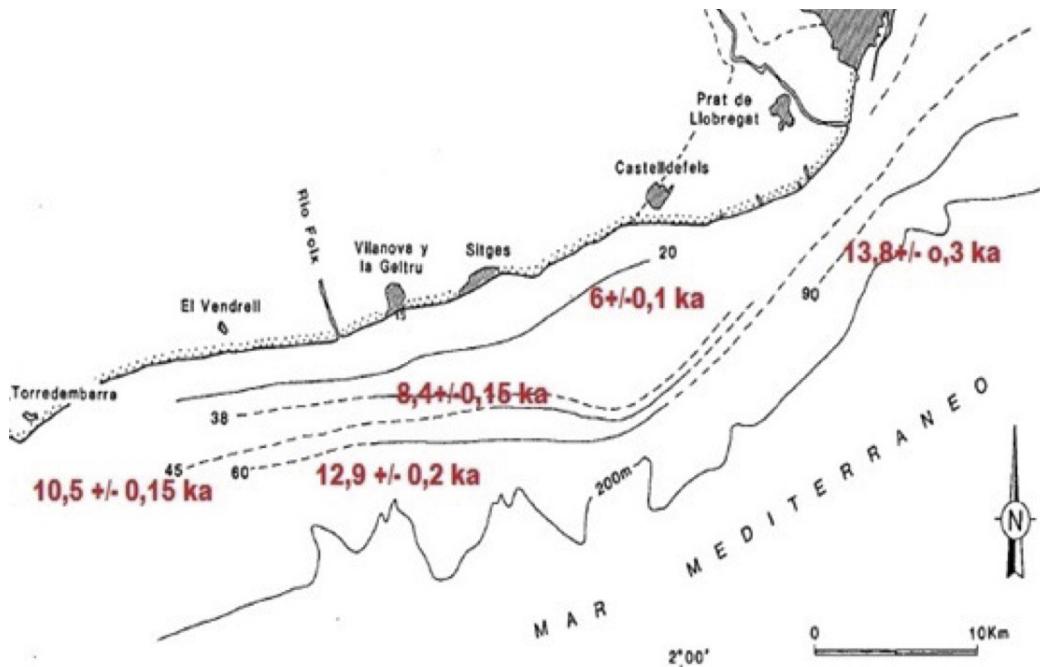
La finalidad última del proyecto Falconera, era conocer qué metodología de trabajo era la más adecuada y segura en la investigación arqueoló-

gica de esta cavidad, para saber si esta cueva sumergida llegó a estar habitada o si fue utilizada de forma eventual como punto de abastecimiento de agua dulce. Se sabe que de manera cronológica, durante el último estadio glaciar WÜRM, el nivel medio del mediterráneo descendió hasta valores que oscilan los -100 a -140 m respecto a la actualidad (Clark *et al.*, 2009) por lo que para gran parte de la historia de la humanidad (90 %) los niveles del mar han dejado grandes extensiones de terreno expuestos, en los que los seres humanos probablemente encontraron lugares de asentamiento cerca de la costa (Arias, 2020).

Desde entonces, la tendencia general ha sido el calentamiento y la consecuente transgresión marina que ha contribuido a inundar las cuevas litorales de la Península Ibérica, donde sus formaciones carbonatadas han permitido que se desarrolle un importante sistema cárstico (Ginés *et al.*, 2012).

Es por esta razón que la mayor parte de las cuevas que hoy se encuentran inundadas, presentan características iguales, tanto en la Prehistoria como en época histórica (Flemming y Antonioli, 2017).

Además, muchas de las grandes transformaciones en la Prehistoria se dieron cuando el nivel del mar era más bajo que en la actualidad (Figura 3); como los orígenes de la pesca o los comienzos de la navegación, lo que nos hace pensar que probablemente todavía estamos lejos de entender a las



**Figura 3.** Reconstrucción de la línea de costa durante la transgresión versiliana con relación a los niveles de estabilización marina. Última transgresión marina registrada en el Mediterráneo desde la última glaciaciación (Würm reciente); de 17.000 a hasta la estabilización de hace unos 5.000 a BP.

primeras poblaciones que vivían en la Península Ibérica (Guerrero, 2006).

### **3. La Cueva de la Falconera. Un proyecto de prospección arqueológica en una cavidad sumergida con agua contaminada**

#### **3.1. Historia de la exploración de la cavidad y la problemática de la topografía subacuática**

De todas las cuevas que contiene el Macizo del Garraf, sin duda, la que muestra más interés y complejidad es la Cueva de la Falconera, debido a la sima de 22 metros en vertical que le da acceso desde la parte superior de la roca, originada por filtración del agua procedente del Torrente de la Falconera.

Desde la antigüedad, los pescadores de la costa del Garraf conocían la existencia de diferentes manantiales de agua dulce que brotaban de la montaña y se extendían de manera notoria mar adentro, los cuales eran visibles gracias al cambio de tonalidad del mar que provoca la salida de agua dulce de la roca. La explicación a semejante fenómeno hay que buscarla en la filtración del agua de lluvia a través de la roca calcárea, que hace que se acumule un gran depósito en los niveles freáticos internos. De hecho, de las diecisiete surgencias conocidas en la costa del Garraf, desde Punta Ginesta hasta el Puerto de Aiguadolç, la más importante es el de la Falconera ubicada en el Paso de la Mala Dona.

El hecho de verter al mar más de 85.000 metros cúbicos diarios de agua dulce llamó la atención en 1899 del empresario Eusebi Güell (1846-1918) quien trató de explotar las surgencias de la cavidad para su comercialización, a través de la Compañía de Aguas de Begues, y así intentar abastecer de agua potable a la ciudad de Barcelona. Los trabajos y estudios de captación del agua se le encargaron a Silvio Thos i Codina, que excavó cuatro pozos artificiales siendo el más importante el pozo de l'Eusebi, con una profundidad de 60 metros, y diversos túneles en la roca dentro de la montaña. Finalmente, se descubrió que la verdadera fuente de agua estaba dentro de la misma cueva, bajo el nivel del mar, lo que hizo que cuatro años después se abandonara el proyecto, desviando el agua desde Montcada hasta Barcelona para el abastecimiento urbano (Aymami, 2007).

Como indica la base de datos y el registro espeleológico de la página web Espeleoindex (<https://www.espeleoindex.com/>) en el año 1953 comen-

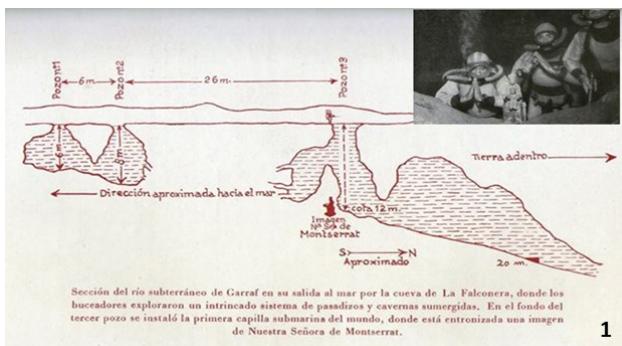
zaron las exploraciones espeleológicas subacuáticas en la cavidad, en las que se fueron realizando una serie de topografías muy básicas de la cavidad que ayudaron a la comprensión de ésta desde un punto de vista técnico, pero no científico (Figura 5.1). Ese mismo año y gracias al uso de escafandra autónoma, el espeleólogo Antonio Ballester y el buceador del Centro de Recuperación e Investigación Submarina (CRIS), Eduard Admetlla hicieron la primera inmersión subacuática alcanzando los 20 metros de profundidad (Figura 4.1). En 1960 se produjo una exploración subacuática a gran escala llamada Operación Tritón y entre 1966 y 1969 se realizan diversas exploraciones hasta llegar a los 30 metros de profundidad. Sin embargo, no fue hasta los años 70 cuando tuvo lugar la campaña "Garraf 70" en la que se recorrieron 350 metros de galerías inundadas y se alcanzaron los 40 metros de profundidad (Cardona, 1990; Ferrer, 2006; Marques, 1988;) (Figura 4.2).

En 1972 se inició la construcción del vertedero de basuras de la Vall d'en Joan, cerca de Garraf, y a los pocos años la contaminación del agua de la Falconera ya era una realidad. A pesar de estas circunstancias, miembros del Espeleo Club de Gràcia (ECG) decidieron emprender de nuevo las exploraciones subacuáticas y en diciembre de 1988, el espeleo-buceador francés Jean Louis Camus y Javier Garza hicieron un primer reconocimiento y, pese a que la visibilidad no superó los 2 metros, se dieron cuenta de la magnitud de la galería.

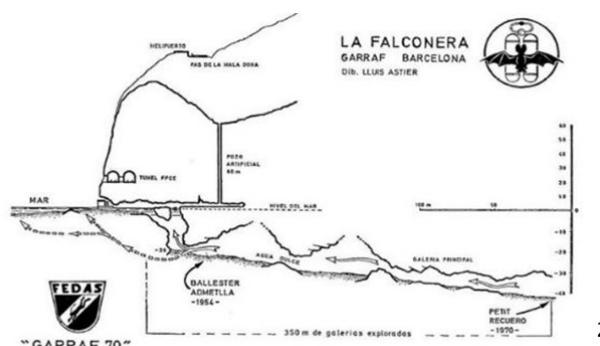
Poco después, Garza instaló 145 metros de hilo guía a fin de preparar una próxima inmersión de J.L Camus con medios más sofisticados. Esta se llevó a cabo en enero de 1989 y sorprendentemente, en contra de lo que hasta ese momento se sabía por la topografía de Petit-Recuero, la galería se cerró en su totalidad a los 200 metros; en este punto, un enorme pozo de unos 20 metros de diámetro supuso la continuación en vertical de la cavidad (Figuras 4.3 y 5.2).

En marzo de 1989, cuando J. L. Camus, con un espectacular equipo con mezcla de gases y oxígeno, para realizar la descompresión, inició la inmersión en la galería al fondo del pozo, pero al llegar a los 81 metros de profundidad la falta de visibilidad y un suelo formado por un profundo sedimento fangoso le hicieron desistir y volvió a la superficie sin conseguir la progresión buscada.

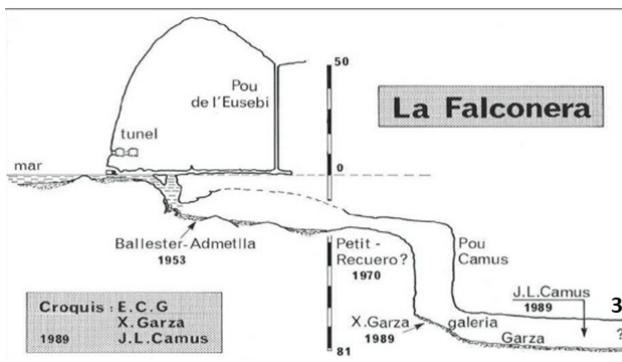
Posteriormente, se han realizado nuevas inmersiones, pero ninguna ha llegado a la importancia de la del año 1989, al tratar de buscar la "miste-



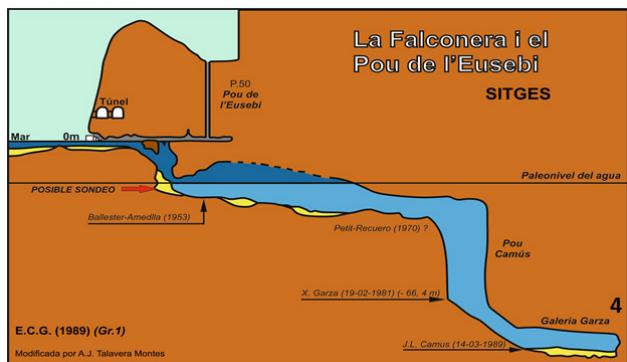
1



2

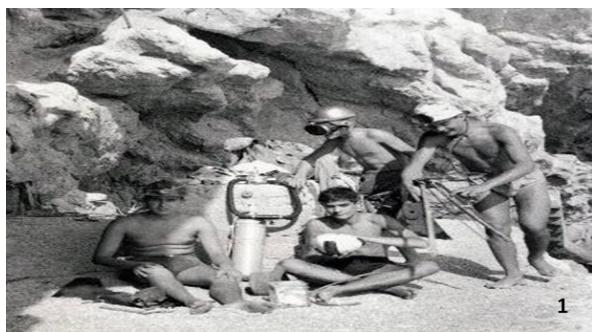


3

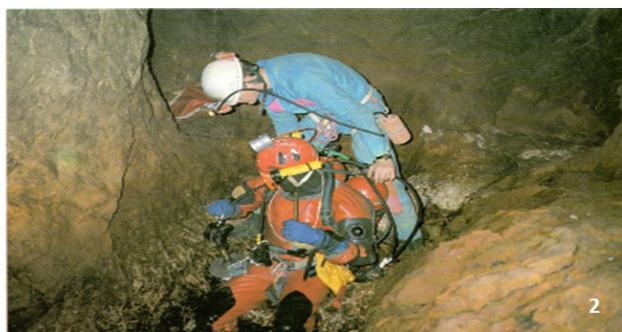


4

**Figura 4.** 1. Primera topografía de la Falconera realizada por E. Admetlla en 1954 donde aparece la sección del río subterráneo del Garraf en su salida al mar (Fuente: Espeleoindex). 2. Topografía de la Falconera realizada por el equipo de Garraf 70 de FEDAS (Fuente: Archivo FEDAS). 3. Croquis esquemático de la Falconera realizado por el equipo de X.Garza y J.L. Camus por el Espeleo Club de Gràcia (ECG) en 1989. Fotografía de Joan Perona (Fuente: Cardona, 1990). 4. Croquis esquemático de la Falconera realizado por A.Talavera donde se defiende la hipótesis de la cavidad como punto de aguada.



1



2



3



4

**Figura 5.** 1. Primeros espeleo-buceadores en las Cuevas del Garraf en el año 1960, F. Villate, A. Carreras, R. Lario, J. Bruguer (Fuente: Ramon Canela, G.E.B). 2. Campaña de trabajo topográfico de 1989 (Fuente: Archivo ECG. Espeleo Club de Gràcia). 3. Salida de agua dulce contaminada por la boca de la Cueva de la Falconera. 4. Vertido al mar de miles de toneladas de aguas contaminadas procedentes de los niveles freáticos a través de la surgencia de la Falconera.

## Métodos y técnicas de prospección topográfica aplicada a la arqueología en cavidades cársticas sumergidas con visibilidad cero. El Proyecto Falconera

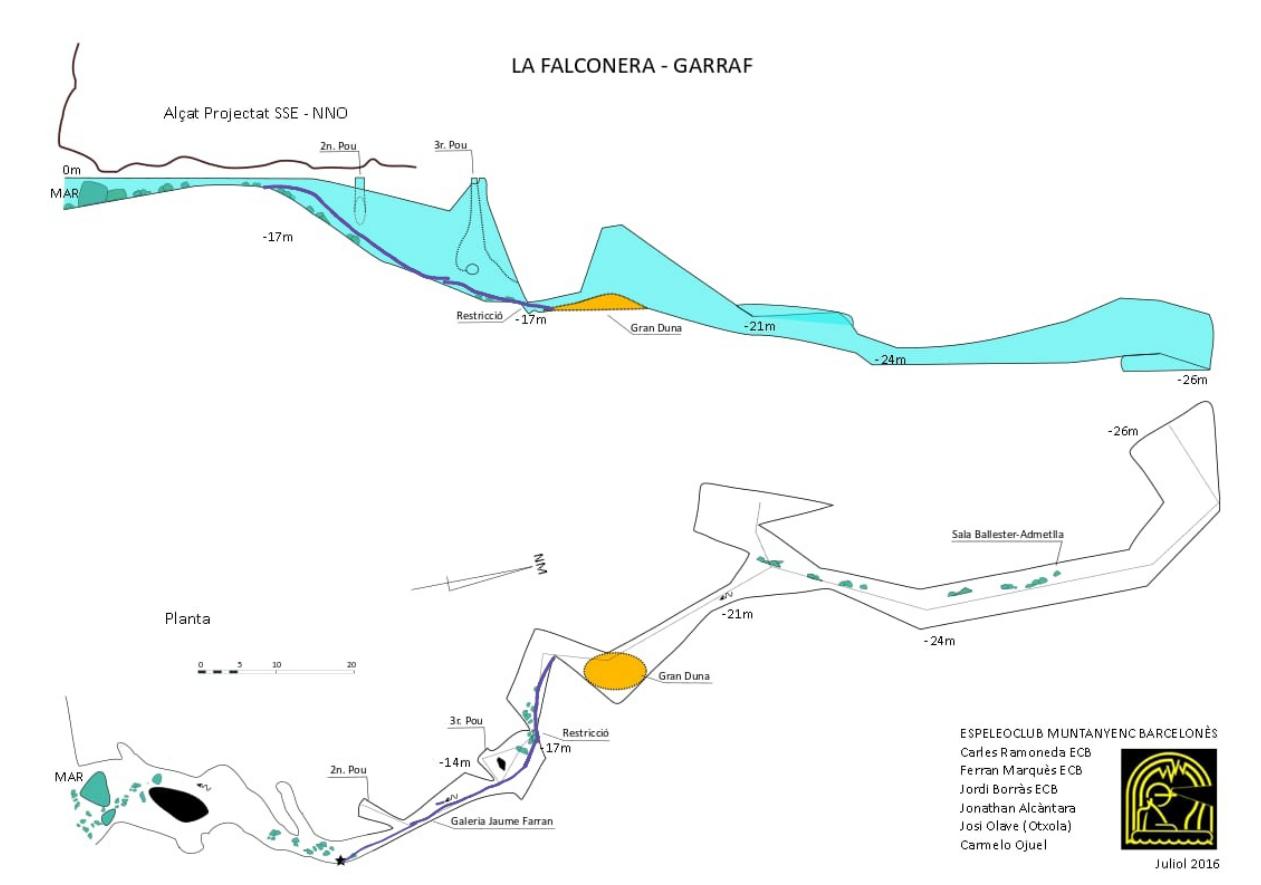
riosa" galería Petit-Recuero, sin resultados (Ferrer, 2006) (Figura 4.3).

Finalmente, no fue hasta el año 2016 cuando el equipo de espeleobuceo del Espeleo Club Muntanyenc Barcelonés (en adelante ECMB) formado por Carles Ramoneda, Ferrán Marqués Artero, Jordi Borrás, Jonathan Alcántara, Carmelo Ojuel y Josi Olave (Otxola) realizaron una nueva topografía actualizada de los primeros 140 metros de la cavidad (Figura 6).

Gracias a la reciente topografía del ECMB se pudo analizar y estudiar las posibles áreas de prospección arqueológica en las galerías de entrada a la cavidad. El estudio realizado por el ECMB no solo indicó, aproximadamente, la posición dentro de la cavidad de la primera restricción, ubicada a -17 metros, sino que, también señaló la existencia de una gran duna de arena que, al depender de si la cueva está en carga o descarga del agua acumulada en los niveles freáticos internos de la montaña, obstaculiza el paso a la Gran Sala de Balles-ter-Admetlla, lo que es muy importante dado que

modifica de forma considerable la morfología de la cueva, al depositar o extraer toneladas de arena acumuladas en su interior.

La proyección de una ruta de prospección, pretendida por el Proyecto Falconera, no solo necesitaba del conocimiento de una topografía actualizada, sino también de unas coordenadas tanto de la entrada como de la zona interior que permitieran medir distancias, georreferenciar, geolocalizar y acotar una posible área de prospección arqueológica, la cual debería quedar posteriormente definida sobre un mapa geográfico u ortofoto y sobre una topografía clásica. Para esto, se debía mejorar de forma científica la topografía existente con un método que permitiera la visualización 3D de la parte de la cavidad que interesaba prospectar, a la vez que, conseguir unas mediciones mucho más rigurosas y exhaustivas que las consultadas en fuentes anteriores, obtenidas manualmente a través del cálculo de los poligonales de las paredes de la cavidad respecto al hilo guía (Huber, 2012).



**Figura 6.** Topografía más actual de la Cueva de la Falconera realizada por el equipo de espeleobuceadores del Espeleo Club Muntanyenc Barcelonés (ECMB).

### 3.2. Hacia una hipótesis de estudio arqueológico

Después de contextualizar la Cueva de la Falconera, como una cavidad explotada por sus recursos hídricos y al conocer el gran caudal de agua dulce que brota de las entrañas de la montaña en su parte sumergida, se debe entender la importancia que pudo tener en el pasado prehistórico semejante fuente de agua dulce para los antiguos pobladores del Garraf. Para esto, es necesario responder a la pregunta, ¿dónde investigar?, lo cual equivale a ¿dónde prospectar? La respuesta a esta pregunta no es sencilla, si no se genera una reflexión sobre la importancia de esta cueva en la antigüedad y su relación con los hábitats circundantes.

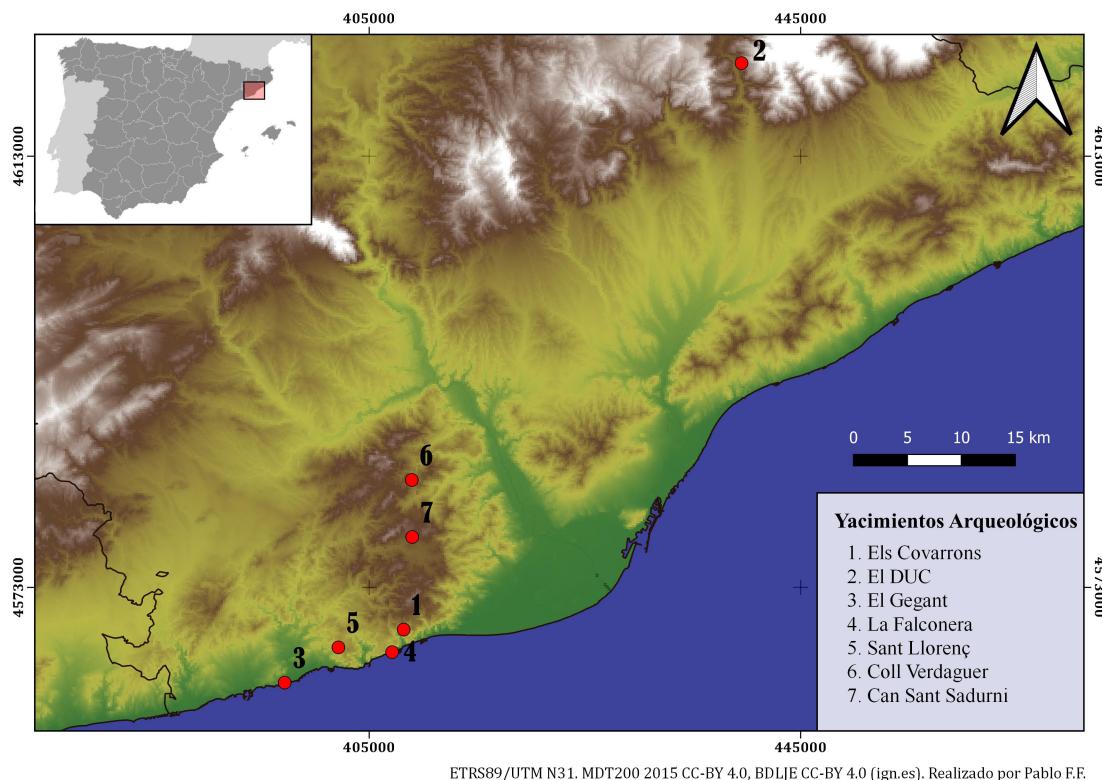
Los estudios geológicos llevados a cabo hasta ahora señalan que el mínimo isostático fue hace unos 25000 años, coincidiendo con el máximo glacial global, con un mínimo de 120 metros del nivel del mar por debajo del actual y con las costas alejadas, unos 10 km delante del lugar en el que está ahora la línea costera del Garraf (Clark *et al.*, 2009) (Figura 3). A partir de entonces, el mar vuelve a subir, al conseguir momentos de estabilización en los que se fueron formando los deltas actuales, hasta llegar a la cota actual. En aquel momento, toda la plataforma continental era una gran llanura esteparia, la cual formaba un paleo-valle surcado por el río Llobregat, siendo la Cueva de la Falconera el lugar donde iba a parar toda el agua del llamado Cañón del Foix (Checa *et al.*, 1988; Gàmez, 2007) (Figura 2). Con toda seguridad, había varias surgencias que seguían el valle, al abrigo del risco de la montaña, en la que se encontraba la Falconera, la cual era una antigua surgencia abandonada, un conducto en seco que podía actuar de aliviadero en épocas muy lluviosas (Figura 8.1). Esta es una de las razones por la que la plataforma marina está cubierta de sedimentación fina, arenas y limos, muy recientes. La Falconera podría haber sido una cueva con una zona interior anegada, quizás, accesible hasta un pozo inundado, al depender del nivel marino, puesto que cuanto más bajo estuviera éste, más abajo entraría el agua interior y más lejos las fuentes relacionadas. Sin duda, en los momentos más húmedos los caudales podían ser importantes y hacer manar la cueva como un aliviadero. La boca de la cueva era mayor que ahora y con varios accesos que se unían a la sala que da paso a la parte inundada, por lo tanto, la habitabilidad y la luz dentro de la entrada eran mucho mejores que en la actualidad.

Además, tal como se ha comentado, la zona del Garraf, alberga yacimientos arqueológicos y paleontológicos de diversa importancia en cuevas terrestres cercanas a la Falconera (Daura, 2009), como la Cueva de San Llorenç (Ferran Borrell *et al.*, 2016), la Cueva de Sant Sadurní (Millán *et al.*, 1981) o la Cueva dels Covarrons (Virella, 1980), lo cual nos indica la importancia de esta zona en la captación de recursos hídricos y alimenticios (Figura 7).

Por otro lado, son abundantes los estudios donde se señala la importancia arqueológica de las cuevas litorales en la Península Ibérica (Arias, 2020), ya sea como puntos de abastecimiento de agua para navegantes y pobladores cercanos a las surgencias, como el caso de la Cueva de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia, Mallorca) (Gracia, 2001) y la Cueva de Sa Gleda-Camps des Pou (Manacor, Mallorca) (Gràcia *et al.*, 2010) o como cuevas refugio de hábitat temporal, como la Cova del Gegant (Sitges, Barcelona) (Daura y Sanz, 2014), la Cueva de los Aviones (Cartagena, Murcia) (Montes, 1991), la Cueva C6 (Águilas, Murcia) (Nicolas, 1987) o la Cueva de Vanguard (Gibraltar) (Stringer *et al.*, 2008). En nuestro caso, y aunque toma fuerza la consideración de un posible uso de abastecimiento de agua dentro de la cavidad, vista la importante actividad de los primeros pobladores del Garraf en su área periférica, la hipótesis arqueológica de la Falconera tan solo se validaría si en el interior de la cavidad se encontraran indicios de ese uso antrópico, para lo cual sería necesario realizar una serie de cores estratigráficos en nuestra área de intervención concreta (Figura 4.4).

### 4. Características técnicas de los dispositivos utilizados en la prospección arqueológica subacuática

Tras analizar los diferentes estudios paleo climáticos se dedujo que el nivel paleo-freático del agua dulce dentro de la cueva podría haber sido el mismo que el nivel del mar, aumentando considerablemente en épocas de fuertes lluvias, cuando las aguas del arroyo de la Falconera desembocaban en la cueva. Así, con esta hipótesis de estudio, y siguiendo las directrices de los estudios de Flemming (Flemming y Antonioli, 2017) y Moyes (Manning, 1999), los restos arqueológicos, tanto cerámicos como líticos, que se pudieran conservar en el interior de la cavidad deberían permanecer enterrados bajo la capa de arena en una zona de



**Figura 7.** Mapa de las cuevas cercanas donde se han encontrado restos arqueológicos alrededor de la cavidad de la Falconera (Fuente: Pablo Fraile).

abrijo de la denominada "Galería Jaume Ferran" (Figuras 4.4. y 6).

Elegido el sector o segmento de la cavidad de interés, quedaba tan solo responder a las preguntas ¿cómo prospectar? y ¿cómo registrar adecuadamente la ubicación de esa prospección? Para esto, se debía conocer la estrategia de trabajo que comprendiera el conocimiento del área de intervención y la organización en la distribución de éste, sabiendo que la técnica más eficaz siempre es el muestreo sistemático, tal como indicó el arqueólogo británico Colin Renfrew en su obra *Arqueología. Teorías, Métodos y Práctica* (Renfrew y Bahn, 2004).

La obtención de una geolocalización rigurosa dentro de una posible área concreta de intervención y sondeo se consigue, habitualmente, a través del cálculo de la poligonal y suele realizarse con un mínimo de tres espeleo-buceadores, dos de cuales lanzan desde un punto concreto de la línea guía, una segunda línea secundaria que debe medirse en longitud, profundidad y dirección hasta llegar al lugar específico. De esta manera, uno de los tres espeleo-buceadores siempre permanece en la línea principal, por razones de seguridad, pasando a realizar asistencia o ayuda si los otros dos no res-

petan los tiempos indicados en el *briefing* realizado antes de la inmersión (Huber, 2009). Desafortunadamente, la pésima visibilidad habitual en la Falconera no permitía realizar esta técnica con las garantías de seguridad necesarias, haciendo necesario descartarla.

Para conocer la metodología adecuada en un estudio tan específico como el que se pretendía llevar a cabo en este proyecto y con el objetivo final puesto en la creación de un patrón de trabajo efectivo, riguroso y breve, era necesario la utilización de herramientas y dispositivos electrónicos que permitieran innovar y aprovechar cada uno de los minutos de la inmersión. Por eso, conocer y localizar cualquier abrigo rocoso dentro de la Galería Jaume Ferran, donde las posibilidades de encontrar remanentes arqueológicos fueran superiores, era la premisa principal.

#### 4.1. Prospección a través de representación digital escalada 3D. El AUV SPARUS II

El uso de los vehículos autónomos subacuáticos (AUV) es una técnica poco usual en el estudio de cavidades sumergidas, debido a la complejidad de su uso dentro de estos ambientes confinados. Los

AUV llevan a cabo sus misiones sin la intervención del operador, completando su trabajo al regresar a una ubicación preprogramada donde los datos se descargan y se procesan los datos obtenidos.

Desde hace unos años se está experimentando con los AUV de un modo notorio y progresivo con la introducción de esta tecnología en proyectos como: el Proyecto DEPTHX en la exploración de los cenotes inundados en México (Kantor *et al.*, 2008), el Proyecto UXNEXMIN basado en el empleo de un AUV con un sonar multihaz en las minas sumergidas de Kaatiala (Finlandia) y de Idrija (Eslovenia) (Martins *et al.*, 2018) o en la creación de imágenes tridimensionales en cuevas sumergidas, al utilizar un mono láser, junto con espejos convexos y sensores CCD sobre un AUV (Wambold *et al.*, 2006).

Actualmente, se ha desarrollado un AUV autónomo denominado SUNFISH (<https://sunfishinc.com/>) capaz de tomar sus propias decisiones más allá de las misiones programadas. Además, es capaz de realizar tareas de exploración en entornos complejos y extremos y encontrar el camino de retorno de forma autónoma mientras obtiene imágenes detalladas, perfiles químicos y mapas de sonar del área explorada (Richmond *et al.*, 2020).

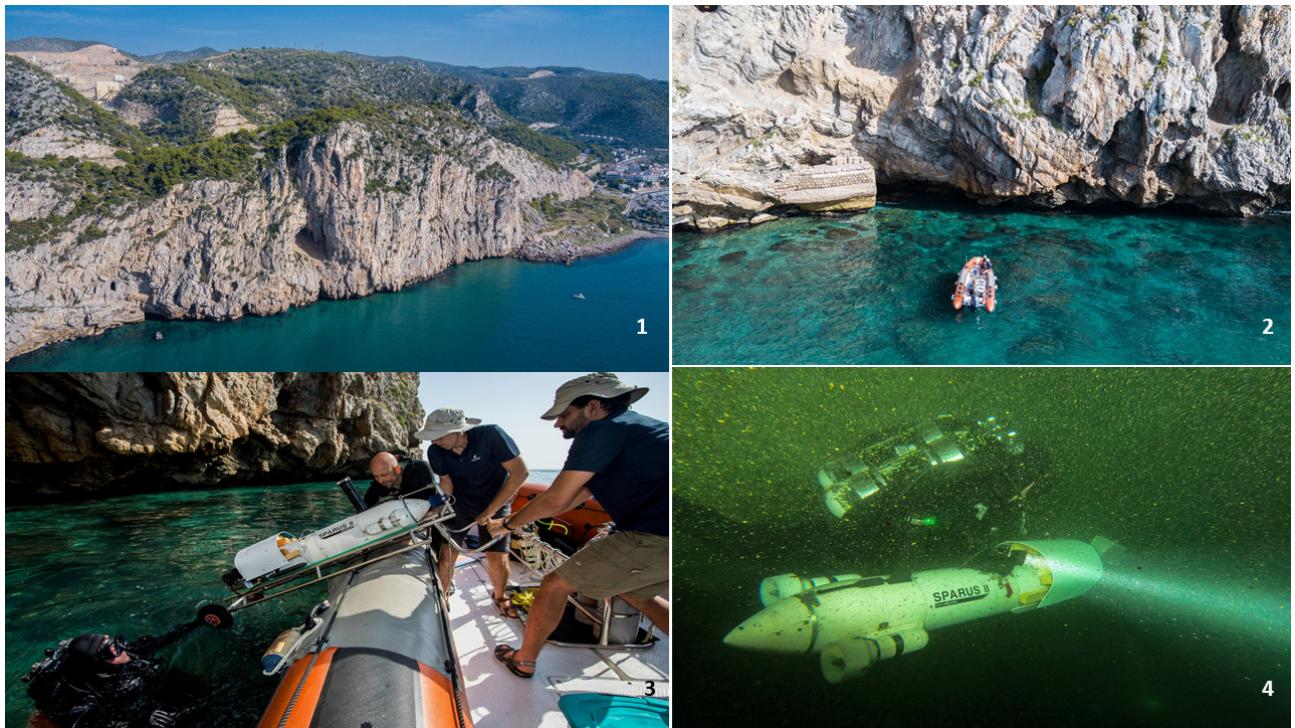
En nuestro caso, y vistos los precedentes en este tipo de prospecciones, se decidió apostar por la introducción de un AUV con una sonda multihaz en la Falconera, como método más eficaz en la consecución de datos. Los sistemas de multihaz utilizan ecosondas cuyos transductores emiten simultáneamente un abanico de ondas acústicas. Estas ondas chocan en el fondo y en las paredes, lo cual provoca un rebote y un eco que es detectado por el receptor, pudiéndose repetir este proceso hasta 100 veces por segundo. Por esta razón, la búsqueda de una localización de resguardo concreta creó la necesidad de utilizar una herramienta de mapeo 3D que generara toda la información de la volumetría de la parte de la cavidad a estudio. Así, después de varias conversaciones entre el equipo de arqueólogos del proyecto Falconera y el equipo de ingeniería del Centro de Investigación en Robótica Submarina (CIRS) del Instituto de Robótica y Visión Computacional (VICOROB) de la Universidad de Girona (UdG), se llegó a un acuerdo de colaboración para introducir un AUV en la cavidad, pero operado de forma manual, con el fin de realizar un mapa 3D de la Galería Jaume Ferran. Esto creó la necesidad de conseguir financiación externa para costear los gastos del trabajo de campo y del procesamiento de datos,

lo cual fue posible gracias a la colaboración del Dr. Florian Huber de *Submaris Scientific Diving Operations* (SUBMARIS), codirector del Proyecto Falconera y científico submarino especializado en ambientes confinados. Gracias a su colaboración se consiguió una subvención económica del Proyecto Europeo de Infraestructuras EU Marine Robots, avalado por la Universidad de Girona, dentro del marco de ayudas europeas a la investigación del Horizon 2020 (Investigación financiada por la Comisión Europea (Comunidad Europea) Programa H2020 bajo el acuerdo de subvención de EU Marine Robots Project nº. 731103).

El AUV del CIRS denominado SPARUS II estaba equipado con una sonda Imagenex Delta T Multihaz, montada en una unidad de giro e inclinación, en la parte frontal del aparato, la cual era capaz de crear una nube de puntos 3D del modelo. Esto se consigue combinando este perfil multihaz, de una apertura de 120 grados, con la trayectoria estimada del robot, que se calcula con sus sensores de navegación. De este modo, el módulo de mapeo del SPARUS II crea una representación del entorno, mediante el uso de datos recibidos de forma mecánica por el sonar, proporcionando un rango de información sobre los obstáculos cercanos que, combinados con la navegación del vehículo (posición y orientación), permite el mapeo 3D del espacio tridimensional solicitado, con respecto a una coordenada inercial marco (Carreras *et al.*, 2018) (Figuras 8.2, 8.3 y 8.4).

En nuestro caso, no era posible la introducción del AUV en la cavidad de la Falconera, de forma autónoma, debido a las características de confinamiento y visibilidad específicas de la cavidad. Conocedores de que, si los resultados de las pruebas eran positivos, se dispondría tanto de un modelo tridimensional del primer tramo como de un mapa de cualquier estructura antrópica de la Galería Jaume Ferran e, incluso, de la surgencia de agua dulce procedente del macizo del Garraf. El único problema se planteaba en la metodología por utilizar al introducir el AUV dentro de la cavidad sumergida, puesto que, el dispositivo no era capaz de entrar y salir de modo autónomo, lo que invalidaba el modelo de trabajo. Tras varias deliberaciones con el equipo de espeleo-buceadores, se decidió que éstos guiarían el aparato durante la inmersión, llevándolo de forma manual, en flotabilidad neutra, durante todo el recorrido por la galería hasta llegar a la primera restricción (Fig. 8.4).

Además, para lograr resultados óptimos, se ne-



**Figura 8.** 1. Vista general del macizo del Garraf y entrada a la Cueva de la Falconera. 2. Entrada por mar a la cavidad de la Falconera. 3. Equipo del CIRS ubicando el SPARUS II en el agua. 4. Espeleo buceador guiando al SPARUS II dentro de la cavidad (Fuente: Fotos realizadas por Florian Huber para el Proyecto Falconera).

cesitaba la obtención de una nube de puntos tridimensional que creara un modelo 3D, para esto, el SPARUS II debía dar una vuelta completa de 360 grados cada varios metros de avance.

#### **4.2. Topografía de mapeo por hilo. MNEMO**

Desde un punto de vista objetivo, toda prospección arqueológica topográfica subacuática necesita de varios requisitos para que muestre fiabilidad y rigurosidad a partes iguales. Los métodos indirectos planimétricos deben ir siempre ligados a una geolocalización exacta, cosa que no es fácil de conseguir en ambientes confinados sumergidos. Por este motivo, los trabajos de sondeo multihaz 3D del AUV debían ir georreferenciados por una coordenada de inicio y final que mostrara, sobre el mapa geográfico y sobre la topografía subacuática manual, qué área de terreno había sido prospectada y qué coordenadas exactas tenían los posibles puntos de interés. Además, esa coordenada interior serviría como referencia inicial o punto 0, ante una nueva prospección arqueológica, puesto que está la capacidad de transportar a SIG la geolocalización exacta de la dispersión de los materia-

les arqueológicos encontrados.

Para solucionar la problemática de georreferenciación, se utilizó el mapeo por hilo mediante el uso del dispositivo MNEMO, desde la sala denominada Estany Blau o sala de entrada, hasta la primera restricción a la Sala Ballester-Admetlla (Figura 6). Para ello fue necesario lanzar una línea secundaria que uniera el muro de contención de la entrada desde el mar, como coordenada tomada en el exterior, hasta el final de la Sala del Estany Blau, justo en el punto en el que comienza la línea fija o hilo guía anclada a la pared de la cavidad, en la Galería Jaume Ferran, y que se dirige hacia la restricción.

El mapeo por hilo se realizó con el MNEMO, el cual es un dispositivo comercial de prospección por línea, inventado por el ingeniero francés Sébastien Kister (<https://www.arianesline.com/>) capaz de realizar un mapeo de la cueva a través del seguimiento del hilo que sirve a los espeleo-buceadores para guiarse dentro de la cavidad. Con un peso de 540 gramos, una flotabilidad en agua dulce de 50 gramos y un tamaño de 13x10x5cm, este dispositivo hecho con Acetal, PTFE, ABS y epoxi cristalino puede alcanzar una profundidad de 130 m. Para que el MNEMO realice una lectura

correcta, es necesario unos requisitos de la línea colocada en la cueva, como un grosor de línea de entre 1 a 5 mm, nudos menores de 5 mm y una tensión mínima de al menos 5 newtons. Gracias a sus sensores de altimetría de alta resolución con compensación de temperatura, el aparato puede hacer un cálculo exacto de la profundidad a la que está trabajando en todo momento (Kister, 2017).

Por otro lado, la longitud de la línea se calcula gracias a un detector óptico infrarrojo del codificador de cuadratura y el rumbo e inclinación se calculan a través de un sensor inteligente de orientación de 9 ejes. A todo esto, hay que añadir una memoria para, aproximadamente, unos 5000 disparos o *tracks*, los cuales se pueden calcular al sumar el número de veces que el MNEMO es capaz de realizar lecturas de medición de la línea con distintos parámetros, ya que cada disparo tendrá distintas variables en su acimut, profundidad y distancia (Figura 11.1).

De esta manera, MNEMO registra la longitud, el ángulo de profundidad, la inclinación al principio y al final del disparo y el acimut del segmento de la línea a medir al principio y al final del disparo. Estos datos se transmiten a través de un cable USB al ordenador, para integrarlos en su programa de software en línea llamado ARIANE, el cual interpreta los datos del dispositivo y los transporta a un mapa geográfico. Su uso es común en la realización de topografías en cavidades sumergidas por los espeleo-buceadores deportivos, debido a su alto grado de fiabilidad. Además, MNEMO calcula la trayectoria de la línea sumergida de principio a fin, al sumar los diferentes *tracks* o disparos de ésta. Finalmente, se introducen los datos del dispositivo en el software mencionado y se introduce una coordenada de entrada a la cueva. Una vez hecho esto, el software es capaz de calcular la línea sobre un plano geográfico.

## 5. Resultados de la prospección arqueológica subacuática. Objetivos y metodología usada en los trabajos de campo

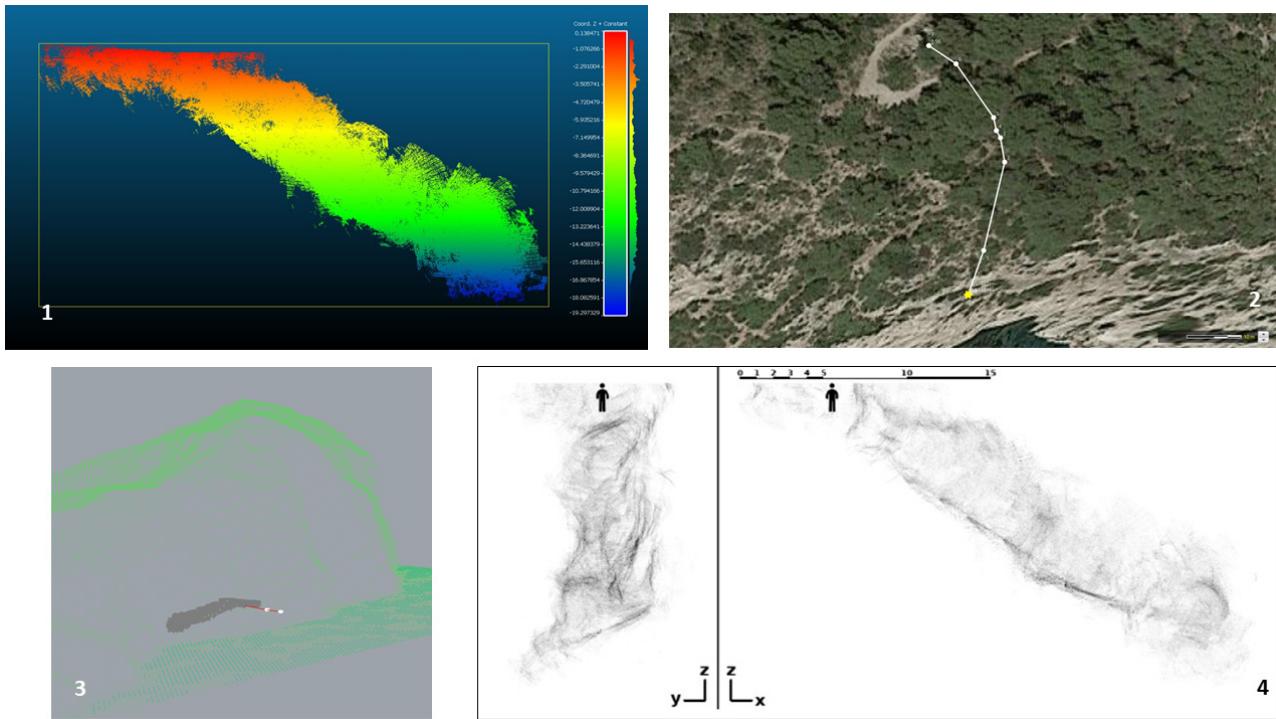
Los trabajos prospectivos realizados en la cavidad tuvieron que cumplir unas premisas previas para su buena organización y logística. Estos factores extrínsecos fueron: una térmica favorable, un oleaje mínimo, un momento de estiaje en la surgenza interior de agua dulce y un nivel de contaminación y percolación de la cueva óptimo, al permitir una visibilidad mínima aceptable.

### 5.1. Método prospectivo de mapeo volumétrico con ecosonda multihaz. SPARUS II

Tras un primer reconocimiento de la cavidad, se dio vía libre a la introducción del AUV y, para ello, se programó el SPARUS II para que la sonda multihaz, a cada barrido, cambiara su rango de 5, 10 y 20 metros, al hacer girar de forma manual el lector colocado en la parte posterior del AUV 360 grados cada 5 metros y así, conseguir que el sonar pudiera realizar la volumetría entera de la Galería Jaume Ferrán. La finalidad última era obtener un mapa completo de la galería con cada uno de los rangos y comprobar cuál era el más idóneo, puesto que este tipo de sensor no se había probado en el interior de una cueva.

Los resultados previos, a falta de un posterior procesamiento de los datos, tuvieron una valoración positiva por parte de los ingenieros del CIRS, lo que demostraba ya en un primer momento que la metodología de inmersión era la adecuada y que los sensores del SPARUS II habían funcionado de forma correcta. Una vez de vuelta al laboratorio, los ingenieros del CIRS procesaron los datos al utilizar la reconstrucción en *Dear-Reckoning* (DR), en la que los puntos del multihaz se complementaron con la navegación del vehículo. Una vez obtenida esta representación, la trayectoria se dividió en diferentes partes que, tras un solapamiento de datos, se volvieron a unir tras aplicar una minimización de *Iterative Closest Point* (ICP) para corregir el error de DR (Vallicrosa *et al.*, 2020).

Una vez finalizado el primer procesamiento de datos, en el modelo de nube de puntos, los diferentes colores indicaron las distintas profundidades, siendo las zonas de color rojo las zonas menos profundas y las de color azul las más profundas. Este primer procesamiento de datos ayudó a comprender que la obtención de datos por parte del SPARUS II funcionó de forma correcta y que los puntos lograron la superposición a diferentes distancias al crear una malla tridimensional de la galería (Figura 9.1). La visualización del modelo escalado nos permitió observar un segmento de paredes cársticas lisas a modo de tubo circular de aproximadamente 32 metros de largo, 4'5 metros de ancho y 7 metros de alto, con una cota máxima de profundidad de -17 metros y una orientación SE-NW. Esta sección presentaba leves protuberancias rocosas en el techo, sin espeleotemas, sin abrigos rocosos ni bifurcaciones adicionales ni galerías secundarias y con un suelo cubierto por un



**Figura 9.** 1. Primera toma de datos del SPARUS II con registro de profundidad en diferentes colores (Fuente: Centro de Investigación de Robótica Submarina (CIRS) de la Universidad de Girona para el Proyecto Falconera). 2. Línea del mapeo por hilo realizada por el dispositivo MNEMO realizado por el software ARIANE sobre ortofoto. 3. Solapamiento de la nube de puntos obtenida por el SPARUS II y la línea del MNEMO en perfil del área prospectada (Fuente: Pablo Cantuel). 4. Mapa escalado de los de puntos obtenidos en X, Y y Z de la galería Jaume Ferran (Fuente: CIRS para Proyecto Falconera).

manto de sedimento arenoso, por lo cual el caudal de entrada de agua salada y salida del agua dulce no se veía afectado por obstáculo alguno (Figuras 9.3 y 9.4).

Es probable que, y vista la rapidez en la ejecución de las tareas con el AUV, si la restricción hubiera dado la posibilidad de ser cruzada, el equipo habría sido capaz de extraer mucha más información, dado que la línea guía que atraviesa la restricción del Pas d'en Carles y llega hasta la gran Sala Ballester-Admetlla estaba enterrada por toneladas de arena, por lo que esta tarea resultó completamente inviable (Figura 6).

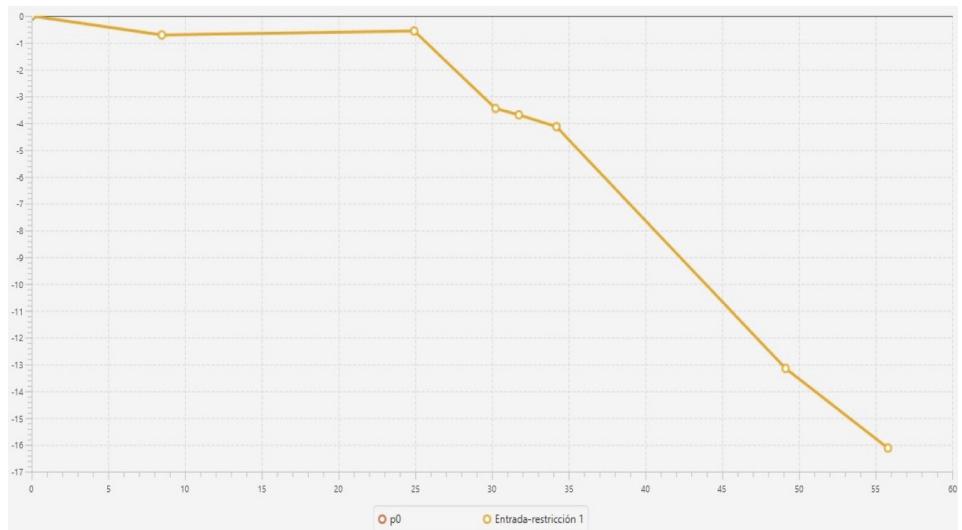
## 5.2. Método prospectivo de mapeo por hilo. MNEMO

Las tareas de sondeo multihaz del SPARUS II se completaron con otras de prospección de mapeo por hilo, al utilizar el dispositivo MNEMO, desde la boca de la cueva hasta la restricción. En primer lugar, se lanzó una línea secundaria desde la entrada aérea hasta la línea guía, la cual comienza

cuando la pendiente es más pronunciada en la Galería Jaume Ferrán. Posteriormente, se continuó con la medición de línea hasta la primera restricción, en el denominado Pas d'en Carles, localización exacta donde acaban también los trabajos del AUV.

La escasa longitud de la línea de mapeo, con tan solo 7 *tracks* o disparos, fue suficiente para conocer la orientación de la cavidad, la profundidad de cada uno de los segmentos mapeados y la distancia recorrida entre cada una de éstas (Gráfico 2). Además, al analizar la desviación del azimut en cada uno de los tracks indicados por el software ARIANE, se pudo comprobar que el margen de error entre la lectura realizada por el dispositivo MNEMO y la topografía manual no era aceptable. Por el contrario, las mediciones obtenidas por el dispositivo de mapeo por hilo fueron similares a las del SPARUS II, respecto a azimut, distancias y profundidad, lo cual validó este modo de lectura y corroboró la rigurosidad en las mediciones tomadas (Figura 13).

La divergencia de datos apareció al superpo-



**Gráfico 2.** Perfil de las mediciones de distancia y profundidad tomadas por el MNEMO desde el Punto 0 en la entrada a la cavidad hasta la primera restricción denominada Pas d'en Carles.

ner en el software ARIANE la topografía realizada por el ECMB con las medidas tomadas con el mapeo por hilo del MNEMO, puesto que éstas no eran coincidentes. En el software, las distancias del dispositivo parecían correctas, aunque había un porcentaje mínimo de error sobre la topografía manual de 5 grados en el azimut en el segmento 3 y 6 (Figuras 9.2 y 13) mientras que el resto de los segmentos no presentaban ningún error de desviación. Este problema en la superposición podría ser causado por la falta de una estación total o GPS diferencial, al tomar la coordenada exacta del punto de partida del hilo, situado en la boca de la Cueva de la Falconera, o por un error en la topografía manual.

### 5.3. La utilización de topografía terrestre de precisión para la obtención de coordenadas

La obtención de una coordenada de inicio rigurosa en la entrada de la cavidad era uno de los problemas más importantes de todo el proyecto, debido a la imposibilidad de utilizar una estación total en esa ubicación y por la obtención de lecturas erróneas con los GPS convencionales al estar la boca de la cueva en la parte cóncava de la roca, al pie del acantilado. Los estudios realizados hasta la fecha habían tomado la coordenada desde una embarcación próxima a la entrada con un puntero láser y extrapolando la medición hasta la ubicación deseada.

Debido a las condiciones de confinamiento de los entornos a levantar, el único modo de georreferenciar la poligonal, es decir, obtener sus coor-

nadas referidas a un sistema de referencia global, era mediante el enlace de ésta con puntos exteriores de los cuales se conocieran sus coordenadas georreferenciadas, obtenidas en superficie terrestre, fuera del entorno confinado.

En este tipo de metodología topográfica se suelen elegir una serie de puntos fijos que rodeen la entrada a la cueva, al ser materializados sobre el terreno mediante el empotramiento de clavos de acero para, al final, realizar sobre ellos observaciones GPS y obtener así sus coordenadas georreferenciadas mediante un levantamiento RTK con posicionamiento en tiempo real y diferencial GNSS, conectado con una Red Geodésica Nacional de Referencia de Estaciones Permanentes (ERGNSS), mediante una solución VRS (Estaciones de Referencia Virtual) (Viva y Gnss, 2020). Desde éstos y por topografía clásica, al utilizar una estación total, se puede obtener las visuales (distancia geométrica, ángulo horizontal, ángulo vertical, altura de aparato y altura de mira) que permiten, mediante una intersección inversa, obtener las coordenadas georreferenciadas (X, Y, H) del primer punto de esa poligonal ubicado, en este caso, sobre un muro artificial realizado en la entrada de la cavidad sumergida. Con lo anterior, se asegura que los errores absolutos de las coordenadas georreferenciadas del primer punto de la poligonal se pueden considerar despreciables, puesto que los errores introducidos por las observaciones, ya en el espacio confinado, serán mucho mayores (Figura 10.1).

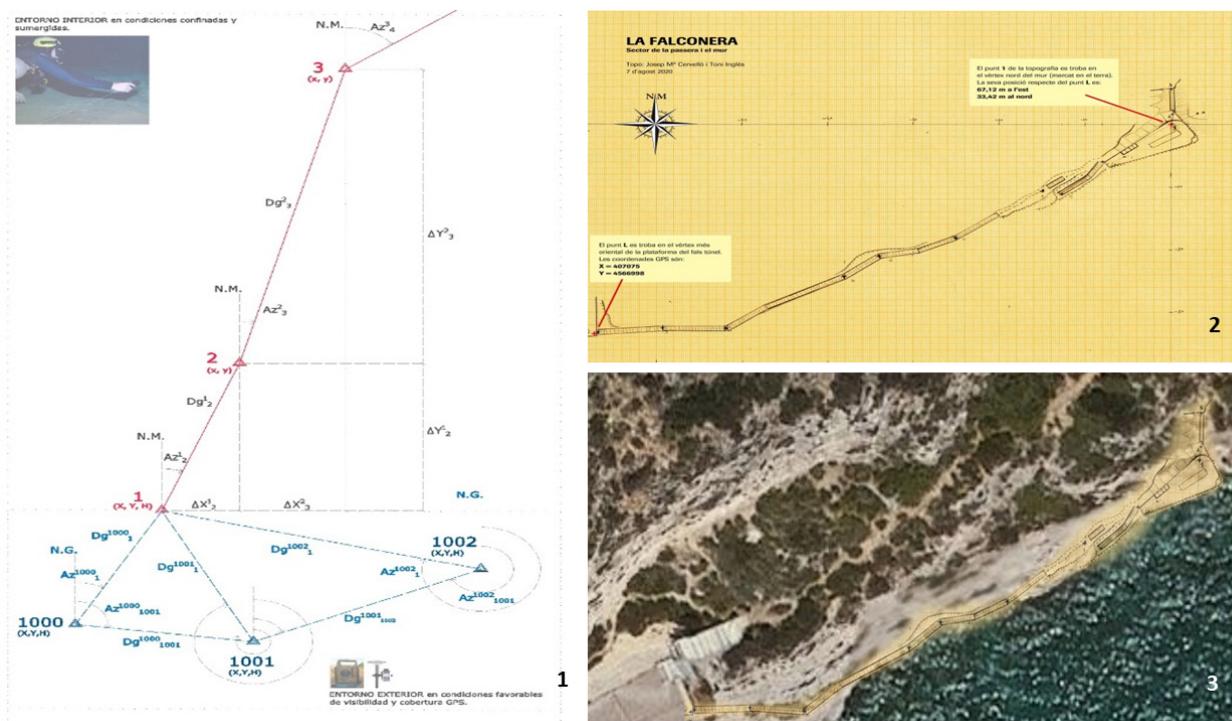
En este caso se utilizó la topografía de precisión, mediante la realización de una poligonal que unía

en superficie dos puntos externos cercanos a la entrada a la cueva. El primero de los puntos con el que se obtuvo la coordenada fue en el Pozo de l'Eusebi, X. 407131,2890, Y. 4567099,2220 y el segundo punto, denominado Punto L, vértice más oriental de la plataforma del falso túnel, en el que se obtuvo la coordenada verificada X 407075, Y 4566998 (Figura 10.3). Esta última coordenada se encuentra con respecto al Punto 1, que marca el punto de referencia de la Falconera, en el vértice, de la plataforma superior del muro realizado por Eusebio Güell en 1890 y el cual está a 67.12 metros al Oeste y a 33.42 metros al Norte (Figuras 10.2 y 10.3). Gracias a la obtención de las coordenadas georreferenciadas de ambos puntos de la poligonal se pudieron georreferenciar todos y cada uno de los otros vértices y conseguir un solapamiento del plano sobre ortofoto. De este modo, se pudo obtener la coordenada de referencia de entrada al espacio confinado, Punto 1, en una cartografía global, concretamente en las coordenadas UTM 31 X 407153.1350, Y 4567019.6980. Este método en la obtención de coordenadas GPS con topografía clásica, ahora exterior, es la solución más eficaz y eficiente.

#### 5.4. Métodos prospectivos manuales complementarios

Tras un análisis previo de la topografía de precisión registrada por el AUV (Figura 9.4), y siendo conocedores de la inexistencia de una zona de resguardo, debido a la homogeneidad de la Galería Jaume Ferran (Figura 9.4), tan solo quedaba complementar la prospección buscando el área con menos potencia de sedimento para la extracción de cores estratigráficos (Figura 4.4).

Recientes estudios publicados en la revista *Journal of Archaeological Science* por los arqueólogos Isaac Ogloblin, Ehud Galili y Ruth Shahack han demostrado la posibilidad de avanzar tanto metodológicamente como técnicamente en los yacimientos costeros sumergidos gracias a la extracción de cores del subsuelo. Su modelo de trabajo para localizar y estudiar asentamientos sumergidos prehistóricos se basa en identificar, ubicar y caracterizar sitios a través de la recolección de cores estratigráficos procedentes de paleosuelos no alterados de áreas expuestas debajo de unos pocos metros de arena, utilizando un sistema de extracción por chorro de



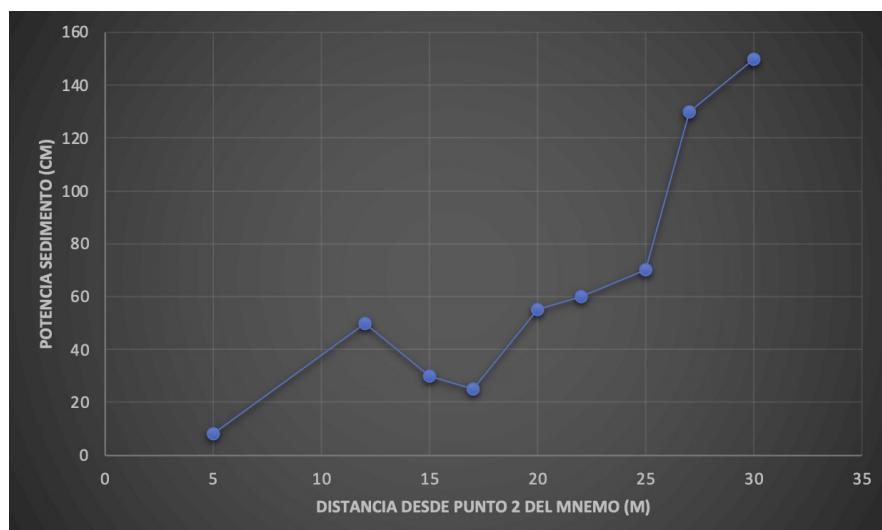
**Figura 10.** 1. Esquema ejemplo del estudio de las poligonales terrestres para la obtención del Punto 1 de entrada a la Falconera (Fuente: Pablo Cantuel). 2. Hoja milimétrica y escalada del perfil de la costa del Garraf y cálculo de las distancias de la poligonal para la obtención de la coordenada Punto 1 (Fuente: Josep María Cervelló y Toni Inglés). 3. Solapamiento del dibujo escalado de la costa del Garraf con los puntos obtenidos sobre ortofoto (Fuente: Josep María Cervelló y Toni Inglés).

agua para, posteriormente, analizar los núcleos o cores extraídos utilizando técnicas micro-geoarqueológicas. El criterio metodológico seguido por estos investigadores se basa en el conocimiento establecido de que, cuando se producen asentamientos humanos, los sedimentos se enriquecen con firmas mineralógicas específicas como los minerales arcillosos calentados o por conjuntos de micro-permanentes antropogénicos como podrían ser los fitolitos, pseudomorfos de ceniza y esferolitos de estiércol. Además, la micro-morfología puede ayudar a identificar patrones micro-estratigráficos típicos de los asentamientos humanos. Este nuevo método facilita el descubrimiento de nuevos sitios submarinos y proporciona criterios de selección, es decir señala la ubicación de la señal antropogénica más alta que, de este modo, permite realizar un cálculo previo de la inversión a desarrollar en la excavación submarina. Además, se puede utilizar tanto para la verificación de señales antropogénicas en lugares enterrados, detectados por teledetección, como para comprender la organización espacial del sitio sumergido (Ogloblin *et al.*, 2021).

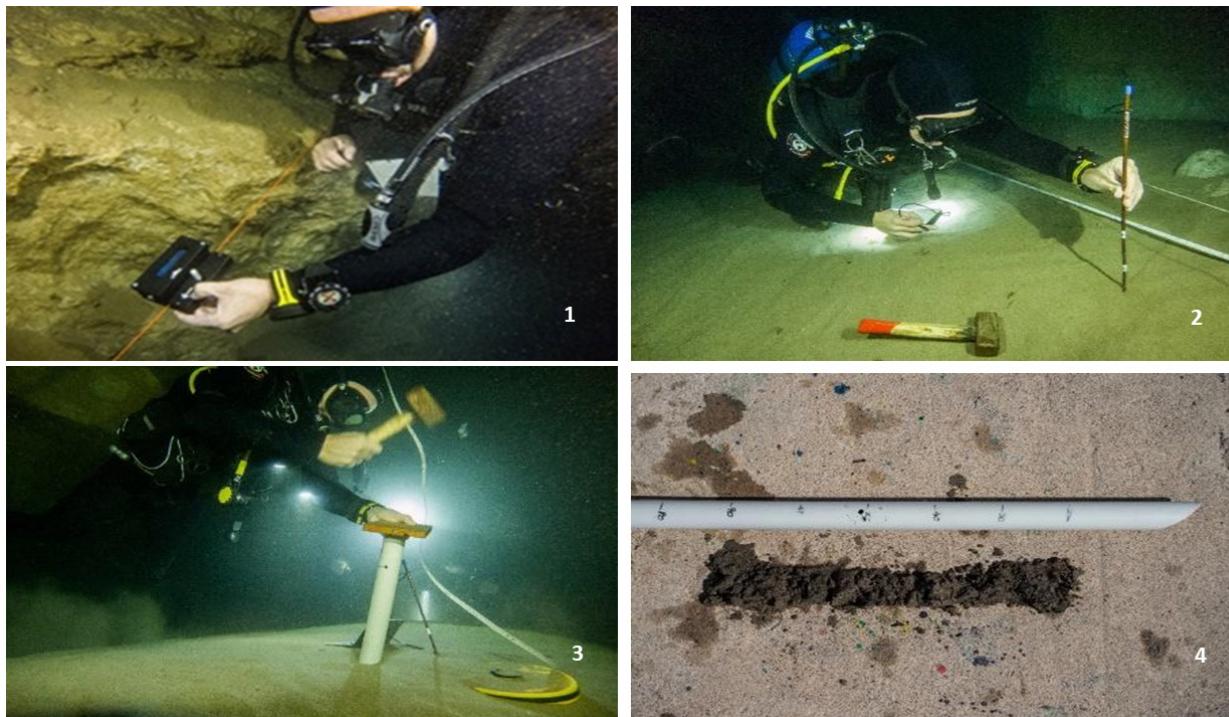
En la investigación llevada a cabo por el equipo de Ogloblin era necesario utilizar métodos que permitieran la extracción bajo el agua de muestras de núcleos sin perturbaciones, aptos para el análisis mineralógico, de micro-restos y micro-morfológico. Para ello se utilizaron tubos de PVC clavados manualmente para extraer depósitos de áreas subacuáticas expuestas y un nuevo sistema de presión usando un chorro de agua en áreas cubiertas de arena, con la intención de alcanzar el paleosuelo enterrado bajo el manto de arena. El poder erosivo del

chorro de agua abría el agujero en la arena y permitía la colocación del tubo de extracción de muestras en el eje paralelo y adyacente a la tubería de chorro de agua, clavándolo con un martillo en el paleosuelo y permitiendo la extracción del núcleo de sedimento intacto (Ogloblin *et al.*, 2021). Es por esta razón que, tras conversaciones con Ogloblin, supimos que este modelo sería perfectamente extrapolable a la investigación arqueológica de la Falconera siempre y cuando supiéramos donde era más fácil y seguro la extracción del core (Figura 12).

De este modo, y a modo de contextualización, se tomaron diferentes mediciones de la potencia sedimentológica tanto en la sala de entrada, o Sala de l'Estany Blau, pasando por la Galería Jaume Ferrán, hasta llegar al Pas d'en Carles o primera restricción (Figuras 9.4 y 11.2). Para esto, se tomó como referencia el punto 2 del MNEMO con coordenadas geográficas 41.249473, 1.891918 señalado mediante un hilo auxiliar a la roca (Figura 9.2). Desde ese punto se lanzó una línea métrica, en paralelo al hilo guía, por la pendiente y se tomó el registro de la potencia sedimentológica arenosa mediante una varilla metálica marcada cada 10 centímetros (Figura 11.2). Esta varilla se iba introduciendo de manera aleatoria mientras se tomaba registro de profundidad y distancia desde el Punto 2. En principio, estas mediciones de la potencia sedimentaria de la arena depositada en la pendiente de la Galería de Jaume Ferrán aumentaban a medida que la profundidad era mayor, pero, al llegar a los 17 metros del punto 2 del MNEMO y a 7.8 metros de profundidad, se encontró una ubicación con potencia débil de tan solo 20 centímetros. Este



**Gráfico 3.** Potencia o grosor del sedimento en centímetros en el interior de la galería Jaume Ferran desde el punto 2 del MNEMO.



**Figura 11.** 1. Espeleo buceador utilizando el dispositivo MNEMO en el interior de la Cueva de la Falconera. 2. Espeleo buceador midiendo con una varilla metálica el grosor del sedimento arenoso depositado en la galería Jaume Ferran. 3. Espeleo buceador realizando un corte estratigráfico mediante la introducción por percusión de un tubo de PVC en el sustrato de sedimento arenoso. 4. Muestra de la homogeneidad del core estratigráfico con la aparición del sustrato arenoso en el interior del tubo de PVC (Fotos realizadas por Florian Huber para el Proyecto Falconera).

punto sería un indicador a favor, para realizar la extracción de un core estratigráfico del paleosuelo y correspondería con las coordenadas geográficas 41.249596, 1.891846 (Gráfico 3).

Finalmente, se recogió una pequeña muestra de sedimento con un tubo de PVC de 6 centímetros de diámetro y 1 metro de largo en el punto 3 del MNEMO, al comienzo de la Galería Jaume Ferrán en las coordenadas geográficas 41.429512, 1.891909 (Gráfico 2). Allí, la potencia del sedimento era de unos 40 centímetros. Esta muestra no fue fácil de obtener debido a la compactación del sustrato arenoso, por lo que fue necesario utilizar mecanismos de percusión directa como un martillo para introducir el tubo de PVC en el manto de arena compactada (Figura 11.3).

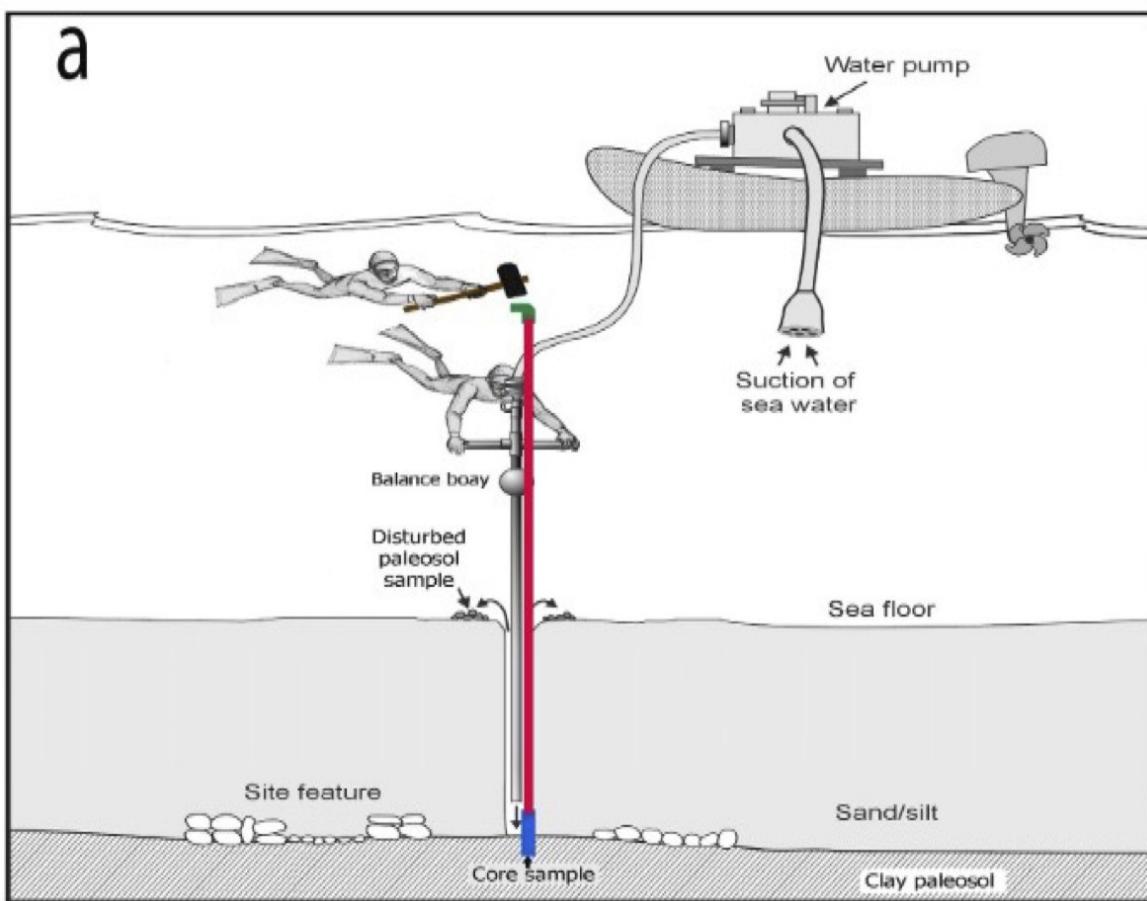
Al extraer el sedimento del interior del core estratigráfico, se pudo comprobar la homogeneidad sedimentaria en esta parte de la cueva, lo que indicó que, para acceder al paleosuelo, se deberán utilizar herramientas específicas que permitan superar esta primera acumulación arenosa, completamente estéril arqueológicamente hablando (Figura 11.4) (Ogloblin *et al.*, 2021).

## 5.5. Análisis de los resultados mediante técnicas SIG

Tras la visualización en SIG del procesamiento de los datos registrados por el AUV SPARUS II, se observó que el modelo de planta coincide plenamente con la orientación y distancias de la Galería Jaume Ferrán, al ser corroboradas las mediciones obtenidas por el dispositivo de mapeo por hilo MNEMO (Figura 13).

Gracias a la toma de mediciones correctas, al geoposicionamiento del Punto 0 de la línea guía, al modelo tridimensional final del SPARUS II y a la georreferenciación de las diferentes coordenadas dentro de la cueva, se pudo realizar las mediciones desde el propio modelo 3D escalado y geo-posicionado (Figura 9.4).

Los resultados obtenidos, tras la visualización de los datos en el SIG, constataron las discrepancias importantes en la topografía del ECMB, desde la entrada a la cavidad hasta la Galería Jaume Ferrán y en el segmento 6 del MNEMO, con una variación hacia el Este de la topografía manual debido a un posible error humano en el cálculo del azimut (Figura 13).



**Figura 12.** Dibujo esquemático que ilustra el funcionamiento del *water jet* o sistema de chorro de agua con una tubería adicional (de color rojo) para la extracción de cortes sedimentológicos (Fuente: Ogloblin *et al.*, 2021).

## 5.6. Resultados finales en la obtención de los puntos de control y referencia

En resumen, y tras toda la recopilación de datos, nos encontramos ante una cavidad con una galería a estudio homogénea y de paredes regulares, lo cual imposibilitó seguir con las indicaciones de los estudios seguidos por Flemming respecto a la búsqueda de una zona resguardada que ampliara las posibilidades de encontrar restos arqueológicos (Flemming, 2014). Las mediciones coincidentes de los dispositivos electrónicos nos indicaron unas nuevas medidas de la cueva que nos permitieron generar coordenadas univocas, lo cual nos autorizó a generar un nuevo plano topográfico viable de interpretación y consulta. Por otro lado, metodológicamente, pudimos corroborar que el primer punto de control se obtuvo a través del cálculo de las poligonales de la coordenada terrestre gracias a la topografía exterior, con un rango de error mucho menor que la topografía interior, ya que los dispositivos utilizados eran de mayor precisión y

exactitud en la consecución del denominado Punto 1 (Figuras 10.1, 10.2 y 10.3). Ese punto era coincidente con el Punto 0 del dispositivo de mapeo por hilo MNEMO como punto de partida (Figura 9.2. y Gráfico 2). Llegado al Punto 3 del MNEMO, comenzó la referencia como punto de partida del estudio volumétrico 3D del SPARUS II en la Galería Jaume Ferrán hasta la primera restricción (Figuras 9.1, 9.3 y 9.4). Y a partir de la referencia del Punto 2 del MNEMO, se realizaron las mediciones de potencia sedimentológica hasta llegar a los 17 metros de distancia de ese punto, por el centro de la pendiente y a 7.8 metros de profundidad, ubicación coyuntural con la potencia de sedimento más débil, de tan solo 20 centímetros, y favorable para extraer un posible core estratigráfico del subsuelo, al corresponder concretamente a las coordenadas geográficas 41.249596, 1.891846 (Gráfico 3).

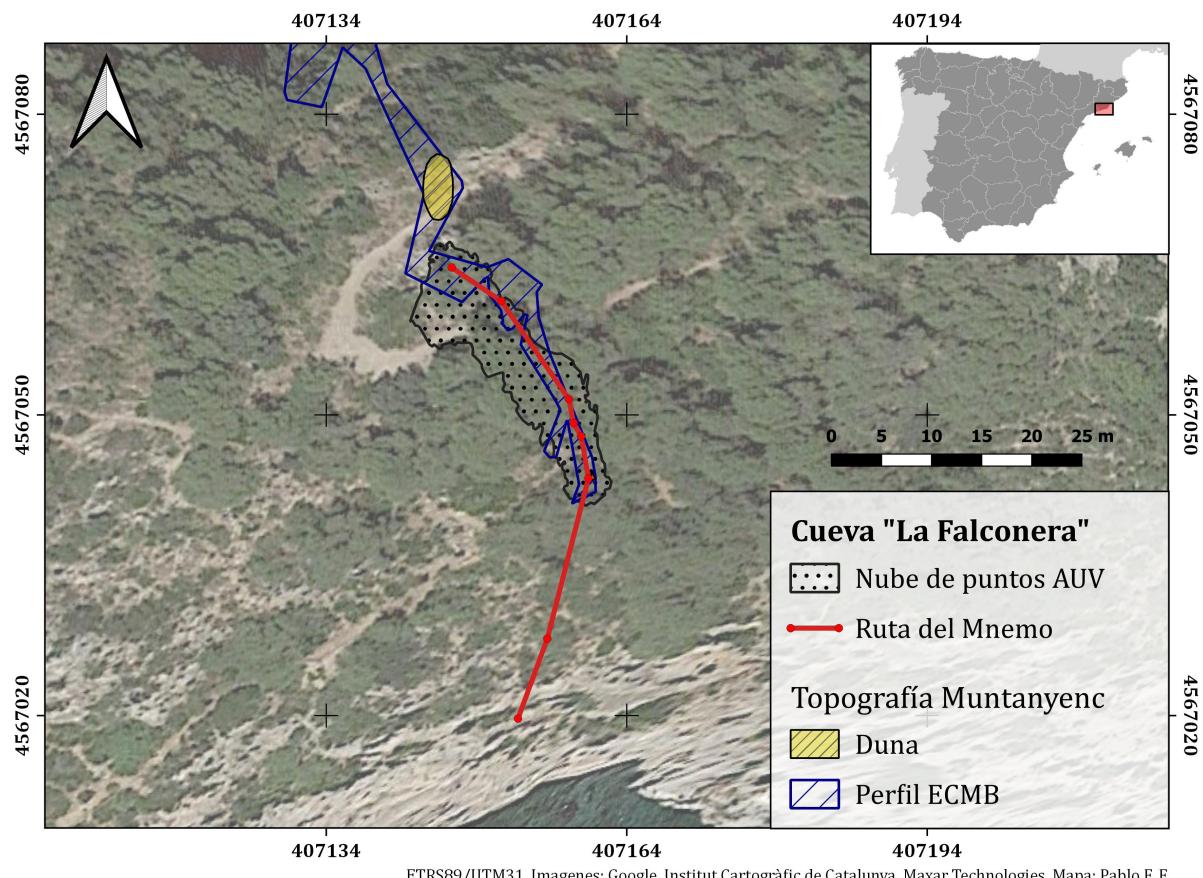
## 6. Discusión

La Falconera es una cueva con una dinámica

cambiente, donde el fuerte oleaje o la alta pluvio-metría pueden modificar totalmente, en pocos días, la morfología interna respecto al grosor de la capa de sedimento arenoso de las galerías internas, lo que provoca la colmatación de las galerías interiores e incluso de la propia entrada a la cavidad (Freixes *et al.*, 2021). Además, y aunque es lógico pensar que el nivel freático de agua dulce, alimentado por las surgencias internas, se ha mantenido siempre constante, debemos considerar también la idea de que es posible que el nivel freático de la cavidad se mantuviera independiente, al ser inferior en épocas de estío y superior en época de lluvias, al llenarse las capas freáticas por la acumulación de las aguas del Torrente de la Falconera. Esta dinámica hidrológica continúa siendo una realidad en la actualidad, dado que, cuando se crea una acumulación de agua en el interior de las capas freáticas, la cueva entra en carga y expulsa a modo de surgencias toda esa acumulación de agua dulce y lixiviados contaminantes retenidos en su interior (Figuras 5.3 y 5.4). Si se sigue esta teoría o hipótesis, la Cueva de la Falconera nunca

habría servido como un hábitat estable, pero quizás sí como un refugio temporal en el que su entrada luminosa, su orientación sur y su manantial de agua dulce interno, hubieran sido condicionantes importantes en la preferencia de los antiguos pobladores del Garraf.

Esta hipótesis de trabajo y las indicaciones de los diferentes estudios realizados en diferentes cavidades sumergidas del mundo por el Dr. Nicholas Flemming (Bailey y Flemming, 2008; Flemming, 2014; Flemming y Antonioli, 2017), han marcado la estrategia de muestreo en la zona de prospección arqueológica pretendidas en esta investigación, al ser la Galería Jaume Ferrán, desde la cota -1 m hasta los -12 metros el área de posible hábitat temporal y aguada de los antiguos pobladores, ya que se trata de una rampa de suave pendiente que finaliza en una restricción colmatada por arena. La facilidad de acceso y la cercanía a la entrada luminosa de la cueva, la convierten en una de las áreas con más posibilidad de encontrar restos antrópicos (Figura 6). Desafortunadamente, no es posible seguir los consejos



**Figura 13.** Mapa escalado con solapamiento sobre ortofoto de la topografía del ECMB, la línea de MNEMO y la nube de puntos obtenida por el SPARUS II (Fuente: Pablo Fraile).

de Flemming, en la búsqueda de un sector de la galería protegido por paredes rocosas, de ahí que tan solo un análisis micro-geoarqueológico completo del subsuelo pueda responder a las preguntas formuladas.

Pero, por otro lado, sabemos que la georreferenciación en arqueología posibilita conocer la ubicación de un determinado yacimiento sobre el espacio de manera inequívoca, es decir, le dota de una localización única definida por una serie de puntos con coordenadas conocidas, en un sistema de referencia y en una proyección cartográfica. Por eso, tras el análisis de los datos obtenidos en la campaña de prospección subacuática y tras recopilar información y cálculos de errores de trabajos anteriores, se puede decir que, metodológicamente, el error relativo obtenido mediante el aparato MNEMO de las coordenadas de todos y cada uno de los puntos que definen la poligonal, asciende a 2 metros cada 400 metros recorridos por hilo de forma planimétrica y a 2.90 metros en altimetría cada 400 metros, lo que hace siempre recomendable las lecturas de ida y vuelta en la lectura del MNEMO, para poder cerrar la poligonal y, de este modo, reducir los errores totales (Fumás, 2022).

Para el caso que ocupa este proyecto, la metodología operativa empleada en la prospección de la cueva, fue la observación de una poligonal abierta, al utilizar el dispositivo de mapeo por hilo guía MNEMO la comparación de ésta con la topografía manual del ECMB, mediante el cálculo de poligonales de las paredes de la cueva respecto al centro de la cavidad o al hilo guía y la georreferenciación de la coordenada de inicio mediante teledetección del primer punto de la poligonal en superficie terrestre denominado Punto 1 (Punto 0 del MNEMO). Todos estos datos fueron solapados en el software QGIS mediante la superposición de elementos sobre ortofoto. (Figura 12).

Si se tienen presentes los errores introducidos por la georreferenciación y si la observación de campo exterior al espacio confinado ha sido realizada correctamente, mediante una combinación de topografía clásica y GPS, los errores introducidos por la georreferenciación han de considerarse despreciables.

## 7. Conclusiones

El presente trabajo ha generado un modelo metodológico de actuación concreto, aplicando la

topografía submarina de detalle al servicio de la prospección arqueológica subacuática en condiciones de visibilidad cero. Esto, no solo abre una nueva vía de investigación, sino que complementa a las ya realizadas hasta la fecha y propone un protocolo de actuación concreto. La necesidad de conocer una trayectoria de cálculo de las diferentes observaciones de los distintos dispositivos no solo era necesario para llevar a cabo futuras campañas de prospección con un margen de error tolerable, sino que esta metodología debía permitir averiguar la diferencia entre el valor obtenido y el real, las coordenadas reales, la topografía de detalle, la morfología cárstica y las características específicas del área de estudio. Además, la posibilidad de compartir el modelo 3D obtenido por el AUV favorece, por una lado, la difusión y comunicación en el ámbito profesional privado, al poder compartir impresiones con científicos multidisciplinares a través de software como MESHLAB (<https://www.meshlab.net/>) que permiten procesar, medir y editar modelos tridimensionales y, por otro lado, también desde el ámbito público mediante la utilización de la realidad virtual o realidad aumentada.

La importancia de la georreferenciación aplicada al estudio de yacimientos en cuevas sumergidas va desde la obtención de resultados en su topografía interna hasta el conocimiento de su contexto espacial, ya sea local o global, pasando por la comparación de cartografías o datos espaciales de diferentes edades, hasta llegar a proporcionar una plusvalía en lo relativo a la seguridad ligada a la campaña subacuática de campo. Los resultados obtenidos aquí proporcionan una ubicación espacial factible de ser utilizada no solo en arqueología, sino también en el espeleo-socorro puesto que esta primera prospección no solo ha generado datos reales fiables, sino que también puede considerarse una investigación preliminar ante cualquier intervención arqueológica intrusiva que se proponga en un futuro, puesto que se ha logrado una contextualización completa de un área sumergida con mínima o nula visibilidad.

Por esta razón, esta primera fase del estudio arqueológico de la Cueva de la Falconera pretende crear sinergias entre un modelo de investigación arqueológico y un modelo técnico-metodológico viable que sirva como engranaje para la mejora de ambas ciencias dependiendo de los objetivos marcados en cada momento. A diferencia de la prospección en mar abierto, donde la obtención de una coordenada es relativamente rápido y efectivo (De

Juan, 2009), en cavidades sumergidas se ha demostrado que no es posible confiar totalmente en la topografía manual basada en el cálculo de polígonales. Por eso, la consecución de una topografía de detalle mediante la visualización tridimensional de una nube de puntos, obtenida por una sonda multihaz de un AUV, es mucho más rigurosa y fiable, ya que descarta cualquier posible error humano en las lecturas del azimut y distancias cuando las condiciones de visibilidad son pésimas o nulas.

Por último, tras analizar la diferente potencia del sustrato arenoso superficial se reconoce la necesidad del análisis químico del paleosuelo extraído con cores en la zona con menos potencia de sedimento superficial (Ogloblin *et al.*, 2021). Los resultados preliminares logrados nos señalan el inicio de un protocolo metodológico que deberá ser mejorada de forma progresiva mediante un futuro estudio geológico de los distintos paleo niveles marinos, como una señal de identificación isostática de los niveles de agua dulce en el interior de la cavidad y a través de AUV autónomos de menor tamaño, que consigan introducirse a través de las restricciones interiores de la cavidad, al aumentar la lectura de datos y completar un modelo volumétrico más extenso y conciso. En nuestro caso, el uso del AUV debería comenzar la lectura de datos antes de introducirse en la cavidad, creando de este modo, una malla o alineación de puntos ya georreferenciados desde el exterior, sin necesidad de lecturas adicionales como las realizadas con el mapeo por hilo y la topografía terrestre (Petriaggi y De Ayala, 2015). El presente protocolo es perfectamente extrapolable a otras cavidades sumergidas con potencial arqueológico, donde la visibilidad pésima o nula imposibilita la consecución de los objetivos marcados, y refuerza la necesidad de generar una metodología cotejada y analizada previamente en trabajos de campo donde la seguridad del equipo humano sea siempre la prioridad.

## **8. Agradecimientos**

Todo mi agradecimiento y reconocimiento por la gran ayuda prestada a los codirectores de la tesis *Técnicas y Metodologías de Prospección Aplicadas a la Arqueología en Cavidades Sumergidas*, el Dr. Joan Daura Luján y el Dr. Antonio Palomo Pérez. También, al Dr. Nicholas Flemming por sus orientaciones, al Dr. Xavier Nieto, por sus gestiones, y al director de la Carta Arqueológica Subacuática de Sitges, Pere Izquierdo i Tugas, por confiar en el

proyecto y llevar la codirección de éste. El estudio científico aplicado al campo de trabajo, como una necesidad práctica para la mejora y evolución en las técnicas prospectivas en cavidades cársticas sumergidas, no hubiera sido posible sin el equipo humano que forma parte del proyecto Falconera. Por este motivo, quiero dar mi profundo agradecimiento a los ingenieros del CIRS (Centro de Investigación Robótica Submarina), del VICOROB (Instituto de Visión por Computador y Robótica) de la Universidad de Girona (UdG), que desplazaron a los técnicos, Guillem Vallicrosa, Pere Ridao y Lluís Magí.

También agradecer al Dr. Florian Huber por su colaboración, codirección del proyecto y por su experiencia en estudios prospectivos subacuáticos. También, a los espeleo-buceadores José Pulido, Carles Ramoneda, Delfí Roda y Joel Borrazas por su trabajo guiando al AUV. A Pablo Fraile, por su inestimable ayuda con el dominio de los sistemas de información geográfica (SIG), a Pablo Cantuel por su trabajo en el cálculo topográfico, y al Dr. Josep María Cervelló y Toni Inglés por los cálculos topográficos terrestres, ya que sin éstos no se hubiera podido redactar este artículo.

## **9. Bibliografía**

- ARIAS, Pablo. 2020: Spain: "Underwater exploration on a narrow continental shelf". *Coastal Research Library*, 35, pp. 281-294.
- AYMAMÍ, Gener. 2003: "Les coves del Penedès: la seva descoberta i utilització per l'home al llarg del temps". *Del Penedès*, 7, p. 7.
- AYMAMÍ, Gener. 2007: El riu subterrani de la Falconera (Garraf). Notes sobre un projecte d'explotació de les aigües de finals del segle XIX. *Del Penedès*, 18, pp. 89-93.
- BAILEY, Geoffrey; FLEMMING, Nicholas. 2008: "Archaeology of the continental shelf: Marine resources, submerged landscapes and underwater archaeology". *Quaternary Science Reviews*, 23-23, pp. 2153-2165.
- BENJAMIN, Jonathan; ROVERE, Alessio; FONTANA, Alessandro; FURLANI, Stefano; VACCHI, Matteo; INGLIS, Robyn H.; GALILI, Ehud; ANTONIOLI, Fabrizio; SIVAN, Dorit; MIKO, Slobodan; MOURTZAS, Nikos; FELJA, Igor; MEREDITH-WILLIAMS, Matthew; GOODMAN-TCHERNOV, Beverley; KOLAITI, Eleni; ANZIDEI, Marco; GEHRELS, Willem R. 2017: "Late Quaternary sea-level changes and ear-

- ly human societies in the central and eastern Mediterranean Basin: An interdisciplinary review". *Quaternary International*, 449, pp. 29-57.
- BORRELL, Ferran; GÓMEZ, Anna; MOLIST, Miquel; TORNERO, Carlos; VICENTE, Oriol. 2014: "Les ocupacions de la Cova de Sant Llorenç (Sitges, Garraf): noves aportacions al coneixement de la prehistòria del Garraf". *Tribuna d'Arqueologia*, 2011-2012, pp. 110-128.
- BORRELL, Ferran; MOLIST, Miquel; TORNERO, Carlos; VICENTE, Oriol. 2016: "La Cova de Sant Llorenç (Sitges, Barcelona). Un Exemple d'Ocupació en cova en el procés de neolització del Garraf". *Jornades d'Arqueologia Del Penedès*, 2011, 255454, pp. 97-107.
- CAMPBELL, Peter B. 2018: "An Introduction to Archaeology in Underwater Caves". En P. CAMPBELL (ed.): *The archaeology of underwater caves*, pp. 5-25. The Highfield Press. Southampton.
- CARRERAS, Marc; HERNANDEZ, Juan D.; VIDAL, Eduard; PALOMERAS, Narcís; RIBAS, David; RIDAO, Pere. 2018: "Sparus II AUV - A Hovering Vehicle for Seabed Inspection". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(2), pp. 344-355.
- CLARK, Peter U.; DYKE, Arthur; SHAKUN, Jeremy; CARLSON, Anders; CLARK, Jorie; WOHLFARTH, Barbara; MITROVICA, Jerry; HOSTETLER, Steven; MCCABE, A. Marshall. 2009: "The Last Glacial Maximum". *Science*, 325(5941), pp. 710-714.
- CLOTTES, Jean; COURTIN, Jean; VALLADAS, Hélène; CACHER, Hélène; MERCIER, Norbert; ARNOLD, Maurice. 1992: "La grotte Cosquer datée". *Bulletin de La Société Préhistorique Française*, 89(8), pp. 230-234.
- CUSTODIO, Emilio; BAYO, Alfons; PASCUAL, Manel; BOSCH, Xavier. 1993: "Results from studies in several karst formations in southern Catalonia (Spain)". En: *Hydrogeological Processes in Karst Terranes. Proc. International Symposium & Field Seminar (Antalya, Turkey, 1990)*, pp. 295-326. International Association of Hydrological Sciences. Wallingford.
- DAURA, Joan. 2009: "Historiografia dels jaciments pliocènics". *Treballs Museu Geologia Barcelona*, 16, pp. 5-38.
- DAURA, Joan. 2010: "La Cova Coll Verdaguer". *Zona Arqueològica*, 13, pp. 501-507.
- DAURA, Joan; SANZ, Montserrat; PIKE, Alistair W. G.; SUBIRÀ, M. Eulalia; FORNÓS, Joan J.; FULLOLA, Josep; M.; JULIÀ, Ramón; ZILHÃO, Joao. 2010: "Stratigraphic context and direct dating of the Neandertal mandible from Cova del Gegant (Sitges, Barcelona)". *Journal of Human Evolution*, 59(1), pp. 109-122.
- DAURA, Joan; SANZ, Montserrat. 2014: "La Cova del Gegant (Sitges, Barcelona)". En: R. SALAS; E. CARBONELL; J. M. BERMÚDEZ y J. L. ARSUAGA (eds.): *Los Cazadores Recolectores Del Pleistoceno y Del Holoceno En Iberia y El Estrecho de Gibraltar*, pp. 276-280. Universidad de Burgos y Fundación Atapuerca. Burgos.
- DAURA, Joan; SANZ, Montserrat; SORIANO, Eni; PEDRO, Mireia; RUBIO, Ángel; OLIVA, Mónica; GIBAJA, J. Francisco; QUERALT, Iganis; ÁLVAREZ, Ramón; LÓPEZ-CACHERO, F. Javier. 2017: "Objetos de oro y epicampaniforme en la Cova del Gegant. Relaciones en la costa mediterránea de la Península Ibérica durante la Edad del Bronce". *Trabajos de Prehistoria*, 74(1), p. 149.
- DE JUAN, Carlos. 2009: "La prospección arqueológica subacuática. Principios y métodos". En: M. A. CAU y F. X. NIETO (eds.): *Arqueología náutica mediterránea*, pp. 121-132. Monografies del CASC. Centre d'Arqueologia Subacuàtica de Catalunya. Gerona.
- FERNÁNDEZ, Rafael; BAQUERO, Juan Carlos. 2006: *Acuíferos Kársticos Costeros. Introducción a su conocimiento*, pp. 60-97. IGME. Madrid.
- FLEMMING, Nic; ANTONIOLI, Fabrizio. (2017). "Prehistoric Archaeology, Palaeontology, and Climate Change Indicators from Caves Submerged by Change of Sea Level". En P. CAMPBELL (ed.): *The archaeology of underwater caves*, pp. 27-43. The Highfield Press. Southampton.
- FLEMMING, Nic. 2014: *Land Beneath the Waves Submerged landscapes and sea level change. Position Paper 21 of the European Marine Board*. European Marine Board. Ostende.
- FREIXES, Antoni et al. :2021: "La qualitat de l'aigua del sistema hidrogeològic del Garraf i les seves implicacions. Informe final". *AMB Residus*, Junio, pp. 1-23.
- FUMÁS, Manuel J. 2022: "Métodos y técnicas de prospección topográfica aplicada a la arqueología subacuática en cavidades sumergidas : el estudio arqueo métrico de la Cueva del Sistema Sa Gleda – Camp des Pou (Manacor -Mallorca-)". *SPAL*, en prensa.
- GÀMEZ, Desiré. 2007: *Sequence Stratigraphy as a*

**Métodos y técnicas de prospección topográfica aplicada a la arqueología en cavidades cársticas sumergidas con visibilidad cero. El Proyecto Falconera**

- tool for water resources management in alluvial coastal aquifers: application to the Llobregat Delta (Barcelona, Spain). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Barcelona. Barcelona.
- GINÉS, Angel; GINÉS, Joaquín; FORNÓS, Joan J.; BOVER, Pere; GÓMEZ-PUJOL, Luis; GRÀCIA, Frances; MERINO, Antoni; VICENS, Damiá. 2012: "An introduction to the quaternary of Mallorca". *Monografies de la Societat d'Historia Natural de les Balears*, 18, pp. 13-53.
- GRACIA, Frances; CLAMOR, Bernat; GRACIA, Pedro; MERINO, Antoni; VEGA, Pep; MULET, Guillermo. 2001: "Notícia preliminar del jaciment arqueologic de la font de ses aiguades". *Introducció Situació i geologia*, 24, pp. 59-73.
- GRACIA, Frances. 2015: *Les cavitats subaquàtiques de les zones costaneres del Llevant i Migjorn de Mallorca*. Tesis Doctoral. Universidad de las Islas Baleares. Mallorca.
- GRACIA, Frances; CLAMOR, Bernat; GAMUNDÍ, Pere; FORNÓS, Joan. 2010: "El sistema de cavitats Gleda - Camp des Pou (Manacor, Mallorca)". *Endins: Publicació d'espeleologia*, 34, pp. 35-68.
- GUERRERO, Víctor. 2006: "Comer antes que viajar. Pesca y barcas de base monóxila en la Prehistoria occidental". *Mayurqa: Revista Del Departament de Ciències Històriques i Teoria de Les Arts*, 31, pp. 7-56.
- HUBER, Florian. 2009: *Investigaciones arqueológicas subacuáticas en cenotes y sistemas de cuevas inundadas de Yucatán : un proyecto de cooperación germano-mexicano - campaña 2009*, pp. 22-28.
- KANTOR, George; FAIRFIELD, Nathaniel; JONAK, Dominic; WETTERGREEN, David. 2008: "Experiments in Navigation and Mapping with a Hovering AUV". *Springer Tracts in Advanced Robotics Book Series*, 42, pp. 115-124.
- KISTER, Sébastien. 2017: *MNEMO User guide v1.6*, pp. 1-42.
- LICHTER, Michael; ZVIELY, Dov; KLEIN, Micha; SI-VAN, Dorit. 2010: "Biodata of Sea level changes of Mediterranean past and present". En A. ISRAEL; R. EINAV; J. SECKBACH (eds.): *Sea-level changes in the Mediterranean*, pp. 5-17. Springer Science, pp. 5-17.
- MALDONADO, Antonio; DÍAZ, José I.; FERRAN, Marcelí; MALDONADO, Andrés. 1988: "Sistemas deltáicos holocenos de los ríos Llobregat, Besos y foix: Modelos evolutivos transgresivos". *Acta Geológica Hispánica*, 23(4), pp. 241-256.
- MANNING, Christopher. 1999: *Foundations of Statistical Natural Language Processing*. The MIT Press. Londres.
- MARTINS, Alfredo; ALMEIDA, José M.; ALMEIDA, Carlos; DIAS, Andre; ALTONEN, Jussi; HENINEN, Arttur; KOSKINEN, Kari; ROSSI, Claudio; DOMÍNGUEZ, Sergio; VÖROS, Csaba; HENLEY, Stephen; MCLOUGHLIN, Mike; VAN MOERKEK, Hilco. 2018: "UXNEXMIN AUV Perception System Design and Characterization". *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*. Madrid.
- MILLÁN, Manuel; BLASCO, Anna; EDO, Manuel; BLANCH, Marta. 1981: "La Cova de Can Sadurní, una cruilla de camins". *Pyrenae: Revista de Prehistòria i Antiguitat de La Mediterrània Occidental*, 17, pp. 11-34.
- MONTES, Ricardo. 1991: "La Cueva de los Aviones. Un Yacimiento del Paleolítico medio (Cartagena, España)". *Memorias de Arqueología de la Región de Murcia*, 2, pp. 35-58.
- NICOLAS, San M. (1987). "Prospecciones arqueológicas en la Cueva C-6 Cabo Cope, Aguilas." En: *Excavaciones y prospecciones arquiológicas*, pp. 10-17. Servicio Regional de Patrimonio Histórico. Murcia.
- OGLOBLIN, Isaac; GALILI, Ehud; SHAHACK-GROSS, Ruth. 2021: "Locating submerged prehistoric settlements : A new underwater survey method using water-jet coring and micro-geoarchaeological techniques". *Journal of Archaeological Science*, 135(July), 105480.
- PETRIAGGI, Barbara; DE AYALA, Gabriele. 2015: "Laser Scanner reliefs of selected archeological structures in the submerged Baiae (Naples)". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 79-83.
- RICHMOND, Kristof; FLESHER, Chris; TANNER, Neal; SIEGEL, Vickie; STONE, William. 2020: "Autonomous exploration and 3-D mapping of underwater caves with the human-portable SUNFISH® AUV". *Global Oceans 2020: Singapore - U.S. Gulf Coast. IEEE*, pp. 1-10.
- STRINGER, Christopher B.; FINLAYSON, Clive; BARTON, Nick; FERNÁNDEZ-JALVO, Yolanda; CÁCERES, Isabel; SABIN, Richard; RHODES, Edward; Currant, A. P., RODRÍGUEZ-VIDAL, Joaquín; GILES-PACHECO, Francisco; RIQUEL-

- ME-CANTAL, Jose A. 2008: "Neanderthal exploitation of marine mammals in Gibraltar". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(38), pp. 14319-14324.
- VALLICROSA, Guillem; FUMAS, Manuel. J.; HUBER, Florian; RIDAO, Pere. 2020: "Sparus II AUV as a Sensor Suite for Underwater Archaeology: Falconera Cave Experiments". *2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium, AUV 2020*, pp. 0-1.
- VILÀ, Antoni. 2004: "Localizaciones Prehistóricas Garraf". *Revista de Girona*, 225, pp. 55-61.
- VIRELLA, Joan. 1980: "Habitacles Troglodíticos". *Miscel.Lania Penedesenca*, pp. 259-279.
- VIVA, Leica; GNSS, G. S. 2020: *Leica Viva GS16 Especificaciones Técnicas*.
- WAMBOLD, Thomas; CESMEGI, Jorge; CAPONE, John; MARKOWITZ, Ira; LASKOWSKI, James. 2006: *Three-Dimensional Cavern Imaging System*.