Papers de la Societat Espeleològica Balear

7
2024

Homenatge a Àngel Ginés (1950-2024)

ISSN-e 2605-3144
ISSN 2697-1194

Papers de la Societat Espeleològica Balear

Volum 7 (2024)

Homenatge a Àngel Ginés (1950-2024)

Papers de la Societat Espeleològica Balear és una publicació de caràcter anual, editada per la:

Societat Espeleològica Balear
C/ Margarida Xirgu, 16
07011 Palma (Mallorca)
email: socespbal@gmail.com

Els articles dels distints números de la publicació i les instruccions per als autors, es troben accessibles a la següent adreça electrònica:
http://socespbal.blogspot.com/

Els treballs per a la seva publicació han de ser enviats a la següent adreça:
publicacions.seb@gmail.com

ISSN-e: 2605-3144
ISSN: 2697-1194
DL: PM 1055-2020

Junta Directiva de la ***Societat Espeleològica Balear***

President: Francesc Gràcia Lladó
Vicepresident: Antoni Rafel Valero Flores
Secretari: Vicenç Pla Martínez
Tresorer: Damià Vicens Xamena
Vocal: Juan José Enseñat Pons

Junta de Publicacions dels ***Papers de la Societat Espeleològica Balear***

Joaquín Ginés Gracia
Joan J. Fornós Astó
Lluís Gómez-Pujol
Juan José Enseñat Pons
Pere Bover Arbós

Foto de la coberta: Les Coves de Campanet constitueixen un dels recursos turístics destacables de la Serra de Tramuntana (Mallorca). Acumulació permanent d'aigua en el paviment de la *sala del Llac*. (Foto: Juan J. Enseñat).

Foto de la contraportada: Les aigües freàtiques salabroses ocupen gairebé la totalitat de la superfície de la *sala de na Malen*, a la Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca).
(Foto: Miquel À. Perelló).

Papers de la Societat Espeleològica Balear
Volum 7 (2024)

Homenatge a Àngel Ginés (1950-2024)

Sumari

Preàmbul / Preamble v

Els espeleotemes freàtics de l'holocè a les coves de Mallorca: evolució dels coneixements i investigacions recents sobre el nivell de la Mediterrània durant els darrers 4.000 anys *per Joaquín Ginés, Bogdan P. Onac, Angel Ginés, Joan J. Fornós, Francesc Gràcia, Victor J. Polyak, Paola Tuccimei, Michele Soligo i Yemane Asmerom* 1

Cova des Puigderrós (Llucmajor, Mallorca): descobriment, estudi i destrucció d'una cavitat singular *per Joan J. Fornós, Francesc Gràcia i Damià Vicens* 21

Estimació dels tipus d'usos del sòl sobre el recorregut de les Coves del Drac i altres cavitats properes de l'àrea de Porto Cristo (Manacor, Mallorca). Dades preliminars *per Pau Balaguer, Damià Vicens i Francesc Gràcia* 37

Processos biocàrstics al sotabosc dels alzinars de la Serra de Tramuntana (Mallorca, Illes Balears) *per Alberto Ortega Ramis i Lluís Gómez-Pujol* 51

La necrópolis talayótica de la Cova des Robiols (Puigpuntent) y el origen de los enterramientos en cal en Mallorca *por Jaume Deyà, Javier Aramburu y Guy De Mulder* 67

Aproximació al catàleg de briòfits i traqueòfits de la Cova de sa Gleda (Manacor, Mallorca) *per Pere M. Mir-Rosselló* 83

Cavitats costaneres i modelat litoral entre cala Marçal i cala Brafi (Felanitx, Mallorca) *per Gabriel Santandreu, Francesc Gràcia, Sebastià Garriga, Juan J. Enseñat i Bernat Gaviño* 91

Coastal cave characteristics and speleothems as indicators of sea-level change in the eastern Adriatic *by Nina Lončar and Petra Kovač Konrad* 111

Els bogamarins fòssils de dues coves del miocè superior del llevant i migjorn de Mallorca *per Josep Quintana, Francesc Gràcia i Joan J. Fornós* 125

Algunes dades sobre els gasos de l'atmosfera de la Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca). Avaluació de les concentracions de CO_2 i CH_4 i les seves signatures isotòpiques *per Joaquín Ginés, Ángel Fernández-Cortés, Francesc Gràcia, Juan J. Enseñat, Joan J. Fornós, José M. Calaforra i Àngel Ginés* 135

Els col·lapses paleocàrstics del miocè superior de Mallorca: estructura, origen i reconeixement als perfils sísmics *per Joan J. Fornós, Bernadí Gelabert, Francesc X. Roig-Munar i Jordi Giménez* 151

Algunas reflexiones sobre el proceso de incorporación de $CaCO_3$ en los enterramientos en cal de la Edad del Hierro en las cuevas de la Islas Baleares *por Mark Van Strydonck y Damià Ramis* 165

Primeres dades sobre la presència de copròlits d'ectoparàsits de ratapinyades a la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca) *per Antoni Merino, Joan J. Fornós, Antoni Mulet i Joaquín Ginés* 175

Ús i modificació antròpica del micromodelat exocàrstic costaner: l'explotació salinera a les costes rocoses de Menorca *per Francesc X. Roig-Munar, Lluís Gómez-Pujol, Bernadí Gelabert i Vicenç Forteza* 185

Nou plànol topogràfic de les Coves de Campanet (Mallorca) *per Juan J. Enseñat, Gabriel Santandreu i Joaquín Ginés* 201

La paleogenòmica aplicada al registre paleontològic i arqueològic de les Illes Balears: el cas de la tortuga marina de Na Guardis (Ses Salines, Mallorca) *per Pere Bover, Alejandro Valenzuela i Joan Pons* 219

Na Burguesa-2: un nou jaciment del zanclià (pliocè inferior) amb fauna de *Myotragus* (Mallorca, Illes Balears) *per Enric Torres-Roig i Josep A. Alcover* 237

Àngel Ginés (1950-2024). Una vida dedicada a l'espeleologia científica, a la seva difusió i a la docència *per Joan J. Fornós i Joaquín Ginés* 249

Àngel Ginés (1950-2024). Publicacions i anàlisi bibliomètric *per Joaquín Ginés i Joan J. Fornós* 265

In Memoriam: Lluís Pomar Gomà (1949-2024) *per Joan J. Fornós i Joaquín Ginés* 281

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Homenatge a Àngel Ginés (1950-2024)

Preàmbul

El present any començà de manera luctuosa per a les ciències naturals de les Balears: a principis del mes de gener es produí el traspàs del nostre company Àngel Ginés, qui actualment formava part de la Junta de Publicacions de la *Societat Espeleològica Balear*, i era un referent històric de l'espeleologia illenca a més del seu prestigi, fins i tot internacional, en els camps de la carstologia, la geocronologia litoral i la bioespeleologia.

La seva pèrdua constitueix una circumstància lamentable que ens priva de les seves contribucions científiques així com de la seva companyonia i valors humans. Per aquests motius, la *Societat Espeleològica Balear* va prendre la decisió de dedicar el volum 7è dels *Papers de la SEB* –corresponent a l'any 2024– a la memòria del company Àngel Ginés, recopilant un número monogràfic que servís d'homenatge i memorial de la seva activitat científica, en els camps de la carstologia i l'espeleologia en el sentit més ample del terme.

En aquest volum s'han reunit un total de 17 contribucions de companys i col·legues seus, tant de les Balears com de l'estranger, que pretenen retre homenatge a la seva figura pionera en els camps relacionats amb les coves i el carst de les nostres illes. Entre aquestes contribucions, s'inclouen dos treballs en els quals n'Àngel participà activament en la seva elaboració, abans del seu inesperat traspàs. El gruix d'aquest volum, es complementa amb una nota biogràfica sobre Àngel Ginés, així com una exhaustiva recopilació bibliogràfica que recull les seves contribucions en les diferents branques dels estudis relacionats amb les coves i el carst.

La pretensió de les pàgines següents és ben clara: homenatjar la memòria del company Àngel Ginés, intentant contribuir al coneixement del seu paper crucial en les ciències naturals de les nostres illes i, més concretament, pel que fa als aspectes lligats al modelat dels territoris calcaris i les cavitats subterrànies que els caracteritzen.

Junta de Publicacions de la SEB

Preamble

The current year began in a mournful way for the natural sciences of the Balearic Islands: at the beginning of January-2024, our colleague and friend Àngel Ginés passed away. He was currently part of the Editorial Board of the *Societat Espeleològica Balear*, and was a historical benchmark of local speleology in addition to its international prestige in the fields of karstology, coastal geochronology and biospeleology.

This loss is a regrettable circumstance that deprives us of his scientific contributions and of his companionship and human values. For these reasons, the *Societat Espeleològica Balear* decided to dedicate the 7th volume of our journal *Papers de la SEB* –corresponding to the year 2024– to the memory of Àngel Ginés, compiling a monographic issue that serves as a tribute and memorial to his scientific activity, in the fields of karstology and speleology in the broadest sense of the term.

In this volume, a total of 17 contributions from his colleagues and friends, both from the Balearic Islands and abroad, have been gathered which aim to pay tribute to his pioneering figure in the fields related to caves and the karst studies on our islands These contributions include two papers in which Àngel actively participated in their preparation, before his unexpected passing. The bulk of this volume is complemented by a biographical note on Àngel Ginés, as well as an exhaustive bibliographic compilation that includes his contributions in the different branches of researches related to caves and karst.

The intention of the following pages is very clear: to honor the memory of our colleague and friend Àngel Ginés, trying to contribute to the knowledge of his crucial role in the natural sciences of our islands, specifically with regard to the aspects linked to the modeling of limestone territories and the caves that characterize them.

SEB Editorial Board

Els espeleotemes freàtics de l'holocè a les coves de Mallorca: evolució dels coneixements i investigacions recents sobre el nivell de la Mediterrània durant els darrers 4.000 anys (*)

Joaquín GINÉS [1, 2], Bogdan P. ONAC [3], Angel GINÉS [1, 2], Joan J. FORNÓS [1, 2], Francesc GRÀCIA [1, 2], Victor J. POLYAK [4], Paola TUCCIMEI [5], Michele SOLIGO [5] i Yemane ASMEROM [4]

[1] Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca, Spain. Email: jginesgracia@yahoo.es
[2] Grup de Recerca de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca, Spain.
[3] School of Geosciences. University of South Florida. Tampa, FL, USA.
[4] Earth & Planetary Sciences. University of New Mexico. Albuquerque, NM, USA.
[5] Dipartimento di Scienze. Università degli studi Roma Tre. Roma, Italy.

Abstract

This study examines Holocene phreatic overgrowths on speleothems (POS) found in brackish pools of Mallorca Island's coastal caves. It traces the evolution of knowledge about these deposits, beginning with initial morphogenetic observations in the late 1970s. Recent research, involving 138 U-Th datings from eight caves, reconstructs the late Holocene sea-level history over the last 4,000 years. Findings include a sea level position at 25 cm below the pre-industrial times −occurring between 3.89 and 3.26 ka BP−, followed by a rapid rise to current levels, remaining stable from 2.84 ka BP until the early 20th century. The paper also discusses glacial isostatic adjustment models, one of which is similar with the obtained POS data, linking sea-level rise to West Antarctica's ice melt. Today, these crystallizations are partially submerged in the coastal phreatic waters, due to the gradual rise in sea level linked to modern (industrial) global warming; since 1900 the sea-level has risen by about 17.3 cm, with the rate of rise accelerating to 2.05 mm/year in the recent decades.

Resumen

En estas páginas se exponen las investigaciones desarrolladas sobre los espeleotemas freáticos (POS) de edad holocena, observables en los lagos salobres de cuevas costeras del levante y sur de Mallorca. Se pasa revista a la evolución de los conocimientos sobre estos depósitos que tienen sus incios, a finales de los años setenta del siglo pasado, con las primeras observaciones morfogenéticas realizadas sobre los POS holocenos de las cuevas litorales de la isla. Las investigaciones más recientes se han basado en un total de 138 dataciones −efectuadas mediante el método U-Th− de muestras recolectadas en 8 cavidades diferentes. Los resultados obtenidos permiten reconstruir la historia del nivel marino durante el final del Holoceno, en concreto los últimos 4.000 años. En este sentido, se ha documentado un nivel marino 25 cm inferior al preindustrial ocurrido entre 3,89 y 3,26 ka BP, seguido de una rápida subida hasta alcanzar el presente nivel del mar que se mantendrá excepcionalmente estable desde 2,84 ka BP hasta comienzos del siglo XX. Se discuten los modelos de ajustes isostáticos glaciales (GIA) que son compatibles con los datos obtenidos, relacionando la mencionada subida del nivel marino con aportaciones procedentes de la fusión de hielo de la Antártida occidental. Hoy en día, estas cristalizaciones están parcialmente sumergidas en las aguas freáticas litorales, debido a la gradual subida del nivel marino asociada al calentamiento global de la era industrial; dicho ascenso se puede evaluar en torno a 17,3 cm desde el 1900, con unas tasas de ascenso de 2,05 mm/año durante las últimas décadas.

Ginés, J.; Onac, B.P.; Ginés, A.; Fornós, J.J.; Gràcia, F.; Polyak, V.J.; Tuccimei, P.; Soligo, M. i Asmerom, Y. (2024): Els espeleotemes freàtics de l'holocè a les coves de Mallorca: evolució dels coneixements i investigacions recents sobre el nivell de la Mediterrània durant els darrers 4.000 anys. Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 1-20. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 14 febrer 2024; **Revisat:** 7 març 2024; **Acceptat:** 12 març 2024.
Publicat online: 25 març 2024.

Introducció

La recerca sobre els espeleotemes freàtics de les coves de Mallorca −internacionalment coneguts amb l'acrònim POS (*Phreatic Overgrowths on Speleothems*; TUCCIMEI et al., 2006)− compten amb una dilatada trajectòria temporal i una abundant producció científica, que s'inaugurà ja fa més de mig segle, tal i com es pot consultar a diferents revisions recents sobre la matèria (GINÉS et al., 2012, 2022). Els avenços dels darrers anys relatius a l'estudi d'aquests dipòsits han estat molt destacables,

(*) Aquest article fou elaborat amb la participació d'Angel Ginés, just abans del seu traspàs el gener del 2024.
El present treball està dedicat a la seva memòria.

(*) This paper was performed with the involvement of Angel Ginés, just before his decease in January 2024.
The present research is dedicated to his memory.

amb aportacions rellevants sobre el nivell marí durant el darrer interglacial (POLYAK et al., 2018; GINÉS et al., 2020), així com en temps tan llunyans com el pliocè i el miocè superior (DUMITRU et al., 2019, 2021; GINÉS et al., 2021). Per tal de complementar tot aquest panorama, el present treball s'ocuparà amb deteniment dels espeleotemes freàtics d'edat holocena, els quals han estat objecte de recerques recents.

Amb la intenció de situar el nostre objecte d'atenció, cal recordar que els llacs salabrosos de moltes coves litorals de l'illa presenten cristal·litzacions espectaculars desenvolupades principalment a les seves voreres, que ja captaren l'atenció dels primers exploradors i científics (MARTEL, 1897; RODÉS, 1925; JOLY, 1929). Aquests dipòsits cristal·lins subactuals foren descrits en detall fa vàries dècades, a partir dels exemplars de la Cova A de Cala Varques, a Manacor, prestant atenció als aspectes morfològics i texturals així com a la seva gènesi (POMAR et al., 1979). Uns pocs anys després es realitzaren les primeres datacions radiomètriques (U-Th), que posaven de manifest la cronologia holocènica d'aquests dipòsits (HENNIG et al., 1981). Després de diversos nous programes de datació, que involucraren també els espeleotemes freàtics dels llacs de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor), els treballs de TUCCIMEI et al. (2009, 2010) exposaven els resultats de la investigació d'aquestes cristal·litzacions, que aportaven un rang d'edats de creixement que abastaven els darrers 3.000 anys. Així mateix, els POS de les dues localitats citades serviren per assajar noves recerques geocronològiques, amb la comparació de les edats obtingudes pels mètodes ^{14}C i U-Th (TUCCIMEI et al., 2011). En qualsevol cas, les referides investigacions confirmaven el caràcter subactual –és a dir, del final de l'holocè– dels espeleotemes freàtics que es poden observar als llacs de les coves costaneres de Mallorca.

Recentment, ha estat possible emprendre noves campanyes de datació U-Th d'espeleotemes freàtics holocens de més localitats del migjorn i llevant de l'illa. Les dades que es deriven d'aquests treballs més recents han estat publicades per ONAC et al. (2022) i documenten les vicissituds del nivell de la Mediterrània occidental durant els últims 4.000 anys. Els resultats obtinguts són avaluats en relació amb els models d'ajustament isostàtic glacial (GIA), els quals poden considerar-se vàlids per a la nostra àrea geogràfica. Les pàgines que segueixen pretenen donar una visió espeleològica força detallada sobre l'evolució i la situació actual de les investigacions a propòsit d'aquests dipòsits holocènics.

Els espeleotemes freàtics de l'holocè a Mallorca: les observacions morfogenètiques primerenques

La presència de cristal·litzacions freàtiques, que s'han desenvolupat a la superfície dels llacs salabrosos de les coves litorals de Mallorca, és un fenomen que gairebé té un caràcter d'ubiqüitat. Malgrat això, les investigacions inicials se centraren en una cova del municipi de Manacor –Cova A de Cala Varques– encara que les recerques anaren involucrant altres cavitats com la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor), i finalment diverses localitats addicionals al llevant i al migjorn de l'illa, com són la Cova Genovesa o les Coves del Drac, entre d'altres.

Els espeleotemes freàtics o POS observables a les vores dels llacs de nombroses coves mallorquines –en correspondència aproximada amb l'actual nivell de les aigües freàtiques litorals– formen unes prominents bandes horitzontals de cristal·litzacions subaquàtiques, que es desenvolupen sobre les parets de la cavitat o freqüentment al voltant de qualsevol altre suport disponible en la superfície dels llacs: estalactites, estalagmites, columnes i espeleotemes aeris en general. Pel que fa a la seva mineralogia, aquests espeleotemes freàtics poden ser tant de calcita –que dona lloc a dipòsits cristal·lins de superfícies més aviat rugoses i amb petites protuberàncies (Figura 1A)– com d'aragonita (Figura 1B), mineralogia que es caracteritza per presentar unes superfícies exteriors molt més llises.

Les primeres observacions morfològiques sobre aquesta tipologia de dipòsits foren publicades per POMAR et al. (1979), els quals descriuen les característiques dels espeleotemes freàtics que es poden observar a les vores dels llacs de la ja citada Cova A de Cala Varques; en aquesta publicació pionera s'utilitzà el terme *espeleotemes epiaquàtics* per a designar les morfologies observades. A l'esmentat treball es descriu una espectacular banda, estrictament horitzontal, de cristal·litzacions subaquàtiques que voreja els llacs, la qual es desenvolupa sobre les parets de la cova o al voltant de qualsevol suport disponible com són, per exemple, estalagmites o columnes (Figura 2). Pel que fa a la seva cronologia, els autors esmentats consideren d'edat subactual aquesta banda d'espeleotemes freàtics de calcita, ja que s'han dipositat després de la pujada postglacial del nivell marí.

Tal i com ja s'assenyalava als primers treballs publicats (POMAR et al., 1979; GINÉS et al., 1981b), les franges d'espeleotemes freàtics d'aquesta localitat presenten una major gruixa –superior als 10 cm– cap

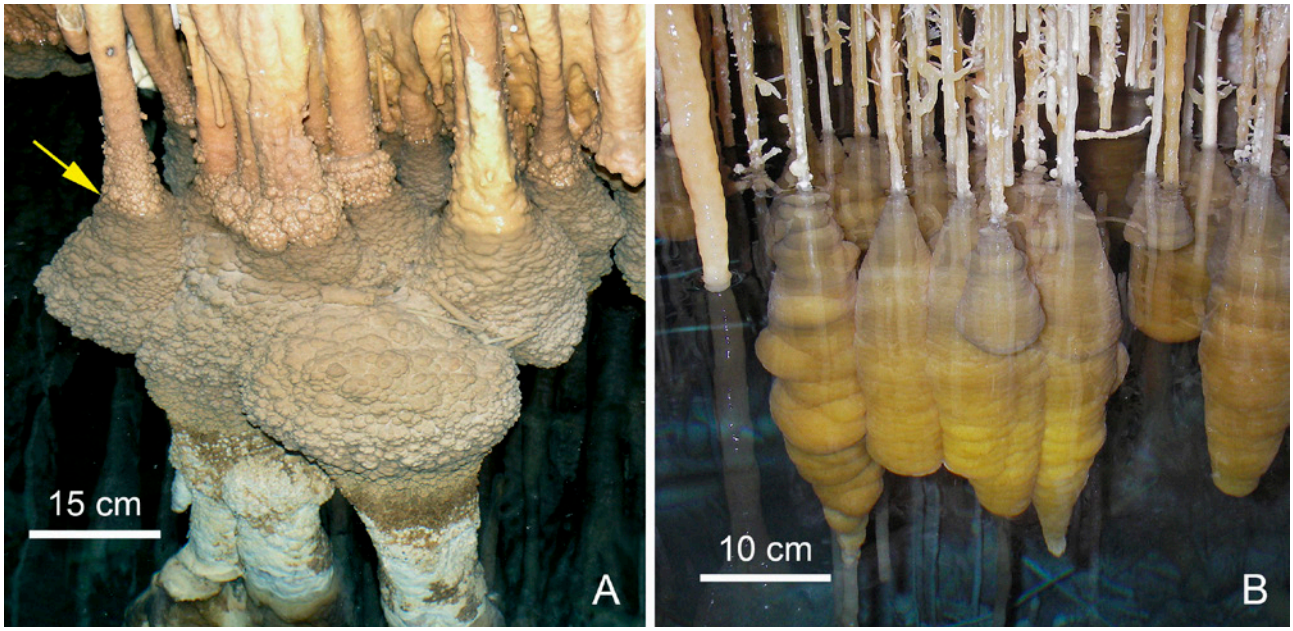


Figura 1: Espeleotemes freàtics (POS) observables a les vores dels llacs de coves costaneres de Mallorca. En ambdós casos, la banda horitzontal de cristal·litzacions freàtiques apareix gairebé totalment submergida per mor de la pujada del nivell marí de les darreres dècades. A) POS de mineralogia calcítica de la Cova A de Cala Varques, a Manacor (Foto: B.P. Onac); la fletxa indica la superfície de les aigües. B) Espeleotemes freàtics d'aragonita de la Cova des Pas de Vallgornera, a Llucmajor (Foto: A. Merino).
Figure 1: Phreatic speleothems (POS) that occur in the pools of littoral caves from Mallorca Island; in both cases, the horizontal belt of phreatic crystallizations appears almost completely submerged due to the rise of sea level in recent decades. A) POS of calcitic mineralogy in Cova A de Cala Varques, Manacor (Photo: B.P. Onac); the arrow indicates the surface of the waters. B) Aragonite POS in Cova des Pas de Vallgornera, Llucmajor (Photo: A. Merino).

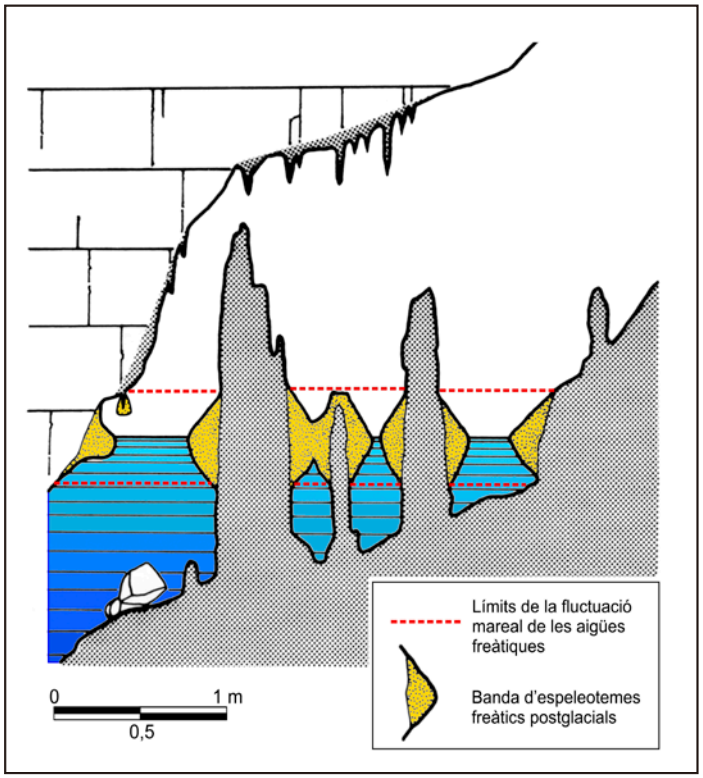


Figura 2: Visió idealitzada dels espeleotemes freàtics en una secció de la Cova A de Cala Varques, tal i com apareixen descrits a la publicació pionera sobre els POS d'aquesta cavitat (Modificat a partir de POMAR et al., 1979).
Figure 2: Idealized representation of the phreatic speleothems along a profile from Cova A de Cala Varques, as they appear described in the pioneering publication on the POS of this cave (Modified from POMAR et al., 1979).

a la part central del sobrecreixement horitzontal, que es correspondria amb el nivell marí mitjà en el moment de la seva deposició. L'amplària vertical de la banda de cristal·litzacions és en general inferior als 40 cm i està controlada per la magnitud del rang de fluctuació de les aigües freàtiques (marees, variacions baromètriques), la qual recentment ha estat quantificada a dues cavitats litorals de Mallorca i oscil·la entre 40 i 55 cm (BOOP et al., 2017; ENTRENA, 2023). El condicionant que suposen les fluctuacions mareals en el creixement dels POS determina la formació de morfologies molt variades, que depenen de les característiques del suport sobre el qual s'han desenvolupat les cristal·litzacions. Així, les bandes d'espeleotemes freàtics que han crescut sobre suports que abracen tot el rang de fluctuació mareal mostren clarament un major gruix central (Figura 2; Figura 3A, cas 1); per altra banda, quan els POS s'han desenvolupat sobre estalactites que penetren lleugerament dins de les aigües freàtiques la morfologia es veu molt alterada i es generen formes bulboses, de vegades amb la seva base bastant plana (Figura 3A, casos 2 i 3). La variabilitat morfològica dels espeleotemes freàtics en funció de la geometria dels suports sobre els quals es desenvolupen queda il·lustrada amb claredat en la Figura 3B.

En el cas de la Cova A de Cala Varques, la banda de POS està constituïda per cristalls de calcita d'hàbit romboèdric, que donen lloc a una

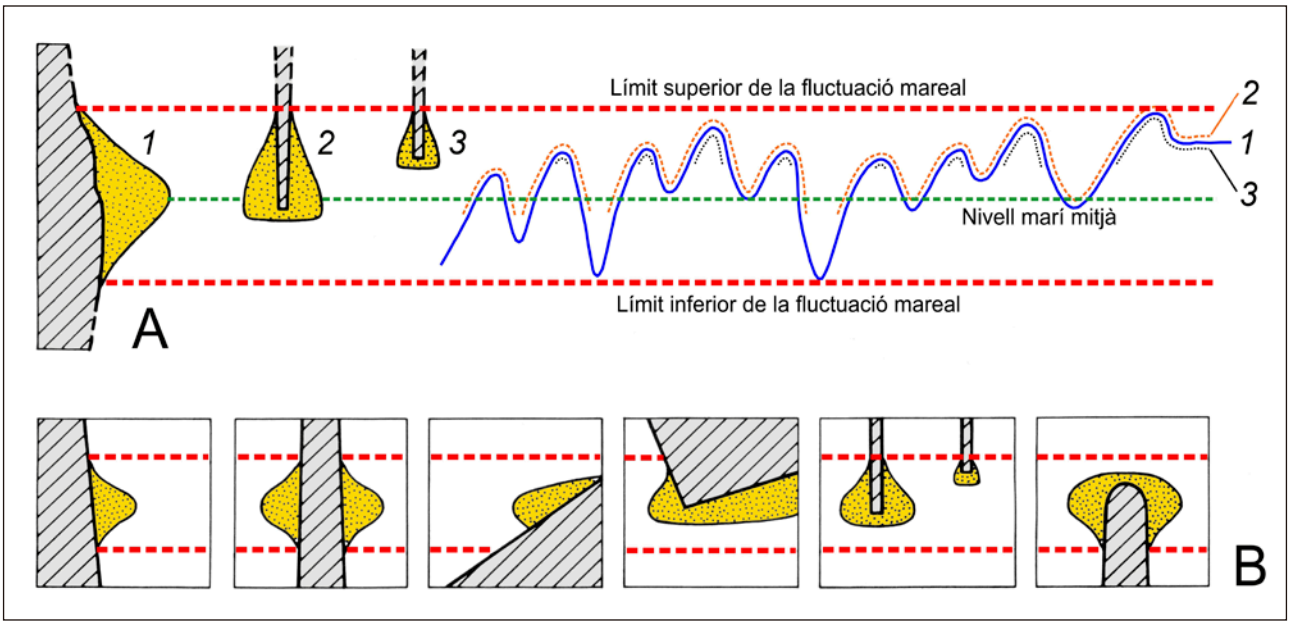


Figura 3: A) Intervals de creixement d'una banda d'espeleotemes freàtics en funció de la penetració del suport dins la zona de fluctuació de les aigües freàtiques: 1, penetració completa del suport, amb màxima gruixa al centre de la banda; 2 i 3, penetració incompleta que genera morfologies de base plana les quals no registren tota la fluctuació mareal. B) Variabilitat morfològica dels POS en relació amb la geometria dels possibles suports, ja sigui la roca o espeleotemes vadosos preexistents (Modificat a partir de POMAR et al., 1979).
Figure 3: A) Growth histories of different POS depending on the penetration of the support within the fluctuation zone of the water table: 1, complete penetration of the support, with maximum thickness in the center of the belt; 2 and 3, incomplete penetration that generates flat-bottomed morphologies that do not record the whole tidal fluctuation. B) Morphological variability of the POS in relation to the geometry of the possible supports, either the bedrock or pre-existing vadose speleothems (Modified from POMAR et al., 1979).

morfologia superficial més aviat rugosa, de la qual sobresurten petites protuberàncies; tot sovint, aquesta franja de cristal·litzacions inclou petites làmines de calcita flotant (POMAR et al., 1979; GINÉS et al., 1981b). La gènesi d'aquestes cristal·litzacions està lligada a la sobresaturació en $CaCO_3$ de la capa superficial dels llacs salabrosos, la qual s'assoleix mitjançant la difusió del CO_2 des de les aigües freàtiques, o bé arran de l'evaporació en els ambients subterranis molt ventilats. Respecte de l'actualisme genètic que invoquen els autors citats per als POS d'aquesta localitat, cal fer referència a les investigacions d'ENTRENA et al. (2020), que han desenvolupat assajos experimentals de creixement de cristal·litzacions carbonàtiques –tant de calcita com d'aragonita– en la superfície d'alguns llacs de les Coves del Drac (Manacor). Aquests experiments demostren el possible mecanisme de creixement actual dels POS associats a la superfície de les aigües freàtiques d'aquella localitat. Creixement que resulta condicionat, des del punt de vista quantitatiu i mineralògic, per les característiques ambientals dels llacs on es produeix la precipitació (ENTRENA, 2023).

Les primeres datacions absolutes

Els anys 70 del segle passat es feren públiques observacions innovadores en relació amb els espeleotemes freàtics de la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia), on es relacionaven aquests dipòsits amb paleonivells de la mar Mediterrània (GINÉS & GINÉS, 1974). Com a resultat d'aquestes investigacions inicials sobre la citada cova, així com de les recerques efectuades a la Cova A de Cala Varques, es presentaren al *8th International Congress of Speleology* celebrat l'any 1981 a Bowling Green (Kentucky, USA) dues comunicacions que tractaven dels espeleotemes freàtics de les coves de Mallorca (GINÉS et al., 1981a, 1981b). En aquells treballs s'exposaven les característiques i les implicacions geocronològiques dels POS, tant pel que fa als dipòsits més antics (pleistocè), com als de cronologia clarament postglacial.

La repercussió internacional de les comunicacions presentades a l'esmentat congrés despertà l'interès per realitzar recerques geocronològiques sobre aquests dipòsits cristal·lins, per part d'investigadors lligats a l'*Institut für Kernchemie der Universität Köln* (Colònia, Alemanya). D'aquesta manera, el mateix 1981, fou possible disposar de les primeres datacions radiomètriques pel mètode U-Th, efectuades pel tristament desaparegut Gerd J. Hennig.

Les datacions realitzades incloïen 4 mostres de la Cova de sa Bassa Blanca i 3 mostres de la Cova A de Cala Varques (HENNIG et al., 1981), les quals es consideraren representatives del marc cronològic que previsiblement es podria abastar. Les mostres de la primera cavitat resultaren ser dipositades –tal i com es presumia– durant el pleistocè mitjà, presentant relacions isotòpiques que s'aproximaven o superaven els límits de datació del mètode. Per altra banda, les mostres de la Cova A de Cala Varques donaven unes edats de 52,2 ka BP en el cas de l'estalagmita que serveix de suport al POS, així com una cronologia de 5,4 a 3,9 ka BP per a les parts interior i exterior, respectivament, de la banda d'espeleotemes freàtics (Figura 4). Val a dir que les tècniques emprades en aquells moments (espectrometria alfa) no eren massa precises en comparació amb les tècniques actuals, que es basen en l'ús de l'espectrometria de masses. Malgrat això, aquestes datacions ja posaven de manifest que els POS de la Cova A de Cala Varques eren d'edat holocena sense cap mena de dubte, aspecte que es ratificaria amb posterioritat. S'encetava així una primera campanya de datacions U-Th, que abastaria fins al 1988, desenvolupada amb la col.laboració de Gerd J. Hennig pertanyent aleshores al *Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung* (Hannover, Alemanya). D'aquesta manera s'aplicaren per primer cop als POS de Mallorca uns mètodes de datació radiomètrica l'ús dels quals començava en aquells moments a generalitzar-se dins l'àmbit internacional (GASCOYNE, 1984).

Nous programes de datació radiomètrica

A partir de 1994 es desenvoluparen nous programes de datació absoluta dels POS de Mallorca, en col·laboració amb el *Dipartamento di Scienze, Università degli studi Roma Tre* (Roma, Itàlia) i liderats per Paola Tuccimei. Aquests programes, que s'han perllongat fins a l'actualitat, foren incorporant la utilització de les tècniques d'espectrometria de masses (TIMS i MC-ICPMS), involucrant així mateix el laboratori de l'*Institut für Geologie, Universität Bern* (Berna, Suïssa).

Noves datacions U-Th de POS holocènics

Les anàlisis efectuades a començaments del present segle sobre espeleotemes freàtics de cavitats de l'illa inclogueren 16 datacions U-Th (MC-ICPMS) de mostres corresponents a dos espeleotemes freàtics subactuals, recol·lectats a les vores dels llacs de la Cova A de Cala Varques i de la Cova des Pas de Vallgornera (TUCCIMEI et al., 2009, 2010). Es tractava de dos espeleotemes molt diferents pel que fa a la seva morfologia i mineralogia, encara que la seva cronologia era previsiblement similar. Els POS de la primera localitat, ja descrits als apartats precedents, des del punt de vista de la seva mineralogia eren de calcita magnesiana, mentre que els espeleotemes freàtics de la Cova des Pas de Vallgornera estaven constituïts per cristalls aciculars d'aragonita que creixen formant ventalls radials (Figures 1 i 5).

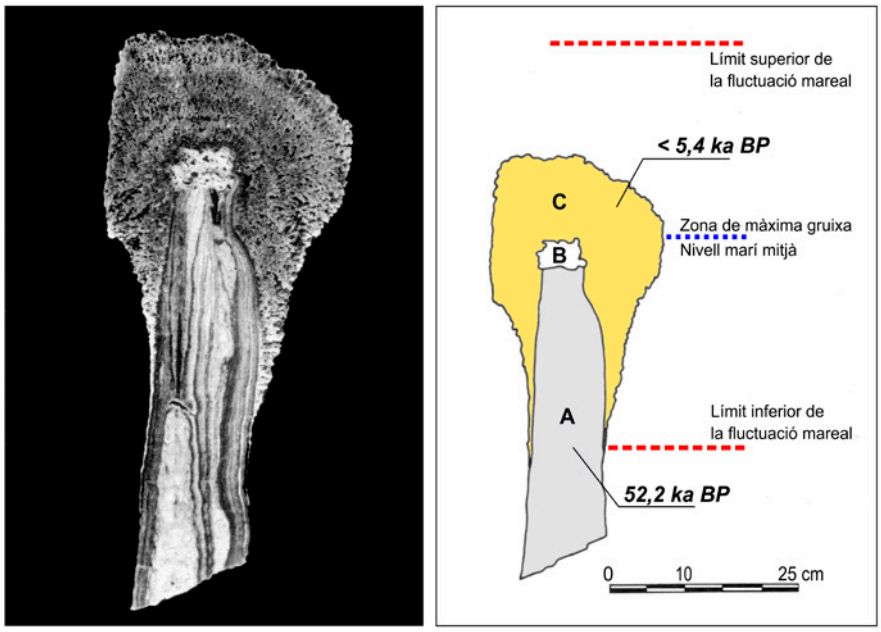


Figura 4: Secció vertical de l'espeleotema estudiat inicialment a la Cova A de Cala Varques, amb indicació de les primeres datacions U-Th efectuades. A) espeleotemes vadosos convencionals; B) possible acumulació de làmines de calcita flotant recristal·litzades; C) cristal·litzacions freàtiques que formen una gruixuda banda de POS (Basat en POMAR et al., 1979 i HENNIG et al., 1981).
Figure 4: Vertical section of the speleothem initially studied in Cova A de Cala Varques, with indication of the first U-Th datings carried out. A) conventional vadose speleothems; B) possible accumulation of re-crystallized calcite rafts; C) phreatic crystallizations forming a thick band of POS (Based on POMAR et al., 1979 and HENNIG et al., 1981).

Les datacions obtingudes permeten situar la deposició d'aquests espeleotemes freàtics entre 2,8 i 0,6 ka BP (TUCCIMEI et al., 2009, 2010), concretament entre 2,8 i 1,1 ka en el cas de la Cova A de Cala Varques, i entre 2,0 i 0,6 ka per a la mostra

aragonítica de la Cova des Pas de Vallgornera (Figura 5). També es realitzaren dues datacions addicionals de l'estalagmita que serveix de suport a una de les mostres, les quals donaren unes edats de 18,3 i 7,7 ka BP, que correspondrien a l'episodi regressiu associat a la darrera glaciació. A tall de conclusió, els POS d'aquestes dues localitats documentaven un nivell marí similar a l'actual, i relativament estable, que abraçaria gairebé els darrers 3 mil·lennis.

Un aspecte interessant a ressaltar és el fet que el voluminós espeleotema freàtic de la Cova A de Cala Varques (Figura 5A) presenta unes bandes de creixement al seu interior, que denoten una progressiva pujada del nivell freàtic. En aquest sentit, les edats més antigues corresponen a les datacions situades a les parts més interiors i inferiors del POS, mentre que les edats rejoveneixen cap a la part superior i exterior de l'espeleotema (TUCCIMEI et al., 2010). D'aquesta manera, malgrat que la morfologia externa del POS delimita una gruixa màxima ben clara, que documentaria el nivell marí mitjà de les seves darreres bandes de creixement, la seva estructura interna evidencia una progressiva pujada del nivell marí de poc més de 5 cm, durant els gairebé 2 mil·lennis que abraçà el seu desenvolupament.

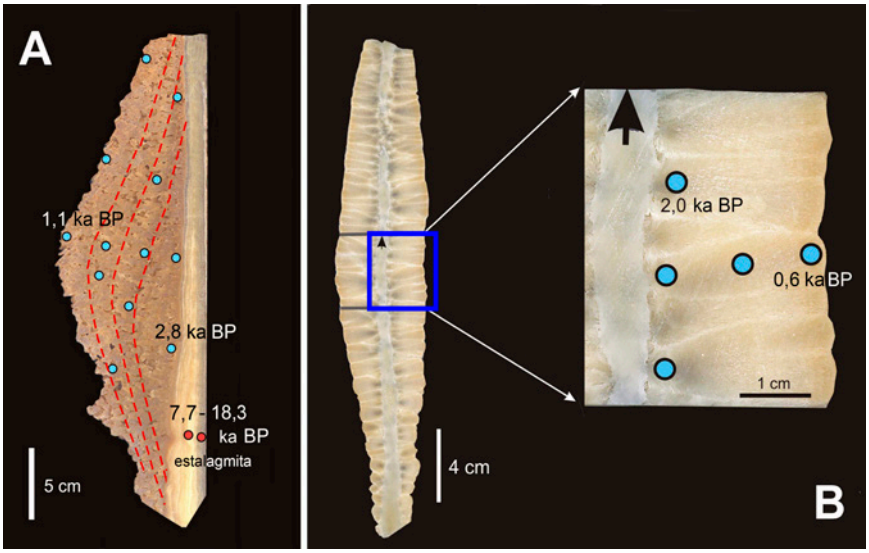


Figura 5: Espeleotemes freàtics (POS) holocènics que han estat datats mitjançant el mètode U-Th (MC-ICPMS). A) Espeleotema freàtic de calcita de la Cova A de Cala Varques que permet observar l'estalagmita vadosa que serveix de suport al POS; amb línies discontinues s'indiquen les bandes de creixement, que evidencien una progressiva pujada del nivell marí durant la deposició del sobrecreixement freàtic. B) Espeleotema freàtic d'aragonita de la Cova des Pas de Vallgornera; s'observa clarament la prima estalactita sobre la qual s'ha desenvolupat aquesta banda de cristal·litzacions freàtiques (Basat en TUCCIMEI et al., 2009, 2010).

Figure 5: Holocene POS that were dated using the U-Th method (MC-ICPMS). A) Calcite phreatic speleothem from Cova A de Cala Varques that shows the vadose stalagmite that serves as a support for the POS; dashed lines indicate the growing bands, which evidence a progressive rise in sea level during the deposition of the phreatic overgrowth. B) Aragonite POS from Cova des Pas de Vallgornera; the thin stalactite on which this band of phreatic crystallizations has developed is clearly visible (Based on TUCCIMEI et al., 2009, 2010).

Les investigacions dutes a terme en relació amb aquests espeleotemes inclogueren l'anàlisi dels isòtops estables de carboni i d'oxigen (TUCCIMEI et al, 2010). Les anàlisis efectuades sobre mostres dels POS d'ambdues localitats donaren uns valors molt similars de $\delta^{18}O$ (VPDB) que se situen entre -3,4 i -4,2 ‰. En ambdós casos són valors menys negatius que els corresponents a l'estalagmita vadosa analitzada, la qual donà un $\delta^{18}O$ entre -5,0 i -5,6 ‰. Els valors de $\delta^{18}O$ obtinguts per a les mostres de POS són indicatius de la mescla entre aigües meteòriques i marines dins d'aquest aqüífer litoral, mescla que els autors avaluen a l'entorn del 40% d'aigua marina en el cas de l'espeleotema de la Cova A de Cala Varques. Les anàlisis relatives al $\delta^{13}C$ (VPDB) aportaren resultats que se situen entre -2,2 i -3,2 ‰ per a les mostres de POS de mineralogia calcítica, mentre que presenten valors entre -4,6 i -4,9 ‰ per a les mostres d'aragonita de la Cova des Pas de Vallgornera. L'única estalagmita vadosa analitzada donà valors de $\delta^{13}C$ clarament més negatius, d'entre -6,0 i -7,9 ‰.

Tal vegada sigui convenient fer referència ara al fet que les condicions de precipitació d'una mineralogia o l'altra –calcita vs. aragonita– són un dels problemes encara per resoldre. Normalment s'han invocat factors ambientals de les aigües subterrànies, tant físics com geoquímics, per explicar la deposició d'una o altra mineralogia: temperatura, índex de saturació o concentració de Mg, entre d'altres. En aquest sentit, algunes investigacions recents han tractat d'esbrinar els mecanismes que actuen en la deposició dels POS de distintes mineralogies, sense obtenir resultats concloents sobre els factors que condicionen la presència d'aragonita en el cas dels espeleotemes freàtics de la Cova des Pas de Vallgornera (BOOP et al., 2014).

Les datacions efectuades mitjançant el mètode ^{14}C

Utilitzant els dos mateixos espeleotemes freàtics que s'han descrit a l'anterior apartat, es realitzaren noves datacions pel mètode ^{14}C (TUCIMEI et al., 2011), amb la finalitat de poder comparar-les amb les cronologies robustes obtingudes anteriorment mitjançant el mètode U-Th. Aquesta comparació permetria quantificar la variabilitat de la proporció de "*dead carbon*" –és a dir, de carboni lliure de

l'isòtop radiactiu ^{14}C– procedent de la dissolució de la roca, i veure quina és la seva repercusió en les edats dels POS obtingudes per aquest mètode.

S'analitzaren 7 mostres dels espeleotemes freàtics de les dues localitats estudiades, així com una mostra corresponent a una estalagmita vadosa que els serveix de suport. Els resultats obtinguts, en el cas de les mostres de la Cova A de Cala Varques, presenten una consistència molt bona amb les edats calculades pel mètode U-Th. Concretament, s'obtingueren per als POS d'aquesta localitat edats ^{14}C entre 2,8 i 0,3 ka BP, així com una cronologia de 7,8 ka BP per a l'estalagmita sobre la que creixen.

Per altra banda, les mostres de la Cova des Pas de Vallgornera subministraren unes edats ^{14}C sistemàticament entre 2,3 i 2,4 ka més antigues que les edats aportades per les tècniques U-Th. TUCCIMEI et al. (2011) atribuïren el relatiu "envelliment" observat a les mostres d'aquesta cavitat a un major temps de residència de l'aigua d'infiltració en el sòl i l'epicarst, la qual cosa implicaria una elevada proporció de "*dead carbon*" i de matèria orgànica procedent del sòl. Les anàlisis corresponents a les datacions ^{14}C realitzades permeten constatar una gran diferència en la proporció de "*dead carbon*" (*dcp*) d'ambdós POS. Mentre a les mostres de la Cova A de Cala Varques els valors de *dcp* són tan sols devers un 1,1%, a la Cova des Pas de Vallgornera la proporció de *dcp* s'eleva a 24,6% degut a la interacció més perllongada entre la roca i les aigües meteòriques. Les anàlisis relatives a la presència de determinats elements (Mg, Na, Sr, P) en els espeleotemes vadosos que actuen de suport a ambdós POS, resulten consistents amb un major temps de residència de les aigües d'infiltració en aquesta localitat.

Les investigacions més recents

Les darreres recerques intensives sobre els espeleotemes freàtics holocènics han estat publicades recentment per ONAC et al. (2022) i s'han centrat en un total de 8 cavitats localitzades a les zones costaneres del llevant i migjorn de Mallorca. Es tracta en tots els casos de coves litorals, excavades en les calcarenites i altres materials carbonatats postorogènics del miocè superior que formen part de la regió càrstica coneguda com el Migjorn (GINÉS & GINÉS, 1989, 2009). Les cavitats investigades es troben a prop de la línia de costa –a una distància que en general no supera els 400 m– i presenten totes elles llacs freàtics d'aigües salabroses afectats per les fluctuacions mareals, on es poden reconèixer i mostrejar POS aparentment subactuals.

Els POS com a registres del nivell marí: aspectes teòrics i paràmetres rellevants

A part de consideracions de tipus estètic, morfològic o genètic, el principal interès dels espeleotemes freàtics radica en el seu potencial d'indicadors precisos de la posició del nivell marí, el que es denomina com a *Sea-Level Index Point* (SLIP) en la bibliografia internacional sobre aquesta matèria (HIJMA et al., 2015). Convé, per tant, abans d'exposar els resultats aportats per aquesta darrera campanya d'investigació, dedicar quelcom d'atenció als paràmetres que defineixen la relació de l'ambient deposicional amb el nivell de les aigües marines, tant en el moment de la seva formació com en el temps present (ROVERE et al., 2016a). En aquest sentit, remetem el lector als materials suplementaris del treball ja citat d'ONAC et al. (2022), en els quals es tracta amb deteniment aquest tipus de qüestions que ara s'exposaran de manera molt abreujada.

Per tal de recolzar l'argumentació que seguirà, a la Figura 6 apareix representat un POS ideal amb la seva morfologia característica de tipus fusiforme, la qual mostra una major gruixa cap a la part central del dipòsit. El creixement de l'espeleotema té lloc en el rang altimètric comprès entre la marea alta (***h_t***) i la marea baixa (***l_t***), és a dir, en la zona de fluctuació mareal corresponent al que es coneix com *Indicative Range* o IR, o sigui

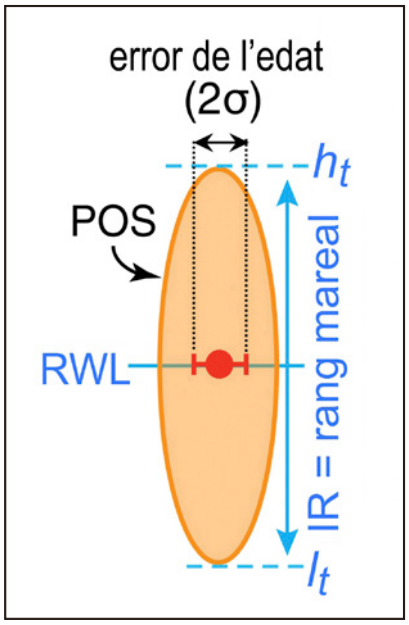


Figura 6: Els espeleotemes freàtics holocens de Mallorca. Representació esquemàtica d'un POS, on s'observa com la part més gruixuda (RWL) correspon a la posició mitjana del nivell marí durant el període de formació del POS. **IR** = *indicative range*; ***h_t*** = marea alta; ***l_t*** = marea baixa; vegeu informacions addicionals en el text (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).
Figure 6: Holocene POS from Mallorca. Schematic representation of the indicative meaning of POS. The thickest part corresponds to the reference water level (RWL), which was the position of mean sea level for the period of POS formation. **IR** = indicative range; ***h_t*** = high tide; ***l_t*** = low tide; see additional information in the text (Modified from ONAC et al., 2022).

el rang d'elevació en el qual es forma o diposita l'indicador del nivell marí analitzat (HIJMA et al., 2015; ROVERE et al., 2016a). Dins d'aquest esquema conceptual, la part central més gruixuda de l'espeleotema coincidiria amb el *Reference Water Level* (RWL), que per convenció es defineix com el punt mig del *Indicative Range* o IR. En el cas dels espeleotemes freàtics, el RWL és coincident amb el nivell marí mitjà durant la deposició del POS, de tal manera que la part central del POS és directament un registre del nivell marí relatiu, o RSL, en un moment donat (ROVERE et al., 2016b). En els POS estudiats ara, el RSL que enregistren és el nivell marí de l'era preindustrial, aspecte que haurà de ser ratificat per les datacions absolutes dutes a terme. Avui en dia, com ja hem comentat, aquestes cristal·litzacions es troben parcialment submergides a les aigües freàtiques litorals per mor de la gradual pujada actual del nivell de la mar.

El darrer paràmetre a considerar és de caràcter temporal: l'edat de l'espeleotema, obtinguda mitjançant datació radiomètrica U-Th i expressada amb els seus errors associats (**2σ**). La datació ens informarà del moment en el qual ha tingut lloc una estabilització del nivell marí a una determinada alçada (un RSL específic) i, fins i tot, ens donarà dades sobre la durada de l'estabilització en el cas de múltiples datacions d'espeleotemes força gruixuts. A la Figura 6, la barra vermella horitzontal indicaria la magnitud dels errors associats a la datació. Aquest recurs gràfic també s'utilitza a moltes de les figures dels apartats següents, encara que la petita magnitud dels errors en dificulta l'apreciació a les gràfiques.

Amb la finalitat de complementar el marc teòric exposat en aquest apartat, a la Figura 7 es representa un diagrama sobre els canvis en la morfologia dels espeleotemes freàtics (POS) en relació amb les fluctuacions del nivell marí durant el seu creixement. Al començament de la deposició de l'espeleotema, el rang indicatiu (IR $\mathbf{t}_0$) és simplement el rang mareal del moment inicial; tal i com ja s'ha indicat abans, el nivell marí relatiu (RSL) d'aquell moment és coincident amb el *Reference Water Level* (RWL), el qual correspon al punt mig del IR inicial. Si durant la deposició del POS es donen fluctuacions menors del nivell marí, els límits de la marea alta (*ht*) i la marea baixa (*lt*) es van desplaçant cap a dalt o cap a baix, així com els corresponents rangs indicatius de cada fluctuació menor (per exemple, IR $\mathbf{t}_1$ o IR $\mathbf{t}_3$). D'aquesta manera, en arribar al final de la deposició de l'espeleotema la longitud vertical del POS pot resultar notablement incrementada, de la mateixa manera que s'ha incrementat el seu rang indicatiu final (IR $\mathbf{t}_5$).

Al treball d'ONAC et al. (2022) s'efectua un càlcul de la precisió obtinguda en la determinació dels nivells marins relatius (RSL) que són definits pels POS holocènics. Els autors treballen a partir d'un rang mareal teòric de 25 cm, encara que la longitud vertical dels POS estudiats pot arribar fins a 35 cm,

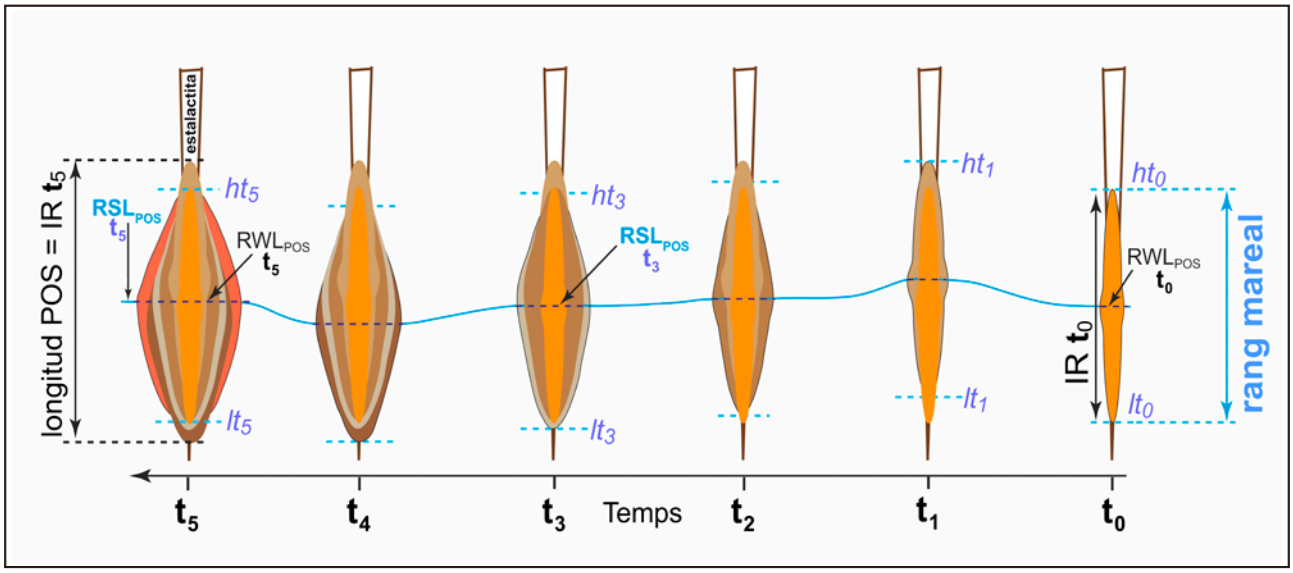


Figura 7: Diagrama esquemàtic que il·lustra els canvis en la morfologia dels POS deguts a fluctuacions del nivell marí al llarg del temps. Quan el nivell marí relatiu (RSL) fluctua entre $\mathbf{t}_0$ i $\mathbf{t}_5$, la precipitació de capes addicionals de carbonats té lloc lleugerament per damunt o per sota del Reference Water Level (RWL) inicial, causant que el POS es faci més gruixut i la seva dimensió vertical es vagi incrementant al llarg del temps. El rang indicatiu final de l'espeleotema (IR $\mathbf{t}_5$) correspon a la longitud vertical del POS en el seu conjunt. (*ht* = marea alta; *lt* = marea baixa). (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).

Figure 7: Schematic diagram illustrating changes in POS morphology due to RSL fluctuation over time. As the Relative Sea Level (RSL) fluctuates between $\mathbf{t}_0$ and $\mathbf{t}_5$, precipitation of additional carbonate layers take place slightly above or below the initial Reference Water Level (RWL) causing the POS to become wider and longer over time. The final Indicative Range of the speleothem (IR $\mathbf{t}_5$) corresponds to the vertical length of the whole POS. (*ht* = high tide; *lt* = low tide). (Modified from ONAC et al., 2022).

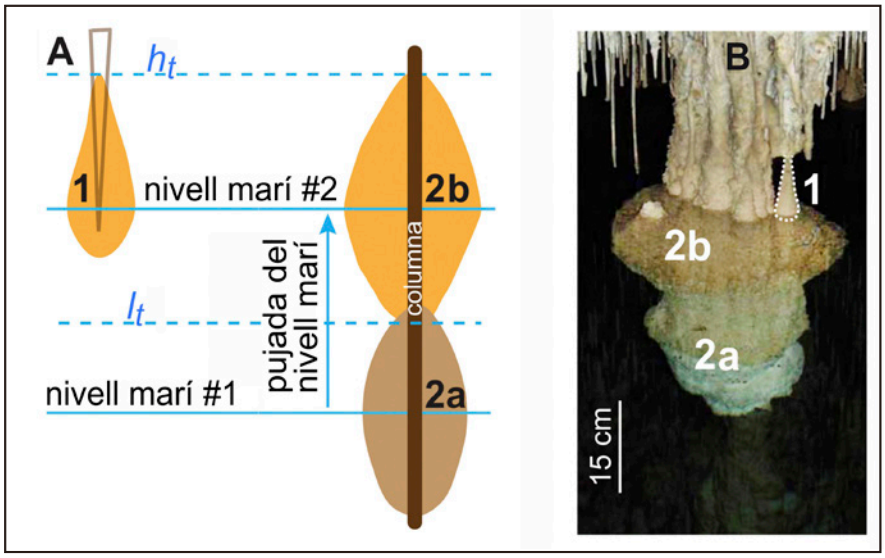


Figura 8: Els espeleotemes freàtics holocens de Mallorca. A) Dibuix que mostra diversos tipus de creixement dels POS. **1**: exemplar de morfologia bulbosa que recobre una estalactita massa curta per a permetre el creixement sobre tot el rang mareal. **2a-2b**: exemple de POS compost de morfologia fusiforme desenvolupat sobre una columna que abraça els rangs mareals complets de dos nivells marins successius. B) Fotografia d'un POS compost de les Coves del Drac (Manacor), format durant el nivell marí #1 (**2a**) seguit d'una pujada fins assolir el nivell marí #2 (**2b**). (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).
Figure 8: Holocene POS from Mallorca. A) Drawing depicting types of POS growth. **1**: knob-type POS encrusting a stalactite that was too short to allow growth over the full tidal range; **2a-2b**: spindle-shaped composite POS precipitated on a column over the entire tidal ranges of the two recorded sea-levels. B) Composite POS in Coves del Drac (Manacor) formed during sea level still stand #1 (**2a**) and after a sea-level rise to still stand #2 (**2b**).
(Modified from ONAC et al., 2022).

degut a possibles variacions menors del nivell marí durant el període de creixement de l'espeleotema, o bé a fluctuacions del nivell relacionades amb esdeveniments meteorològics singulars però persistents. Els resultats aportats donen errors en la determinació del nivell marí compresos entre 0,05 i 0,11 m, el que representa, a totes llums, una major precisió altimètrica en comparació amb d'altres registres exteriors (platges fòssils, terrasses marines, creixement de coralls, presència d'organismes inter- o sub-mareals, etc.), tal i com s'assenyala a diverses publicacions prèvies (ONAC et al., 2012; VAN HENGSTUM et al., 2015).

La presència de POS compostos

Ja s'ha vist amb anterioritat que la morfologia externa dels espeleotemes freàtics és bastant variada, sobretot en funció de les característiques del suport sobre el qual s'han desenvolupat (Figures 1 i 3). Precisament, una de les principals novetats aportades per ONAC et al. (2022) és l'existència dels *POS compostos* –que enregistren més d'un nivell marí– els quals han estat observats i estudiats a les Coves del Drac, de Manacor (Figures 8 i 9). Es tracta d'espeleotemes que han crescut sobre suports de suficient dimensió vertical com per abraçar tot el rang mareal preindustrial així com una fondària addicional de la columna d'aigua, relativament important. La denominació de *POS compostos* rau en el fet que aquests exemplars documenten dos estabilitzacions marines successives, separades per una petita pujada del nivell marí. Així, una banda inferior de cristal·litzacions (assenyalada com a **2a**, a les Figures 8A i 8B) enregistra una primera estabilització del nivell marí, que apareix parcialment recoberta per un sobrecreixement cristal·lí més recent (marcat com a **2b**) corresponent

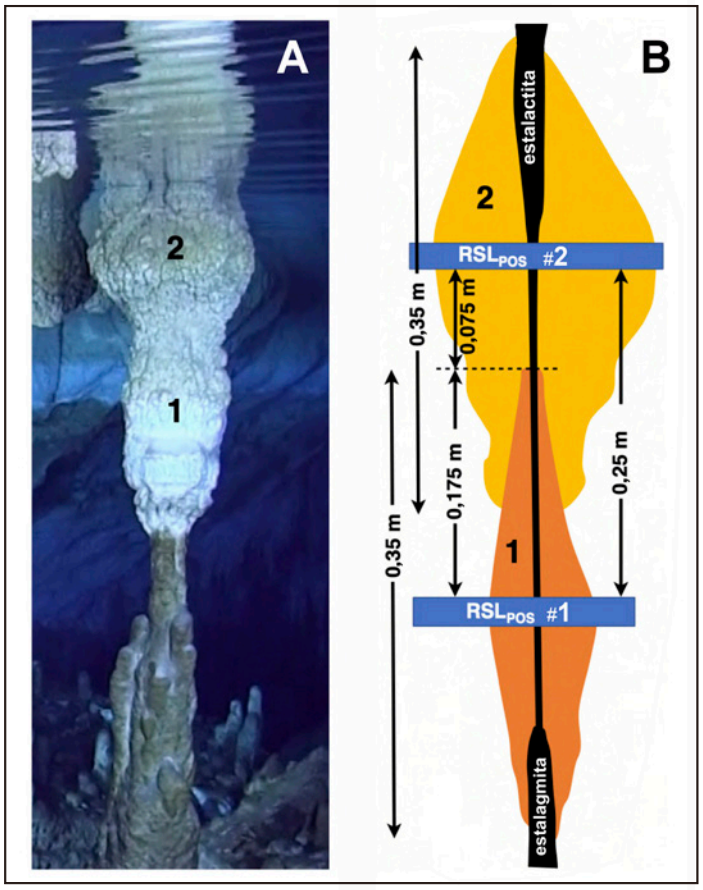


Figura 9: Interpretació morfogenètica d'un POS compost de les Coves del Drac, a Manacor (Foto: M.A. Perelló). Aquest espeleotema enregistra dos nivells marins diferents separats per una pujada del nivell de la mar d'aproximadament 25 cm. RSL_{POS} = nivells marins relatius, deduïts de la pròpia morfologia dels POS; veure explicacions addicionals en el text (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).
Figure 9: Morphogenetic interpretation of a composed POS from Coves del Drac, in Manacor (Photo: M.A. Perelló). This speleothem records two different sea-level still stands separated by a sea-level rise of around 25 cm. RSL_{POS} = relative sea levels deduced from POS morphology; see additional explanations in the text (Modified from ONAC et al., 2022).

al nivell preindustrial de la mar. Les datacions efectuades en aquests exemplars compostos permetran conèixer unes vicissituds, experimentades pel nivell marí de l'holocè final a la nostra àrea geogràfica, que ara per ara eren desconegudes.

Per tal de completar la visió dels POS compostos, la Figura 9 ens mostra la interpretació morfogenètica d'un exemplar notable de les esmentades Coves del Drac. La part inferior de l'espeleotema (assenyalada amb l'**1**) representa un primer nivell marí de major antiguitat, mentre que la part superior (marcada amb el **2**) documenta una estabilització marina més moderna, ocorreguda després d'una pujada de 25 cm de magnitud. La determinació de la cota del nivell marí més antic (**1**) es realitza prenent com a referència la part més gruixuda de la part superior de l'espeleotema (**2**), que com ja s'ha dit recull la posició del nivell de la mar a l'era preindustrial. Aquesta història queda ben documentada mitjançant altres POS d'aquestes característiques que ha estat possible mostrejar a la mateixa localitat; la datació d'ambdós esdeveniments permet situar el marc geocronològic i també dona informació sobre la velocitat d'aquesta pujada recent del nivell de la Mediterrània.

Resultats de les darreres campanyes de datacions

La recerca s'ha desenvolupat sobre 13 espeleotemes freàtics que s'han recol·lectat en 8 cavitats diferents (Figura 10); sempre que ha estat possible, s'han mostrejat exemplars prèviament romputs (per causes naturals, o no), però dels quals era factible esbrinar el seu emplaçament i context morfogenètic. En total s'analitzaren un total de 16 mostres sobre les quals s'aporten 138 datacions U-Th d'elevada precisió (Taula 1). En la majoria de les mostres s'han realitzat múltiples datacions per tal de comprovar la

LOCALITAT	MUNICIPI	MOSTRA	COTA (m)	NOMBRE DE DATACIONS	RANG D'EDAT (ka BP)
Coves del Drac	Manacor	DR-D15	±0	16	**2,84 - 0,36**
Coves del Drac	Manacor	DR-D15b	–0,25	15	**3,89 - 3,26**
Coves del Drac	Manacor	DR-D7	±0	5	**2,77 - 0,50**
Coves del Drac	Manacor	DR-D7b	–0,25	7	**3,41 - 2,94**
Coves del Drac	Manacor	DR-D18	±0	18	**2,68 - 0,67**
Coves del Drac	Manacor	DR-D18b	–0,25	2	**3,56 - 3,48**
Coves del Drac	Manacor	DR-D14	±0	16	**2,53 - 0,91**
Coves del Drac	Manacor	DR-D13	±0	2	**2,18 - 2,02**
Cova Genovesa	Manacor	GE-D8	±0	2	**2,22 - 1,30**
Cova des Pas de Vallgornera	Llucmajor	VL-D3	±0	5	**1,89 - 0,58**
Cova des Pas de Vallgornera	Llucmajor	PV-1681	±0	19	**1,80 - 0,31**
Cova dets Ases	Felanitx	AS-D3	±0	20	**1,66 - 0,07**
Cova de sa Gleda	Manacor	GL-D15	±0	2	**1,57 - 0,25**
Cova A de Cala Varques	Manacor	VA-D1	±0	1	**1,46**
Cova des Drac (Rafal des Porcs)	Santanyí	RP-D1	±0	4	**1,34 - 0,34**
Cova de sa Tortuga	Manacor	TO-D4	±0	4	**1,33 - 0,09**

Taula 1: Resultats de les datacions U-Th realitzades. Les sis primeres files de la taula corresponen a mostres de POS compostos; en color blau s'indiquen les mostres corresponents a la part inferior d'aquests espeleotemes. Les cotes estan referides a la posició del nivell marí preindustrial, en base a la pròpia morfologia dels POS mostrejats. Les edats es refereixen al rang temporal en el qual ha crescut l'espeleotema, documentat per les diverses datacions realitzades al llarg de les seccions de les mostres dels POS. Les dades detallades de les datacions poden ser consultades a ONAC et al. (2022, mat. supl.).

Table 1: Results of the U-Th dating program. The first six rows of the table correspond to composite POS; the samples corresponding to the lower part of these speleothems are highlighted in blue color. Elevations are referred to the pre-industrial sea level, deduced by the POS morphology itself. The ages refer to the temporal range in which the speleothem has grown, documented by the successive datings carried out along the profile of the POS samples. Detailed data on the datings can be consulted at ONAC et al. (2022, Suppl. Mat.).

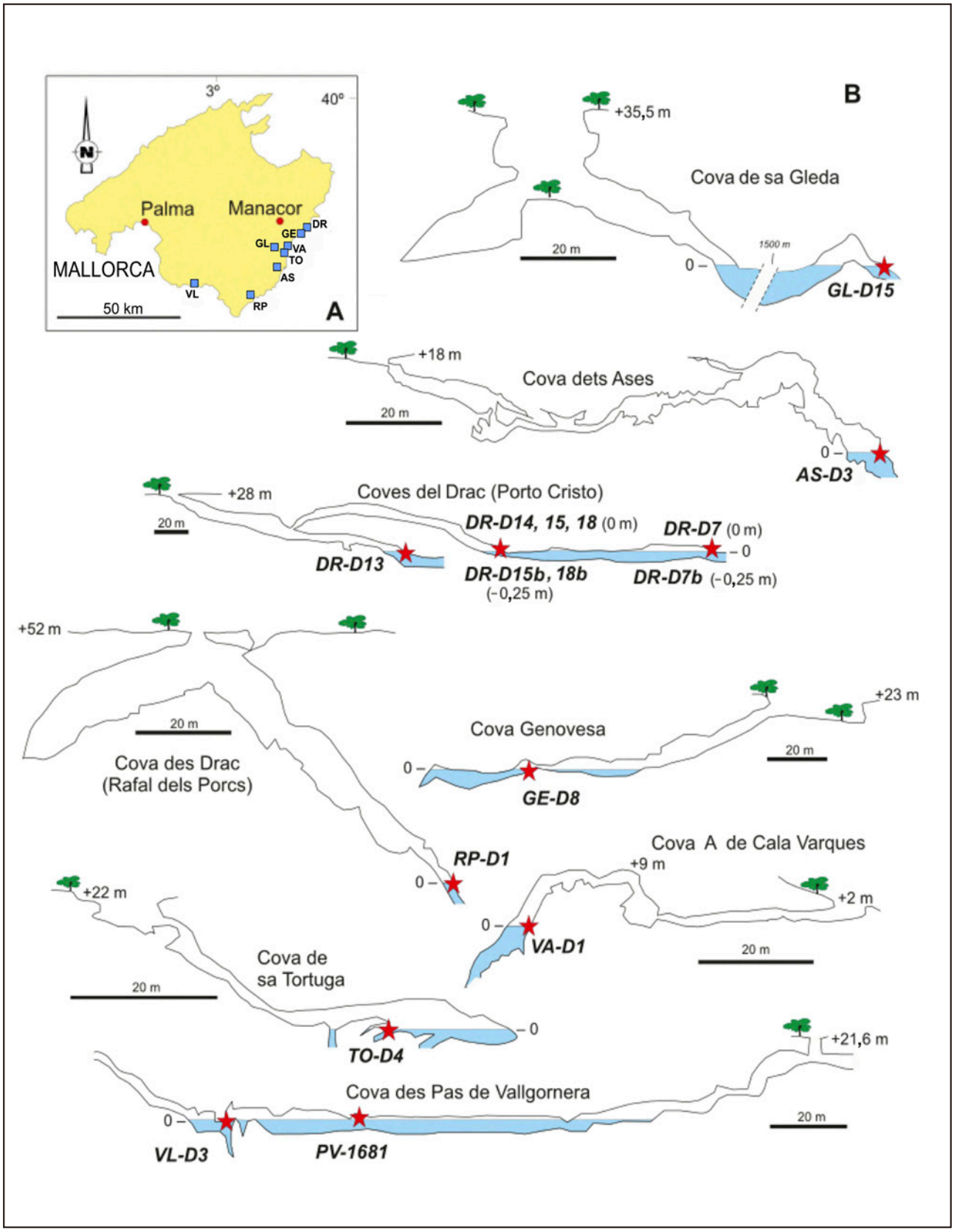


Figura 10: A) Localització de les coves investigades. DR: Coves del Drac; GE: Cova Genovesa; VA: Cova A de Cala Varques; TO: Cova de sa Tortuga; GL: Cova de sa Gleda; AS: Cova dets Ases; RP: Cova des Drac (Rafal des Porcs); VL: Cova des Pas de Vallgornera. B) Perfils esquemàtics de les coves estudiades amb indicació de les mostres atribuïdes a l'holocè (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).
Figure 10: A) Location of the investigated caves. DR: Coves del Drac; GE: Cova Genovesa; VA: Cova A de Cala Varques; TO: Cova de sa Tortuga; GL: Cova de sa Gleda; AS: Cova dets Ases; RP: Cova des Drac (Rafal des Porcs); VL: Cova des Pas de Vallgornera. B) Schematic profiles of the caves with indication of the collected samples attributed to the Holocene (Modified from ONAC et al., 2022).

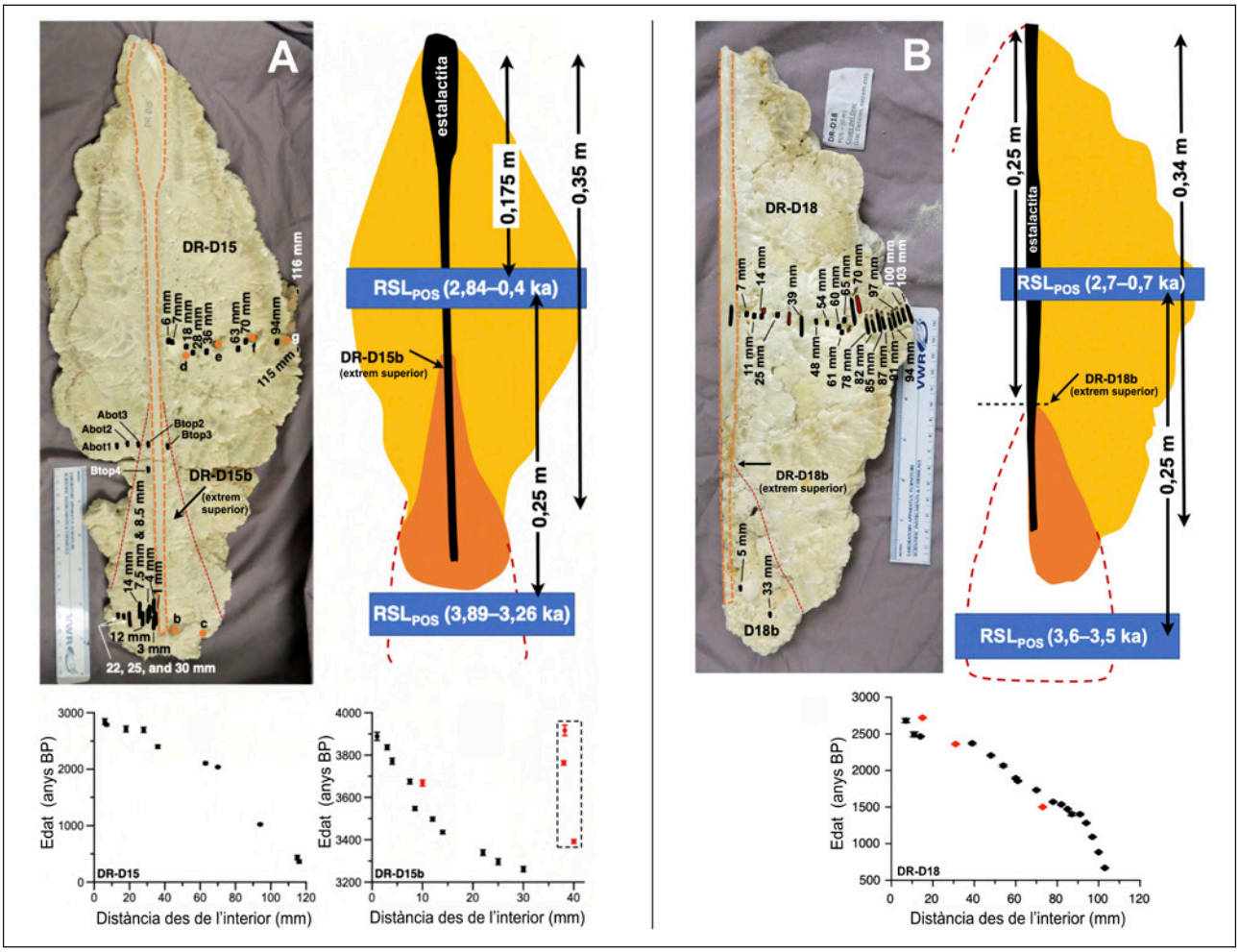


Figura 11: Els POS compostos DR-D15/15b (A) i DR18/18b (B) de les Coves del Drac (Manacor). Vista en secció dels espeleotemes amb la localització de les submostres extretes per a les datacions U-Th, i interpretació morfogenètica que es deriva (RSL_{POS} = nivells marins relatius deduïts dels POS i les seves edats). S'han identificat dos nivells marins successius, separats per una pujada de 25 cm del nivell de la Mediterrània ocorreguda entre 3,26 i 2,84 ka BP. Les gràfiques de la banda inferior de la figura representen la cronologia de la deposició dels POS; els símbols vermells corresponen a datacions de capes contaminades o alterades, que han subministrat edats sense coherència estratigràfica (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).

Figure 11: The composed POS samples DR-D15/15b (A) and DR18/18b (B) from Coves del Drac (Manacor). Section view of the speleothems with the location of subsamples for U-Th dating, and morphogenetic interpretation derived from them (RSL_{POS} = POS deduced relative sea levels and its ages). Two successive sea levels have been identified, separated by a short rise (25 cm) that occurred between 3.26 and 2.84 ka BP. The graphs at the lower part of the figure represent the chronology of POS deposition; the red symbols correspond to datings of contaminated or altered layers, which have yielded ages without stratigraphic coherence (Modified from ONAC et al., 2022).

coherència estratigràfica dels resultats i avaluar les taxes de creixement de l'espeleotema. Així mateix es realitzaren datacions d'algunes estalactites que feien de suport a alguns dels POS mostrejats. Tan sols unes poques datacions donaren dades inconsistents o amb grans errors, motiu pel qual s'han descartat; en aquest sentit, s'ha pogut constatar que al voltant del 90% de les datacions realitzades subministraren dades cronològiques de gran fiabilitat. Les anàlisis radiomètriques es dugueren a terme al *Radiogenic Isotope Laboratory, University of New Mexico* (Albuquerque, USA), així com a l'*Institut für Geologie, Universität Bern* (Suïssa). Els resultats d'aquestes investigacions foren publicats recentment per ONAC et al. (2022), posant especial atenció als aspectes geocronològics i paleoclimàtics dels POS estudiats, així com a les informacions que aquests dipòsits subministren sobre les actuals tendències de canvi climàtic.

Datacions dels POS compostos de les Coves del Drac (Manacor)

Dos espeleotemes procedents de la zona del *llac de les Delícies* (mostres DR-D15/15b i DR-D18/18b) resultaren ser uns espectaculars i molt il·lustratius POS compostos. Ambdós exemplars són formacions que fan entre 40 i 50 cm de llargada vertical (Figura 11), les quals exhibeixen uns sobrecreixements freàtics prominents i gruixuts (mostres DR-D15 i DR-D18) desenvolupats sobre

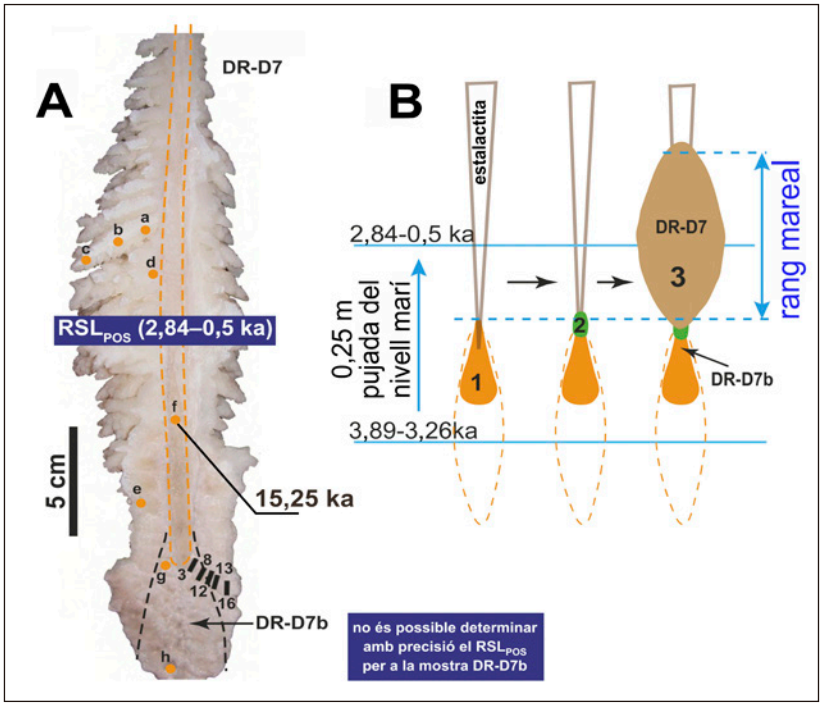


Figura 12: Mostres DR-D7/7b de les Coves del Drac (Manacor). A) Vista en secció d'aquest POS compost, el qual conté evidències de les dues estabilitzacions marines de ±0 (nivell marí preindustrial) i de –0,25 m. La mostra DR-D7b representa tan sols el creixement de l'espeleotema durant la marea alta del nivell marí de –0,25 m, degut a l'escassa longitud de l'estalactita (RSL$_{POS}$ = nivell marí relatiu deduït del POS i la seva edat). B) Esquema de les fases de creixement de l'espeleotema. La línia discontinua taronja indica la possible morfologia del POS inferior si l'estalactita fos més llarga. L'encrustació assenyalada amb el número 2 (en verd) representa una precipitació menor de carbonats que tingué lloc durant la pujada del nivell marí ocorreguda entre 3,26 i 2,84 ka BP (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).
Figure 12: Samples DR-D7/7b from Coves del Drac (Manacor). A) Section view of this composed POS, which contains evidence of the two marine stabilizations at ±0 (pre-industrial sea level) and –0.25 m. Sample DR-D7b only represents speleothem growth during the high tide for the –0.25 m sea level, due to the short length of the stalactite (RSL$_{POS}$ = POS deduced relative sea level and its age). B) Drawing illustrating the growth phases of the speleothem. The orange dashed line shows the predicted morphology of the lower POS if the stalactite was longer. The encrustation labelled 2 (green) represents minor carbonate precipitation during the sea-level rise between 3.26 and 2,84 ka BP (Modified from ONAC et al., 2022).

unes estalactites més aviat primes. Aquests sobrecreixements de més de 10 cm de gruixa, que corresponen al nivell preindustrial dels llacs, apareixen recobrint els extrems superiors d'uns altres POS (DR-D15b i DR-D18b) dipositats en correspondència amb un nivell marí situat alguns decímetres més avall.

Resulta evident que les parts inferiors dels dos espeleotemes (mostres DR-D15b i DR-D18b) capturen tan sols la banda superior del rang mareal corresponent a un paleonivell marí, ocorregut entre 3,89 i 3,26 ka BP. Una curta pujada posterior, avaluada en 0,25 m, faria assolir el nivell marí preindustrial que es perllongarà des de 2,84 ka BP fins al segle XX. Malgrat que el nivell inferior dels POS compostos només està enregistrat de manera fragmentària, existeixen a les Coves del Drac exemplars que capturen en la seva totalitat el rang mareal dels dos nivells marins representats (Figura 9), tot permetent reconstruir amb claredat la seva morfologia i paràmetres dimensionals.

Unes poques datacions de les mostres DR-D15b i DR-D18 aporten resultats fora de l'ordre estratigràfic o amb importants errors (veure gràfiques inferiors de la Figura 11); en el cas de la mostra DR-D15b es tracta de les capes més externes del precipitat, que poden haver estat contaminades o alterades. Les corbes de creixement d'aquests POS compostos donen unes taxes mitjanes de l'ordre de 0,05 mm/any.

Per altra banda, la mostra DR-D7/7b és un espeleotema de característiques molt semblants als dos anteriors (Figura 12A). En aquest exemplar l'estalactita que actua de suport és molt curta i, per tant, el nivell marí de la cota −0,25 m està representat només mínimament, ja que el creixement freàtic −de mineralogia aragonítica− estava limitat tan sols als moments de marea alta (mostra DR-D7b). No obstant això, el major interès d'aquest POS compost rau en el fet que inclou una precipitació menor de carbonats ocorreguda durant la pujada del nivell marí entre 3,26 i 2,84 ka BP, la qual apareix assenyalada amb un **2** (en color verd) a la Figura 12B. La part superior d'aquest POS compost (mostra DR-D7) està formada per grans cristalls de calcita i conté en la seva totalitat la precipitació corresponent a l'estabilització de cota ±0 que s'estén des de 2,84 ka BP fins a l'era industrial. També s'efectuà la datació de l'estalactita que fa de suport a l'espeleotema freàtic, la qual es desenvolupà coincidint amb la davallada del nivell marí durant la darrera glaciació, amb una edat obtinguda de 15,25 ka BP.

Datacions dels POS convencionals

A més dels POS compostos descrits en les seccions prèvies, la recerca ha involucrat també 10 espeleotemes freàtics convencionals o simples, procedents de 8 cavitats diferents (Taula 1). Totes les mostres estudiades representen el nivell marí subactual, corresponent al nivell ±0 m de l'era preindustrial.

La mostra DR-D14 és un voluminós precipitat freàtic d'aragonita, procedent de la zona del *llac de les Delícies* de les Coves del Drac, a Manacor. Presenta una gruixa notable, de més de 12 cm, que ha

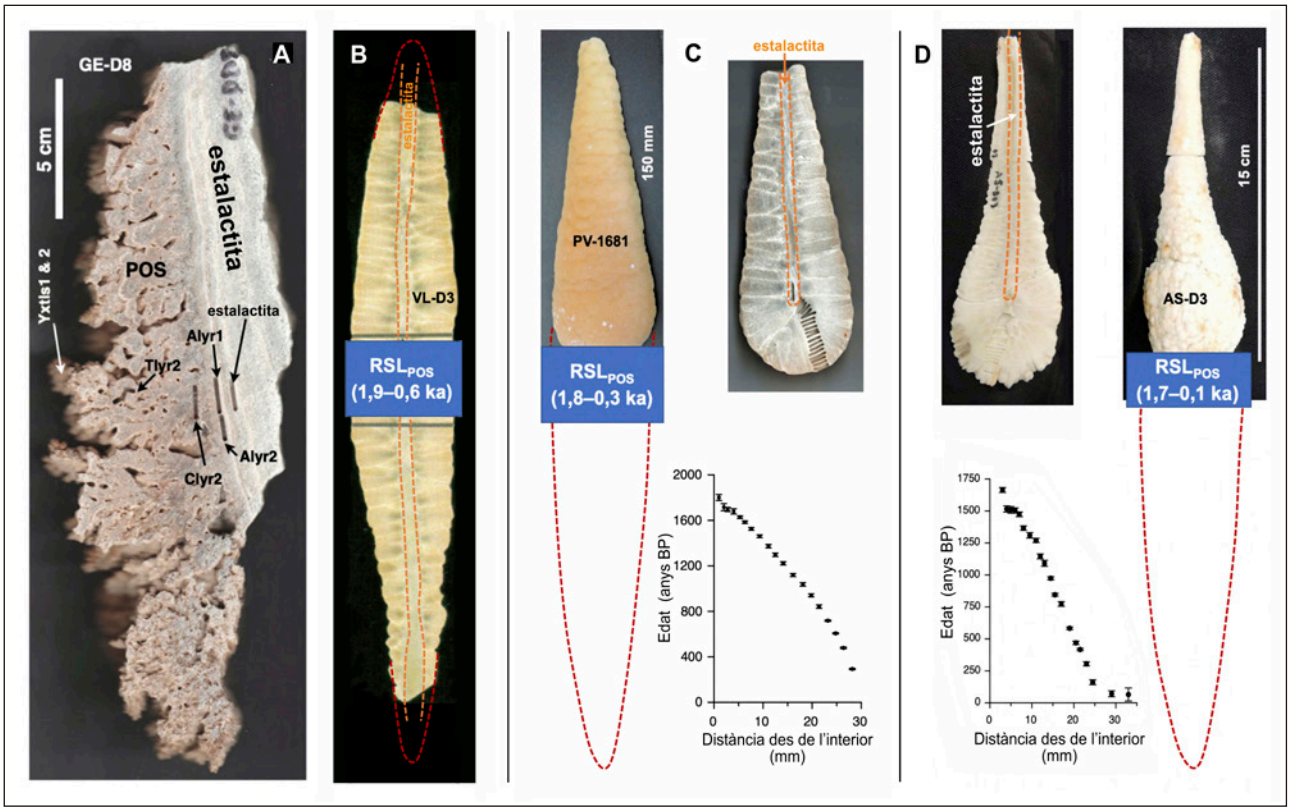


Figure 13: Mostres de POS corresponents al nivell marí preindustrial. A) POS de calcita (mostra GE-D8) de la Cova Genovesa, a Manacor; l'estalactita del seu interior ha donat una edat corresponent a la darrera glaciació. B) Vista en secció de la mostra VL-D3 de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor), de mineralogia aragonítica. C) Mostra PV-1681, procedent també de la Cova des Pas de Vallgornera, formada per un precipitat d'aragonita; s'inclou una gràfica que recull la cronologia del creixement del POS. D) POS de mineralogia aragonítica (mostra AS-D3) de la Cova dets Ases, a Felanitx. Les línies vermelles discontínues (C i D) assenyalen la morfologia teòrica del POS si el suport hagués estat a bastament llarg; els requadres blaus indiquen la posició deduïda del nivell marí relatiu (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).

Figure 13: POS samples corresponding to the pre-industrial sea level. A) Calcite POS (sample GE-D8) from Cova Genovesa, in Manacor; the inner stalactite has yielded an age corresponding to the last glacial event. B) Section view of the aragonite sample VL-D3 from Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). C) Sample PV-1681, formed by an aragonite precipitate, also from Cova des Pas de Vallgornera; a graph on the growth chronology of this POS is included. D) Aragonitic POS (sample AS-D3) from Cova dets Ases, in Felanitx, including a graph on its growth chronology. The red dashed lines (C and D) denote the contour of POS for a scenario where stalactites were longer; the blue boxes indicate the inferred position of the RSL (Modified from ONAC et al., 2022).

permès realitzar successives datacions que situen la cronologia del seu creixement entre 2,53 i 0,91 ka BP, amb una coherència estratigràfica gairebé total. La corba de creixement d'aquests POS dona una taxa mitjana elevada, de l'ordre de 0,08 mm/any. Per altra banda, la mostra DR-D13 és un POS de calcita, provinent del *llac Negre* de la mateixa cavitat. Es tracta, en aquest cas, d'un precipitat de coloració obscura que conté abundant material detrític; en conseqüència, tan sols s'han pogut realitzar dues datacions, no gaire rellevants, que donen edats compreses entre 2,18 i 2,02 ka BP.

Procedent de la Cova Genovesa (Manacor) s'ha obtingut la mostra GE-D8 (Figura 13A), que inclou un fragment gros de l'estalactita que serveix de suport al POS. Totes les submostres obtingudes per a les datacions són de calcita i es presenten brutes, així com amb un baix contingut d'urani, motius pels quals subministren edats amb grans errors. Les edats obtingudes estan compreses entre 2,22 i 1,30 ka BP, encara que les capes més internes del POS podrien assolir una antiguitat de 2,85 ka BP. D'aquesta mostra també s'ha datat l'estalactita vadosa que fa de suport al precipitat freàtic; l'edat obtinguda és de 25,68 ka BP, el que situaria el seu creixement en la darrera glaciació, tot coincidint amb un nivell marí bastant inferior a l'actual.

Els espeleotemes freàtics d'aragonita de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor) foren estudiats fa alguns anys per TUCCIMEI et al (2009, 2010), i documentaren un creixement continuat entre 2,02 i 0,61 ka BP. No obstant això, es feren datacions addicionals d'alguns POS d'aquesta localitat per tal de reafirmar els resultats prèviament obtinguts. Concretament, es tornà a datar la mostra VL-D3, la qual consisteix en un POS d'aragonita que recobreix una llarga estalactita (Figura 13B) i que captura tot el rang mareal de la superfície dels llacs. La cronologia subministrada per aquesta mostra és del tot coincident amb les dades anteriors, ja que abraça de 1,89 a 0,58 ka BP. Per altra

banda, s'han portat a terme 19 datacions de la mostra PV-1681 (Figura 13C), les quals segueixen un transecte al llarg de l'extrem d'un POS desenvolupat sobre una estalactita que, en aquest cas, tan sols penetra lleugerament la superfície de les aigües freàtiques sense capturar tot el rang mareal. Les edats subministrades comprenen d'1,80 a 0,31 ka BP, tot presentant una coherència estratigràfica perfecta (gràfica inferior de la Figura 13C). La taxa de creixement calculada per a aquest espeleotema és bastant baixa (0,019 mm/any), sobretot si es compara amb els valors obtinguts per a alguns POS de les Coves del Drac.

Procedent de la Cova dets Ases (Felanitx), es recol·lectà la mostra AS-D3 (Figura 13D), que consisteix en un sobrecreixement d'aragonita desenvolupat sobre una curta estalactita que no abraça tot el rang mareal. Les edats obtingudes se situen entre 1,66 i 0,07 ka BP, de tal manera que les 20 datacions realitzades permeten reconstruir una sòlida corba de creixement, de total coherència estratigràfica. La taxa de creixement és de 0,02 mm/any, una mica més elevada que els valors corresponents a la mostra PV-1681 de la Cova des Pas de Vallgornera.

Així mateix, s'han realitzat algunes datacions addicionals d'espeleotemes freàtics d'altres coves del llevant de l'illa, en particular de la Cova de sa Gleda i la Cova de sa Tortuga, ambdues del municipi de Manacor, així com de la Cova des Drac o del Rafal des Porcs, de Santanyí. Les edats obtingudes en aquestes localitats oscil·len entre 1,57 i 0,09 ka BP (Taula 1) i contribueixen a documentar la posició del nivell marí preindustrial fins a dates ben recents.

Finalment, cal fer una breu referència a les dades provinents de la Cova A de Cala Varques, de Manacor. En aquesta localitat es dugueren a terme les primeres datacions radiomètriques U-Th, que donaren una edat dels seus POS clarament postglacial, avaluada llavors entre 5,36 i 3,86 ka BP (HENNIG et al., 1981); val a dir que aquesta datació fou realitzada quasi bé mig segle enrere, i amb la tecnologia utilitzada aleshores de recompte-alfa. Amb posterioritat, mostres d'aquesta cavitat foren datades per TUCCIMEI et al. (2009, 2010) aportant una cronologia del creixement d'aquests POS que comprèn des de 2,80 fins a 1,10 ka BP. En el marc de la present campanya geocronològica s'ha efectuat una datació addicional d'aquesta localitat, que ha subministrat una cronologia d'1,46 ka BP (Taula 1), edat coherent amb les datacions publicades prèviament (TUCCIMEI et al., 2010).

Discussió: deglaciació, ajustaments isostàtics i canvi climàtic

La història del nivell de les aigües oceàniques durant l'holocè està marcada per un ascens continuat, que s'inicia en començar a remetre el cicle fred corresponent a la darrera glaciació pleistocènica, la qual assolí el seu màxim entre els 22 i els 19 ka BP (YOKOYAMA et al., 2000). En aquells moments les aigües marines havien experimentat una regressió de l'ordre de 120 m, emperò el progressiu procés de ràpida deglaciació elevà el nivell marí global fins a una cota aproximada de -60 m al començament de l'holocè, devers 10,7 ka BP. La velocitat de pujada postglacial holocènica del nivell de la Mediterrània fou en general més lenta que en els moments finals del pleistocè, malgrat assolir taxes força elevades, superiors als 8 mm/any (VACCHI et al., 2021); al llarg de l'holocè aquesta dinàmica transgressiva s'anà alentint a partir de 7,5 ka BP i, sobretot, durant els darrers 4 mil·lenis –amb taxes mitjanes de pujada de tan sols 0,45 mm/any– quan ja el nivell marí global s'anava apropant a l'elevació que assoliria durant l'era preindustrial.

Cal tenir present que la tendència transgressiva continuada, lligada a la deglaciació, està en tot moment afectada pels ajustaments isostàtics (GIA) que es produïren com a conseqüència dels canvis de volum de les masses glacials i oceàniques (glacio- i hidroisostàsia; ROVERE et al., 2016b). En aquest sentit, VACCHI et al. (2016) quantifiquen que la contribució del GIA suposa devers el 25-30% de l'ascens del nivell marí relatiu a la conca Mediterrània durant l'holocè més recent; no obstant això, els ajustaments isostàtics mostren una distribució força irregular, en funció de les diferents respostes de l'escorça i el mantell terrestre a les càrregues que es produeixen en cada àrea geogràfica. A la Mediterrània occidental, es constata un comportament isostàtic diferencial entre Mallorca i Sardenya, amb discrepàncies ben manifestes pel que fa a la resposta de cada illa als ajustaments atribuïbles al GIA, tant durant l'holocè com en el darrer interglacial (VACCHI et al., 2018). Com a resultat de les dades disponibles, es pot argumentar que, a l'holocè, la participació del GIA ha estat sobreestimada en el cas de Mallorca. Així les coses, el nivell marí local segueix de bastant a prop el nivell marí global (GMSL), el que permet deduir que els ajustaments isostàtics postglacials han estat minsos en la nostra illa (ONAC et al., 2022).

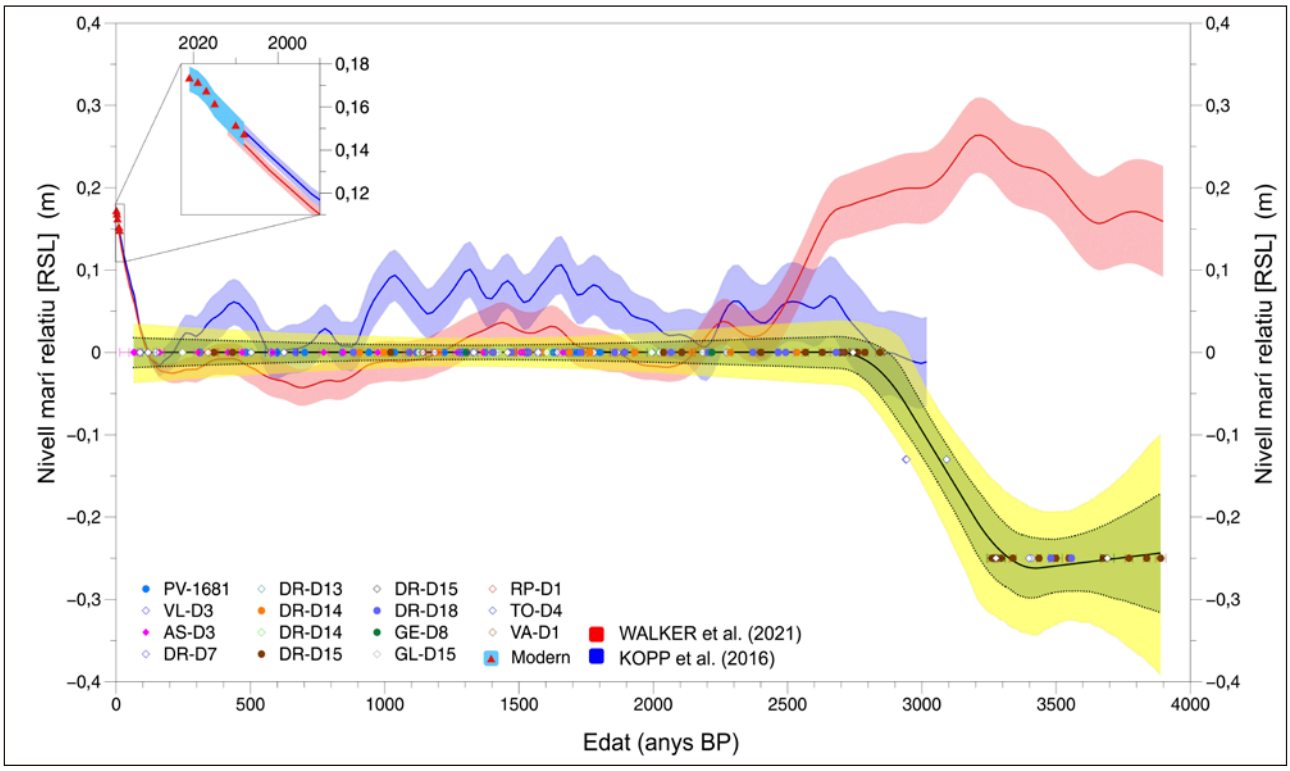


Figura 14: El nivell marí relatiu (RSL) a Mallorca durant l'holocè final, segons les dades aportades pels espeleotemes freàtics. El RSL romangué estable a –0,25 m entre ~3,89 i ~3,26 ka BP i, després d'una ràpida pujada, es va estabilitzar en el nivell marí preindustrial els darrers ~2,84 ka (les àrees acolorides en verd i en grog denoten, respectivament, els intervals de credibilitat del 67 i del 95%). Les corbes blava i vermella mostren el nivell marí global (GMSL) en relació a l'any 1900 segons KOPP et al. (2016) i WALKER et al. (2021). Els cercles i els rombes assenyalen, respectivament, els POS analitzats a la *University of New Mexico* i a la *Universität Bern*. El requadre superior recull la posició del nivell marí relatiu, mesurada a tres cavitats des del 2008 (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).

Figure 14: Mallorca POS-derived Late Holocene relative sea level. RSL remained still at –0.25 m between ~3.89 and ~3.26 ka BP and at preindustrial GMSL for the past ~2.84 ka (green and yellow envelopes denote the 67 and 95% credible intervals, respectively). Blue and red curves show the GMSL with respect to 1900 CE according to KOPP et al. (2016) and WALKER et al. (2021). Solid circles and open rhombs denote POS analyzed at University of New Mexico and University of Bern, respectively. The inset focuses on the RSL position measured in three caves since 2008 (Modified from ONAC et al., 2022).

Tal i com ja s'ha anat exposant, les dades subministrades pels espeleotemes freàtics holocènics estudiats registren un nivell marí relatiu inferior al preindustrial entre 3,89 i 3,26 ka BP, seguit per una pujada de 25 cm ocorreguda entre 3,26 i 2,84 ka BP fins a assolir el nivell marí preindustrial; aquesta pujada fou ràpida a bastament, amb una taxa estimada d'ascens de 0,6 mm/any. A partir dels 2,84 ka BP el nivell marí es mantingué excepcionalment estable fins al començament de l'era industrial, dada cronològica que coincideix exactament amb l'inici del creixement dels POS de la Cova A de Cala Varques calculat ja fa anys per TUCCIMEI et al. (2009, 2010). La Figura 14 ens mostra les dades procedents dels POS holocènics de Mallorca representades, per a la seva comparació, juntament amb les corbes del nivell marí global publicades per KOPP et al. (2016) i WALKER et al. (2021); les discrepàncies observables entre aquestes tres corbes necessiten una aproximació que intenti reconciliar les dades procedents dels POS amb les prediccions dels models de GIA disponibles per als darrers 5 ka. Tots aquests aspectes són tractats en profunditat per ONAC et al. (2022), on els autors discuteixen els models d'ajustaments isostàtics glacials que poden resultar compatibles amb les dades obtingudes a Mallorca (Figura 15), i relacionen la pujada de 25 cm ocorreguda entre 3,26 i 2,84 ka BP amb aportacions procedents de la fusió de gel de l'Antàrtida occidental.

A més a més de la sobtada pujada de 25 cm, que tingué lloc devers 3 ka BP, un aspecte que resulta cridaner és l'excepcional estabilitat del nivell marí relatiu a Mallorca durant pràcticament aquests darrers tres mil·lenis. No obstant això, les informacions subministrades per TUCCIMEI et al. (2010) denoten l'existència d'una lleu i progressiva pujada del nivell marí (poc més de 5 cm), que tingué lloc al llarg dels gairebé 2 ka que durà la deposició dels POS de la Cova A de Cala Varques. En qualsevol cas, les vicissituds climàtiques ocorregudes en època històrica (*òptim climàtic medieval* o la *petita edat del gel* de l'era moderna) no queden recollides en el registre aportat pels POS investigats. Cal afegir al

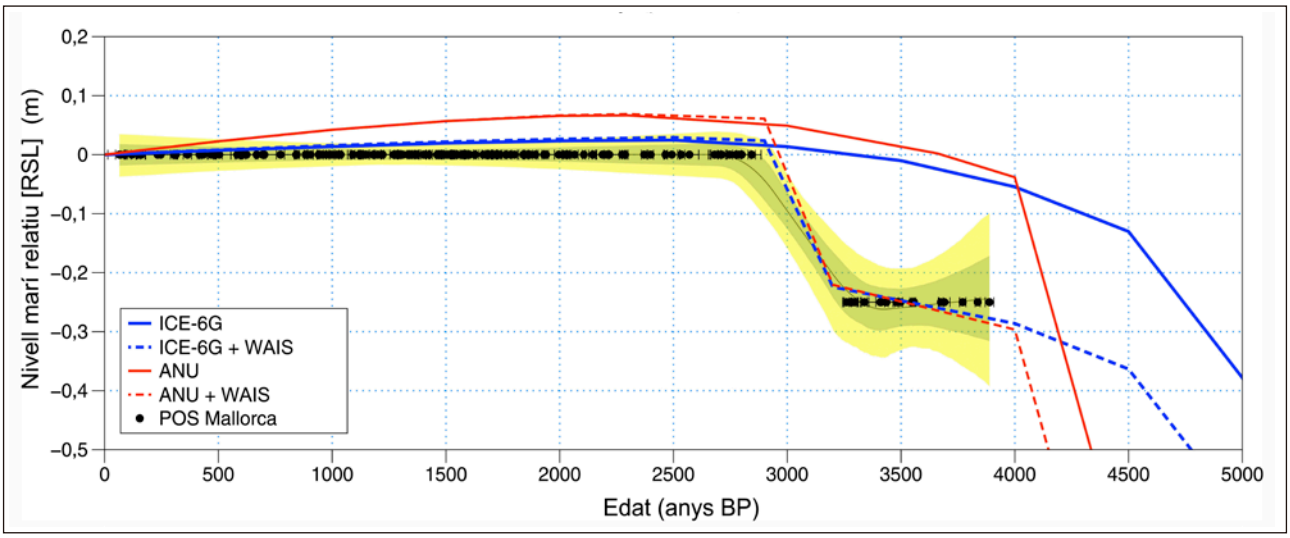


Figura 15: Comparació entre les observacions sobre el nivell marí relatiu (RSL) deduït dels espeleotemes freàtics i les prediccions dels models d'ajustament isostàtic global (GIA) a Mallorca durant els darrers 5.000 anys. Predicció basada en el model glacial ICE-6G i el model geofísic VM5 (línia blava contínua); la línea blava discontínua és idèntica però inclou una contribució procedent de la fusió de gel de l'Antàrtida occidental (WAIS) ocorreguda entre 3,26 i 2,84 ka BP. Les línies vermelles són anàlogues a les blaves, però en aquest cas s'ha adoptat el model de l'*Australian National University* (ANU). Els cercles negres (amb les seves incerteses d'edat) indiquen l'elevació dels POS i les àreas acolorides en verd i en grog representen els intervals de credibilitat del 67 i 95%, respectivament (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).
Figure 15: Comparison between RSL observations from POS and predictions from GIA models in Mallorca over the past 5,000 years. Prediction (solid blue) based on the ICE-6G ice history and the VM5 Earth model; the dashed blue line is identical to the solid but including a melt event from WAIS between 3.26 and 2.84 BP. The red lines are analogous to the blue, except that the Australian National University (ANU) ice history is adopted. Solid black circles (with age uncertainties) show POS elevations and the green and yellow shaded envelopes represent 67 and 95% credible intervals, respectively (Modified from ONAC et al., 2022).

respecte que VACCHI et al. (2021) també suggereixen que la *petita edat del gel* només tingué efectes regionals molt limitats sobre el nivell marí a la Mediterrània occidental.

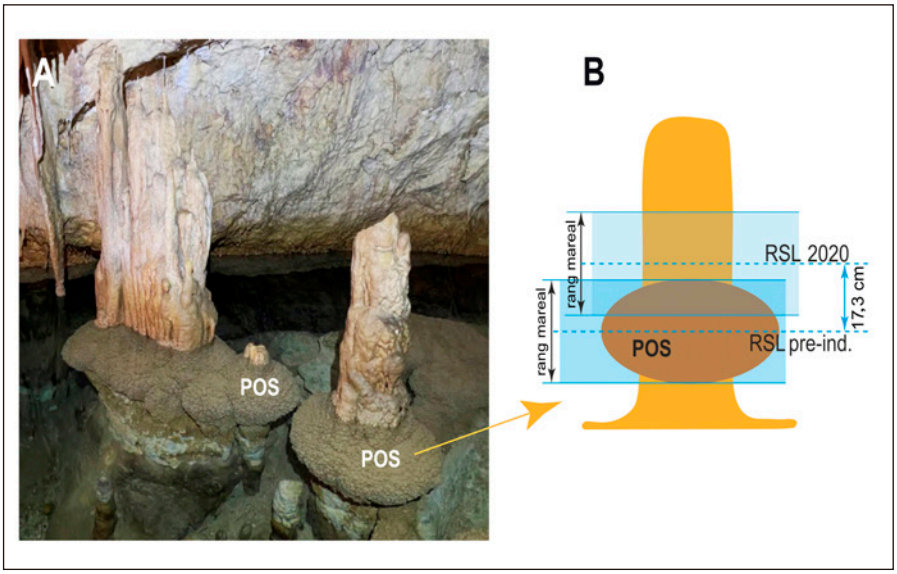


Figura 16: Espeleotemes freàtics corresponents al nivell marí preindustrial de la Cova A de Cala Varques (Manacor). A) Fotografia dels POS que es formaren en correspondència amb el nivell marí preindustrial (1900 = ±0 m) i que es troben submergits actualment. B) Dibuix esquemàtic que mostra la relació altimètrica existent entre els RSLs preindustrial i el de l'any 2020, així com la magnitud de la pujada del nivell marí des del 1900 (Modificat a partir d'ONAC et al., 2022).
Figure 16: Pre-industrial sea level POS in Cova A de Cala Varques (Manacor). A) Photograph showing POS that grew at pre-industrial sea level (1900 CE = ±0 m) and which are currently submerged. B) Schematic cartoon depicting the relationship between the pre-industrial and the 2020 RSLs and the amount of sea-level rise since 1900 CE (Modified from ONAC et al., 2022).

Actualment, els espeleotemes freàtics holocènics, formats en el seu moment en correspondència amb el nivell marí preindustrial, es troben gairebé totalment submergits en les aigües dels llacs de les coves de l'illa. Aquest fet es relaciona amb la pujada del nivell de la Mediterrània durant les darreres dècades, que està lligada amb l'escalfament global actual (Figura 14, requadre superior). El seguiment de les variacions de nivell dels llacs de diverses coves del llevant de Mallorca, ha permès a ONAC et al. (2022) quantificar la pujada del nivell marí des de l'era preindustrial en un mínim de 17,3 cm (Figura 16), la major part d'aquest ascens ocorregut en les tres darreres dècades. Concretament, en el període 2008-2019 la taxa d'ascens obtinguda és de 2,05 mm/any. Aquestes dades són concordants amb les aportades per VACCHI

et al. (2021) que situen l'augment del nivell marí durant l'era industrial en taxes al voltant d'1,3 mm/any per al període 1880-2012, i que fins i tot són bastant més elevades per a les darreres dècades (devers 1,7-1,8 mm/any).

Conclusions

Les recerques desenvolupades sobre els espeleotemes freàtics (POS) subactuals, que s'observen a les voreres dels llacs salabrosos de les coves litorals de Mallorca, han permès recopilar interessants dades sobre el nivell marí durant l'holocè més tardà. Aquestes investigacions se sustenten en successives campanyes de datació absoluta, la més recent i exhaustiva de les quals ha subministrat un total de 138 datacions radiomètriques –efectuades mitjançant el mètode U-Th– de mostres recol·lectades en 8 coves del llevant i migjorn de l'illa. Aquestes dades geocronològiques permeten reconstruir la història del nivell de la Mediterrània en la nostra àrea geogràfica durant els darrers 4 ka.

Els resultats obtinguts han documentat un nivell marí 25 cm inferior al preindustrial ocorregut entre 3,89 i 3,26 ka BP, seguit d'una ràpida pujada fins assolir el present nivell marí, que es mantindrà estable des de 2,84 ka BP fins ben entrat el segle passat. Resulta cridanera l'excepcional estabilitat del nivell marí al llarg d'aquests darrers 3 mil·lenis, la qual tan sols es veurà clarament truncada a partir dels darrers decennis del segle XX, quan s'inaugura una etapa de forta i progressiva pujada del nivell de la mar.

Es dedica alguna atenció a la dinàmica de deglaciació que caracteritza el període de l'holocè i als models d'ajustaments isostàtics glacials (GIA) que són compatibles amb les dades obtingudes. La modelització efectuada al respecte relaciona la pujada del nivell marí, que tingué lloc entre 3,26 i 2,84 ka BP, amb aportacions procedents de la fusió de gel de l'Antàrtida occidental (ONAC et al., 2022).

Avui en dia, resulta ben evident que els espeleotemes freàtics estudiats es troben quasi totalment submergits en les aigües freàtiques dels llacs de les coves litorals, per mor de la gradual elevació del nivell de la Mediterrània ocorregut al llarg de l'era industrial. Aquesta pujada s'ha quantificat en 17,3 cm des del 1900, amb unes taxes actuals d'ascens de 2,05 mm/any, com a conseqüència de l'escalfament global de les darreres dècades.

Agraïments

La recol·lecció i documentació fotogràfica dels espeleotemes situats als sectors subaquàtics d'algunes cavitats ha comptat amb la inestimable participació dels espeleobussejadors de la Societat Espeleològica Balear, entre els que cal esmentar: Antoni Cirer, Juan Carlos Lázaro i Miquel Àngel Perelló. Cal agrair als gestors i al personal de les Coves del Drac les facilitats que ens han donat en tot moment, així com a la Conselleria de Medi Ambient que ha recolzat administrativament algunes de les tasques desenvolupades. Diversos investigadors d'institucions forànies han participat en aspectes molt concrets de les darreres investigacions, com són la modelització del GIA, el tractament estadístic de les dades o la datació radiomètrica: Jerry X. Mitrovica (*Harvard University*), Erica L. Ashe (*Rutgers University*), Mark J. Hoggard (*Australian National University*), Sophie Coulson (*Los Alamos National Laboratory*) i Igor M. Villa (*Universität Bern*).

La present contribució s'emmarca dins del projecte PID2020-112720GB-I00/AEI/10.13039/501100011033, finançat per *l'Agencia Estatal de Investigación* (AEI).

B.P.O. i V.J.P. comptaren amb una subvenció col·laborativa de la *National Science Foundation* (AGS 1602670 i 1602685). Algunes despeses addicionals d'aquesta recerca foren finançades mitjançant una altra subvenció de la *NSF* (EAR 0326902 per a Y.A. i V.J.P.).

Bibliografia

BOOP, L.M.; ONAC, B.P.; WYNN, J.G.; FORNÓS, J.J.: RODRÍGUEZ-HOMAR, M. & MERINO, A. (2014): Groundwater geochemistry observations in littoral caves of Mallorca (western Mediterranean): implications for deposition of phreatic overgrowths on speleothems. *International Journal of Speleology*, 43 (2): 193-203. Tampa, USA.

BOOP, L.M.; WYNN, J.G.; THOMPSON, G.; FORNÓS, J.J. & ONAC, B.P. (2017): Interactions between surface conditions, the Mediterranean Sea, and cave climate within two littoral caves in Mallorca: implications for the formation of phreatic overgrowths on speleothems. *Journal of Cave and Karst Studies*, 79 (1): 59-72. Huntsville, USA.

DUMITRU, O.A.; AUSTERMANN, J.; POLYAK, V.J.; FORNÓS, J.J.; ASMEROM, Y.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & ONAC, B.P. (2019): Constraints on global mean sea level during Pliocene warmth. *Nature*, 574 (7777): 233-236 + 12 pàgs. supl. Londres.

DUMITRU, O.A.; AUSTERMANN, J.; POLYAK, V.J.; FORNÓS, J.J.; ASMEROM, Y.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & ONAC, B.P. (2021): Sea-level stands from the Western Mediterranean over the past 6.5 million years. *Scientific Reports*, 11: article nº 261, 10 pàgs. Londres.

ENTRENA, A. (2023): *Depósitos detríticos y espeleotémicos (POS y rafts) en cuevas costeras de Mallorca: indicadores paleoambientales y relaciones con las variaciones del nivel del mar Mediterráneo*. Tesi doctoral. Universitat de les Illes Balears - Universidad de Zaragoza. 388 pàgs. Palma - Saragossa.

ENTRENA, A.; FORNÓS, J.J.; GÓMEZ-PUJOL, L. & AUQUÉ, L.F. (2020): Sobrecrecimientos freáticos en espeleotemas (POS): una experimentación con placas de vidrio (datos preliminares). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 65-81. Palma.

GASCOYNE, M. (1984): Twenty years of Uranium-series dating of cave calcites: a review of results, problems and new directions. *Studies in Speleology*, 5: 15-30. Newbury, U.K.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1974): Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con formaciones marinas del Cuaternario. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 19: 11-28. Palma.

GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981a): Phreatic speleothems in coastal caves of Majorca (Spain) as indicators of Mediterranean Pleistocene paleolevels. *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 533-536. Bowling Green, U.S.A.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1989): El karst en las islas Baleares. In: DURÁN, J.J. & LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (eds.) *El karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía nº 4: 163-174. Madrid.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009): Proposta d'una nova classificació morfogenètica de les cavitats càrstiques de l'illa de Mallorca. *Endins*, 33: 5-18. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A. & POMAR, L. (1981b): Morphological and mineralogical features of phreatic speleothems occurring in coastal caves of Majorca (Spain). *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 529-532. Bowling Green, U.S.A.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; TUCCIMEI, P.; ONAC, B.P. & GRÀCIA, F. (2012): Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) from Mallorca, Spain: updating forty years of research. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 111-146. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F.; TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; ONAC, B.P. & POLYAK, V.J. (2020): El nivell marí a Mallorca durant el darrer interglacial (MIS-5): estat de la qüestió basat en les datacions d'espeleotemes freàtics. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 115-132. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; DUMITRU, O.A.; AUSTERMANN, J.; POLYAK, V.J.; ASMEROM, Y. & ONAC, B.P. (2021): Els espeleotemes freàtics del miocè superior i pliocè de les Coves d'Artà (Capdepera, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 4: 19-34. Palma.

GINES, J.; GINÉS, A. & FORNÓS, J.J. (2022): Cinquanta anys d'investigacions sobre el nivell marí durant el quaternari i el pliocè a Mallorca mitjançant els espeleotemes freàtics de les coves litorals. In: PONS, G.X.; DEL VALLE, L.; McMINN, M.; PINYA, S. & VICENS, D. (eds.) *VIII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Comunicacions*. Soc. Hist. Nat. Balears - Universitat de les Illes Balears. 59-62. Palma.

HENNIG, G.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981): Avance de los resultados obtenidos mediante datación isotópica de algunos espeleotemas subacuáticos mallorquines. *Endins*, 8: 91-93. Palma.

HIJMA, M.P.; ENGELHART, S.E.; TÖRNQVIST, T.E.; HORTON, B.P.; HU, P. & HILL, D.F. (2015): Chapter 34. A protocol for a geological sea-level database. In: SHENNAN, I.; LONG, A.J. & HORTON, B.P. (eds.) *Handbook of Sea-level Research*. First Edition. John Wiley & Sons, Ltd. 536-553.

JOLY, R. de (1929): Explorations spéléologiques à Majorque 1929. *Rev. Geog. Phys. et Géol. Dyn.*, 2 (3): 233-245. París.

KOPP, R.E.; KEMP, A.C.; BITTERMANN, K.; HORTON, B.P.; DONNELLY, J.P.; GEHRELS, W.R.; HAY, C.C.; MITROVICA, J.X.; MORROW, E.D. & RAHMSTORF, S. (2016): Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 113: E1434–E1441.

MARTEL, É.A. (1897): Sous Terre (neuvième campagne). Cueva del Drach, à Majorque - Scialets du Vercors - Chouruns de Dévoluy. *Annuaire du Club Alpin Français*. 23ème année, 1896. 368-413 + 1 plànol. París.

ONAC, B.P.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J. & DORALE, J.A. (2012): Late Quaternary sea-level history: a speleothem perspective. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 147-161. Palma.

ONAC, B.P.; MITROVICA, J.X.; GINÉS, J.; ASMEROM, Y.; POLYAK, V.J.; TUCCIMEI, P.; ASHE, E.L.; FORNÓS, J.J.; HOGGARD, M.J.; COULSON, S.; GINÉS, A.; SOLIGO, M. & VILLA, I.M. (2022): Exceptionally stable preindustrial sea level inferred from the western Mediterranean Sea. *Science Advances*, 8 (26): article nº eabm6185, 8 pàgs + 34 pàgs. supl. Washington.

POLYAK, V.J.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; HAY, C.; ASMEROM, Y.; DORALE, J.A.; GINÉS, J.; TUCCIMEI, P. & GINÉS, A. (2018): A highly resolved record of relative sea level in the western Mediterranean Sea during the last interglacial period. *Nature Geoscience*, 11 (11): 860-864 + 20 pàgs. supl. Londres.

POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. *Endins*, 5-6: 3-17. Palma.

RODÉS, L. (1925): Los cambios de nivel en las Cuevas del Drach (Manacor, Mallorca) y su oscilación rítmica de 40 minutos. *Mem. Acad. Cienc. Art. Barcelona*, 19 (7): 207-221. Barcelona.

ROVERE, A.; RAYMO, M.E.; VACCHI, M.; LORSCHEID, T.; STOCCHI, P.; GÓMEZ-PUJOL, L.; HARRIS, D.L.; CASELLA, E.; O'LEARY, M.J. & HEARTY, P. (2016a): The analysis of Last Interglacial (MIS5e) relative sea-level indicators: reconstructing sea-level in a warmer world. *Earth-Science Reviews*, 159: 404-427.

ROVERE, A.; STOCCHI, P. & VACCHI, M. (2016b): Eustatic and relative sea level changes. *Curr. Clim. Change Rep.*, 2: 221-231.

TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; DELITALA, C.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J. & TADDEUCCI, A. (2006): Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (1): 1-21. Berlín.

TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; ONAC, B.P. & VILLA, I.M. (2009): Precipitation of phreatic overgrowths at the water table of meteoric-marine mixing zones in coastal cave systems: a useful tool in sea level change reconstruction. In: WHITE, W.B. (ed.) *Proc. 15th Int. Congress Speleol.*, 1: 554-560. Kerrville, USA.

TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; KRAMERS, J. & VILLA, I.M. (2010): Constraining Holocene sea levels using U-Th ages of phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (7): 782-790. Londres.

TUCCIMEI, P.; VAN STRYDONCK, M.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; SOLIGO, M.; VILLA, I.M. & FORNÓS, J.J. (2011): Comparison of ^{14}C and U-Th ages of two Holocene phreatic overgrowths on speleothems from Mallorca (Western Mediterranean): Environmental implications. *International Journal of Speleology*, 40 (1): 1-8. Tampa, USA.

VACCHI, M.; MARRINER, N.; MORHANGE, C.; SPADA, G.; FONTANA, A. & ROVERE, A. (2016): Multiproxy assessment of Holocene relative sea-level changes in the western Mediterranean: Sea-level variability and improvements in the definition of the isostatic signal. *Earth-Science Reviews*, 155: 172-197.

VACCHI, M.; GHILARDI, M.; MELIS, R.T.; SPADA, G.; GIAIME, M.; MARRINER, N.; LORSCHEID, T.; MORHANGE, C.; BURJACHS, J. & ROVERE, A. (2018): New relative sea-level insights into the isostatic history of the Western Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*, 201: 396-408.

VACCHI, M.; JOYSE, K.M.; KOPP, R.E.; MARRINER, N.; KANIEWSKI, D. & ROVERE, A. (2021): Climate pacing of millenial sea-level change variability in the central and western Mediterranean. *Nature Comm.,* 12: 4013.

VAN HENGSTUM, P.J.; RICHARDS, D.A.; ONAC, B.P. & DORALE, J.A. (2015): Chapter 6. Coastal caves and sinkholes. In: SHENNAN, I.; LONG, A.J. & HORTON, B.P. (eds.) *Handbook of sea-level research*. American Geophysical Union. John Wiley & Sons, Ltd. 83-103. Chichester, U.K.

WALKER, J.S.; KOPP, R.E.; SHAW, T.A.; CAHILL, N.; KHAN, N.S.; BARBER, D.C.; ASHE, E.L.; BRAIN, M.J.; CLEAR, J.L.; CORBETT, D.R. & HORTON B.P. (2021): Common Era sea-level budgets along the U.S. Atlantic coast. *Nature Comm.*, 12: 1841.

YOKOYAMA, Y.; LAMBECK, K.; DE DECKKER, P.; JOHNSTON, P. & FIFIELD, L.K. (2000): Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima. *Nature*, 406: 713-716.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Cova des Puigderrós (Llucmajor, Mallorca): descobriment, estudi i destrucció d'una cavitat singular

Joan J. FORNÓS [1, 2], Francesc GRÀCIA [1, 2] i Damià VICENS [2]

[1] Grup de Recerca de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca. Email: joan.fornos@uib.cat
[2] Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca.

Abstract

The geotechnical study carried out in August 2017 related to the construction of a single-family house allowed the discovery of a cave of considerable dimension. The cavity, which showed a single hall with little speleothems ornamentation, has a surface area around 1,600 m^2 that was covered with blocks and about 22,000 m^3 in volume, with no natural entrance.

The interest of the cave, formed by collapse, lies in the fact that it is embedded within the poorly consolidated materials that correspond to the alternating sequence of Quaternary paleosols and eolianites; this being the second case described on the island of Mallorca developed in the same type of deposit (the "marès"). The subsequent destruction of the cave, with the opening and widening of its vault and the subsequent filling by demolition materials makes us consider the need for legal protection, with the establishment of appropriate regulations in order to preserve this type of natural phenomena against anthropic activities.

Resum

Els estudis geotècnics realitzats el mes d'agost de 2017 amb motiu de la construcció d'un habitatge unifamiliar van permetre el descobriment d'una cavitat de considerables dimensions. La cavitat, que constava d'una sola sala amb poca ornamentació d'espeleotemes i amb una planta de devers 1.600 m^2 de superfície coberta de grans blocs i al voltant de 22.000 m^3 de volum, no tenia cap obertura natural a l'exterior.

L'interès de la cavitat, formada per col·lapse, radica en el fet de que està enclavada dins dels materials poc consolidats corresponents a la seqüència alternant de paleosòls i eolianites del quaternari; essent aquest, el segon cas que es descriu a l'illa de Mallorca desenvolupat en el mateix tipus de dipòsit (el marès). La destrucció posterior de la cavitat, amb l'obertura i eixamplament de la seva volta i el posterior rebliment per enderrocs ens fa plantejar la necessitat d'una protecció legal, amb la creació de la normativa oportuna per tal de preservar aquest tipus de fenòmens naturals davant les activitats antròpiques.

Fornós, J.J.; Gràcia, F. i Vicens, D. (2024): Cova des Puigderrós (Llucmajor, Mallorca): descobriment, estudi i destrucció d'una cavitat singular.
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 21-36. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 13 maig 2024; **Revisat:** 22 maig 2024; **Acceptat:** 24 maig 2024.
Publicat online: 10 juny 2024.

Introducció

La inesperada troballa d'una cavitat, en fer l'estudi de geotècnia per a la construcció d'un habitatge unifamiliar a la zona d'es Puigderrós (Llucmajor), ha posat èmfasi en la possibilitat de formació de cavitats dins de nivells poc propensos al seu desenvolupament. Aquest és el cas dels dipòsits calcarenítics i poc consolidats relativament recents (marès) d'edat plio-quaternària que corresponen a un ambient deposicional eòlic (eolianites) i que són molt abundants a l'illa de Mallorca. L'evolució de les obres posteriors, amb el rebliment amb enderrocs de la cova que ha donat lloc a la seva destrucció, ens va empènyer a fer una ràpida descripció de la cavitat així com caracteritzar el seu marc geològic i estratigràfic de detall, per posar èmfasi en aquest cas singular per mor de la seva litologia i disposició estratigràfica en la qual s'hi desenvolupa.

Encara que són nombrosos els treballs que tracten dels nivells d'eolianites pleistocenes també propers a l'àrea on trobem la cova des Puigderrós (CUERDA & SACARÈS, 1966, 1970, 1992; CUERDA, 1975; VICENS, 2015; POMAR & DEL VALLE, 2018), no s'ha dedicat especial atenció al registre del pleistocè inferior-mitjà que es disposa per sobre dels dipòsits atribuïts al pliocè i que és ben visible en els penya-segats de la costa llucmajorera. És per aquest motiu que dins dels objectius del present treball, a part de comentar l'evolució de la destrucció de la cavitat i fer una breu descripció de la mateixa, s'han aixecat dues columnes estratigràfiques de detall per tal de caracteritzar el marc sedimentari en el qual es disposa la cova.

En referència a la toponímia utilitzada, encara que denominada Cova des Puig de Ros per BERMEJO et al. (2021), hem decidit utilitzar el topònim oficial de Puigderrós seguint les dades aportades per AGUILÓ (1996) i el *Nomenclàtor Toponímic de les Illes Balears* (https://notib.iec.cat/). S'ha d'anar alerta amb que hi ha una altra cova amb una denominació similar, la cova des Puigderrós de Dalt, cova artificial prehistòrica, catalogada com a Bé d'Interès Cultural (BIC), situada al lloc anomenat es Camp Vell, de la possessió des Puigderrós de Dalt, al mateix municipi de Llucmajor. La planta d'aquesta cova és de ferradura, amb unes dimensions de 12 m de llargària per 6 m d'amplada, i amb una alçada màxima d'1,6 m (FONT, 1973).

Història del descobriment de la cova i la seva destrucció

Fou a principis d'abril de 2017 quan s'iniciaren els treballs de camp de l'estudi geotècnic per al projecte d'un habitatge, al número 25 del carrer Xoric (Figura 1), executant-se diversos sondatges de recerca que detectaren una cavitat al subsòl de la mateixa, a escassos metres des de la superfície, cosa que posaria en risc la seguretat de la futura estructura. Per tal de poder valorar adequadament el risc de col·lapse, a mitjans de maig s'obrí una petita obertura al sostre de la cavitat mitjançant retroexcavadora (Figura 2c) i s'entrà a la cavitat per realitzar tasques de topografia, les dades de les quals foren incorporades a l'estudi geotècnic amb data d'agost de 2017. A l'estudi es conclogué que no era possible edificar al solar i es plantejà com a solució reomplir la cavitat mitjançant l'execució d'un farciment estructural (formigó ciclopi). Com que els costos d'aquesta solució eren molt elevats atès el gran volum que calia omplir, el projecte no es dugué a terme i el solar quedà sense edificar.

L'any 2018, una altra empresa realitzà un altre estudi geotècnic al solar situat al número 23 del citat carrer i, sense conèixer els resultats de l'estudi anterior, es tornà a detectar la cavitat i es va concloure novament que, davant de l'elevat risc de col·lapse, no era possible edificar.

L'agost de 2019, es torna a accedir a la cavitat per valorar novament el risc de col·lapse per una tercera empresa especialitzada en treballs de geotècnia. Es va fer una nova topografia mitjançant tècniques espeleològiques (Figura 1c) i es documenta fotogràficament la cavitat (BERMEJO et al., 2021). Es conclou novament que, atès que el sostre de la cova no està en equilibri (presenta una estructura plana), en la situació actual no és possible edificar en superfície. Passen els anys i els propietaris dels solars, que no poden dur a terme els seus projectes d'habitatges, intenten buscar alguna solució que els torni la inversió.

A començaments de febrer del 2024 ens van fer arribar a la *Societat Espeleològica Balear* unes fotografies fetes amb *dron* (Figura 2a), que circulaven per les xarxes socials, de les obres efectuades al solar on s'ubica la cova. A les imatges es veien les tasques d'eixamplament de la boca efectuades amb maquinària pesant. El 10 de febrer surt al diari *Última Hora* la denúncia de la *Federació Balear d'Espeleologia* (FBE) per investigar els fets. Aquesta es va fer a la policia local de l'Ajuntament de Llucmajor i a la Direcció General d'Espais Naturals del Govern de les Illes Balears, la qual va enviar dos agents de Medi Ambient per aixecar acta. El cas passà a disposició dels òrgans competents per determinar si hi havia delicte o no, i prendre les mesures necessàries per protegir la cova (AMORES, 2024a). Posteriorment es va poder comprovar que en les obres del solar s'hi havien abocat una gran quantitat de runes que havien estat compactades i aplanades, per tal de reblir el màxim possible el buit de la sala de la cova i poder edificar al damunt. El con de material d'obra llançat a l'interior formava un gran rost, de 38º de pendent, que entrava per l'obertura ampliada amb la màquina picadora.

Al *Diario de Mallorca* surt la notícia el dia 1 de març (Figura 2b), ben documentada, de la destrucció de la cavitat (FRAU, 2024), i aclareix que la llicència d'obra data del 2021 i que l'expedient de denúncia es trobava en procés de tramitació d'ençà del 15 de febrer. El dia 21 de març, el diari *Última Hora* publicà que la destrucció de la cova estava avalada per la Conselleria de Medi Ambient i Territori el 2018. Segons l'article periodístic, el projecte per construir dos xalets al solar on es troba la cova tenia llicència municipal per executar-se. L'autorització la donà l'ajuntament després que la Conselleria de Medi Ambient l'any 2018 emetés un informe favorable per edificar. En aquest document, signat pel director general d'Espais Naturals, s'al·ludeix a que el projecte no es trobava ubicat a cap espai de rellevància ambiental, per la qual cosa des de la Direcció General es considerà que no s'havia d'emetre cap informe relatiu a aquest projecte. Per aquest motiu l'actual Conselleria d'Agricultura, Pesca i Medi Natural va arxivar la denúncia que presentà la FBE.

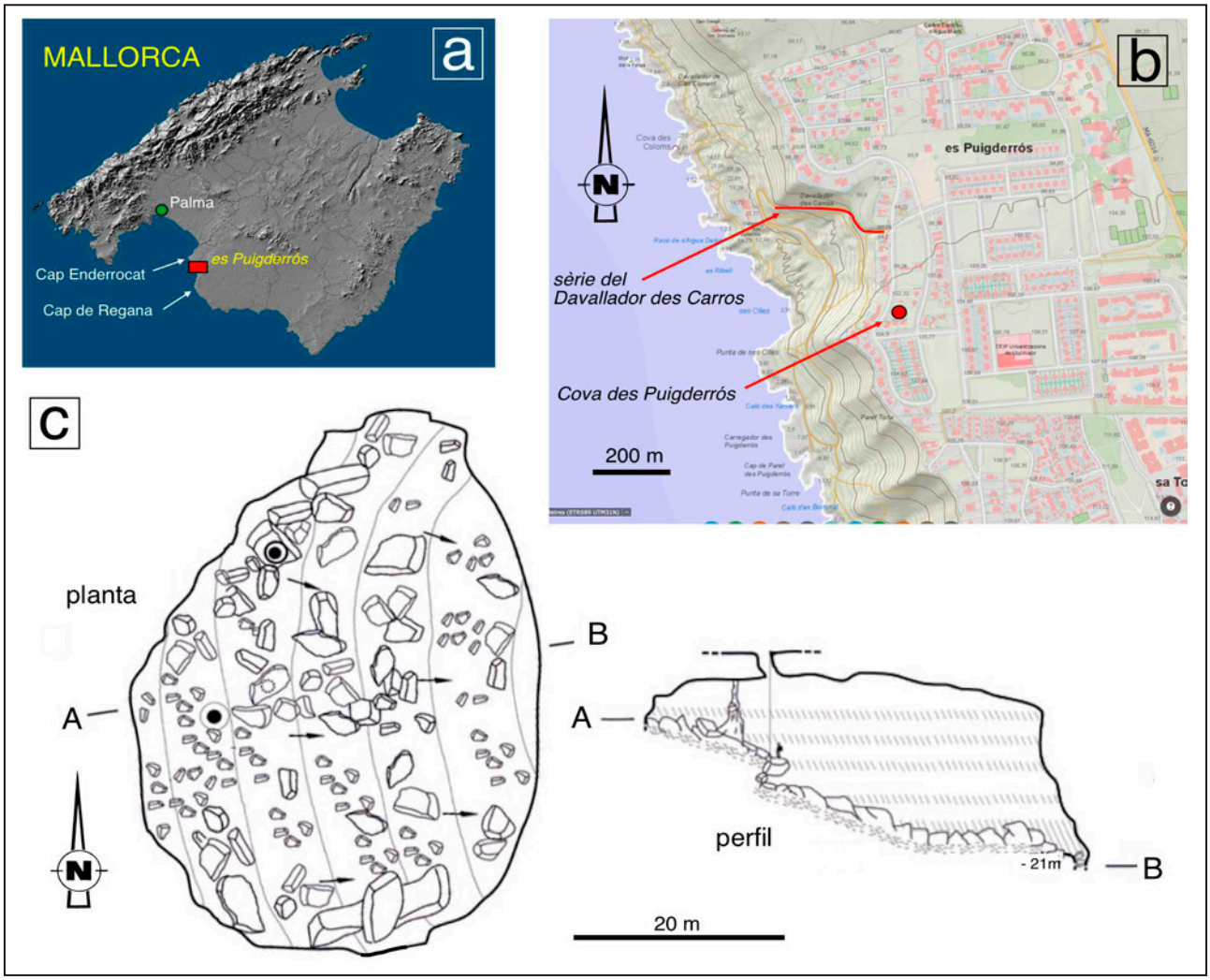


Figura 1: Localització de la cova des Puigderrós (a) amb indicació de la situació de la sèrie estratigràfica del Davallador des Carros (b) i topografia de la cavitat (c). (Font mapes: IDEIB; topografia de la cova modificada de BERMEJO et al., 2021).
Figure 1: Location of the Cova des Puigderrós (a) with indication of the situation of the Davallador des Carros stratigraphic series (b) and topographic survey of the cave (c). (Source maps: IDEIB; cave survey modified from BERMEJO et al., 2021).

L'Ajuntament de Llucmajor tampoc pogué paralitzar les obres, ja que suposaria pagar una indemnització patrimonial al propietari de la finca, al no existir causa justificada en disposar d'un informe tècnic que avalava el projecte. Des del Govern Balear apuntaren també que l'ajuntament actuà correctament, ja que en veure que el projecte afectava a la cova traslladaren l'autorització al Govern, i aclariren que amb la resposta de la Conselleria s'obligava al consistori a concedir la llicència d'obra si el projecte complia amb la normativa urbanística municipal vigent. A més a més, cal destacar que el projecte entregat al consistori llucmajorer el 2017, no només indicava la presència de la cova, sinó que també especificava que es rebliria fins assolir la resistència del terreny necessària per edificar un habitatge i identificà la cova com a d'esfondrament (AMORES, 2024b). En posteriors visites al solar, es va apreciar com les tasques d'arranjament del solar van prosseguir i l'obertura a l'exterior es va seguir eixamplant per donar cabuda a més runes i d'aquesta manera incrementar la mida del con d'enderrocs abocats al buit.

Alguns comentaris relacionats amb aspectes geotècnics

En general, les característiques resistents dels massissos rocosos depenen en gran mesura dels defectes de la roca (diàclasis, fractures, plans d'estratificació, presència de rebliments...) i no només

de la resistència de la matriu rocosa. En el cas de capes de roca de poca potència, recolzades en materials tous o en l'aire (com en el cas d'una cova), la càrrega de treball que poden suportar depèn de la resistència de la matriu, de la seva gruixa i de la continuïtat. En disminuir el gruix de la roca o la seva continuïtat (com pot ser per exemple la presència de fractures), augmenta significativament el risc que la roca trenqui i col·lapsi. La majoria de les cavitats tendeixen a adquirir la seva condició d'equilibri (de menor energia) que és l'esfera, adoptant sostres en forma de volta la qual cosa permet transmetre amb eficàcia les càrregues cap a les parets afavorint així la seva estabilitat. En aquest tipus de geometries augmenta ràpidament el gruix de roca des del centre de la mateixa cap als laterals, disminuint dràsticament el risc de col·lapse en el mateix sentit. És per aquest motiu que, en la major part de les ocasions, només cal adaptar la fonamentació de la futura construcció a la geometria de la cavitat per minimitzar el risc. Aquest fet suposa una solució relativament barata i d'aquesta forma la cavitat quedaria intacta.

D'altra banda, bona part de les cavitats subterrànies s'han desenvolupat per col·lapse del sostre a partir d'un buit inicial basal (GINÉS, 2000). Els blocs despresos s'acumulen a la part inferior de la cova i tendeixen a formar cons d'enderrocs que presenten gran heterogeneïtat en la mida dels clastos (normalment blocs), escassa o nul·la compactació, i abundants buits entre els blocs, per la qual cosa amb el temps tendeixen a reajustar-se. Per tant qualsevol solució de fonamentació que transmeti càrregues als rebliments basals és molt perillosa ja que es poden donar assentaments no previstos.

En el cas de cavitats buides, d'escassa entitat, solen emplenar-se amb formigó ja que és una solució barata. Encara que és una solució fàcil, hi ha el risc que la cavitat tingui gran continuïtat lateral i el volum de formigó emprat suposi un cost enorme per a l'obra. És per això que, de vegades, s'executa una fonamentació mitjançant pilons columna. En el cas de la cova des Puigderrós, es tracta d'una cavitat de mida gran (uns 22.000 m^3), que per les característiques sedimentològiques de la roca on està enclavada la cova presenta un sostre pla, per la qual cosa actualment no ha assolit el seu equilibri, i el gruix de roca no és molt gran (entre 2 i 4 m) de manera que el risc de col·lapse és molt elevat.

Atès que la cavitat ocupa la major part del solar situat al número 25, adaptar la fonamentació de l'habitatge no és possible. Pels motius explicats anteriorment, tampoc seria recomanable executar una fonamentació mitjançant pilotatge que es recolzi a la base de la cavitat. Tal com es comentava a l'estudi geotècnic realitzat, l'única solució per poder construir l'habitatge passaria per emplenar la cavitat. Naturalment, el rebliment s'hauria de fer mitjançant formigó ciclopi (tal com indica l'estudi geotècnic) o amb materials adequats, ben compactats, ja que es tractaria d'un rebliment estructural.

Per la informació de què es disposa, sembla que la cova ha estat emplenada amb runes d'obra o producte d'excavacions properes, abocant-se els materials al seu interior per gravetat, sense cap tipus de selecció o compactació, per la qual cosa no disminueixen el risc de col·lapse i donen una falsa sensació de seguretat. A més, aquest rebliment es consolidarà amb el pas del temps (assentarà) i deixarà una càmera d'aire novament entre la roca i el rebliment de la cavitat.

En la situació actual, en què la cova ha estat emplenada de forma inadequada, segueix existint un elevat risc de col·lapse, i és poc recomanable la construcció d'habitatges en superfície.

Descripció de la cavitat

Com ja s'ha esmentat, la cavitat no presentava cap entrada natural. La cova estava formada per una única i voluminosa sala d'esfondrament, amb unes dimensions de 40 m de longitud, amb un rost que davallava d'oest a est. L'amplària màxima era de 54 m i 14 m l'alçària mitjana (Figura 1c). La fondària segons BERMEJO et al. (2021) era de 21 m, encara que amb la mesura de la sèrie estratigràfica present a l'interior, la suma de la totes les capes que afloren superen els 26 m de desnivell total. Es tractava d'una formació endocàrstica rellevant que assolia una planta de devers 1.600 m^2 de superfície i al voltant de 22.000 m^3 de volum. Tot el pis de la cova estava format per blocs caiguts del sostre i parets, alguns de grans dimensions. Un dels aspectes destacats era la gran horitzontalitat de la volta que no formava el típic perfil acampanat, a la recerca del perfil d'equilibri zenital. La potència de la capa del sostre, format per eolianites amb elevat grau de cimentació, era d'uns dos metres. Un altre aspecte a destacar era l'horitzontalitat ben visible dels estrats que envoltaven la cova, amb predomini del colors blancs o blancs groguencs alternant amb qualque petita capa vermellosa.

La sala no es trobava molt decorada per espeleotemes, però així i tot alguns d'ells localment eren importants. Les formacions litoquímiques més destacades estaven representades per una gran columna situada al costat oest, recoberta parcialment d'arrels que també penjaven d'una part del sostre propera a la formació. Una part d'aquestes arrels es trobaven concrecionades i integrades a la columna. Les arrels

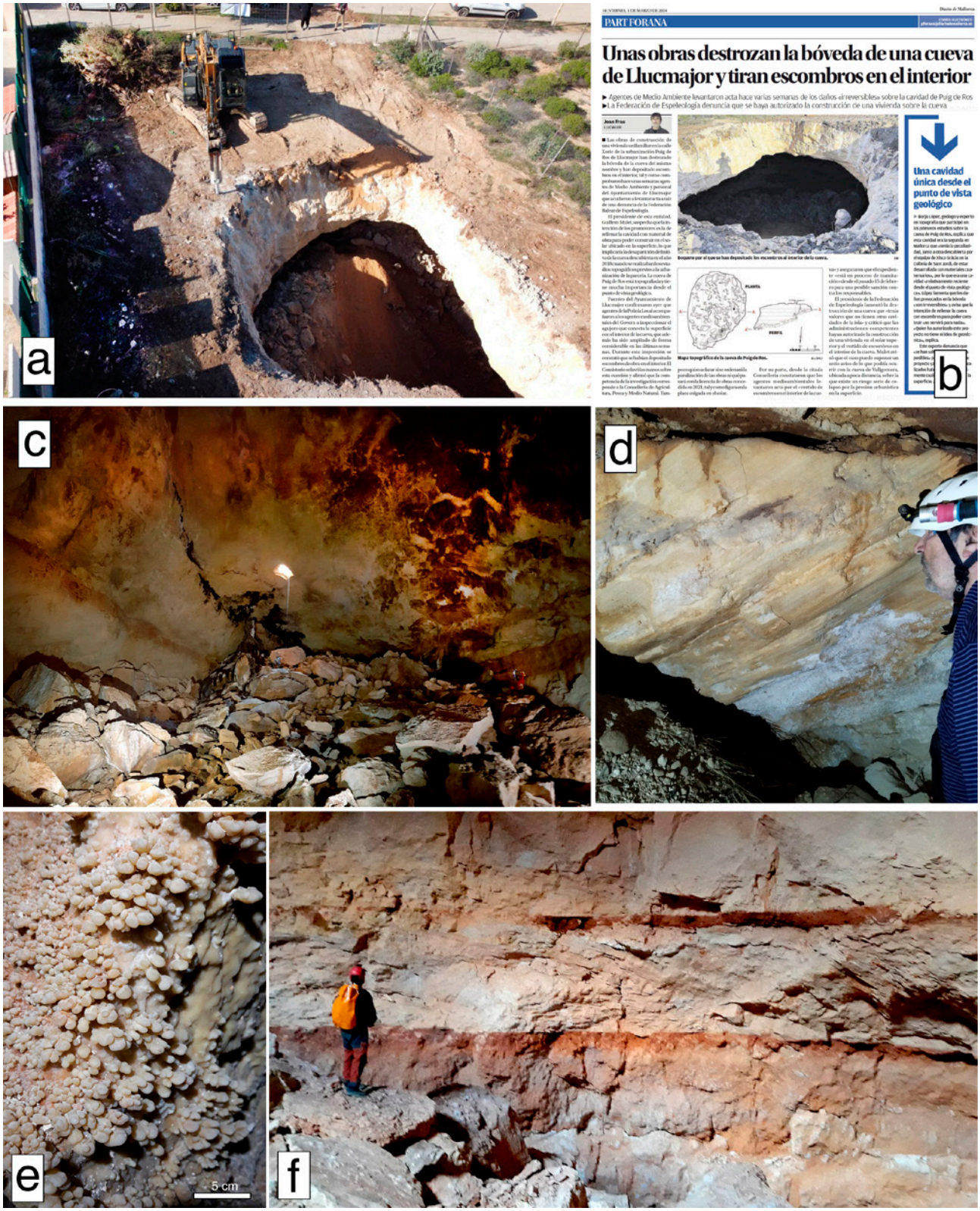


Figura 2: La cova des Puigderrós: a) vista aèria de les obres d'obertura i desmantellament de la cova; b) plana de la premsa (*Diario de Mallorca*) on es fa ressò de la destrucció de la cavitat; c) forat inicial perforat a la volta per al seu accés i exploració; d) laminació encreuada de les eolianites als nivells que afloren a la base de la cavitat; e) formacions de coral·loides; f) aspecte de l'alternança de nivells d'eolianites i paleosòls poc desenvolupats a les parets de la cova.
Figure 2: The Cova des Puigderrós: a) aerial view of the opening and dismantling works of the cave; b) the press (*Diario de Mallorca*) reports about the destruction of the cavity; c) initial hole drilled at the vault for its access and exploration; d) cross lamination of the eolianites at the lowermost levels of the cave; e) coralloid formations; f) panoramic view of the superposition of eolianites and the poorly developed paleosols on the walls of the cave.

aprofitaven especialment plans d'estratificació i fractures zenitals per obrir-se camí. Un altre pilar, de menors dimensions, s'ubicava a prop de la paret nord de la sala, on una estalactita i la seva estalagmita corresponent semblava que havien arribat a tocar. A prop d'aquestes, una gran estalagmita s'alçava d'entre colades estalagmítiques que recobrien grans blocs caiguts. Algunes estalactites i banderes poc desenvolupades sorgien de plans d'estratificació del sostre, a prop de les parets. Els espeleotemes de percolació, tipus coral·loides (Figura 2e), estaven presents especialment a les cotes més baixes de la cova, recobrint blocs i algunes colades pavimentàries.

Un cop feta la descripció, l'excepcionalitat de la cova –no tant per les seves característiques morfològiques sinó pel seu desenvolupament dins materials calcarenítics relativament poc cimentats i molt recents (pleistocè)– vam procedir a fer una descripció precisa dels nivells presents al seu interior (Figura 2d, f). A la vegada, per tal de tenir una visió de conjunt dins el context geològic de la zona oriental de la badia de Palma, també es va analitzar la seqüència que aflora en la zona propera denominada Davallador des Carros.

Metodologia emprada

Es recolliren un total de 14 mostres, entre eolianites i paleosòls, a les parets de l'interior de la cova des Puigderrós i 5 mostres més a la sèrie del Davallador des Carros, a les quals s'ha aplicat l'anàlisi sedimentològica bàsica (TUCKER, 1988) que ha consistit en l'anàlisi de la composició (tant mineralògica per difracció de raigs-X com composicional amb observació a la lupa binocular) i la textura amb la utilització de la microscòpia electrònica d'escandallatge. També s'ha determinat el color en sec (taules de color Munsell) i la mida de gra, el grau de classificació del sediment i l'arrodoniment dels grans.

Marc geològic

La cova des Puigderrós es troba situada a la vora oriental de la badia de Palma a mig camí entre el cap Enderrocat i el cap de Regana, a la zona coneguda com es Puigderrós actualment ocupada per una urbanització extensiva que rep el mateix nom (Figura 1a, b).

Geològicament es tracta d'una conca subsident condicionada per la tectònica distensiva que té lloc desprès de l'estructuració de l'illa, que presenta el seu màxim paroxisme durant el miocè mig i que conforma els principals relleus de l'illa. El posterior rebliment d'aquesta conca durant el tortonià-messinià i fins el quaternari més recent configura el caràcter geomorfològic de la zona.

L'evolució sedimentària d'aquesta part és ben visible a la zona d'es Puigderrós-Ses Olles, on seguint la zona denominada Davallador des Carros (antic camí per on davallaven el carros amb la gent que treballava el marès de les pedreres que hi ha a la costa), es pot observar tota la seqüència del rebliment des dels materials de plataforma marina del miocè superior, passant pel pliocè, fins els sistemes dunars del pleistocè superior (Figura 1b).

Segons MAS-GORNALS (2016) arran de mar afloren, amb una potència aproximada de 35 m, els materials carbonatats del miocè superior amb fàcies de plataforma marina oberta els quals mostren una disposició quasi horitzontal, amb un lleuger cabussament de caràcter deposicional en direcció al centre de la conca de Palma (Figura 3). La marcada estratificació és deguda a l'alternança entre materials fins i més grollers. Es tracta de calcisiltites blanques, les predominants, que alternen amb calcarenites puntualment molt bioturbades (Figura 3e, f), amb abundància de restes de mol·luscs, *Ostrea* sp. i equinoïdeus. Aquests nivells corresponen a l'acumulació damunt la plataforma de la progradació dels talussos associats al creixement dels fronts escullosos (Figura 3c) característics de l'ambient deposicional descrit per POMAR et al. (1996) per al miocè superior (Unitat d'Esculls). La seqüència de plataforma acaba amb uns nivells amb una gran acumulació de segments de l'alga verda *Halimeda* (Figura 3d).

Per sobre d'aquest nivells tenim el miocè terminal (messinià) amb el denominat Complex Terminal (Figura 3c). Aquest es caracteritza per la presència de margo-calcàries peri-evaporítiques blanques i grises amb laminacions estromatolítiques i un nivell final, format per margues i margues arenoses grises que inclouen nivells d'argiles verdes. Aquests darrers nivells s'atribueixen a l'episodi denominat Lago Mare (MAS-GORNALS et al., 2013). La seva potència està al voltant dels 25 m.

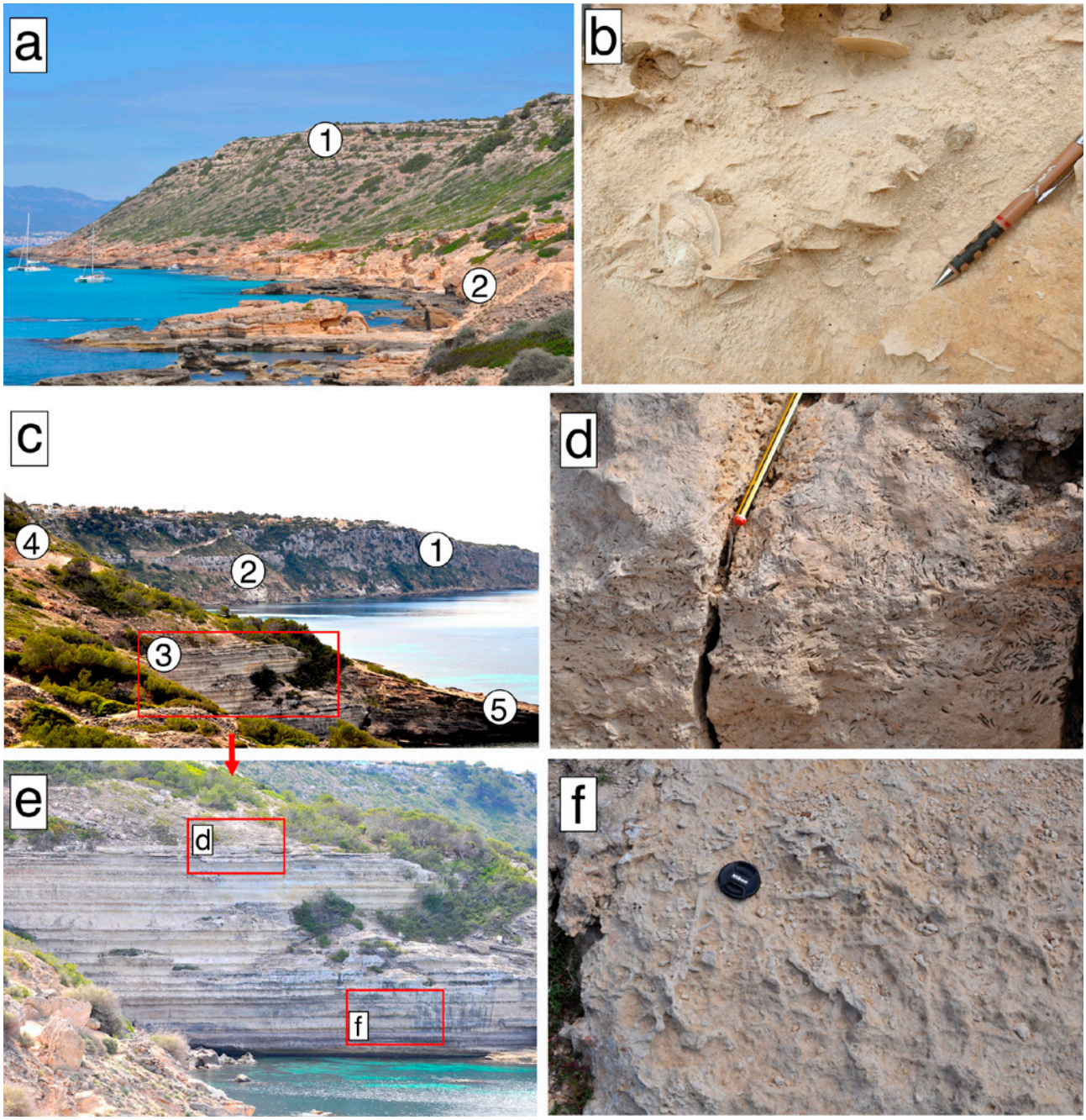


Figura 3: a) Disposició dels dipòsits eòlics quaternaris a la zona de Ses Olles-es Puigderrós (1- eolianites del quaternari antic; 2- dunes adossades del pleistocè superior); b) calcisiltites blanques del pliocè amb fragments de copinyes d'*Ammussium*; c) disposició de les principals unitats sedimentàries (1- front escullós, 2- talús escullós, 3- nivells de plataforma; 4- Complex Terminal i Lago Mare; 5- dunes adossades del pleistocè superior); d) Acumulació d'*Halimeda* en el talús distal de l'escull; e) estratificació horitzontal corresponent a les fàcies de plataforma; f) calcarenites i margues blanques de plataforma amb abundant bioturbació.
Figure 3: a) Stratigraphy of Quaternary eolian deposits in the Ses Olles-es Puigderrós area (1- ancient Quaternary eolianites; 2- cliff-front dunes from the Upper Pleistocene); b) Pliocene white calcisiltites showing fragments of *Ammussium* shells; c) main sedimentary units (1- reef front; 2- reef slope; 3- shelf; 4- Terminal Complex and Lago Mare; 5- cliff-front dunes from the Upper Pleistocene); d) accumulation of *Halimeda* segments on the distal slope part of the reef; e) horizontal stratification corresponding to the shelf facies; f) white platform calcarenites and marls showing abundant bioturbation.

Damunt d'una superfície d'erosió es disposen, amb una potència de 10 m, les calcisiltites grogues atribuïdes al pliocè que contenen abundants closques del característic bivalve *Ammussium* (Figura 3b) a més d'altres bivalves, gasteròpodes, foraminífers, equinoïdeus i fragments d'algues vermelles. Representa un medi marí obert a la base i més litoral a sostre. En aquest sentit, a la zona propera del Pas des Verro, per als mateixos nivells, CUERDA & SACARÈS (1966) indiquen que per l'alçada, aquest dipòsit ha de ser del pleistocè inferior, emperò amb dubtes si ens atenem a la fauna trobada.

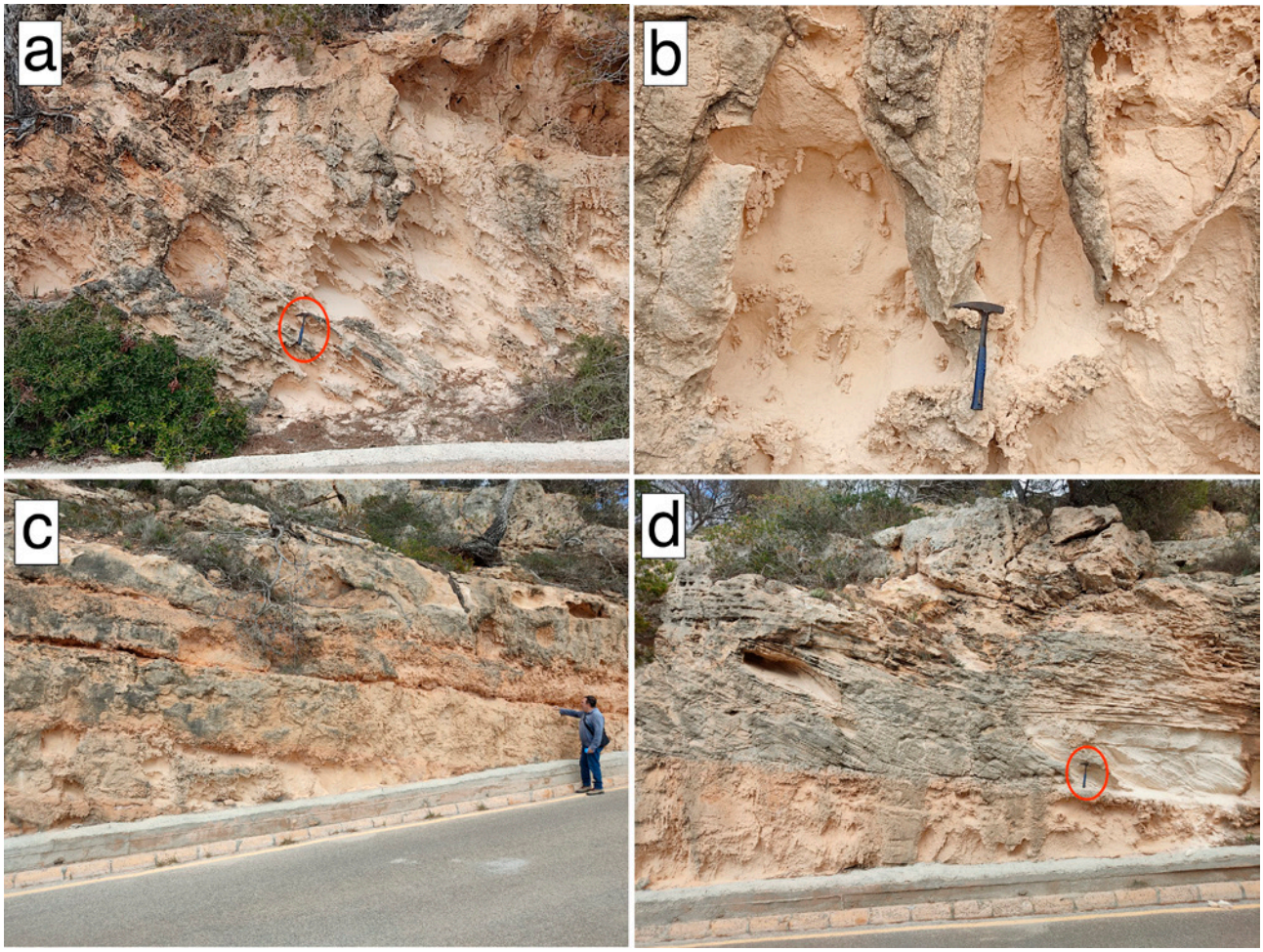


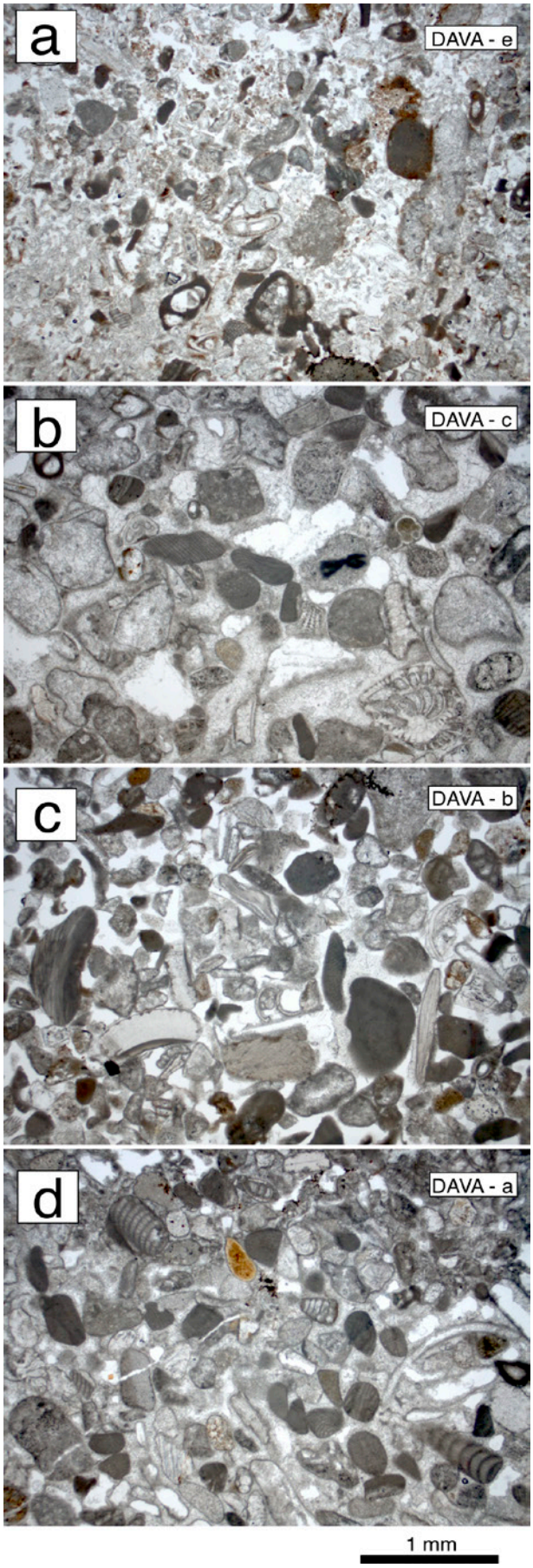
Figura 4: Vista de l'aflorament dels dipòsits d'eolianites del quaternari a la zona del Davallador des Carros; a) estratificació encreuada de gran angle, b) rizoconcrecions, c) separació dels diversos cossos deposicionals amb desenvolupament de paleosòls amb moltes concrecions per arrels, d) estratificacions encreuades degut a la interferència de diversos cossos dunars. (Veure localització dins la sèrie estratigràfica a la Figura 1).

Figure 4: Outcrop characteristics of the Quaternary eolianite deposits in the Davallador des Carros area; a) high-angle cross-stratification, b) rhizoconcretions, c) separation of the various depositional bodies with the development of paleosols showing concretions due to root development, d) coset laminae due to the interference of several dune bodies. (See location within the stratigraphic logs in Figure 1).

CUERDA (1987) ratifica que els fòssils trobats en aquest jaciment són del pleistocè inferior. Posteriorment, MAS-GORNALS (2016) amb la realització de datacions absolutes, li assigna una edat pliocena i JUÁREZ & MAS-GORNALS (2022) revisant la fauna del jaciment dipositada a la Societat d'Història Natural de les Balears (SHNB), juntament amb les dades aportades per autors anteriors, situen la cronologia pliocena dins el zanclià mig-superior.

Finalment, la sèrie continua amb uns 30 m de dipòsits de calcarenites bioclàstiques (eolianites) en capes lenticulars de potències variables (Figura 3a) que van alternant amb nivells de paleosòls. Dins d'aquests dipòsits, que presenten abundants concrecions relacionades amb arrels, no s'ha pogut observar cap macrofòssil. Aquests nivells atribuïts al quaternari antic se descriuen a continuació amb més detall ja que, a grans trets, es corresponen amb els nivells observats a l'interior de la cova on per raons òbvies no ha estat possible aixecar una columna amb gran detall.

Bona part d'aquesta seqüència es troba tapada per les dunes adossades als penya-segats i que en aquesta zona del Davallador des Carros arriben fins els 75 m d'altura (Figura 3a, c). Aquestes eolianites, que corresponen al pleistocè superior, han estat tradicionalment explotades com a materials de construcció (marès), del que donen fe les abundants pedreres que hi trobem a la costa. En aquest sentit, el terme de Llucmajor ha estat una de les zones de Mallorca on l'activitat extractiva del marès ha estat més notable i forma part del paisatge (SALVÀ, 2020). El litoral de la zona propera a la cova des Puigderrós no ha estat una excepció (ALOMAR & CLAR, 2006; VICENS & GINARD, 2022).



Sèrie d'eolianites i paleosòls del Davallador des Carros

A la zona del Davallador des Carros la seqüència alternant d'eolianites i paleosòls presenta una potència aproximada d'uns 30 m. Se disposa per sobre els nivells del pliocè, a una altura aproximada entre 65 i 70 m, doncs el contacte en aquest punt està tapat per la duna adossada del pleistocè superior la qual es perllonga pel vessant sud del penya-segat fins un poc més d'uns 70 m d'altura. El primer nivell que podem observar (Figura 4a), seguint un ordre de base a sostre, correspon a un dipòsit eòlic de 20 m de potència format per calcarenites ben cimentades que presenten una marcada laminació mil·limètrica asimptòtica per la base amb un cabussament màxim de 30°. Hi són freqüents les concrecions relacionades amb les arrels entre les que hi destaquen les de caràcter vertical i d'una certa envergadura (Figura 4a, b). No s'ha pogut reconèixer cap tipus de macrofauna. L'observació en làmina prima ens indica que la seva composició està formada principalment per fragments de mol·luscs, encara que també hi són presents les algues coral·linàcies, els foraminífers i un petit percentatge de litoclasts (Figura 5c).

En un contacte molt marcat per la presència d'abundants concrecions degudes a l'acció de les arrels, i que correspon a un petit paleosòl format per llims arenosos vermellosos, li segueixen dos nivells formats per calcarenites llimoses relativament cimentades i de tonalitat vermellosa, separats per un paleosòl poc desenvolupat i molt arenós que en conjunt tenen uns 5 m de potència. Presenten una morfologia lenticular que se subdivideix en diferents sub-nivells. Aquestes eolianites presenten un grau elevat de bioturbació per arrels, especialment el nivell superior (Figura 4c) que fa difícil observar la laminació de baix angle que presenten aquí les eolianites.

Per damunt d'aquests nivells tenim una nova duna de dimensions considerables (9 m de potència en el punt de màxima altura). Es tracta d'una calcarenita força cimentada, de color blanc, amb estratificació encreuada resultat de la coalescència de les làmines de diversos cossos dunars (Figura 4d).

Un sòl format per arenes llimoses vermelles de menys d'1 m de potència separa aquesta unitat de la unitat eòlica següent (Figura 6a). Aquesta consisteix en una calcarenita de color rogenc caracteritzada per una marcada laminació que forma sets de dimensions decamètriques i amb un cabussament que supera els 30º. Aquesta eolianita, força cimentada, conté abundants foraminífers, algues vermelles i abundants litoclasts (Figura 5b). L'aspecte de les calcarenites és molt massiu, lleugerament concrecionat

Figura 5: Imatges de làmines primes observades al microscopi petrogràfic amb llum paral·lela de mostres representatives de les unitats eòliques de la sèrie del Davallador des Carros: a) eolianita superior, b) eolianita intermèdia, c) eolianita basal, d) duna adossada al penya-segat. Veure descripció dins del text. (Localització de les mostres a la Figura 8).

Figure 5: Thin section images observed under the petrographic microscope in parallel light of representative samples of the eolian units from Davallador des Carros: a) upper eolianite, b) intermediate eolianite, c) basal eolianite, d) cliff-front eolianite. See description in the text. (Location of the samples in Figure 8).

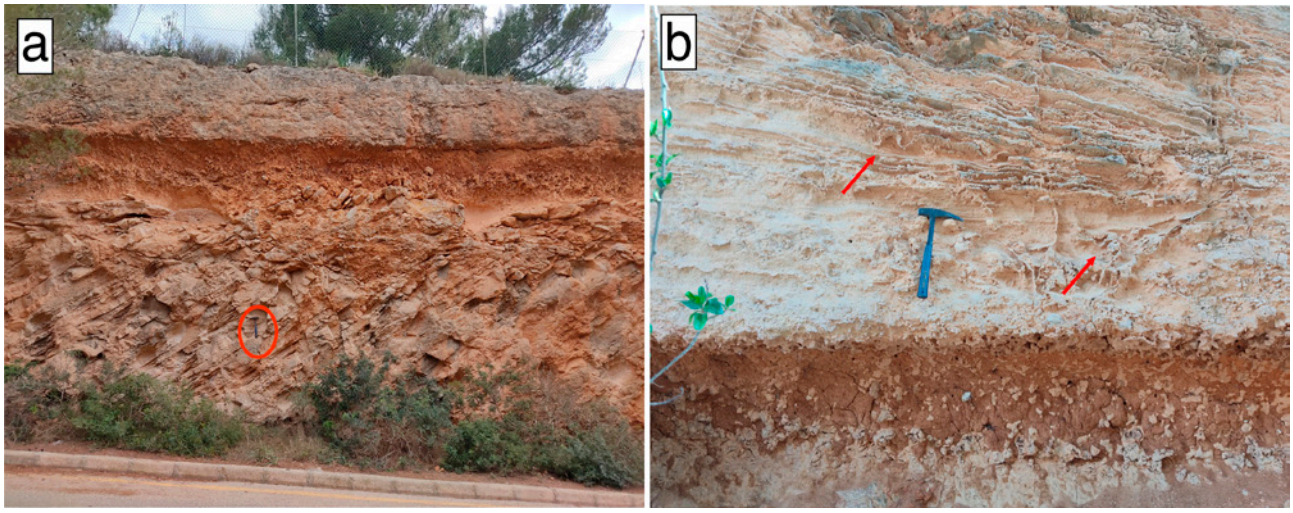


Figura 6: Sostre de la seqüència quaternària amb el desenvolupament d'una gran duna de prop de 8 m de potència. Per sobre d'ella es desenvolupa un sòl amb abundants nòduls carbonatats (a) que dóna pas al darrer episodi eòlic on, a part de l'acció de les arrels, s'hi pot observar la distorsió de les làmines per l'acció de *Myotragus* (b).

Figure 6: Uppermost part of the Quaternary sequence with the development of a dune nearly 8 m thick. On top of this level a soil with abundant carbonate nodules develops (a) that gives way to the last eolian episode, where apart from the action of the roots can be seen the distortion of the laminae due to the action of *Myotragus* (b).

Cova des Puigderrós

Mostra	Color	Mida de gra		Mineralogia						Interpretació
	Munsell	(*)	textura (**)	calcita ***	aragonita	dolomita	quars	feldspats	argiles	
PGROS-14	7,5YR 7/6	AF-AM	a - mbc	96.2	0.0	0.6	3.2	0.0	0.0	eolianita
PGROS-13	7,5YR 8/2	AM	sub-a - mbc	98.5	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	eolianita
PGROS-12	7,5YR 8/4	AMF-LL	sub-a - pc	96.4	0.0	0.0	3.6	0.0	0.0	paleosòl desenvolupat
PGROS-11	7,5YR 8/2	AF-AM	a - mc	98.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	eolianita
PGROS-10	7,5YR 8/2	AM	a - mbc	98.4	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	eolianita
PGROS-09	5YR 5/8	LL-AMF	sub-a - pc	75.0 ****	0.0	0.0	22.5	0.0	2.5	paleosòl ben desenvolupat
PGROS-08	7,5YR 8/4	AF-AM	a - mbc	96.9	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	eolianita
PGROS-07	5YR 6/8	AMF-LL	sub-a - pc	90.8	0.0	0.0	9.2	0.0	0.0	paleosòl incipient
PGROS-06	7,5YR 8/2	AF-AMF	sub-a - mbc	94.4	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	eolianita
PGROS-05	5YR 7/6	LL-AMF	sub-a - pc	92.5	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	paleosòl incipient
PGROS-04	7,5YR 8/3	AM	sub-a - mbc	98.3	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	eolianita
PGROS-03	5YR 5/6	AMF-LL	sub-a - pc	91.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	paleosòl incipient
PGROS-02	7,5YR 7/6	AF-AMF	sub-a - mbc	83.9	0.0	0.1	16.0	0.0	0.0	eolianita
PGROS-01	7,5YR 8/4	AF	sub-a - mbc	98.2	0.0	1.1	0.7	0.0	0.0	eolianita
Promig d'eolianites				95.9	0.0	0.2	3.9	0.0	0.0	
Promig de paleosòls				92.7	0.0	0.0	10.4	0.0	0.5	

Davallador des Carros

Mostra	Color	Mida de gra		Mineralogia						Interpretació
	Munsell	(*)	textura	calcita ***	aragonita	dolomita	quars	feldspats	argiles	
DAVA-e	7,5YR 7/6	AF-AMF	sub-a -mbc	91.9	0.0	1.2	4.6	0.0	2.3 (guix)	eolianita
DAVA-d	10R4/6	LL-AMF	sub-a - pc	35.8	6.3	0.0	47.5	4.5	5.9	paleosòl ben desenvolupat
DAVA-c	7,5YR 8/2	AF	sub-a -mbc	95.3	0.0	1.8	2.9	0.0	0.0	eolianita
DAVA-b	7,5YR 8/2	AF-AM	sub-a -mbc	94.3	0.0	0.9	4.8	0.0	0.0	eolianita
DAVA-a	7,5YR 8/4	AF-AM	sub-a -mbc	69.5	9.9	16.1	4.5	0.0	0.0	eolianita adossada
Promig d'eolianites				87.8	2.5	5.0	4.2	0.0	0.0	
Promig de paleosòls				35.8	6.3	0.0	47.5	4.5	5.9	

* AM: arena mitjana (0,5-0,25 mm); AF: Arena fina (0,25-0,12 mm); AMF; arena molt fina (0,12-0,06 mm); LL: llim (<0,06 mm)
** a: arrodonit; sub-a: sub-arrodonit; mbc: molt ben classificat; bc: ben classificat; mc: moderadament classificat; pc: poc classificat
*** (Mg 0,03 / Ca 0,97) **** (Ca 1.0)

Taula 1: Principals trets composicionals de les mostres d'eolianites estudiades.

Table 1: Main compositional features of the sampled eolianites.

a la base i a sostre presenta una marcada superfície d'erosió que dona pas a un paleosòl molt ben desenvolupat. El contacte està format per bretxes amb clastos molt irregulars i angulosos d'ordre centidecimètric resultat de l'erosió de l'eolianita subjacent sobre la que es desenvolupa. El paleosòl, que pot atènyer puntualment 1 m de potència, està format per llims arenosos marrons amb abundants nòduls carbonatats resultat de l'activitat de les arrels. Aquest paleosòl és el més important i desenvolupat de tota la sèrie observada aquí i marca clarament un canvi climàtic i ambiental important.

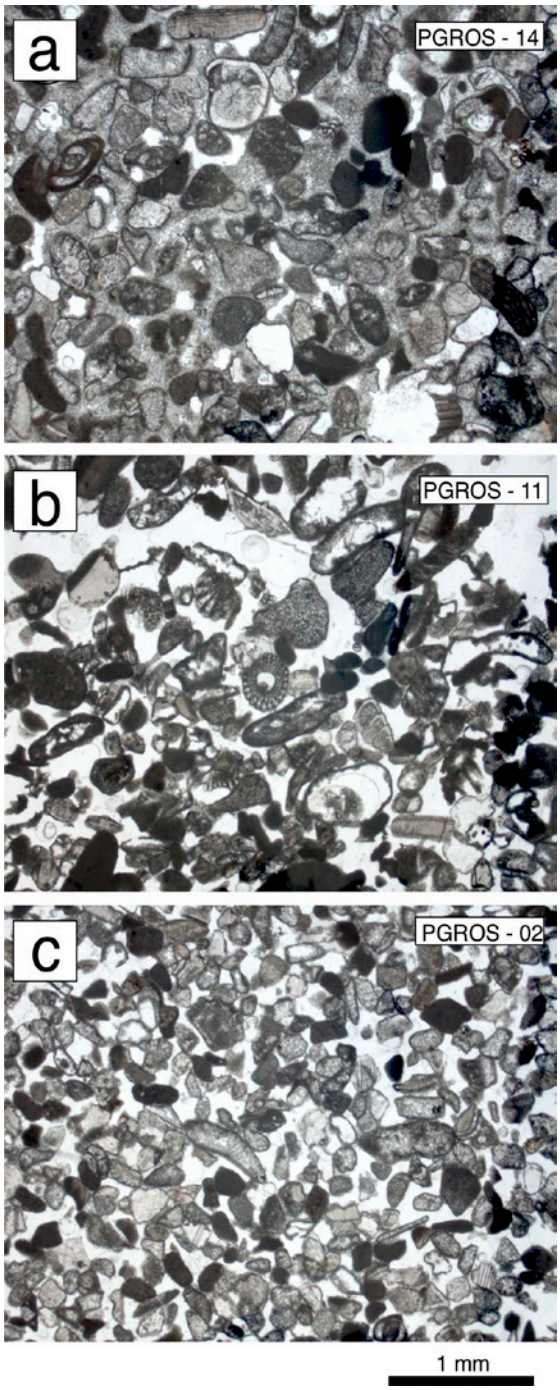


Figura 7: Imatges de làmines primes observades al microscopi petrogràfic amb llum paral·lela de mostres representatives de les unitats eòliques de la sèrie de l'interior de la cova des Puigderrós. La roca presenta un baix grau de cimentació excepte a la part més superior (a) amb una composició on dominen els bioclasts (b) i amb una mida d'arena fina a molt fina ben classificada (c). (Localització de les mostres a la Figura 8).
Figure 7: Thin section images observed under the petrographic microscope in parallel light of representative samples of the eolian units inside Cova des Puigderrós. The rock shows a low degree of cementation except for the uppermost part (a), its composition is dominated by bioclasts (b) and with a size of fine to very fine well sorted sand (c). (Location of the samples in Figure 8).

Un nou episodi eòlic es desenvolupa per sobre del paleosòl (Figura 6b). Es tracta d'unes calcarenites blanques poc cimentades, que mostren una fina laminació amb un angle de cabussament d'uns 15° i asimptòtica a la base, que presenten algunes restes de l'activitat d'arrels i a les que s'hi ha observat algunes icnites de l'activitat de *Myotragus*. Aquesta eolianita està parcialment cimentada per ciment ferruginós i la seva composició està dominada per foraminífers, algues coral·linàcies i litoclasts (Figura 5a).

En el conjunt de la sèrie les eolianites presenten una composició clarament carbonatada (Taula 1) amb una mitjana de percentatge al voltant del 90% formada, quasi exclusivament, per calcita amb baix contingut de Mg i amb uns valors de quars al voltant del 4,5%. No s'observa cap variació significativa al llarg de tota la columna. Pel que fa al paleosòl més ben desenvolupat, el quars supera el 45% observant-se també un petit percentatge de feldspats (4,5%) i minerals de les argiles (6%). La resta està formada per calcita amb baix contingut de Mg. Un fet diferencial s'observa en l'eolianita adossada del pleistocè superior que cobreix bona part de la part bassal de la sèrie del Davallador des Carros i en la que la fracció carbonatada és molt més variada i està formada per calcita (aproximadament 70%), dolomita (16%) i aragonita (un 10%) amb prop d'un 5% de quars. Aquesta unitat també es diferencia per l'abundància de les empremtes de *Myotragus*.

El registre sedimentari a l'interior de la cova des Puigderrós

La seqüència quaternària de l'interior de la cavitat és molt similar a la que s'observa al Davallador des Carros de la que la separa només uns 190 m en línia recta. Hi ha petites diferències degut a les característiques dels tipus de dipòsits que les componen, formats per cossos lenticulars que obeeixen al desenvolupament del propi sistema dunar i dels paleosòls que hi solen anar associats.

A la part més profunda de la cova, i parcialment tapada pels blocs provinents del col·lapse de la cavitat, hi ha un nivell format per calcarenites d'aspecte massiu que a sostre passa a una fina laminació horitzontal. En la seqüència van alternant els nivells calcarenítics eòlics amb nivells poc desenvolupats o incipients de paleosòls (Figura 2f). En línies generals la laminació es poc visible degut al grau de meteorització superficial de les parets (*moonmilk*). Malgrat tot, en alguns nivells s'ha observat una marcada laminació asimptòtica a la base que supera els 30° de cabussament (Figura 2d).

Des del punt de vista composicional i textural s'observen algunes diferències al llarg de la columna en les diferents unitats eòliques. Així, els nivells inferiors (Figura 7c) presenten una mida de gra

més petita i un baix grau de cimentació. Els grans que són sub-arrodonits i que presenten un bon grau de classificació, estan formats majorment per litoclasts calcaris i bioclasts on hi destaquen les algues vermelles de poca fondària, alguns foraminífers epífits i fragments de mol·luscs. També s'hi ha observat algun foraminífer planctònic.

Els nivells intermedis (Figura 7b) que presenten una mida de gra major, amb un grau de classificació un poc menor, segueixen presentant un baix grau de cimentació i la seva composició és principalment bioclàstica destacant-hi els foraminífers epífits característics d'una praderia ben desenvolupada. Hi ha algunes algues vermelles i, sobretot, restes d'equinoïdeus, especialment pues. També s'hi observa algun foraminífer planctònic. La presència de litoclasts és més escadussera.

El nivell superior (Figura 7a), que correspon a la volta que tanca la cavitat, és el que presenta una mida de gra més grollera amb un bon grau de classificació i amb els grans arrodonits. Es caracteritza per tenir un elevat grau de cimentació comparat amb la resta de la sèrie. En la seva composició hi destaquen tant els components litoclàstics carbonatats, com la presència de bioclasts formats sobretot per foraminífers bentònics, algunes algues vermelles i alguns fragments d'equinoïdeus i de mol·luscs.

En el conjunt de la sèrie, les eolianites presenten una composició mineralògica clarament carbonatada (Taula 1) amb una mitjana de percentatge que supera el 95% formada, quasi exclusivament, per calcita amb baix contingut de Mg i amb uns valors de quars que rarament superen el 4%. No s'observa cap variació significativa al llarg de tota la columna, encara que en alguna mostra de la part basal s'hi ha observat algun petit percentatge de dolomita que es relacionaria amb la major presència de litoclasts. Pel que fa als paleosòls intercalats, encara que també domina la fracció carbonatada, els valors del contingut en quars és molt superior (un 10% de mitjana) així com, en el paleosòl més ben desenvolupat, la presència d'argiles (amb minerals del grup de les illites i la caolinita) és significativa.

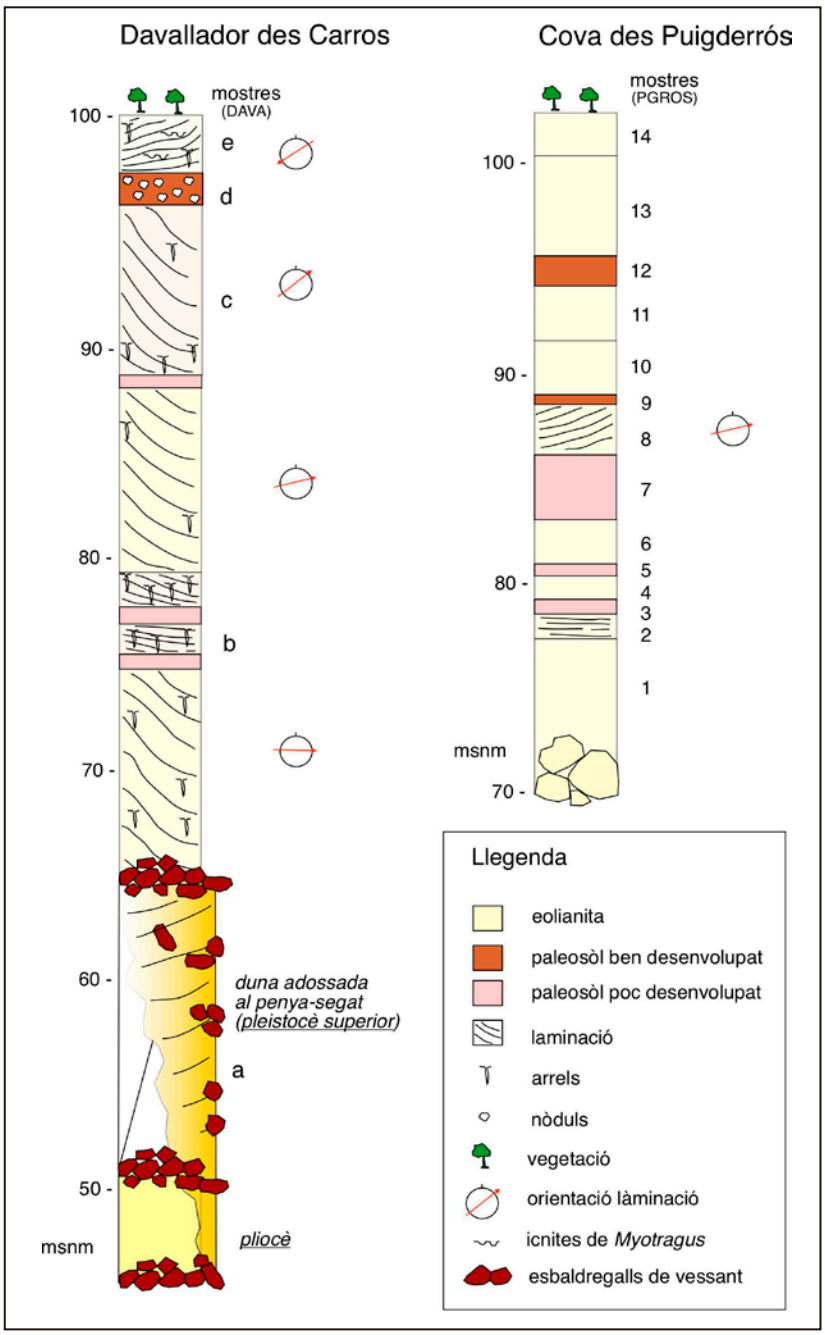


Figura 8: Columnes estratigràfiques simplificades de la zona del Davallador des Carros i de l'interior de la cova des Puigderrós. (Veure localització a la Figura 1).
Figure 8: Simplified stratigraphic logs of Davallador des Carros and inside Cova des Puigderrós. (See location in Figure 1).

Discussió i conclusions

El principal interès de la cova des Puigderrós correspon al fet de que és la segona cavitat desenvolupada a l'interior dels dipòsits calcarenítics eòlics del quaternari a l'illa de Mallorca, desprès

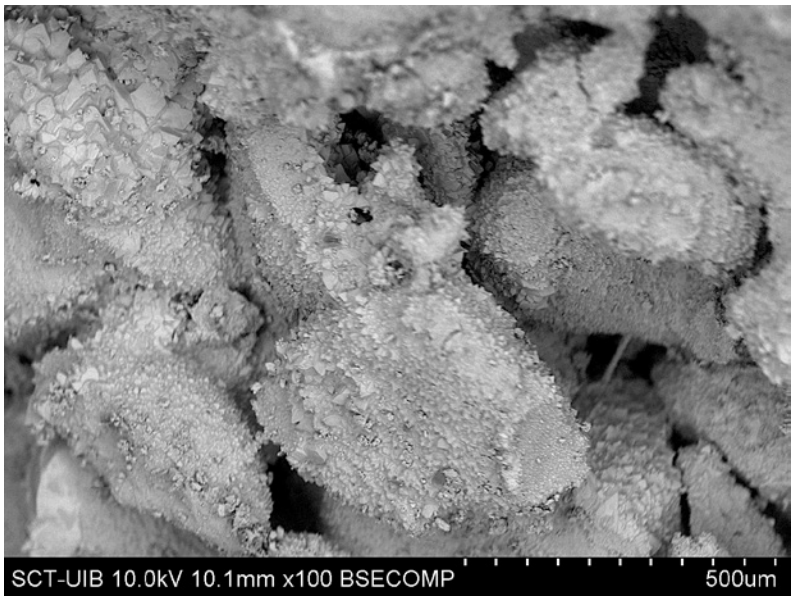


Figure 9: Imatge de microscòpia electrònica (SEM) de la mostra 13 on és visible damunt els grans sub-arrodonits l'incipient cimentació vadosa amb romboedres de calcita microsparítica que envolta i uneix els grans.
Figure 9: Electron microscopy (SEM) image of sample 13 where the incipient vadose cementation with rhombohedra of microsparitic calcite that surrounds and joins the grains is visible coating the sub-rounded grains.

de la cova des Dolç descrita per GRÀCIA et al. (2014) a la Colònia de Sant Jordi. En el cas de la cova des Puigderrós, per la seva morfologia i per la situació topogràfica de la mateixa, situada a més de 70 m d'altitud, podem considerar que es tracta d'una cavitat formada per col·lapse arran de la pèrdua de sustentació per, molt probablement, la presència d'un o diversos buits generats en els dipòsits inferiors de la seqüència que aflora a la zona. En aquest sentit, els dipòsits eòlics quaternaris, es desenvolupen damunt les margues evaporítiques del miocè terminal, les quals es disposen sobre els materials carbonatats del miocè superior que corresponen a la Unitat d'Esculls la qual està en contacte amb la mar. És en aquesta darrera unitat on trobem la major part de cavitats, tant al migjorn com al llevant de l'illa de Mallorca (FORNÓS & GELABERT, 2011; GINÉS et al., 2013). En el cas de la cova des Puigderrós no es desgavellat pensar en el desenvolupament d'unes quantes cavitats dins d'aquest nivells, on la seva evolució posterior migraria en ascens vertical per esfondrament el qual, a més a més, es veuria afavorit pels nivells margosos peri-evaporítics corresponents al miocè terminal.

A la Figura 8 es pot observar la comparativa entre els dipòsits observats a l'interior de la cova i els presents als penya-segats costaners de la zona del Davallador des Carros. Ambdues seqüències presenten un domini de la sedimentació eòlica formada per arenes de gra fi a mig, puntualment molt fi, i de composició carbonatada en la que la calcita és el mineral principal amb uns percentatges de quars que rarament superen el 5% i amb els grans de ben-arrodonits a sub-arrodonits. La composició és principalment biogènica de procedència marina, destacant-hi els foraminífers bentònics i litorals encara que algun planctònic hi és visible, a més d'algues coral·linàcies, equinoïdeus i fragments de mol·luscs. Hi ha una bona proporció de litoclasts però també de composició carbonatada, probablement procedents de l'erosió d'eolianites més antigues. La font dels sediments seria l'exposició de la plataforma marina en moments de regressió del nivell marí relacionada amb els episodis glacials del quaternari (DEL VALLE et al., 2024).

Quasi tots els dipòsits eòlics mostren una elevada activitat vegetal donada per la presència de concrecions associades a arrels, que es fan especialment abundants en les proximitats dels paleosòls incipients que separen els grans cossos dunars. La major part d'aquest paleosòls són molt arenosos i de composició carbonatada amb una mitjana aproximada en el percentatges de quars del 10%, que puntualment pot superar el 20%.

En línies generals les eolianites presenten un baix grau de cimentació de tipus vadós circumgranular amb cristalls microesparítics amb romboedres de calcita que envolten els grans (Figura 9). Només s'ha observat un bon grau de cimentació al nivell superior que correspon a la volta que tanca la cova.

La disposició de la seqüència eòlica damunt del pliocè, així com el grau de cimentació i la composició de les eolianites similars a altres dipòsits del litoral mallorquí (NIELSEN, et al., 2004), fan pensar en una edat corresponent al quaternari antic (pleistocè mitjà ?) ja que no ha estat possible trobar cap indici de macrofauna que permetés assignar-ho a una data concreta; falten especialment mol·luscs terrestres d'aquestes edats com els citats per MAS-GORNALS & RIPOLL (2010) a Calvià, SERVERA-NICOLAU et al., (2022) a Pòrtol - sa Cabaneta, o a altres indrets citats a VICENS (2015). Tampoc la microfauna observada a les làmines primes ha permès una atribució temporal. No s'han observat cambres de pupació d'insectes com les que s'observen als paleosòls del pliocè-pleistocè inferior de Calvià, i que han estat descrites per MAS-GORNALS & RIPOLL (2010), així com a altres indrets de Mallorca on hi ha materials de cronologia similar (VICENS, 2015).

La unitat superior, en canvi, mostra unes característiques diferencials. La seva disposició damunt d'un paleosòl molt ben desenvolupat, un baix grau de cimentació, així com la presència de icnites atribuïdes a *Myotragus* sp. fan pensar en dipòsits pertanyents ja, o molt propers, al pleistocè superior per afinitat amb dipòsits similars descrits a altres parts de Mallorca (FORNÓS et al., 2002, 2009).

La protecció del patrimoni subterrani de les Balears a partir del cas de la destrucció de la cova des Puigderrós. Què cal fer per evitar que torni a passar?

Les coves i avencs formen part inseparable dels aqüífers, contribuint a la seva recàrrega hídrica i, per tant, qualsevol activitat que s'hi realitzi dins ells pot implicar la contaminació de les aigües subterrànies. A la vegada, els sistemes càrstics en general i les coves en particular ofereixen uns valors ambientals d'especial interès; d'una banda, de tipus geològic, ja que existeix una gran geodiversitat entorn d'aquests fenòmens subterranis els quals formen una part important d'un patrimoni geològic que l'humà ha d'assumir, respectar i conservar. Per altra banda, cal destacar igualment els aspectes biològics i ecològics (Figura 10), ja que les coves constitueixen ecosistemes fràgils molt interessants, que es caracteritzen per una enorme especialització dels organismes vius que hi són presents i per una sorprenent biodiversitat adaptada a unes condicions de total foscor i d'elevat grau d'humitat que són pròpies d'aquest medi.

Totes aquestes consideracions constitueixen els arguments que reforcen l'encert que els legisladors de la Comunitat Valenciana van tenir en protegir les coves. Així, pensam que és del tot necessari per protegir el patrimoni subterrani de les Balears aprovar unes lleis semblants a les aprovades per la Comunitat Valenciana, al Decret 65/2006, de 12 de maig, del Consell, pel qual es desenvolupà el règim de protecció de les coves i s'aprovà el Catàleg de coves de la Comunitat Valenciana. [2006/X5697].

Amb l'aprovació de la Llei 11/1994, de 27 de desembre, de la Generalitat, d'Espais Naturals Protegits de la Comunitat Valenciana, es van declarar protegides, amb caràcter general, totes les coves, avencs i altres cavitats subterrànies situades en l'àmbit territorial valencià. Al seu torn, l'article 16 de la citada Llei 11/1994 emplaçava al Consell per a aprovar un catàleg de coves de la Comunitat Valenciana.

A l'article 5 de la citada llei apareix el cas dels descobriments fortuïts. En el cas particular de la troballa de noves cavitats en fronts d'explotació de pedreres o de desmunts d'obra civil, els responsables de l'obra queden obligats a comunicar immediatament el fet a l'administració competent en matèria d'espais naturals. En aquest moment, s'adoptaran les mesures necessàries per a la seva conservació fins que puguin ser inspeccionades i determinar si contenen elements o característiques de rellevant interès i, conseqüentment, poder avaluar la conveniència d'establir les mesures de protecció

Figura 10: Les coves són llocs amb una gran diversitat tant geològica com biològica. Columna coberta d'arrels a la cova des Puigderrós (Foto: J. Bermejo).
Figure 10: Caves are places that show great geological and biological diversity. Column covered with roots in the Cova des Puigderrós (Photo: J. Bermejo).

pertinents. Un cop notificada la troballa, la conselleria competent en matèria de medi ambient haurà de pronunciar-se sobre el que procedeixi.

De la mateixa manera, la troballa o descobriment fortuït de coves o avencs en el curs d'excavacions, activitats agrícoles o altres pràctiques rutinàries en terrenys privats o públics, haurà de ser també oportunament comunicat pels autors o propietaris dels terrenys a la conselleria competent en matèria de medi ambient, a fi que tals cavitats puguin ser degudament reconegudes i inventariades.

Centrats en la suposició de la necessitat de protecció del cas que ens ocupa, la cova des Puigderrós, tenint en compte el decret del Consell de la Comunitat Valenciana, entraria en el punt: Criteris Geològics I (Geomorfologia subterrània on determinades cavitats destaquen per la seva especial tipologia, la seva ubicació dins del carst, el seu origen –espeleogènesi– o el seu funcionament hidrològic); també s'afegiria un altre interès, en el punt de Criteris Espeleomètrics III (Majors sales i conductes. Sales de gran grandària de més de 2.000 m² en planta o 20.000 m³ en volum, així com grans conductes horitzontals –galeries– o verticals –pous– de seccions àmplies pròximes al decàmetre). En el cas que ens ocupa, i seguint les directrius esmentades, la cova des Puigderrós s'aproparia com a sala als 2.000 m^2 de superfície i superaria els 22.000 m^3 de volum. Per la qual cosa, i per evitar que aquests deplorables fets tornin a succeir, creiem convenient demanar mesures de protecció adequades per protegir el patrimoni natural subterrani de la comunitat de les Illes Balears.

Agraïments

Volem manifestar el nostre agraïment a José Bermejo per la cessió de la topografia i d'algunes fotografies de la cova des Puigderrós així com els comentaris de Borja López. A Miquel Alexandre Dot, pels seus bons suggeriments i adients consells. Als Serveis Científicotècnics de la UIB i en especial als Drs. Joan Cifre i Antoni Busquets.

També volem fer una dedicatòria molt especial d'aquest treball al tristament desaparegut Dr. Àngel Ginés, el mestre que ens va introduir en el món del carst, gran company i amic.

El present treball forma part del projecte de recerca finançat per l'Agencia Estatal de Investigación (AEI) amb la referència PID2020-112720GB-I00/AEI/.

Bibliografia

AGUILÓ, C. (1996): *La toponímia de la costa de Llucmajor*. Institut d'Estudis Catalans. Treball de l'Oficina d'Onomàstica II, 184 pp.

ALOMAR, G. & CLAR, T. (2006): Apunts geogràfics sobre l'extracció i ús de la pedra de marès al sud de Mallorca. La pedrera de ses Olles (Llucmajor). Arquitectura i enginyeria popular a Mallorca. *Actes del VIIè Congrés de la Societat Arqueològica Lul·liana*, 101-114.

AMORES, C. (2024a): Preocupación entre los espeleólogos por la destrucción de la Cova des Puig de Ros. *Última Hora*, 10/02/24.

AMORES, C. (2024b): Medi Ambient aprobó en 2018 la construcción de dos chalets sobre la cueva de Puig den Ros. *Última Hora*, 21/03/24.

BERMEJO, J.; PARDO, J.V. & MATEU, J. (2021): Litoral de Llucmajor (Mallorca). Zona Cap Enderrocat – Cap de Regana. *Gota a Gota*, 24: 80-90.

CUERDA, J. (1975): *Los tiempos Cuaternarios en Baleares*. Inst. Est. Bal. Palma. 304 pp.

CUERDA, J. (1987): *Moluscos marinos y salobres del Pleistoceno balear*. Caja de Baleares "Sa Nostra". Palma. 421 pp.

CUERDA, J. & SACARÈS, J. (1966): Nueva contribución al estudio del Pleistoceno marino del término de Lluchmajor (Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 12: 63-100.

CUERDA, J. & SACARÈS, J. (1970): Formaciones marinas correspondientes al límite plio-quaternario y el Pleistoceno inferior de la costa de Llucmayor (Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 16: 105-141

CUERDA, J. & SACARÈS, J. (1992): E*l Quaternari al Migjorn de Mallorca*. Conselleria de Cultura, Educació i Esports del Govern Balear, 130 pp.

DEL VALLE, L,; TIMAR-GABOR, A.; FORNÓS, J.J. (2024): Chronology of Pleistocene sedimentary cycles in the western Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*, 330: 108451.
FONT, B. (1973): *Història de Llucmajor*. Volum 1. Ajuntament de Llucmajor, p. 61.
FORNÓS, J.J.; BROMLEY, R.G.; CLEMMENSEN, L.B. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (2002): Tracks and trackways of Myotragus balearicus Bate (Artiodactyla, Caprinae) in Pleistocene aeolianites from Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). P*alaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 180: 277-313.
FORNÓS, J.J.; CLEMMENSEN, L.B.; GÓMEZ-PUJOL, L. & MURRAY, A.S. (2009): Late Pleistocene carbonate aeolianites on Mallorca, Western Mediterranean: a luminescence chronology. *Quaternary Science Reviews*, 28: 2697-2709.
FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (2011): Condicionants litològics i estructurals del carst a les Illes Balears. *Endins*, 35: 37-52.
FRAU, J. (2024): Unas obras destrozan la bóveda de una cueva de Llucmajor y tiran escombros en el interior. *Diario de Mallorca*, 1/03/24.
GINÉS, A. (2000): Patterns of collapse chambers in the endokarst of Mallorca (Balearic Islands, Spain). *Acta Carsologica*, 29 (2): 139-148. Ljubljana.
GINÉS, A.; GINÉS, J. & GRÀCIA, F. (2013): Cave development and patterns of caves and cave systems in the eogenetic coastal karst of Southern Mallorca (Balearic Islands, Spain). In: LACE, M.A. & MYLROIE, J.E. *Coastal Karst Landforms*. Springer. Coastal Research Library, 5: 245-260.
GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; GAMUNDÍ, P.; CIRER, A.; FERNÁNDEZ, J.F.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; URIZ, M.J.; MUNAR, S.; VICENS, D.; GINARD, A.; BETTON, N.; VIVES, M.A.; JAUME, D.; MAS, G.; PERELLÓ, M.A. CARDONA, F. & TIMAR-GABOR, A. (2014): Es Dolç (Colònia de Sant Jordi, Ses Salines, Mallorca). Cavitat litoral amb influències hipogèniques excavada a les eolianites quaternàries i als materials del pliocè. *Endins*, 36: 69-96.
JUÁREZ & MAS-GORNALS (2022): Els dipòsits litorals atribuits històricament al Pliocè-Plistocè inferior de Mallorca (Illes Balears, Mediterrani occidental): revisió, biocronologia de mol·luscs i implicacions paleogeogràfiques. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 65: 237-257.
MAS-GORNALS, G. (2016): *El registre estratigràfic del Messinià terminal i del Pliocè a l'illa de Mallorca. Relacions amb la crisi de salinitat de la Mediterrània*. Tesi doctoral. Universitat de les Illes Balears. 534 pp.
MAS-GORNALS, G. & FORNÓS, J.J. (2013): Late Messinian Lago-Mare deposits of the island of Mallorca (Western Mediterranean). Implications on the MSC events. *14th RCMNS Congress. Neogene to Quaternary geological evolution of Mediterranean, Paratethys and Black Sea*. 8-12 September 2013, Istanbul, Turkey. Abstracts book, p. 210.
MAS-GORNALS, G. & RIPOLL, J. (2010): Cambres de pupació d'insectes coleopters del Pliocè-Pleistocè inferior de Mallorca (Illes Balears, Mediterrania occidental). Significacio paleoambiental i cronoestratigrafica. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 53: 91-106.
NIELSEN, K.A.; CLEMMENSEN, L.B. & FORNÓS, J.J. (2004): Middle Pleistocene magnetostratigraphy and susceptibility stratigraphy: data from a carbonate aeolian System, Mallorca, Western Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*, 33: 1733-1756.
POMAR, F. & DEL VALLE, L. (2018): Els dipòsits pleistocens de cap Enderrocat-ses Olles (Mallorca, Mediterrània occidental): un exemple de sand ramp adossat a un penya-segat costaner. *VII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears*, 53-56.
POMAR, L.; WARD, W.C. & GREEN, D.G. (1996): Upper Miocene Reef Complex of the Llucmajor area, Mallorca, Spain. In: FRANSEEN, E.; ESTEBAN, M.; WARD, W.C. & ROUCHY, J.M. (eds.). *Models for Carbonate Stratigraphy from Miocene Reef Complexes of the Mediterranean regions*. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology Series, 5: 191-225.
SALVÀ, C. (2020): *La memòria d'un paisatge gravat. Les pedreres de marès, empremta territorial del paisatge identitari de Mallorca*. Tesi doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 806 pp.
SERVERA-NICOLAU, J., DEL VALLE, L., VICENS, D. & PONS, G.X. (2022): El registre estratigràfic del fini-Messinià i del Plioquaternari de la plataforma Pòrtol-Sa Cabaneta (Illes Balears, Mediterrani occidental): evolució geomorfològica, estratigràfica i dades paleontològiques. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 65: 331-347.
TUCKER, M. (1988): *Techniques in Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications. 394 pp.
VICENS, D. (2015): *El registre paleontològic dels dipòsits litorals quaternaris a l'Illa de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània occcidental)*. Tesi Doctoral. UIB. 985 pp.
VICENS, D. & GINARD, A. (2022): Les pedreres històriques de marès de la Fossa (Llucmajor). *VIII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears*, 99-101.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Estimació dels tipus d'usos del sòl sobre el recorregut de les Coves del Drac i altres cavitats properes de l'àrea de Porto Cristo (Manacor, Mallorca). Dades preliminars

Pau BALAGUER [1], Damià VICENS [1, 2] i Francesc GRÀCIA [1, 2]

[1] Societat d'Història Natural de les Balears (SHNB). Palma, Mallorca. Email: pablobalaguerhuguet@gmail.com
[2] Societat Espeleològica Balear (SEB). Palma, Mallorca.

Abstract

It has been estimated the surface area and the percentage of modified land/soil above 5 caves in the area of Porto Cristo (Mallorca). The studied caves are: Coves del Drac, Cova de Cala Murta, Cova de s'Enterrossall, Cova des Coloms and Cova de sa Piscina. The analysis has been based on: 1) digitization of the path of the cavities according to the most recent publications of the advances about knowledge of the caves; 2) determination of the types of land uses covers over the path of the caves; 3) comparison between the different phases of knowledge of the cavities (mainly the case of Coves del Drac) and year of construction of buildings and infrastructures located above the path of the cave. The work is a contribution to the continuation of land cover analysis tasks above caves located in urban coastal areas, performed with the aim of increasing knowledge about littoral areas in line with the concept of Integrated Coastal and Marine Management (ICMM).

Resum

S'estima la superfície i el percentatge de terreny/sòl modificat sobre el recorregut de 5 cavitats del nucli de Porto Cristo (Mallorca). Les cavitats tractades són: Coves del Drac, Cova de Cala Murta, Cova de s'Enterrossall, Cova des Coloms i Cova de sa Piscina. L'anàlisi s'ha basat en: 1) digitalització del recorregut de les cavitats d'acord amb publicacions dels avenços en el coneixement de les coves; 2) Determinació dels tipus de cobertures superficials sobre el recorregut de les cavitats; 3) Comparació de les diferents fases de coneixement de les cavitats (principalment el cas de Coves del Drac) amb l'any de construcció de les edificacions i habitatges que es troben sobre el recorregut de la cova. El treball és una contribució a la continuació de tasques d'anàlisi de cobertures d'usos del sòl sobre cavitats localitzades a àrees urbanes costaneres, amb la intenció d'incrementar el coneixement de les àrees litorals i en línia amb el concepte de Gestió Integrada de Zones Costaneres i Marines (GIZCM).

Balaguer, P.; Vicens, D. i Gràcia, F. (2024): Estimació dels tipus d'usos del sòl sobre el recorregut de les Coves del Drac i altres cavitats properes de l'àrea de Porto Cristo (Manacor, Mallorca). Dades preliminars. Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 37-49. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 21 abril 2024; **Revisat:** 16 maig 2024; **Acceptat:** 20 maig 2024.
Publicat online: 2 juliol 2024.

Pròleg

Aquest treball s'ha realitzat a partir de l'esforç previ de diferents equips de recerca pluridisciplinaris que han contribuït, mitjançant el desenvolupament de treball de camp i tasques d'anàlisi i redacció, a difondre el coneixement de caire científic i divulgatiu de les cavitats de la zona de Porto Cristo entre les quals destaca l'emblemàtica Coves del Drac.

A bona part d'aquests treballs l'autoria principal o participació activa d'Àngel Ginés és ben palesa. La figura d'Àngel Ginés s'estén pràcticament a tota la literatura científica sobre cavitats i processos càrstics de tot Balears. La pèrdua sobtada d'aquesta figura clau i pionera de l'espeleologia balear i espanyola, de la que destacava la seva qualitat humana i les ganes de seguir avançant cap al coneixement del carst, ens va colpejar a tots i va passar durant les acaballes d'aquest treball. Valgui aquesta humil contribució construïda a partir de part del llegat científic i divulgatiu que ens ha deixat Àngel com el nostre homenatge particular a la seva tasca. Descansi en Pau.

Introducció

L'estimació dels tipus de cobertures de les coves de l'àrea de Porto Cristo comprèn l'anàlisi de 5 cavitats: 1) Coves del Drac, 2) Cova de Cala Murta, 3) Cova de s'Enterrossall, 4) Cova de sa Piscina i 5) Cova des Coloms (Figura 1) localitzades al Llevant de Mallorca a l'àrea compresa entre Porto Cristo i Cala Murta (Figura 2). La motivació de l'anàlisi de les cobertures es basa en la determinació dels m^2 i/o percentatge de terreny modificat per l'home a sobre del recorregut de les coves.

El present treball segueix la línia dels treballs de la mateixa temàtica realitzats a coves del Llevant i Migjorn de Mallorca i l'àrea de la regió del Migjorn de Menorca (BALAGUER et al., 2013, 2017, 2018). De la mateixa manera que en els treballs anteriors, cal assenyalar que el desenvolupament de totes aquestes tasques s'ha pogut realitzar gràcies a l'extraordinària tasca duta a terme per diversos autors i que es pot consultar a treballs que principalment s'han publicat a les revistes *Endins* i *Papers de la Societat Espeleològica Balear*.

Per tal de contextualitzar l'evolució de la construcció sobre el traçat de les Coves del Drac cal realitzar un repàs de l'evolució de les diferents etapes de descobriment de les coves. D'acord amb GINÉS et al. (2018a) l'evolució de les exploracions de la cova es pot dividir en 4 etapes principals, que bàsicament comprenen els darrers 150 anys:

1) La primera informació de caire topogràfic de la cova data de 1880, quan es va realitzar el primer plànol per part de WILL (1880), tot i que la cova ja és coneguda des del segle XVII d'acord amb alguns documents de l'època (GINÉS et al., 2018a). Sempre d'acord amb el treball citat, la denominació de "coves" parteix del costum de considerar les cavitats turístiques clàssiques de l'illa, com a conjunts de sales o cavitats més o manco individualitzades; d'aquesta manera la cova que ens ocupa s'anomena habitualment en plural: Coves del Drac, denominació que agrupa les diferents sales conegudes com a *cova Negra*, *cova Blanca*, *cova de Lluís Salvador* i *cova dels Francesos*.

2) La segona etapa en el descobriment de les Coves del Drac seria la que s'inicia amb la campanya d'Édouard-Alfred Martel, desenvolupada el 1896, i en la que s'aprofundeix en l'exploració dels seus llacs (MARTEL, 1897). Inicialment, la presència dels llacs fou considerada com a una limitació a les exploracions realitzades fins aleshores. En aquesta etapa també cal destacar les importants visites exploratòries de RACOVITZA (1905) i MAHEU (1912) que esdevenen importants aportacions de caire bioespeleològic. La cova es converteix en un "reclam turístic" gairebé des de finals del segle XIX, que anirà guanyant protagonisme a mesura que avença el segle XX.

3) La tercera etapa es correspondria amb l'increment de l'interès turístic de la cavitat a partir dels anys 20 del segle passat. Es publica un mapa de detall a escala 1:1000 amb motiu d'una de les excursions del XIV Congrés Internacional de Geologia celebrat a Madrid l'any 1926 (FAURA I SANS, 1926). Durant el període 1922-1929 es produeix l'adequació del recorregut turístic de la cova amb construcció de camins, escales, passarel·les i l'embarcador. Els propietaris es fan valer dels plànols de FAURA I SANS (1926) per a dur a terme totes les obres. L'any 1935 es completa l'enllumenat de la cova a càrrec de l'enginyer Carles Buïgas, posteriorment (al voltant dels anys 70) es bastirà la passarel·la/camí que rodeja el vessant oriental del *llac Martel* (GINÉS & GINÉS,

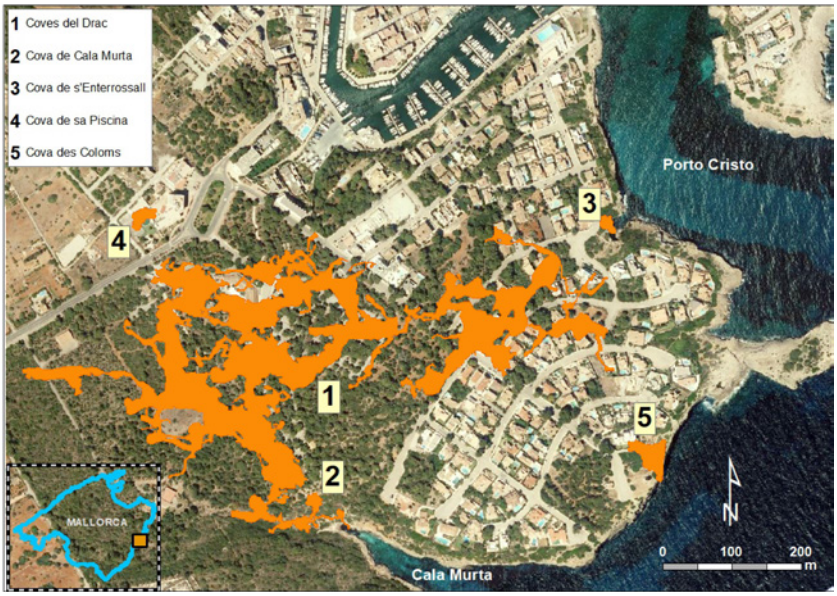


Figura 1: Localització de les coves de l'àrea de Porto Cristo.
Figure 1: Location of the caves in the area of Porto Cristo.

2018). Les intervencions dutes a terme en aquest període gairebé disposen la cova de la mateixa manera que la coneixem en l'actualitat.

4) La quarta etapa correspon a les exploracions de les galeries sotaiguades de la cova, que es perllonguen fins a l'actualitat. No és fins a finals del segle XX quan espeleobussejadors gal·lesos emprenen les exploracions dels passatges submergits (CLARKE, 1991); aquest autor aporta un plànol actualitzat amb més de 600 m nous de galeries subaquàtiques. A partir de 2013 i seguint el fil de les exploracions subaquàtiques, els espeleobussejadors del *Grup Nord de Mallorca* se centren majoritàriament en la recerca de noves extensions submergides tenint en compte els avenços esdevinguts a partir de la cartografia aportada per CLARKE (1991). L'estat de les exploracions dutes a terme entre 2013 i 2018 s'ha anat reportant a successius treballs (GRÀCIA, 2015; GRÀCIA et al., 2017, 2018a, 2018b).

   Paral·lelament a les tasques d'exploració subaquàtica en el període 2013-2018, en el 2015 també s'inicien tasques d'exploració i aixecament topogràfic dels sectors no submergits per part dels integrants de l'*Speleo Club Mallorca* que el 2017, juntament amb els membres d'altres grups espeleològics, com són el *Grup Nord de Mallorca* i el *Grup Espeleològic EST*, que van passar a constituir la *Societat Espeleològica Balear*. El resultat fou un plànol detallat de les Coves del Drac i cavitats properes (ENSEÑAT et al., 2018a, 2018b; SANTANDREU et al., 2018).

   Cal remarcar que tota aquesta activitat d'exploració compresa entre 2013-2018, esdevé de la voluntat d'ambdós equips (exploració subaquàtica –espeleobusseig– i exploració de sales aèries) d'aconseguir un plànol de la cova amb el major grau de detall possible i que en el seu conjunt es recull en els treballs recollits en el primer volum de la revista *Papers de la Societat Espeleològica Balear*. D'aquests darrers treballs s'extreu que les Coves del Drac tenen un recorregut de 7.690 m dels quals 5.260 m són subaquàtics (Figura 1).

Pel que fa al coneixement de les petites coves dels voltants (Cova de Cala Murta, Cova de sa Piscina, Cova des Coloms i Cova de s'Enterrossall) també respon a diverses campanyes d'exploració malgrat dues d'elles (Cova de s'Enterrossall i Cova des Coloms) són visibles des de la mar. A continuació s'exposen algunes notes molt generals sobre el coneixement de l'existència d'aquestes cavitats d'acord amb ENSEÑAT et al. (2018b):

- Cova de Cala Murta: En el treball de VENY (1968) en el que es desenvolupa un inventari de cavitats, es constata la seva presència. Es troba al límit meridional de les Coves del Drac a l'alineació conformada entre la *sala Louis Armand* de les Coves del Drac i la surgència d'aigua de Cala Murta (ENSEÑAT et al., 2018b). No existeix una comunicació directa i transitable amb les Coves del Drac, però són diversos els treballs i autors que proposen la hipòtesi congruent que la seva gènesi està directament lligada a la de les Coves del Drac (ENSEÑAT et al., 2018a, 2018b; GRÀCIA et al., 2018a, 2018b) (Figures 1 i 6).

- Cova de s'Enterrossall: Es tracta d'una cavitat localitzada a la mateixa línia de costa i té una comunicació directa amb la mar. És prou coneguda, almanco com a cova litoral que es localitza al vessant meridional de la bocana del Port de Manacor, on la línia de costa presenta una raconada o petita cala que rep el nom de s'Enterrossall. L'aparent alineació d'aquesta cavitat amb les *galeries de l'Arxiduc* i la *galeria Despullada* de les Coves del Drac, així com la presència de la raconada acabada d'esmentar suggereix a pensar en una gènesi lligada a les Coves del Drac (FORNÓS et al., 2018) (Figures 1 i 5).

- Cova de sa Piscina: Es constata la seva possible existència a partir d'una cartografia de les Coves del Drac elaborada per FAURA I SANS (1926). Aquesta cartografia reflecteix l'existència d'una cavitat separada de les Coves del Drac, sense connexió aparent i que pareixia coincidir amb la cavitat que es troba íntegrament dins del recinte de l'Hotel Porto Playa (ENSEÑAT et al., 2018b) (Figures 1 i 6). Per desgràcia, sembla que la cova en qüestió va quedar enterrada sota el jardí de l'hotel i al llarg de les tasques de recerca de la cavitat es va poder localitzar aquesta altra, inèdita i segurament relacionada genèticament.

- Cova des Coloms: Rep el nom després que Martel l'anomenés així durant les seves expedicions de 1896. La primera cartografia de detall coneguda és la realitzada al treball d'ENSEÑAT et al. (2018a, 2018b). En un primer moment MARTEL (1897) la considerava com a una possible connexió amb la mar de les Coves del Drac. És una cova

accessible, ben visible i localitzada a la mateixa línia de costa. A les expedicions de Clarke de l'any 1991 es descartà una connexió directa amb les Coves del Drac (Figures 1 i 5).

L'objectiu principal de l'estudi és el d'oferir una estimació dels diferents tipus de cobertures (usos del sòl) existents sobre el recorregut de les coves de l'àrea de Porto Cristo, calcular l'extensió de terreny modificat i comparar, si escau, la data de construcció dels habitatges i infraestructures, segons les dades del cadastre, amb els diferents períodes de descobriment i exploració de les cavitats. De les 5 coves tractades, les Coves del Drac és la cavitat que adquireix una major importància tant per les seves característiques espeleogenètiques, la seva notable extensió i les connotacions socioeconòmiques relacionades amb l'explotació turística. Les dades obtingudes, malgrat siguin a mode d'aproximació o estimació, poden contribuir a la presa de decisions en un context d'acord amb el concepte de Gestió Integrada de Zones Costaneres (GIZC), alhora que aporten més dades de caire quantitatiu a la discussió, gairebé continua, sobre la gestió urbanística d'àrees amb presència de coves i possibles implicacions de la seva gestió i conservació.

Descripció i marc físic de la zona d'estudi

Tal com s'ha exposat a l'apartat d'introducció, aquest treball s'ha realitzat d'acord amb la recopilació d'informació prèviament existent i publicada en diferents articles científics, amb un marcat caràcter pluridisciplinari. El treball de FORNÓS et al. (2018) realitza un repàs complet de l'entorn geogràfic, geomorfològic i geològic de les Coves del Drac; per altra banda, GINÉS et al. (2018b) detallen les característiques espeleogenètiques de la cavitat. D'aquesta manera i d'acord amb l'anterior, s'enumeren les principals característiques geogràfiques i geomorfològiques de l'entorn de les coves:

- Les Coves del Drac es troben a la plataforma tabular carbonatada del Llevant de Mallorca que conforma la Marina de Llevant (Figura 2).
- Els materials predominants a la Marina de Llevant i a l'àrea de les coves són d'edat corresponent al miocè superior (Figura 2). La naturalesa calcària i la configuració de la fracturació permeten el desenvolupament de coves de dissolució de gènesi càrstica.
- L'origen de la cova és càrstic i el desenvolupament vertical és degut principalment a la gran quantitat d'esfondraments ocorreguts (GINÉS et al., 2018b).
- Aquests esfondraments a les sales aèries, sovint contribueixen a emmascarar una mica el control estructural que regeix el recorregut d'aquestes coves (GINÉS & GINÉS, 1992, 2007; GRÀCIA, 2015; GINÉS et al., 2018b), corresponent a direccionalitats NE-SW en els trams més rectilinis, majoritàriament a les zones negades, i direccions quasi ortogonals ESE-WNW (Figura 1), així com amb menor freqüència algunes direccionalitats E-W. A l'àrea de Porto Cristo la direcció predominant de la fracturació és NE-SW, que conjuntament amb les direccionalitats ortogonals acabades d'esmentar, condiciona el traçat de la línia de costa i de bona part de les cales d'aquesta zona.

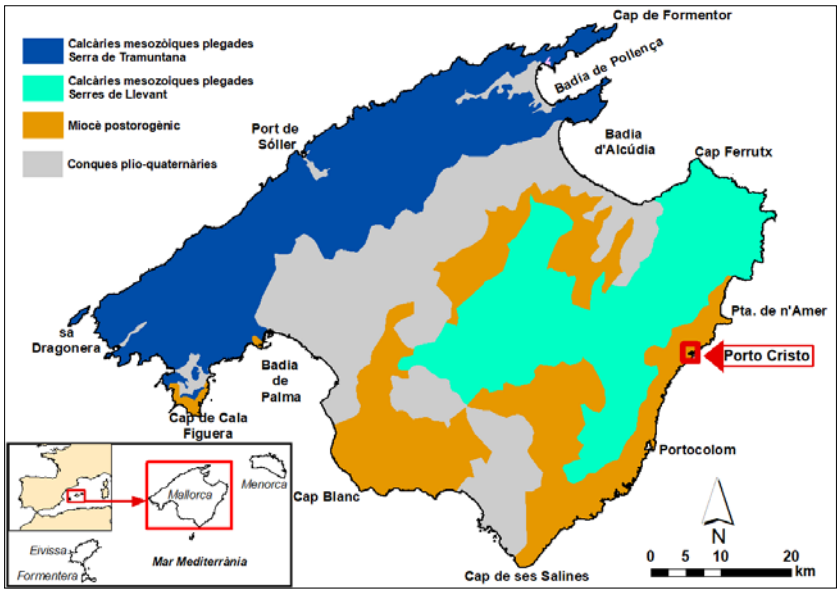


Figura 2: Localització de Porto Cristo dins del context geològic sintetitzat de l'illa de Mallorca. Figura modificada de GRÀCIA et al. (2011).
Figure 2: Location of Porto Cristo within the summarised geologic context of Mallorca island. Modified figure from GRÀCIA et al. (2011).

Pel que fa a la resta de cavitats menors, la Cova de Cala Murta i la Cova de sa Piscina responen a una gènesi càrstica en línia amb les Coves del Drac. En el cas de la localització de la Cova de Cala Murta, deixa palesa una relació directa amb les Coves del Drac (Figures 1 i 6). Les Coves de s'Enterrossall i la Cova des Coloms

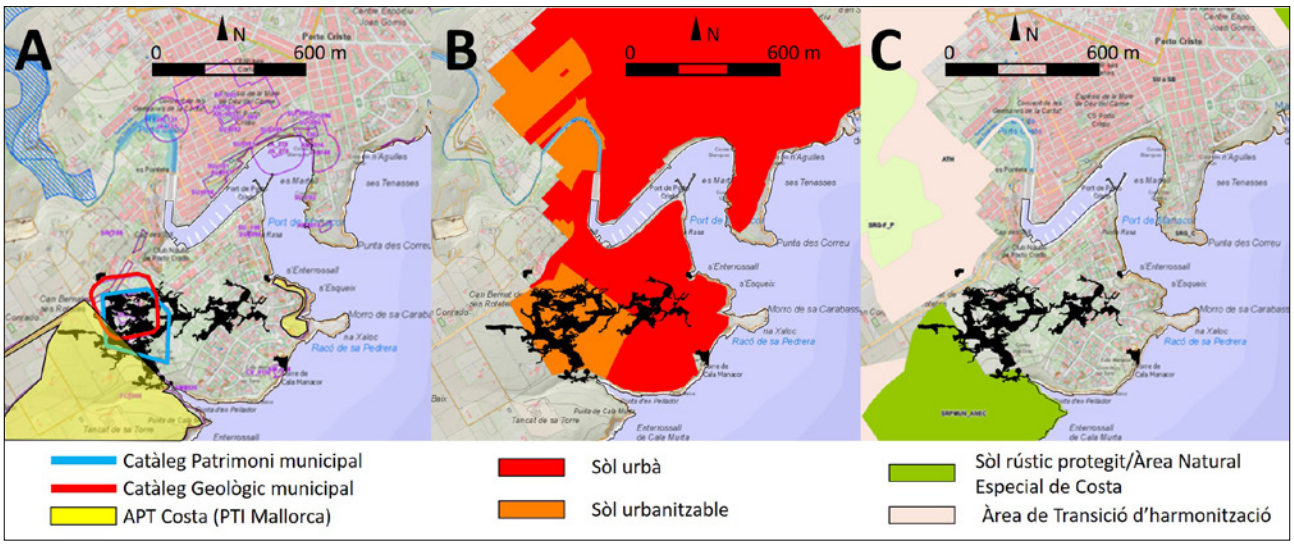


Figura 3: Tipus d'usos del sòl i regulacions legals (municipals i del Pla Territorial Insular de Mallorca) a l'àrea de Porto Cristo.
Figure 3: Land types and legal regulations (municipal and the Insular Territorial Plan of Mallorca) at the Porto Cristo area.

(Figura 5) són coves litorals on l'acció dels processos marins són ben patents. En el cas de la Cova de s'Enterrossall, a la seva part més costanera guarda relació amb la presència d'un paleo-col·lapse càrstic; per altra banda, la seva relació amb les Coves del Drac tindria a veure amb processos de descàrrega difusa d'aigües subterrànies cap a la línia de costa, coincidint amb la raconada (cala) que dona el nom a la cova.

En quant a tipus de sòl i regulacions legals de l'àrea on es troben les 5 cavitats objecte d'estudi (Figura 3), pel que fa als terrenys del sector més sud-occidental de les Coves del Drac es troben sota la figura d'Àrea de Protecció Territorial de la Costa (APT-Costa) del PTI Mallorca (Pla Territorial Insular de Mallorca, Consell Insular de Mallorca) (Figura 3A). Cal ressenyar que els terrenys localitzats sobre l'àrea de les Coves del Drac, explotades turísticament (topografia de *Will-1880* i topografia de *Martel-1896*, en GINÉS et al., 2018a), són catalogats com a Patrimoni Municipal i Patrimoni Geològic per l'Ajuntament de Manacor (Figura 3A). El sòl urbà i urbanitzable s'estén sobre la major part de les Coves del Drac, Cova des Coloms i Cova de s'Enterrossall (Figura 3B). Els terrenys localitzats sobre la zona sud (més propera a Cala Murta) i sud-occidental del sector "exploracions 2013-2018" de les Coves del Drac i la Cova de Cala Murta són catalogats com a Sòl Rústic Protegit i Àrea natural d'Especial Protecció de la Costa (Figura 3C); bona part d'aquesta zona coincideix amb l'APT del PTI Mallorca, però d'acord amb la interpretació de la cartografia, la Cova de Cala Murta queda exclosa de la figura del Consell de Mallorca. La Cova de sa Piscina, localitzada davall de l'Hotel Porto Playa, es troba dins d'una Àrea de Transició d'Harmonització (AT-H) (Figura 3C) que vindria a esser com a una possible àrea de reserva de sòl urbanitzable; es tracta d'una figura contemplada en el PTI Mallorca i que l'Ajuntament de Manacor ha hagut d'adaptar al seu planejament urbà –com gairebé la major part de figures contemplades a la Figura 3– des de l'aprovació del PTI Mallorca l'any 2004, amb les seves modificacions, actualment vigents, de 2011 i 2017.

Materials i mètode

L'anàlisi cartogràfica realitzada per a determinar l'abast del terreny modificat a sobre del recorregut de les Coves del Drac i les petites coves dels voltants de la zona de Porto Cristo (Manacor) s'ha basat en la darrera topografia de detall actualitzada (ENSEÑAT et al., 2018a). El mètode seguit per a la determinació de l'extensió de les àrees modificades per l'acció de l'home, sobre el recorregut de les coves, segueix la mateixa línia desenvolupada a treballs anteriors de la mateixa temàtica per a coves de Mallorca i Menorca (BALAGUER et al., 2017, 2018).

La cartografia detallada d'ENSEÑAT et al. (2018a) s'ha georeferenciat mitjançant el programa Arcmap 10.3 de gestió de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) sobre la fotografia aèria de 2021 i la base topogràfica (1:5.000) de les Illes Balears 2021, ambdues disponibles al servei de visualització de cartografia (WMS) de l'*Institut Cartogràfic i Geogràfic de les Illes Balears* (ICGIB). La georreferenciació s'ha realitzat de forma conjunta per a les 5 cavitats tractades en aquest treball: 1) Coves del Drac,

2) Cova de Cala Murta, 3) Cova de s'Enterrossall, 4) Cova de sa Piscina i 5) Cova des Coloms. La georreferenciació s'ha realitzat amb un total de 13 punts de control i té un *Error Quadràtic Mitjà* (RMS -*Root Mean Square*-) d'1,76 metres.

La digitalització de les coves s'ha realitzat amb el mateix programa de SIG emprant escales cartogràfiques de detall de l'ordre d'1:300 i 1:400. Les capes cartogràfiques, obtingudes en format *shapefile,* són: 1) perímetre per a les 5 cavitats, 2) capa de les diferents etapes o cicles d'exploració de les Coves del Drac 3) capa de les àrees subaquàtiques i terrestres de les Coves del Drac.

L'obtenció d'aquestes bases cartogràfiques en format digital permeten el càlcul de l'extensió en planta, el maneig hàbil i encreuament amb altres capes d'informació.

El següent pas s'ha basat en la consulta de la cartografia del cadastre (disponible al visor cartogràfic de la *Infraestructura de Dades Espacials* (Visor-IDEIB) de l'*Institut Cartogràfic i Geogràfic de les Illes Balears* (ICGIB)) amb la finalitat de saber l'any de construcció dels habitatges i propietats compromeses amb els recorreguts de les cavitats. Les construccions "afectades" pel recorregut de les coves s'han individualitzat mitjançant l'aplicació de l'eina d'anàlisi "*clip*" a partir de l'encreuament de les capes del recorregut/perímetre de les cavitats i la base topogràfica 1:5.000. Posteriorment, i prèvia consulta de la cartografia del cadastre, s'ha atorgat l'any de construcció a la taula d'atributs i de forma individualitzada per a cada cas.

Tipus de cobertura	Coves del Drac	
	m²	%
Edificacions	2.876,8	3,9
Vials	4.558,6	6,2
Zones pavimentades	2.350,5	3,2
Zones parcialment pavimentades amb vegetació (pàrquing)	11.271,0	15,5
Piscines	278,8	0,4
Jardins	3.359,3	4,6
Àrea urbanitzada	*24.695*	*33,8*
Rocós i àrees sense vegetació	229,9	0,3
Pinar	28.076,5	38,5
Garriga	8.908,2	12,2
Bosc mixt / zones arbrades	11.054,4	15,2
Àrea no urbanitzada	*48.269*	*66,2*
TOTAL	**72.964**	**100**

Taula 1: Relació dels tipus de cobertures localitzades sobre el recorregut de les Coves del Drac a partir del reconeixement del Mapa Topogràfic Balear i ortofotografia aèria de 2021 del visor de la Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears (Visor-IDEIB).
Table 1: Type of land uses above Coves del Drac according to Balearic Topographic Map and aerial photography of 2021 from Spatial Data Infrastructure of the Balearic Islands (Visor-IDEIB).

Resultats i discussió

La digitalització de les Coves del Drac, un cop georreferenciada la cartografia actualitzada de la cova (ENSEÑAT et al., 2018a), desprèn que té una extensió de 72.964 m² (Taula 1) respecte als 71.150 m² projectats en planta calculats al citat treball. L'extensió resultant de la cartografia digital extreta a partir de la digitalització de la cartografia georreferenciada d'ENSEÑAT et al. (2018a) suposa un increment de 2,5% (1.814 m²) de l'extensió. Aquesta diferència es considera assumible ja que s'ha de tenir en compte l'*Error Quadràtic Mitjà* (RMS) (1,76 m) i possibles errades mínimes implícites al mateix procés de digitalització,

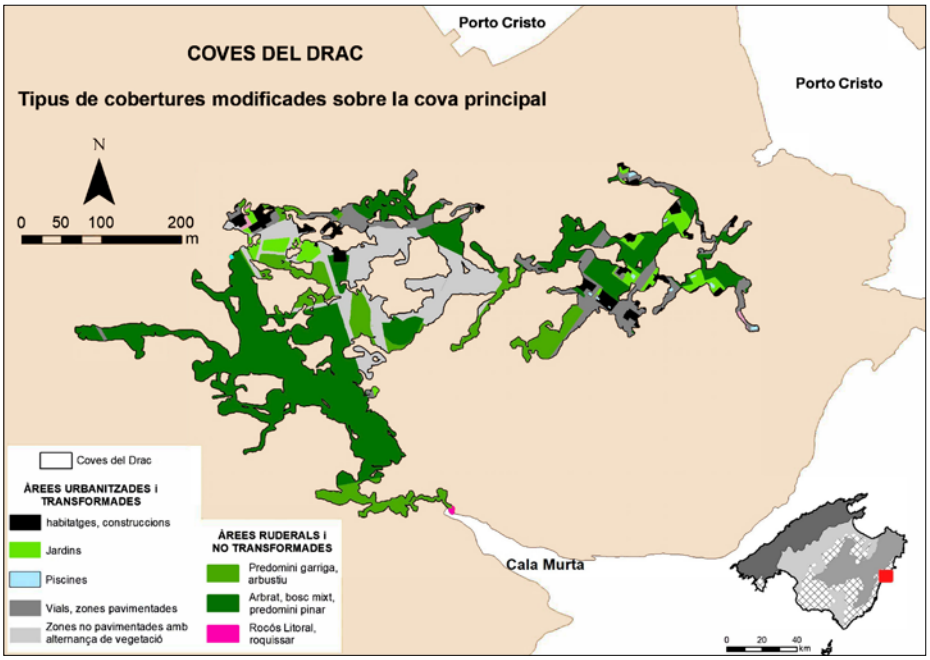


Figura 4: Tipus de cobertures d'usos del sòl sobre el recorregut de les Coves del Drac.
Figure 4: Land use covers above Coves del Drac.

Any construcció / modificació terreny (segons cadastre)	m² construïts / modificats sobre la cova	% sòl modificat	% acumulat
1950-1960 *	2.556,0	10,4	10,4
1960 *	951,6	3,9	14,2
1963	1,0	0,004	14,2
1967	58,3	0,2	14,4
1973	72,2	0,3	14,7
1975	328,7	1,3	16,1
1980	288,4	1,2	17,2
1982	196,7	0,8	18,0
1984	140,4	0,6	18,6
1988	300,8	1,2	19,8
1990	106,5	0,4	20,2
1991	91,2	0,4	20,6
1994	408,2	1,7	22,3
1995	130,4	0,5	22,8
1999	555,5	2,2	25,0
2000	125,5	0,5	25,6
2002	320,0	1,3	26,9
2003	292,2	1,2	28,0
2004	503,1	2,0	30,1
2005	163,8	0,7	30,7
2006	422,4	1,7	32,4
2008	431,6	1,7	34,2
2009	103,8	0,4	34,6
2017	14,3	0,1	34,7
2018	241,4	1,0	35,7
2021 – 2022 **	61,4	0,2	35,9
A) TOTAL m² d'acord amb cadastre	*8.865,4*	*35,9*	*35,9*
B) Vials	*4.558,6*	*18,5*	*54,4*
C) Àrees parcialment pavimentades	*11.271,0*	*45,6*	*100*
TOTAL A,B i C (àrees modificades)	**24.695**	**100**	

Taula 2: Relació de m² de terreny modificat i determinació de l'any de construcció, segons cadastre, de les edificacions existents sobre el recorregut de les Coves del Drac. *: amb algunes modificacions realitzades el 1985 l'extensió de les quals no s'ha pogut determinar. **: edificacions recents o en construcció no registrades al visor del Cadastre.
Table 2: Relationship between the m² of the area altered by man activity and the year of construction, according to the cadastre of the existing buildings above the Coves del Drac. *: with some changes since 1985 that could not be quantified. **: recent constructions or buildings that are not registered in the online database of the cadastre.

com per exemple que el traçat sobre la línia del perímetre de la cavitat a una escala cartogràfica de detall (aprox. 1:300/1:400) pot suposar una desviació involuntària d'alguns metres.

De totes maneres, el fet que sigui un treball d'estimació, realitzat amb la major cura possible, de càlcul de les cobertures modificades sobre el traçat de les cavitats subterrànies de l'àrea de Porto Cristo, fa que els resultats obtinguts també s'hagin d'expressat en percentatges a fi i efecte de donar una estimació del grau de modificació del terreny sobre el recorregut de les Coves del Drac i resta de cavitats tractades.

Pel que fa a l'extensió de les altres coves properes, el procés de digitalització desprèn que la Cova de Cala Murta té una extensió de 270 m², la Cova de s'Enterrossall és de 279 m², la Cova de sa Piscina té una extensió de 501 m² i la Cova des Coloms de 1.372 m².

Cobertures sobre les cavitats

Coves del Drac

Els tipus de cobertures sobre el recorregut de les Coves del Drac (Figura 4) es reflecteixen a la Taula 1. Les cobertures "naturals" sense aparent modificació del terreny suposen el 66,2% del total del recorregut de la cavitat; el 33,8% restant l'ocupen les cobertures de terreny modificat, construïdes o parcialment modificades. De les cobertures no modificades, els pinars i zones arbrades en general representen gairebé el 54% del total del recorregut total de la cavitat i el 12% està ocupat per garriga (àrees amb predomini de vegetació arbustiva).

Pel que fa a les cobertures de terreny modificat sobre la cova, la major proporció la constitueixen les "*zones parcialment pavimentades amb vegetació*" amb un 15,5% sobre el recorregut total de la cova (Taula 1); aquest tipus de cobertura correspon principalment al pàrquing de les Coves del Drac. Segueixen els vials que ocupen un 6,2%, zones de jardí que suposen un 4,6% i les edificacions i zones pavimentades relacionades amb les edificacions/construccions que representen un 3,9% i un 3,2 % del total del recorregut de la cova respectivament (Figura 4 i Taula 1).

A la Taula 2 es mostren els anys de construcció de les edificacions i habitatges localitzats sobre el recorregut de les Coves del Drac. Les dades obtingudes del cadastre no inclouen els anys de construcció dels vials i pel que fa a la zona del pàrquing de les Coves del Drac (*zones parcialment pavimentades amb vegetació*), tampoc consta, però podem determinar que es construïren o ampliaren substancialment entre els anys 1990 i 1997 a partir de l'observació de les

ortofotografies aèries del Visor-IDEIB. Aquest pàrquing s'estén al voltant d'11.000 m² sobre el recorregut total de la cavitat.

D'acord amb el que s'acaba d'exposar, s'ha pogut determinar l'any de construcció de 8.865,4 m² corresponents a habitatges i construccions en general dels 24.695 m² de terreny modificat sobre la cavitat (Taula 2). Les construccions corresponents a la dècada dels anys 50 del segle passat se situen al voltant de 2.600 m² sobre els dominis de la cova i la major part d'aquests corresponen en bona part a les infraestructures i edificis destinats a l'explotació turística de les Coves del Drac. La relació de dates de construcció sobre la cavitat reflecteix l'evolució del desenvolupament urbanístic experimentat a la costa de Mallorca i al sector de la regió del Llevant en general. D'aquesta manera a les dècades dels 60 i 70 del segle XX, en un període de 20 anys es construïren aproximadament un 16% de les edificacions existents sobre el recorregut de la cova; a la dècada dels anys 80 del segle XX es construí al voltant del 10% de les edificacions; a la dècada dels anys 90 el 14,5%; a la dècada compresa entre l'any 2000 i 2010 el 26,6%; i a la dècada següent (2010-2020) el 3,6%. Aquest augment de pressió urbanística observat entre la dècada dels 80 i la dècada del 2000-2010 es pot considerar en línia amb l'activitat urbanística que experimentava tot el vessant litoral del Llevant de Mallorca i, concretament, amb la urbanització meridional del nucli poblacional de Porto Cristo.

Pel que fa a la relació entre les dates de construcció i el coneixement de l'existència de les galeries i sales de les Coves del Drac (Taula 3) cal ressenyar que la major part de les edificacions i habitatges construïts sobre el recorregut de la cova (al voltant del 70% d'edificacions) s'han realitzat abans del coneixement de la distribució de la cavitat esdevingut amb les exploracions 2013-2018 (Taula 3). Únicament a la dècada dels anys 50 i 60 del segle XX es construïren, amb un cert coneixement de l'existència i de la trajectòria de la cavitat, les edificacions, serveis i infraestructures d'explotació turística de la cova, que sumen al voltant del 30% de terreny modificat/construït.

Coves del Drac				
Etapes d'exploració	**Any de construcció**	**m² sobre la cova**	**% edificacions**	**% acumulat**
Topografia Will (1880)	1950-1060	2.351,1	26,5	26,5
	1960	427,0	4,8	31,3
Topografia Martel (1896)	1960	9,0	0,01	31,4
Exploracions 2013 - 2018	1950-1960	204,9	2,3	33,7
	1960	515,6	5,8	39,6
	1963	1,0	0,0	39,6
	1967	58,3	0,7	40,2
	1973	72,2	0,8	41,0
	1975	328,7	3,7	44,8
	1980	288,4	3,3	48,0
	1982	196,7	2,2	50,2
	1984	140,4	1,6	51,8
	1988	300,8	3,4	55,2
	1990	106,5	1,2	56,4
	1991	91,2	1,0	57,4
	1994	408,2	4,6	62,0
	1995	130,4	1,5	63,5
	1999	555,5	6,3	69,8
	2000	125,5	1,4	71,2
	2002	320,0	3,6	74,8
	2003	292,2	3,3	78,1
	2004	503,1	5,7	83,8
	2005	163,8	1,8	85,6
	2006	422,4	4,8	90,4
	2008	431,6	4,9	95,3
	2009	103,8	1,2	96,4
	2017	14,3	0,2	96,6
	2018	241,4	2,7	99,3
	2021 – 2022	61,4	0,7	100
TOTAL		**8.865,4**	**100**	

Taula 3: Comparació de l'any de construcció de les edificacions i habitatges reconeguts sobre el recorregut de les Coves del Drac i les diferents etapes d'exploració de la cavitat.
Table 3: Comparison between year of construction of buildings above Coves del Drac and the different exploration periods of the cave.

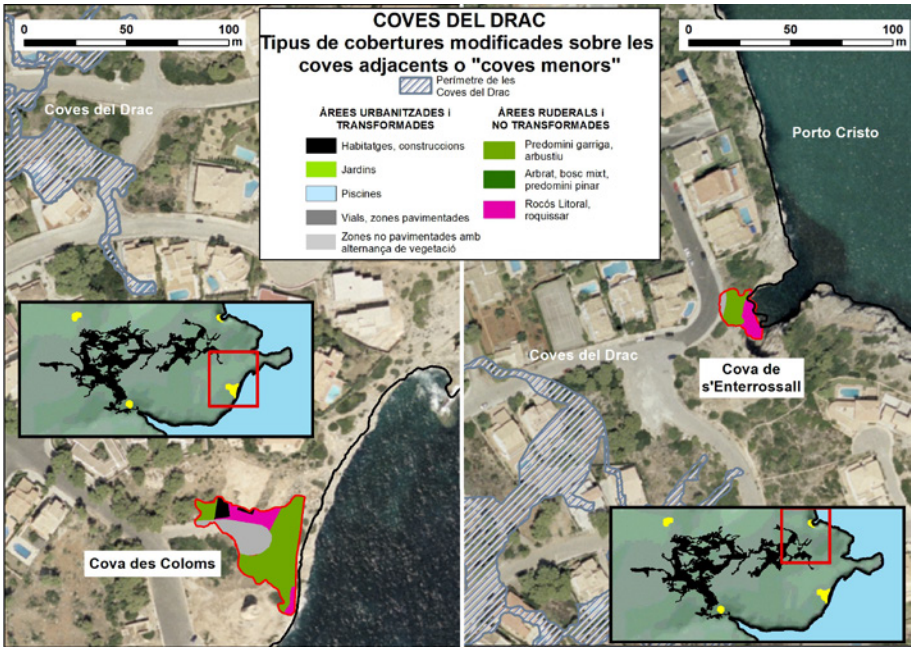


Figura 5: Tipus de cobertures d'usos del sòl sobre el recorregut de la Cova des Coloms i la Cova de s'Enterrossall.
Figure 5: Land use covers above Cova des Coloms and Cova de s'Enterrossall.

Cova de Cala Murta

Es tracta de l'única de les 5 cavitats tractades en aquest treball que no presenta cobertures modificades per acció antròpica sobre el seu recorregut (Taula 4). D'acord amb la cartografia, i confirmat per l'ortofotografia del Visor de l'IDEIB, el 100% del terreny és cobertura de tipus arbustiu (garriga) (Figura 6).

Cova de s'Enterrossall

Aquesta cavitat té al voltant del 8% cobert per vials, concretament per un revolt d'un carrer de la urbanització d'aquest sector de Porto Cristo (Figura 5, Taula 4). La resta de cobertures de sòl sobre el recorregut d'aquesta cavitat és considerat com a ullastrar i rocós d'acord amb els usos del sòl reflectits al Mapa Topogràfic Balear 2021.

Cova de sa Piscina

Es troba a sota dels terrenys actualment ocupats per un hotel i la totalitat de la superfície del seu recorregut es troba modificada per acció antròpica. La major part de la superfície (al voltant del 73%) es troba ocupada per àrees pavimentades destinades a lleure i esport (terrasses d'hotel i pista de tenis). La piscina de l'hotel ocupa al voltant del 25% de la superfície del recorregut de la cavitat (Figura 6 i Taula 5).

Tipus de cobertura	Cova de Cala Murta		Cova de s'Enterrossall	
	m²	%	m²	%
Zones pavimentades / modificades	-----	-----	-----	-----
Edificacions	-----	-----	-----	-----
Piscines	-----	-----	-----	-----
Vials	-----	-----	22	7,9
Àrea urbanitzada	-----	-----	*22*	*7,9*
Rocós	-----	-----	111	39,8
Ullastrar	-----	-----	146	52,3
Garriga	270	100	-----	-----
Bosc mixt	-----	-----	-----	-----
Àrea no urbanitzada	-----	-----	*257*	*92,1*
TOTAL	**270**	**100**	**279**	**100**

Taula 4: Tipus de cobertures existents sobre el recorregut de la Cova de Cala Murta i Cova de s'Enterrossall, de l'àrea de Porto Cristo.
Table 4: Type of land uses above Cova de Cala Murta and Cova de s'Enterrossall, located in the area of Porto Cristo.

Cova des Coloms

Aquesta cavitat presenta al voltant del 28% del seu recorregut amb la superfície modificada on la major part de l'àrea modificada correspon a vials. Al voltant del 5% el representa una àrea de solar a la part més septentrional de la cavitat, visible des de la fotografia aèria, amb terrenys modificats que pareixen haver estat preparats per a una construcció que no arribà a materialitzar-se al voltant de l'any 2000. La resta de cobertures no modificades corresponen a arbustiu/garriga (59% aprox.) i terrenys rocosos (14% aprox.) característics d'àrees litorals (Figura 5 i Taula 5).

Implicacions territorials i de gestió

La zona a on es troben les Coves del Drac i les cavitats properes no presenta cap regulació legal de protecció del territori (Figura 3). La major part dels terrenys els conformen sòls de tipus urbà i urbanitzable reconeguts pel Pla General d'Ordenació de l'Ajuntament de Manacor i d'acord amb les premisses del PTI Mallorca.

Aquest treball se suma als treballs anteriors, realitzats a les Illes Balears, de temàtica anàloga destinats a estimar la superfície de terrenys modificats sobre el recorregut de coves de les Balears (BALAGUER et al., 2013, 2017, 2018). D'aquesta manera, i comptant amb els casos tractats en aquest treball, ja són 14 les coves estudiades que potencialment presenten terrenys modificats sobre el seu recorregut i només a 2 casos no s'observen modificacions del terreny (Cova des Caramells a Cala Blanca, Ciutadella, i la Cova de Cala Murta, Manacor).

Dels 5 casos estudiats a la zona de Porto Cristo, només un cas, la Cova de Cala Murta, no presenta terreny modificat sobre el seu recorregut. La condició de trobar-se sota les figures de APT-Costa, Sòl Rústic Protegit-Àrea Natural Especial de Costa, així com estar exclosa de terrenys urbanitzables (Figura 3) pot-ser hagin fet possible la no modificació de terrenys sobre d'aquesta.

Tipus de cobertura	Cova des Coloms		Cova de sa Piscina	
	m²	%	m²	%
Zones pavimentades / modificades	63	4,6	367	73,3
Edificacions	-----	-----	11	2,2
Piscines	-----	-----	123	24,5
Vials	316	23,0	-----	-----
Àrea urbanitzada	*379*	*27,6*	*501*	*100*
Rocós	187	13,6	-----	-----
Ullastrar	-----	-----	-----	-----
Garriga	806	58,8	-----	-----
Bosc mixt	-----	-----	-----	-----
Àrea no urbanitzada	*993*	*72,4*	-----	-----
TOTAL	**1.372**	**100**	**501**	**100**

Taula 5: Tipus de cobertures existents sobre el recorregut de la Cova des Coloms i la Cova de sa Piscina, ambdues de l'àrea de Porto Cristo.
Table 5: Type of land uses above Cova des Coloms and Cova de sa Piscina, located in the area of Porto Cristo.

Les 5 cavitats d'aquesta àrea no es troben protegides com a Lloc d'Interès Comunitari per la Unió Europea; en el cas de les Coves del Drac, concretament, s'entén que la mateixa empresa d'explotació turística de la cavitat és la que procura el bon estat de conservació. De les cavitats d'aquesta àrea, la Cova de sa Piscina és la que presenta major modificació del terreny sobre el seu recorregut essent el 100% de l'àrea, la segueix les Coves del Drac amb un 33,8% de terrenys modificats sobre el seu recorregut, la Cova des Coloms amb un 27,6% i la Cova de s'Enterrossall amb un 7,9 % (Taules 1, 4 i 5).

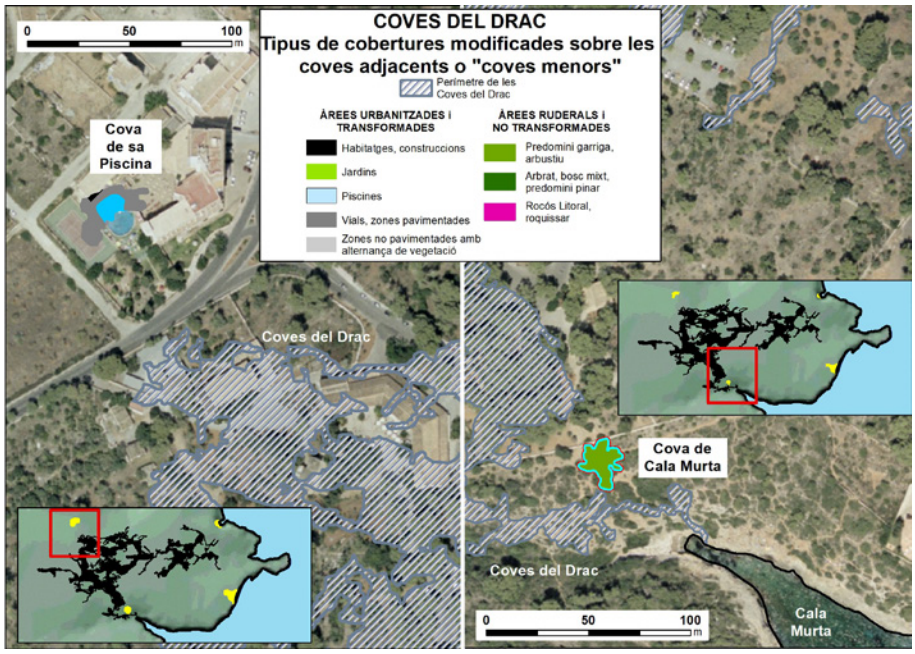


Figura 6: Tipus de cobertures d'usos del sòl sobre el recorregut de la Cova de sa Piscina i la Cova de Cala Murta.
Figure 6: Land use covers above Cova de sa Piscina and Cova de Cala Murta.

Pel que fa a la cavitat més "important", les Coves del Drac, cal esmentar que el 70% de les construccions i habitatges localitzats sobre el seu recorregut s'han edificat amb anterioritat al coneixement de la planimetria completa de la cova, especialment pel que fa a les exploracions 2013-2018. La construcció sobre el recorregut de les cavitats abans de la coneixença de la seva existència o de bona part del seu recorregut, a més del desenvolupament de la major part dels elements d'urbanització, és un fet que ja s'ha observat a la Cova des Coll (Portocolom, Felanitx), a la zona que es desenvolupa per davall del barri des Rivetó (BALAGUER et al., 2017).

Actualment, de 13 coves analitzades, tant en aquest treball com en treballs anteriors de la mateixa temàtica (BALAGUER et al., 2017, 2018), s'estima un total de 61.225 m^2 (l'equivalent a la superfície del Parc de ses Estacions de Palma) construïts sobre 13 cavitats, amb una extensió total sobre plànol de 575.000 m^2, a 6 indrets de les zones costaneres de Mallorca i Menorca (Portocolom, Cala Santanyí, Cala Anguila, Vallgornera, Cala Blanca i Porto Cristo). Tots els casos es troben sobre plataformes tabulars postorogèniques del miocè superior. Hi ha la possibilitat que existeixin més casos fins aleshores no reportats i per aquests casos la legislació aplicada sobre les cavitats continua essent la mateixa de la reportada al treball de BALAGUER et al. (2017):

1) Conservació: directiva 92/43/CEE relativa a la conservació dels hàbitats naturals i de la flora i fauna silvestres; Llei 42/2007 sobre la conservació del Patrimoni Natural i Biodiversitat.
2) Legislació urbanística: Llei del sòl espanyola vigent (aprovada pel Reial Decret Legislatiu 2/2008 de 20 de Juny i modificada pel Reial Decret Legislatiu 7/2015.
3) Explotació de recursos: Llei de Mines de l'Estat Espanyol de l'any 1973 (Llei 22/1973 de 21 de Juliol); Llei d'Aigües Espanyola (Reial Decret Legislatiu 1/2001 de 20 de Juliol).
4) Patrimoni: Llei de Patrimoni Històric (Llei 16/1985 de 25 de Juny).
5) Plans regionals: Pla de Gestió Natura 2000, Coves, de la Direcció General de Medi Natural i Gestió Forestal, aprovat pel Decret 14/2015 de 27 de març.

D'acord amb la singularitat, riquesa i fragilitat d'aquests fenòmens geomorfològics i hàbitats associats, cal enumerar les aptituds pels quals aquests ambients són de necessària bona gestió i conservació, segons la Comissió Mundial sobre Àrees Protegides (WCPA) de la Unió Internacional per a la Conservació de la Naturalesa (UICN):

a) constitueixen hàbitats d'espècies de fauna en perill d'extinció.
b) constitueixen àrees importants per a l'estudi d'aspectes geològics, geomorfològics, paleontològics, prehistòria i història, entre d'altres.
c) són observatoris adequats per al coneixement hidrogeològic regional.
d) algunes d'elles poden ser utilitzades per a finalitats de turisme i esbarjo.

Conclusions

L'estimació dels tipus de cobertures d'usos del sòl sobre el recorregut de les cavitats de la zona sud de Porto Cristo determina que el 34% (25.597 m^2) del recorregut d'aquestes es troba modificat per l'acció antròpica amb edificacions, habitatges, vials, zones pavimentades, piscines i jardins.

La superfície en planta estimada del total de les coves es de 75.386 m^2, essent 72.964 m^2 per a les Coves del Drac, 270 m^2 per a la Cova de s'Enterrossall, 1.372m^2 per a la Cova des Coloms i 501 m^2 per a la Cova de sa Piscina (Figures 4, 5 i 6; Taules 1, 4 i 5).

Els tipus de cobertures de terreny modificat més freqüents sobre les coves són (per ordre d'importància): 1) zones parcialment pavimentades amb vegetació (pàrquing de les Coves del Drac), 2) vials, 3) jardins (zones de jardins privats o públics amb aportació freqüent d'aigua), 4) construccions (habitatges), 5) àrees pavimentades en general i 6) piscines.

Les cobertures de sòl no modificat sobre el recorregut de les cavitats estudiades són, en ordre de major a menor freqüència: 1) zones arbrades en general (principalment pinar i en menor proporció ullastres), 2) àrees de garriga (vegetació arbustiva) i 3) àrees sense vegetació o vegetació principalment herbàcia o superfícies rocoses.

Pel que fa als aspectes d'ordenació (regulació legal) de l'àrea on es troben les cavitats, cal remarcar que es tracta de regulacions provinents del Pla Territorial Insular de Mallorca (PTI Mallorca) i del Pla General d'Ordenació de Manacor (PG Manacor) que està convenientment adaptat al PTI Mallorca (Figura 3). Les Coves del Drac es troben catalogades com a Patrimoni Municipal i com a Patrimoni Geològic; ambdues figures coincideixen amb la major part de la cavitat que està explotada turísticament. La major part de les Coves del Drac es troben sota figures de sòl urbà i sòl urbanitzable i la part més occidental de la cavitat es troba sota la figura d'Àrea de Protecció Territorial de la Costa (APT Costa) del PTI Mallorca i també com a sòl rústic Protegit d'acord amb el PG Manacor. Pel que fa a la Cova de Cala Murta es troba sota les figures d'Àrea de Protecció Territorial de la Costa (APT Costa) del PTI Mallorca i sòl rústic Protegit (PG Manacor). Les coves des Coloms i de s'Enterrossall es troben dins del Domini Públic Marítim i Terrestre de la Llei de Costes (Llei 2/2013 que modifica

la Llei 22/1988). Pel que fa a la Cova de sa Piscina es troba a l'Àrea de Transició d'Harmonització que vindria a esser una possible reserva de sòl urbanitzable d'acord amb el PG Manacor, de cara al futur.

La major part de les cobertures modificades sobre el recorregut de les Coves del Drac s'han desenvolupat abans de conèixer la seva existència a la zona corresponent a les noves extensions explorades entre 2013 i 2018 (Taules 2 i 3). D'acord amb aquesta característica, la urbanització per sobre d'aquesta cova és molt similar a l'ocorreguda al cas de la Cova des Coll de Portocolom, que ja ha estat objecte d'aquest mateix tipus d'estudi (BALAGUER et al., 2017).

Bibliografia

BALAGUER, P.; GRÀCIA, F.; VICENS, D. & PONS, G.X. (2013): Estimació de construccions compromeses per la presència de coves en el litoral del sud i llevant de Mallorca mitjançant l'ús de sistemes d'informació geogràfica (SIGs). Dades preliminars. In: PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (edit.). *VI Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears.* Soc. Hist. Nat. Balears. 83-85. Palma.

BALAGUER, P.; GRÀCIA, F.; VICENS, D. & PONS, G.X. (2017): Estimació de construccions compromeses per la presència de coves en el litoral del sud i llevant de Mallorca mitjançant l'ús de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIGs). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 60: 51-63. Palma.

BALAGUER, P.; PONS, G.X.; VICENS, D. & GRÀCIA, F. (2018): Anàlisi cronològica de les construccions localitzades sobre les coves de Cala Blanca (Ciutadella, Menorca). Resultats preliminars. In: PONS, G.X.; DEL VALLE, L.; VICENS, D.; PINYA, S.; McMINN, M. & POMAR, F. (eds.). *Llibre de ponències i resums de les VII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears*. 122-125. Societat d'Història Natural de les Balears (SHNB) – Universitat de les Illes Balears (UIB). Palma.

CLARKE, O. (1991): Diving in Drach. *Descent*, 101: 32-33.

ENSEÑAT, J.J.; GRÀCIA, F.; GINARD, A.; MASCARÓ, G.; SANTANDREU, G.; FERNÁNDEZ, J.F.; TRIAS, M.; PÉREZ, J.; BOVER, P.; CIRER, A.; PLA, V.; LÁZARO, J.C.; VICENS, D.; ANSALDI, D.; BASCUÑANA, F.X.; CLAMOR, B.; LOZANO, A.; PERELLÓ, M.A.; GUAL, M.A.; VIVES, M. A.; GAVIÑO, B.; GAMUNDÍ, P.; BONNÍN, M.; GRANELL, A.; BETTON, N.; FRANGLEN, N. & BORNEMANN, D. (2018a): Nou plànol topogràfic de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 65-76. Palma.

ENSEÑAT, J.J.; SANTANDREU, G. & GRÀCIA, F. (2018b): Les cavitats properes a les Coves del Drac (Manacor, Mallorca): descripció i reflexions sobre la seva possible relació. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 249-260. Palma.

FAURA I SANS, M. (1926): *Cuevas de Mallorca. XIV Congreso Geológico Internacional. Excursión C-5. Instituto Geológico de España.* Gráficas Reunidas, S.A. 78 pàgs + 10 làms. fotos + 4 plànols. Madrid.

FORNÓS, J.J., BALAGUER, P., GELABERT, B., & GÓMEZ-PUJOL, L. (2005): Pleistocene formation, evolution, retreat, rates and processes in a carbonate coastal cliff (SE of Mallorca Is., Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research SI*, 49: 15–21.

FORNÓS, J.J.; GÓMEZ-PUJOL, L. & MAS, G. (2018): L'entorn geogràfic, geomorfològic i geològic de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 49-63. Palma.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1992): Las Coves del Drac (Manacor, Mallorca). Apuntes históricos y espeleogenéticos. *Endins*, 17-18: 5-20. Palma.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (2007): Eogenetic karst, glacioeustatic cave pools and anchialine environments on Mallorca Island: a discussion of coastal speleogenesis. *International Journal of Speleology*, 36 (2): 57-67. Bologna, Itàlia.

GINÉS, A.; SANTANDREU, G.; GRÀCIA, F.; ENSEÑAT, J.J. & GINÉS, J. (2018a): Principals etapes de l'exploració i topografia de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 1-20. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2018): Aspectes històrics i bibliogràfics de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 21-47. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F. & FORNÓS, J.J. (2018b): L'espeleogènesi de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca): evolució dels coneixements i interpretació actual. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 141-163. Palma.

GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; GAMUNDÍ, P.; FORNÓS J.J. & WATKINSON, P. (2011): Cavitats subaquàtiques de la franja litoral de Mallorca. *Endins*, 35 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 17: 103-132. Palma.

GRÀCIA, F. (2015): *Les cavitats subaquàtiques de les zones costaneres del llevant i migjorn de Mallorca.* Tesi Doctoral. Programa de Doctorat de Geografia, Universitat de les Illes Balears. 984 pàgs. Inèdita.

GRÀCIA, F.; CIRER, A.; FERNÁNDEZ, F.; FORNÓS, J.J.; BETTON, N.; LÁZARO, J.C.; CLAMOR, B.; PERELLÓ, M.A.; VIVES, M.A. & ANSALDI, D. (2017): Les Coves del Drac: 1896-2016. Les descobertes subaquàtiques. *IX Jornades d'Estudis Locals de Manacor. Llegendes, mentides i altres equívocs. Expressions de cultura popular a Manacor*. 13 i 14 de maig de 2016. 421-439. Manacor.

GRÀCIA, F.; MASCARÓ, G.; PÉREZ, J.; FERNÁNDEZ, J.F.; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; ANSALDI, D.; CLAMOR, B.; PERELLÓ, M.À.; VIVES, M.À.; GAMUNDÍ, P.; GRANELL, Á.; BETTON, N.; BORNEMANN, D. & FRANGLEN, N. (2018a): Les exploracions subaquàtiques a les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 105-116. Palma.

GRÀCIA, F.; MASCARÓ, G.; PÉREZ, J.; FERNÁNDEZ, J.F.; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; ANSALDI, D.; CLAMOR, B.; PERELLÓ, M.À.; VIVES, M.À.; GAMUNDÍ, P.; GRANELL, Á.; BETTON, N.; BORNEMANN, D. & FRANGLEN, N. (2018b): El Drac subaquàtic (Coves del Drac, Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 117-139. Palma.

MAHEU, J. (1912): Exploration et flore souterraine des cavernes de Catalogne et des Iles Baléares. *Spelunca, Bull et Mém. Soc. Spéléol.*, 8 (67-68): 1-108. París.

MARTEL, É.A. (1897): Sous Terre (neuvième campagne). Cueva del Drach, à Majorque - Scialets du Vercors - Chouruns de Dévoluy. *Annuaire du Club Alpin Français. 23ème année, 1896*. 368-413 + 1 plànol. París.

RACOVITZA, É.G. (1905): *Typhlocirolana moraguesi* n.g. n.sp. Isopode aquatique cavernicole des Grottes du Drach. *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 30: 72-80. París.

SANTANDREU, G.; ENSEÑAT, J.J.; GRÀCIA, F.; PLA, V.; GINARD, A. & GUAL, M.A. (2018): Les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). Descripció dels sectors terrestres. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 77-104. Palma.

VENY, C. (1968): *Las cuevas sepulcrales del Bronce antiguo de Mallorca*. Bibliotheca Praehistorica Hispana IX, CSIC. Madrid.

WILL, F. (1880): *Plano de la Cueva del Drach. Situada en el predio Son Moro (Manacor, Isla de Mallorca) propiedad del Sr. Dn. José Ygnacio Moragues. Escala 1/500*. Lit. Catalana. 1 plànol. Palma.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Processos biocàrstics al sotabosc dels alzinars de la Serra de Tramuntana (Mallorca, Illes Balears)

Alberto ORTEGA RAMIS [1] i Lluís GÓMEZ-PUJOL [1]

[1] Grup de Recerca de Ciències de la Terra, Departament de Biologia, Universitat de les IIlles Balears. Palma. E-mail: lgomez-pujol@uib.cat

Abstract

Biokarst refers to the participation of biological agents in the karst processes and the resulting forms, especially, although not exclusively, in exokarst landforms. Bryophytes are part of the pioneer organisms, along with cyanobacteria, algae, fungi and lichens, on the rock surface colonization, as well as in the vegetal succession on limestones and therefore they can play a significant role as biokarstic agents. The aim of this study is to characterize the role of bryophytes in the weathering of carbonate rocks and explore their role in the formation of incipient soils (oligosoils) associated with the holm-oak woods of the middle Mediterranean mountain. Results show that bryophytes are effective agents in limestone rock decay and soil generation. Weathering patterns mainly consist in (a) the mechanical and chemical alteration of rock surface by mosses' rhizoids, using rock crystal planes growth patterns, as well as (b) grains surface biopitting closely related to the action of other pioneer microorganisms. Mosses appear as an effective aerosol trapping agent, since soil formed below mosses is rich in quartz and clay minerals whereas the colonized limestones are quite pure.

Resum

Per biocarst hom designa la participació dels agents biològics en els processos càrstics i les formes de relleu resultants, especialment, encara que no de forma exclusiva, en el modelat exocàrstic. Els briòfits, juntament amb els cianobacteris, algues, fongs i líquens, són els organismes pioners en la colonització de la superfície de les roques i juguen un paper capital tant en la generació de nous hàbitats, com en les bases de l'establiment de la successió vegetal sobre rocam carbonàtic i per tant poden tenir un paper important com a agents biocàrstics. El present treball caracteritza el paper dels briòfits en l'alteració del rocam i en la formació d'oligosòls al sotabosc dels alzinars a cinc localitats de la Serra de Tramuntana, representatives de la muntanya mitjana mediterrània. Els resultats apunten que els briòfits són uns agents actius en l'alteració i erosió de la roca carbonàtica, així com en la formació de sòls. Els patrons d'alteració es caracteritzen principalment pels mecanismes d'alteració física, seguits pels químics que, associats als rizoides dels briòfits, ataquen els límits entre els cristalls de la roca o bé produeixen diferents tipus de microalvèols sobre els grans o els cristalls que després aprofiten altres organismes litobiòntics. L'anàlisi dels sòls que es formen sota les molses indiquen que els briòfits són uns captadors eficaços d'aerosols, ja que la riquesa en quars i minerals del grup de les argiles contrasta amb la puresa de les roques carbonàtiques que colonitzen.

Ortega Ramis, A. i Gómez-Pujol, L. (2024): Processos biocàrstics al sotabosc dels alzinars de la Serra de Tramuntana (Mallorca, Illes Balears).
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 51-66. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 25 març 2024; **Revisat:** 30 maig 2024; **Acceptat:** 5 juny 2024.
Publicat online: 5 juliol 2024.

Introducció

Els ecosistemes que es formen sobre el rocam carbonàtic són tan diversos com els propis paisatges càrstics i per això hom reconeix que resten sota la influència de factors com el context geològic (rocam, fracturació i deformació), el clima, el transcurs del temps i l'acció de l'home (GOUDIE, 1986). Tanmateix existeix un consens generalitzat que distingeix i/o separa aquests tipus d'ecosistemes dels desenvolupats sobre altres tipus de rocams (no carbonàtics), atesa la menor capacitat de penetració de les arrels i la menor productivitat de la vegetació característica de les àrees càrstiques (JENNINGS, 1985). De més a més, TRUDGILL (1985) apunta que l'escàs desenvolupament dels sòls, la riquesa en Ca i un pH elevat associat a les característiques parentals del sòl, condicionen la vegetació i el tipus de formació que es pot trobar a les zones càrstiques, tot explicant el mosaic de formacions calcícoles sobre sòls calcaris i de formacions calcífugues sobre substrats més àcids.

Tradicionalment els estudis sobre els ecosistemes desenvolupats sobre rocams carbonàtics s'han agrupat en tres grans categories (VILES, 1988): els ecosistemes sobre la roca nua, els sistemes sobre rocams colgats per un mantell edàfic i els ecosistemes cavernícoles.

En el primer dels casos, els rocams carbonàtics que queden exposats al medi subaeri, sense cap tipus de sòl, constitueixen la base per al desenvolupament de sistemes relativament simples sobre la superfície de la roca. Les primeres comunitats en ocupar aquest nínxol ecològic es coneixen com a organismes pioners i entre ells s'hi compten bacteris, algues, líquens i molses (GORBUSCHINA & KRUMBEIN, 2000). En aquest sentit KRUMBEIN & LAPO (1996) suggereixen que les roques i, més concretament, la seva superfície poden analitzar-se com si es tractàs d'éssers vius, ja que l'erosió o la construcció biocàrstica (tot entenent com a tal els processos de biocorrosió, biodegradació, biolaminació, biomineralització, bioencrostament i biomorfogénesi) són el resultat dels processos de biotransferència de matèria i energia entre dos sistemes oberts i heterogenis (el substrat sòlid i l'atmosfera), cada un ells amb les seves respectives propietats físiques, químiques i biològiques (VILES, 1995; GORBUSCHINA & KRUMBEIN, 2000). D'aquesta forma, la colonització del rocam carbonàtic és un procés lent en què el rocam actua com un hàbitat potencial on una sèrie d'organismes, durant el seu cicle vital, modifiquen les característiques de la superfície rocosa (degradant la roca, formant i/o retenint material detrític...) i permeten així la successió de diferents organismes i sistemes de cada cop més complexos. Amb el pas del temps, aquests organismes arriben a degradar la roca, fins al punt de desenvolupar un nivell edàfic sobre el qual es poden establir plantes superiors. D'aquesta manera es completa així el clàssic procés de la successió vegetal. Els primers organismes en colonitzar un rocam nuu (litobionts) són les cianofícies i el líquens, ja que no precisen d'unes condicions gaire exigents per al seu desenvolupament. Amb el transcurs del temps aquests organismes litobionts o saxícoles pioners alteraran la superfície de la roca i generaran unes condicions més òptimes per a organismes més complexos. Així els briòfits necessiten una major porositat de la roca (esquerdes, fissures...) o la presència d'un substrat edàfic, encara que sigui molt incipient, per desenvolupar-se (CHEN et al., 2000).

Atesa la dificultat per classificar i separar els organismes que integren la comunitat pionera litobiont i diferenciar el paper específic de cada un d'ells en l'alteració de la roca i la formació de sòls, molts autors han optat per encabir tots aquests organismes sota el terme *biofilm* (POHL & SCHNEIDER, 2002). Les algues, els fongs i els líquens que integren el biofilm responsable de la successió primària de la roca presenten una longevitat, una tolerància a la dessecació, una capacitat per suportar temperatures extremes i unes taxes de creixement pausades associades al lent alliberament de nutrients del substrat. No és estrany, doncs, que els briòfits que presenten unes característiques molt semblants, també formin part d'aquestes comunitats litobiòntiques pioneres (LONGTON, 1992).

Els briòfits, i entre ells les molses, contribueixen a l'alteració de la superfície de la roca, tant de manera física com química. A la vegada la seva presència i la forma que adoptin (i.e. coixinets o mantells) ajudaran a retenir matèria orgànica i inorgànica o a retenir aerosols. Aquesta captura de matèria i la seva retenció són importants, en la mesura que contribueixen a la formació de sòl, de més de la pròpia acció del briòfit sobre el rocam (CARTER & AROCENA, 2000).

El rocam resta exposat a una sèrie de processos físics i químics, tant d'origen biòtic com abiòtic, que provoquen la meteorització-alteració de la roca. Pel que fa als processos d'origen abiòtic destaquen la precipitació o la dissolució d'elements minerals, o la pressió que exerceix la formació de gel a les esquerdes de la roca (BLAND & ROLLS, 1998). D'altra banda, els processos d'origen biòtic estan influenciats pel desenvolupament d'una sèrie d'organismes, dels quals destaquen els organismes colonitzadors o els pioners. El desenvolupament d'aquests organismes i els efectes que puguin provocar a la roca també estan influenciats indirectament pels factors abiòtics com la mida de gra de la roca i la seva porositat, la humitat del substrat o la intensitat de la radiació solar (POHL & SCHNEIDER, 2002).

A la superfície de la roca, coincidint amb la capa superior del biofilm, predominen els components fotosintètics (algues i cianòfits), però a mesura que s'aprofundeix a la roca, la presència d'aquests components disminueix i al seu lloc cobren major rellevància els micro-organismes heterotròfics (fongs). Cal tenir en compte que un cop el biofilm euendolític s'ha establert a la roca deixa d'alterar-la, ja que si el porus que colonitza es fa molt gran, aquest micro/nano relleu, deixa de proporcionar protecció als micro-organismes que s'hi han instal·lat (HOPPERT et al., 2004). Un cop que el biofilm s'ha establert a la roca deixa d'atacar-la i l'acaba protegint de les condicions adverses que l'ambient extern pot presentar. Així, per exemple, el gruix de la biomassa de la comunitat epilítica actuarà com a protecció mecànica davant de les precipitacions, reduint la força de la col·lisió de les gotes de pluja contra la roca i disminuint així l'alteració que la precipitació pugui provocar (POHL & SCHNEIDER, 2002). A l'inici de la colonització es produeix el procés conegut com *biopitting* per

part dels microorganismes. Aquest consisteix en la formació de petites galeries, de mida micromètrica, que proporcionen protecció i un nínxol ecològic als organismes colonitzadors (DANIN & GARTY, 1982; MCILROY et al., 2012). En aquesta fase inicial de la colonització es produeix un procés erosiu que suposa un impacte destructiu de la roca, tant d'origen físic (les hifes, peritecis, apotecis o rizoides penetren a la roca i creen fissures que suposen una pèrdua de matèria i duresa de la roca), com d'origen químic (corrosió i dissolució de cristalls/grans de la roca a causa de l'alliberament d'àcids originats pel metabolisme dels organismes colonitzadors, o que les activitats metabòliques dels microorganismes produeixin un efecte catalític en altres reaccions com pugui ser l'oxidació de metalls) (JACKSON, 2015). En el cas de l'alteració química destaca el paper de l'àcid oxàlic a l'inici de la colonització, mentre que un cop s'ha establert el biofilm a la roca, la presència d'aquest àcid i la seva funció de dissoldre nutrients minerals perquè el biofilm els pugui aprofitar disminueix considerablement (GEHRMANN-JANSSEN, 1995). Quan la profunditat a què arriben els microorganismes arriba al seu punt òptim –de manera que la radiació solar no els perjudiqui en excés i els permeti una fotosíntesi adequada– la colonització continua lateralment. En el moment en què els microorganismes arriben al punt òptim i s'estableixen a la roca, deixa d'haver-hi una erosió activa (POMAR et al., 2017).

S'han realitzat nombroses investigacions i existeix abundant bibliografia sobre el paper que tenen les algues, els fongs i els líquens en l'alteració de les roques carbonàtiques entre els quals destaquen els treballs de CHEN et al. (2000), MOTTERSHEAD & LUCAS (2000) i VILES (2012, 2020). També cal destacar les investigacions realitzades a l'àmbit de les Illes Balears, des del treball pioner de POMAR (1976), passant pels de FIOL et al. (1996) –que se centren en els processos bioerosius lligats a les formes exocàrstiques– fins a les contribucions de GÓMEZ-PUJOL (2006) o POMAR et al. (2017) a zones costaneres. Comptat i debatut, hi ha un gran interès pel paper de l'alteració de líquens, fongs i algues en l'alteració i erosió del rocam carbonàtic. Però els estudis sobre el paper desenvolupat pels briòfits en contexts similars són escassos. Les poques referències relatives a les molses com agents bioerosius que hi ha, se centren en ambients freds i la funció que els briòfits exerceixen en la formació de sòls sobre roques ígnies o metamòrfiques (CARTER & AROCENA, 2000; JACKSON, 2015; SZYMANSKI, 2017). També hi ha treballs enfocats al paper dels briòfits en la formació de sòls (LONGTON, 1992; CAO et al., 2020) o sobre el seu paper en la captura d'elements suspesos en l'aire (DONG et al., 2019). Però cap d'aquests treballs aprofundeix en l'estil i els processos d'alteració de la roca pels briòfits. La identificació de microformes d'alteració i els mecanismes d'erosió en roca carbonàtica associats a briòfits continua sent avui per avui un camp de recerca per abordar (VILES, 2020).

Davant l'absència d'estudis que explotin el paper dels briòfits (molses) en l'alteració del rocam carbonàtic i la seva contribució a la successió primària, aquest treball té un caràcter exploratori i es concep com un primer pas en la sistematització del paper biogeomorfològic d'aquest grup. Així doncs es plantegen els següents objectius de recerca: (a) caracteritzar els patrons i mecanismes d'alteració de la roca carbonàtica per briòfits al sotabosc dels alzinars de la muntanya mitjana mallorquina i (b) caracteritzar la naturalesa i la formació de sòls associats als tapets de briòfits sobre roques carbonàtiques.

Àrea d'estudi

La Serra de Tramuntana, en el vessant nord-occidental de l'illa de Mallorca, està constituïda per una cadena de muntanyes que s'estenen des del cap Andritxol fins al cap de Formentor amb una longitud de 90 km, una amplada mitjana de 15 km, tot ocupant una superfície aproximada de 70.000 ha (Figura 1). La Serra de Tramuntana acull deu cims superiors als 1.000 m d'alçària i, entre ells, hi destaca el Puig Major amb els seus 1.445 m de cota topogràfica. La seva estructura geològica, es caracteritza per un complex sistema de plecs, falles i encavalcaments amb direcció SW-NE (GELABERT, 1998) que es tradueixen en una morfologia característica amb penya-segats i timbes abruptes orientats al NW i vessants suaus cap al SE (GINÉS et al., 2012). No obstant això, la característica més distintiva de la Serra està relacionada amb la litologia del rocam que hi aflora, atès que més del 65% de la superfície d'aquesta unitat morfoestructural es desenvolupa sobre rocam carbonàtic (FORNÓS & GELABERT, 1995); el que es tradueix en un riquíssim modelat exocàrstic (GINÉS, 1998a, 1999; GINÉS & GINÉS, 2009a) i endocàrstic (GINÉS, 1998b; GINÉS & GINÉS, 2009b).

La Serra de Tramuntana presenta un clima de tipus mediterrani subhumit-humit, caracteritzat per temperatures mitjanes i temperades, juntament amb precipitacions estacionals, les quals són més intenses i abundants durant la tardor i la primavera. A la zona central i de major altitud de la serra, la precipitació mitjana anual és de 1.500 mm, mentre que la temperatura varia entre 5 °C de mínima i els 31 °C de màxima i les temperatures mitjanes giren al voltant dels 17 °C (GINÉS et al., 2012). La precipitació

mitjana disminueix amb la cota, passant dels 800 mm a les cotes mitjanes del centre de la serra, als 600 mm de les zones més marginals i baixes, als extrems orientals i occidentals de la serralada; el mateix que succeeix amb les temperatures, on a les zones centrals i de major altitud la temperatura és de 12 °C, de 14 °C a les zones mitjanes i de 16 °C a les zones més properes a la costa (GINÉS et al., 2012).

Tot seguint a BOLÒS (1996), a l'illa de Mallorca poden diferenciar-se tres zones principals de vegetació en funció de l'altitud i la precipitació: la garriga densa dominada per l'ullastre, *Olea europaea* var. *sylvestris*, i el llentiscle, *Pistacia lentiscus*, que s'estenen des del nivell del mar fins a 400 m d'altitud; el bosc perenne d'alzines, *Quercus ilex*, fins a una altura de 800 m i a partir d'aquest punt la vegetació coneguda com a pis culminar balear. Els alzinars, definits per la comunitat *Cyclamini balearicae-Quercetum ilicis,* són molt abundants a la Serra de Tramuntana, fins al punt que es consideren la seva comunitat climàcica, tot corresponent a boscs escleròfils de clima relativament humit dominats per *Quercus ilex*. Tot i que en el passat ocupaven extensions majors, avui per avui es troben ben desenvolupats a les cares septentrionals i occidentals de la Serra de Tramuntana, en aquelles àrees on les isohietes superen els 600 mm. A l'alzina l'acompanyen altres espècies de port arbustiu o herbaci com *Arbutus unedo*, *Rhamnus* sp., *Cyclamen balearicum*, *Smilax aspera* var. *balearica*, *Asparagus acutifolius* o *Ruscus aculeatus*.

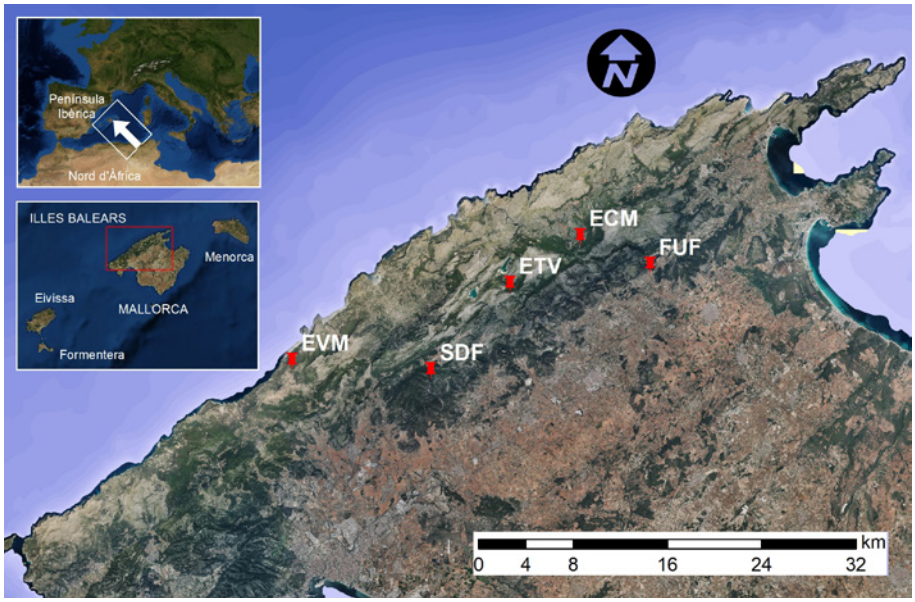


Figura 1: Ubicació de les zones de mostratge a diferents localitats de la Serra de Tramuntana. EVM: Ermita de Valldemossa; SDF: es Salt des Freu; ETV: es Tossals Verds; ECM: es Camell; FUF: ses Fonts Ufanes. Imatge de Fons: Visor de la Infraestructura Espacial de Dades de les Illes Balears, Institut Cartogràfic i Geogràfic de les Illes Balears.
Figure 1: Location of the sampling zones in different localities of the Serra de Tramuntana EVM: Ermita de Valldemossa; SDF: es Salt des Freu; ETV: es Tossals Verds; ECM: es Camell; FUF: ses Fonts Ufanes. Base map: Balearic Islands Spatial Data Base, Balearic Islands Institute of Cartography and Geography.

Pel que fa als briòfits, cal esmentar els treballs que a propòsit d'aquest grup i el món càrstic realitzaren a la boca dels avencs de Mallorca ROSSELLÓ & GINÉS (1980). Tanmateix, després de l'inventari de CROS et al. (2008), SÁEZ (2020, p. 31) identifica la Serra de Tramuntana com un dels àmbits de l'illa de Mallorca on s'hi troba un major nombre de taxons, uns 277 taxons que equivalen al 81% de la biodiversitat de briòfits de les Balears i dels quals 252 són molses. La majoria de les molses, tot i que no exclusivament, estan associades al sotabosc dels alzinars. Amb l'objecte de tenir una instantània de la tipologia d'alzinars, el paper de l'altitud i els factors climàtics, se seleccionaren cinc zones d'estudi amb formacions d'alzinars ben desenvolupades en les quals s'hi trobassin superfícies rocoses colonitzades per pradells de molses, allò que en termes populars s'anomena pans de molsa (Figura 1). Les característiques de cada una de les localitats queden recollides a la Taula 1.

Materials i mètode

Mostratge i observacions de camp

A cada una de les zones de mostratge descrites a la Taula 1, i amb la prescriptiva autorització de la Direcció General de Biodiversitat i Espais Naturals, de la Conselleria de Medi Ambient i Territori del Govern Balear, es prioritzà el mostratge d'afloraments rocosos amb presència de briòfits en els quals la morfologia del terreny permetés l'extracció de les mostres, així com la caracterització de superfícies subhoritzontals de roca colonitzada i fresca. En la selecció de les localitats, també hi jugà un pes important que el rocam no presentàs signes d'estar alterat en excés, així com també s'intentà minimitzar l'impacte visual de la retirada de pans de molsa i fragments de roca. A cada una de les localitats de mostratge es prengueren les coordenades geogràfiques, el pendent i orientació del vessant, es comprovà la litologia i cronologia del rocam a partir de la cartografia geològica 1:25.000 de la Junta d'Aigües disponible al visor de la Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears (IGCIB).

Localitat	**EVM** Ermita de Valldemossa	**SDF** Es Salt des Freu	**ETV** Es Tossals Verds	**ECM** Es Camell	**FUF** Ses Fonts Ufanes
Coords. UTM	31 (S) 466787, 4398155	31 (S) 478343, 4397249	31 (S) 484947, 4404628	31 (S) 490617, 4408222	31 (S) 496864, 4406188
Altitud	443 m	380 m	729 m	714 m	80 m
Orientació	NE	NW	NW	NE	W
Pendent	3º	20º	22º	13º	12º
Litologia mapa geològic	Dolomies, margues i carnioles	Dolomies massives i bretxes	Dolomies, margues i carnioles	Dolomies massives i bretxes	Dolomies massives i bretxes
Edat rocam	Retià	Juràssic inferior	Retià	Juràssic inferior	Juràssic inferior
Vegetació	*Erica multiflora*, *Laurus nobilis*, *Pinus* sp., *Pistacia lentiscus*, *Quercus ilex*	*Ampelodesmos mauritanicus*, *Pistacia lentiscus*, *Phillyrea* sp., *Pinus* sp., *Quercus ilex*, *Rhamnus alaternus*, *Rubia peregrina*	*Ampelodesmos mauritanicus*, *Bellis annua*, *Quercus ilex*	*Ampelodesmos mauritanicus*, *Buxus balearica*, *Laurus nobilis*, *Pistacia lentiscus*, *Quercus ilex*, *Rubia peregrina*, *Smilax aspera*	*Adiantum capillus-veneris*, *Arbutus unedo*, *Daphne gnidium*, *Olea europaea* var. *sylvestris*, *Phillyrea latifolia*, *Pistacia* sp., *Quercus ilex*, *Rubia peregrina*, *Smilax aspera*

Taula 1: Localització i paràmetres descriptius de les zones d'estudi.
Table 1: Location and major features of the study zones.

Un cop determinat el punt de mostratge, en un radi de 150 m es procedí a fer un catàleg de la vegetació. Val a dir que aquest mostratge es realitzà entre juliol i setembre de 2020. A cada punt de mostratge es marcà una superfície aproximada de 400 cm^2 (20 x 20 cm) de la qual es retirà el pa de molsa, deixant exposat un sòl incipient o bé la roca nua (Figura 2). En aquest darrer cas, el sòl es retirà amb l'ajuda d'un pinzell. Les mostres de briòfit es guardaren en unes bosses de paper *kraft* per evitar-ne la degradació, mentre que les mostres de sòl s'estotjaren en bosses de plàstic. Un cop que es retirà el pa de molsa i el sòl incipient, es caracteritzà la duresa de la roca mitjançant un duròmetre *Equotip Piccolo Bambino* 2. Seguint a VILES et al. (2011) i a WIHELM et al. (2016) primer es caracteritzà la duresa sobre la superfície rocosa de la qual s'havia retirat el briòfit i el sòl (d'ara en endavant roca colonitzada). Després d'obtenir una superfície de roca fresca mitjançant acció mecànica assistits per un martell de geòleg o una escarpra, es prengueren altres 50 registres de rebot sobre la roca fresca. Addicionalment es recolliren mostres de mà de roca fresca i roca colonitzada per al seu estudi al laboratori i per realitzar observacions, tant amb lupa binocular com amb microscopi electrònic de rastreig (SEM).

Tractament de mostres al laboratori

Un cop al laboratori, en el cas de les mostres biològiques, primer es netejà la superfície retirada de pa de molsa i se separaren les restes vegetals adherides a la part superficial (i.e. fullaraca, aglans, branques), així com els animals presents amb l'ajuda d'unes pinces. La fauna que es trobà es conservà en recipients tancats amb etanol al 96%.

Seguidament es retirà i separà el sòl acumulat a la base del pa de molsa amb l'ajuda d'un pinzell i després es realitzaren successives rentades amb aigua destil·lada. Un cop finalitzada l'operació es deixà el pa de molsa a una palangana sobre un paper de filtre perquè s'eixugàs a temperatura ambient. Un cop el pa de molsa restà sec, aquest es guardà dins una bossa de paper *kraft* amb la corresponent identificació de la mostra, localitat i data. L'aigua destil·lada amb què es feu el rentat del briòfit, es decantà lentament a un *erlenmeyer* de 250 ml, i s'abocà l'aigua a un embut on prèviament s'havia ubicat un filtre de paper orgànic de 63 µm prèviament tarat. El material retingut s'assecà a 60 °C durant 48 h i s'afegí al volum de sòl retirat durant el mostratge de camp.

Figura 2: Procés d'extracció de les mostres al camp. Aspecte de la superfície de retirada dels briòfits abans (esquerra) i després del mostreig (dreta).
Figure 2: Process of sample extraction in the field. Appearance of the removal surface of the bryophytes before (left) and after sampling (right).

La classificació taxonòmica dels briòfits es dugué a terme a partir de les claus artificials per la determinació de molses de CASAS et al. (2001) i la informació recollida al *Llibre Vermell de Briòfits de les Illes Balears* (SÁEZ, 2020). De més a més, a partir d'observacions de lupa binocular es midaren tant la longitud com la gruixa dels rizoides de les molses. Addicionalment també es quantificaren a partir d'observacions amb SEM quan sobre les mostres de roca encara restaven rizoides de la molsa un cop enretirats els fil·loides.

Per a les mostres de sòl, en primer lloc es determinà el color en condicions humides amb una escala de color Munsell i, després de deixar eixugar les mostres durant 24 h a 105 °C, s'emprà la mateixa escala de color per determinar el color en condicions seques. Es pesà tot el sòl recollit per a cada superfície de 400 cm^2. Com a mínim es retiraren 20 g, dels quals s'eliminà la matèria orgànica mitjançant un atac amb aigua oxigenada (H_2O_2) i es desagregaren les partícules amb un bany d'hexametafosfat sòdic $(NaPO_3)_6$. En els casos en què la massa de sòl recollida per a cada pa de molsa no arribà als 20 g, s'utilitzà la totalitat de la mostra disponible. Amb aquest sediment es procedí a realitzar una granulometria mitjançant el granulòmetre làser *Malvern Hydro 2000©* on les mostres, després de ser sonificades durant 60 s, es mesuraren tres cops i es calculà la mitjana dels valors de sediment corresponents a cada calibre. Atès que les anàlisis parteixen d'un volum de mostra petit, per tal d'evitar biaxos associats al volum de la mostra, si la desviació estàndard de la mitjana de les mostres excedia el 5%, llavors la mostra era analitzada de nou, fins a obtenir un valor de desviació inferior al llindar establert. Els paràmetres granulomètrics s'obtingueren a partir del programari *GRADISTAT® v.8.0* emprant el mètode gràfic de Folk i Ward (BLOTT & PYE, 2001).

De la mostra de sòl seca es retiraren 2 g per a l'anàlisi mineralògica a partir de difracció de raigs X (XDR) realitzada amb un aparell *Bruker-D8-Advance* dels Serveis Cientificotècnics de la Universitat de les Illes Balears. Els paràmetres emprats en la difracció foren un voltatge de 40 kV i corrent de 40 mA, amb radiació CuKα. L'adquisició es feu dels 3 als 70° 2θ, amb passos o intervals de 0,020°, i el temps per pas de 96 segons. Posteriorment, per tal de donar un valor percentual de la composició mineralògica dels sòls els difractogrames foren analitzats mitjançant el programari *Diffrac Suite EVA v. 4.4*.

Altres 7 g de sòl s'utilitzaren per a la determinació de matèria orgànica pel mètode d'ignició. La massa de sòl es deposità a un gresol de ceràmica que s'incinerà a una mufla durant 3 h a una temperatura de 550 °C. La reducció de massa del sòl després d'aquest procediment representa la quantitat de matèria orgànica alliberada en forma de CO_2 després de la incineració.

Per determinar el pH es barrejaren 5 mL de terra amb 25 mL d'aigua destil·lada en un vas de precipitats amb l'ajuda d'una vareta agitadora i es mesurà el pH amb una sonda portàtil *XS PHMT-007-001*. Per determinar la conductivitat es barrejà la terra restant amb aigua destil·lada, de manera que hi hagués 100 mL d'aigua per 20 g terra, i es mesurà la conductivitat mitjançant un conductímetre portàtil *XS COND7*.

Per a la caracterització mineralògica s'empraren fragments de roca fresca. A partir de 2 g de roca polvoritzada, i tot seguint el mateix procediment de l'anàlisi dels sòls, una submostra de roca fresca s'utilitzà per calcular el residu no carbonàtic de la roca. Després d'assecar la roca durant 24 h a 105 ºC, el fragment de roca es pesà en una balança de tres dígits de precisió i seguidament se submergí en

àcid clorhídric (HCl), al 10%, durant 24 hores. Una vegada atacada la roca, el residu lític fou filtrat i assecat durant 24 h a 105 ºC i s'obtingué la massa amb una balança de tres dígits de precisió. La diferència de massa respecte el pes inicial de la mostra es transformà en un valor de percentatge d'impureses de la roca carbonàtica.

A partir de la mostra de camp de roca colonitzada, es procedí a l'obtenció d'una làmina prima amb la qual es caracteritzà l'estil i la profunditat del front d'alteració de la roca mitjançant un microscopi petrològic i el programa *Image J Focus®*. Un altre fragment de la roca colonitzada s'explorà mitjançant el microscopi electrònic de rastreig (SEM) *Hitachi S* dels Serveis Cientificotècnics de la Universitat de les Illes Balears, per tal d'explorar les nanoformes d'alteració que es produeixen sota el pa de molsa. Les observacions de SEM tenen un caràcter estrictament exploratori i qualitatiu.

Resultats

Mostres biològiques

En el conjunt de localitats de sotabosc d'alzinar mostrejades s'han trobat quatre taxons de briòfits diferents. L'estat de les mostres, atès que el període d'estudi es desenvolupà just després de les restriccions sanitàries lligades a la pandèmia de la COVID-19, obligaren a mostrejar entre juliol i setembre de 2020, mancant alguns dels elements morfològics i reproductius que permeten la determinació fins a nivell d'espècie de forma senzilla. A les localitats d'estudi els pans de molsa estan formats majoritàriament (>90% de la superfície) per catifes de *Pseudoscleropodium purum* (Hedw.) M. Fleisch. Així a es Tossals Verds (ETV) i es Camell (ECM) al pa de molsa de la superfície retirada també es troba de forma testimonial *Leucodon sciuroi*des (Hedw.) Schwägr. i a es Salt des Freu (SDF) i ses Fonts Ufanes (FUF) *Leptodon smithii* (Hedw.) F. Weber & D. Mohr. A trets generals es pot afirmar que els rizoides observats al microscopi tenen un diàmetre mitjà de 15 µm, mentre que les longituds mitjanes dels rizoides és de més de 3 mm.

Mostres de sòl

L'anàlisi granulomètrica dels sòls, retirats a cada una de les localitats, presenta un rang textural que oscil·la de les arenes mitjanes a les arenes fines, tot i que amb una component de materials fins important. A la Figura 3 es pot apreciar que les distribucions granulomètriques tenen tendència asimètrica i estan desplaçades cap a les textures fines. De fet, els sòls més grollers i més ben classificats pertanyen a les localitats d'es Tossals Verds ($\mu = 421{,}8$ µm; $\sigma = 1{,}975$ µm), es Camell ($\mu = 456{,}2$ µm; $\sigma = 1{,}838$ µm) i ses Fonts Ufanes ($\mu = 392{,}1$ µm; $\sigma = 1{,}840$ µm), mentre que els sòls són més fins i menys classificats als alzinars d'es Salt des Freu ($\mu = 196{,}7$ µm; $\sigma = 5{,}893$ µm) o a l'Ermita de Valldemossa ($\mu = 238{,}2$ µm; $\sigma = 3{,}399$ µm) (Taula 2). Tanmateix, totes les mostres caracteritzades entrarien dins la categoria de sòls arenosos o franco-arenosos.

Pel que fa al color dels sòls, tant els valors de l'escala de Munsell, en condicions humides com en seques, tenen un matís marronós-rogenc (2.5 YR). Tot i que la resta de paràmetres no són gaire diferents en condicions humides o seques, en aquestes darreres la lluminositat és fosca. Tenen valors entre 2 i 3 a totes les mostres, mentre que la saturació o *chroma* és més intensa com més gran és la proporció de materials fins en el sediment (3 per a ses Fonts Ufanes i es Salt des Freu, mentre que per a la resta és d'1 o 2) (Taula 2). La matèria orgànica present en aquests sòls incipients també és variable amb un rang que oscil·la del 22,3 al 59,7%. Com passa amb la textura i amb la coloració, aquelles localitats amb sòls més fins i *chromes* més intensos presenten un percentatge de matèria orgànica menor (Ermita de Valldemossa 22,3% i es Salt des Freu 26,6%); mentre que a la resta de localitats, com es Tossals Verds, ses Fonts Ufanes o es Camell, la contribució de la matèria orgànica supera el 50% de la mostra (Taula 2). En relació al pH es tracta de sòls neutres o lleugerament alcalins, atès que el rang d'acidesa oscil·la entre 7,52 i 7,76. Els sòls més bàsics són els de l'Ermita de Valldemossa i els més neutres els de

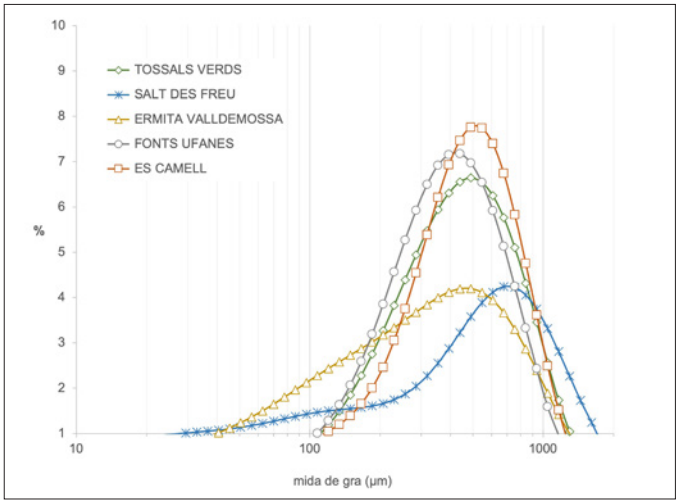


Figura 3: Corbes granulomètriques dels sòls retinguts sota els pans de molsa a cada localitat.
Figure 3: Granulometric curves of the soils retained under the moss mats in each locality.

	EVM	SDF	ETV	ECM	FUF
Mitjana (µm)	238,2	196,7	421,8	456,2	392,1
Classificació (µm)	3,399	5,893	1,975	1,838	1,840
Assimetria	-0,290	-0,470	-0,166	-0,195	-0,120
Kurtosi	1,059	0,913	1,040	1,095	1,012
Color en humit	2.5 YR 3/3	2.5 YR 3/2	2.5 YR 3/1	2.5 YR 2,5/2	2.5 YR 2,5/1
Color en sec	2.5 YR 5/3	2.5 YR 3/3	2.5 YR 3/3	2.5 YR 3/1	2.5 YR 3/1
Mat. orgànica (%)	22,3	26,6	58,9	59,7	50,7
pH	8,16	7,87	7,76	7,71	7,52
Conductivitat (mS)	420	427	127	742	590

Taula 2: Característiques del sòls retinguts sota els pans de molsa a cada localitat.
Table 2: Properties of the soils retained under the moss mats in each locality.

ses Fonts Ufanes (Taula 2). En termes de conductivitat, els valors entren dins la categoria de valors de salinitat mitjana, tot i que excepte en el cas de les mostres des Tossals Verds amb conductivitats de 127 mS, la resta de localitats queden compreses en un rang entre 410 i 742 mS (Taula 3).

L'anàlisi mineralògica de la fracció fina dels sòls revela que el principal component a les localitats estudiades és el quars (>50%), seguit de minerals del grup de les argiles (Taula 3, Figura 4). No obstant, els materials recollits a ses Fonts Ufanes presenten una composició diferenciada, on la dolomita és majoritària (68,6%) seguida del quars (27,9%) i les argiles són irrellevants (Taula 3).

Composició XDR	EVM	SDF	ETV	ECM	FUF
Quars	62 %	68,9 %	58,1 %	74,3 %	27,9 %
Calcita	PI	4,3 %	15,9 %	5,9 %	2,1 %
Dolomita	5 %	PI	4 %	PI	68,6 %
Argiles	22 %	26,8 %	14 %	19,7 %	PI

Taula 3: Composició mineralògica dels sòls retinguts sota els pans de molsa a cada localitat (PI: presència irrellevant).
Table 3: Mineralogical composition of the soils retained under the moss mats in each locality (PI: irrelevant presence).

Mostres de roca

Els resultats de les difraccions de raigs X de les mostres del rocam que resta sota els pans de molsa apunten que la mineralogia del rocam de les zones d'estudi és carbonàtica. A excepció de la mostra de ses Fonts Ufanes (Taula 4, Figura 4), majoritàriament les roques estan formades per calcita (80 a 98,7%) i dolomita (0,7 a 19,6%). En el cas de ses Fonts Ufanes, la dolomita assoleix un 94%. El quars és molt poc abundant o irrellevant en la composició de les diferents mostres. Aquest fet també queda de manifest en la quantitat de residu de la roca després d'atacar-les amb HCl. Es tracta de roques carbonàtiques bastant pures, amb residus que com a màxim assoleixen un 3% de la massa de la roca (Taula 5). La mostra d'es Camell és una calcària pura.

Composició XDR	EVM	SDF	ETV	ECM	FUF
Quars	0,3 %	PI	1,6 %	0,6 %	0,5 %
Calcita	80 %	97 %	97,7 %	98,7 %	5,5 %
Dolomita	19,6 %	2,5 %	PI	0,7%	94%

Taula 4: Composició mineralògica de les roques sota els pans de molsa a cada localitat (PI: presència irrellevant).
Table 4: Mineralogical composition of the rocks under the moss mats in each locality (PI: irrelevant presence).

Evidències i estil d'alteració

L'estudi de les propietats físiques de la roca mitjançant el duròmetre mostra com la superfície de les roques colonitzades presenta uns valors adimensionals de rebot menors que la roca fresca. Així per a les superfícies colonitzades la mitjana del valor de rebot a les localitats d'estudi oscil·la entre 367 i

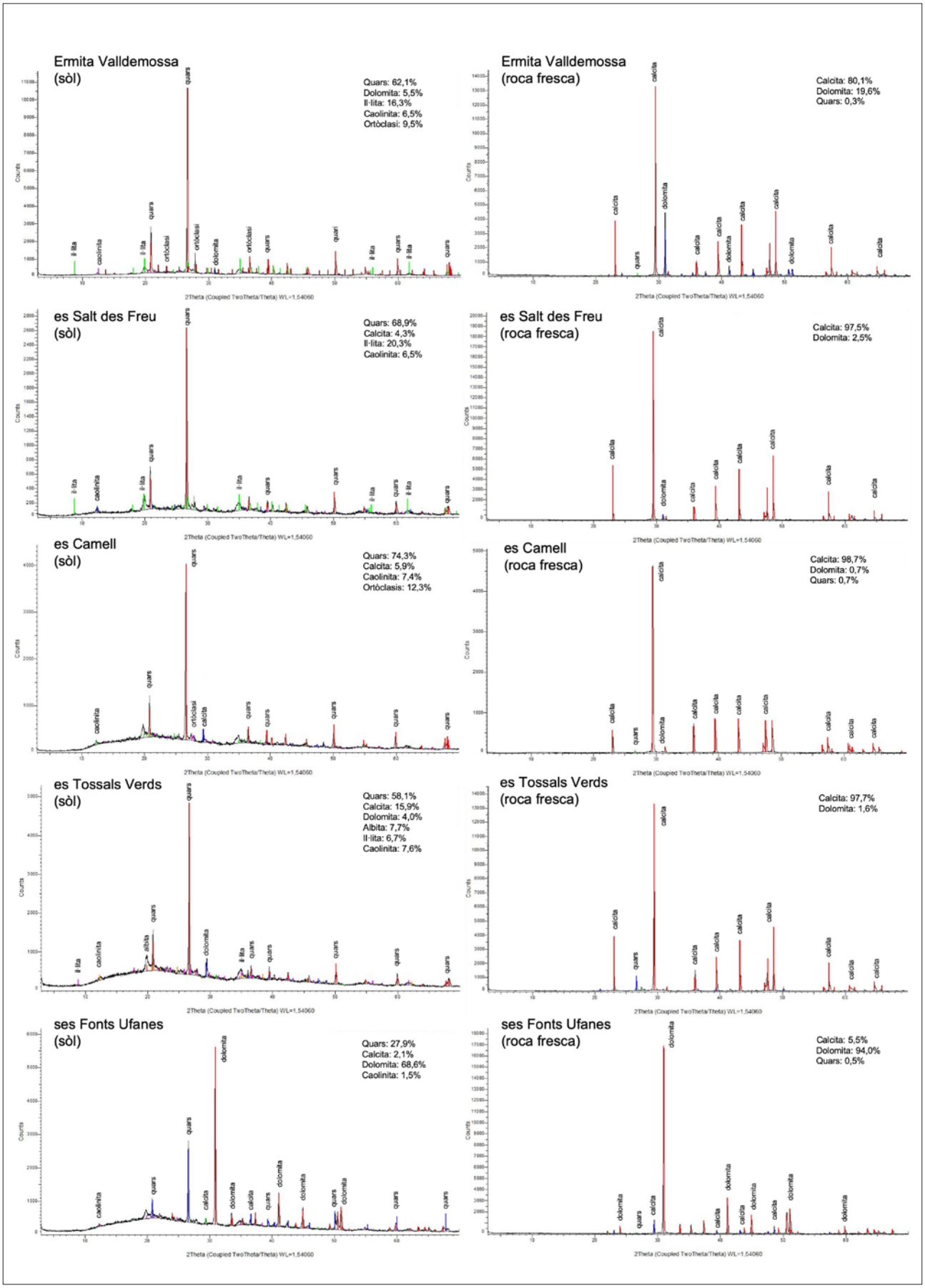


Figura 4: Difractogrames dels sòls i el rocam sota els pans de molsa a cada localitat d'estudi.
Figure 4: Diffractograms of the soils and rocks under the moss mats in each study site.

415, mentre que per a les observacions a roca fresca, aquest mateix rang oscil·la entre 542 i 646 (Taula 6; Figura 5). Aquests valors indiquen que el rocam que resta sota els pans de molsa presenta indicis d'alteració. De fet, arran de l'elevat nombre d'observacions obtingudes mitjançant el duròmetre a cada localitat, s'ha contrastat si aquestes diferències eren significatives, o no, a partir de diferents tests estadístics. Per a ETV, SDF i EVM s'ha realitzat el test de Kruskal-Wallis atès que la distribució de les dades no presenta normalitat; per a la localitat EMC s'ha realitzat una anàlisi normalitzada de la variància ja que les dades presentaven normalitat i eren homogènies; mentre que per a FUF s'ha emprat el test d'una via ja que les dades no eren homogènies. Tots els resultats dels tests han indicat que la diferència entre les poblacions són significatives amb un nivell de confiança superior al 95% (Figura 5). Fet que constata el grau d'alteració associat al desenvolupament i la instal·lació de les molses sobre el rocam carbonàtic del sotabosc dels alzinars de la Serra de Tramuntana. Tant és així que a les observacions de la làmina prima de les mostres de roca que restaven sota el pa de molsa s'observa que hi ha un front d'alteració des de la superfície fins a profunditats màximes de 0,47 mm (Taula 7). La màxima profunditat d'alteració es registra a les localitats d'es Camell i es Tossals Verds, amb profunditats de 0,38 i 0,47 mm respectivament, mentre que a la resta, la profunditat de penetració gira al voltant dels 0,20 mm (Figura 6a). No hi ha

Localitat	% impureses	% carbonats
EVM	1,02	98,98
SDF	0,26	99,74
ETV	3,37	96,92
ECM	0	100
FUF	1,61	98,39

Taula 5: Residu lític de les roques sota els pans de molsa a cada localitat.
Table 5: Lithic residue of the rocks under the moss mats in each locality.

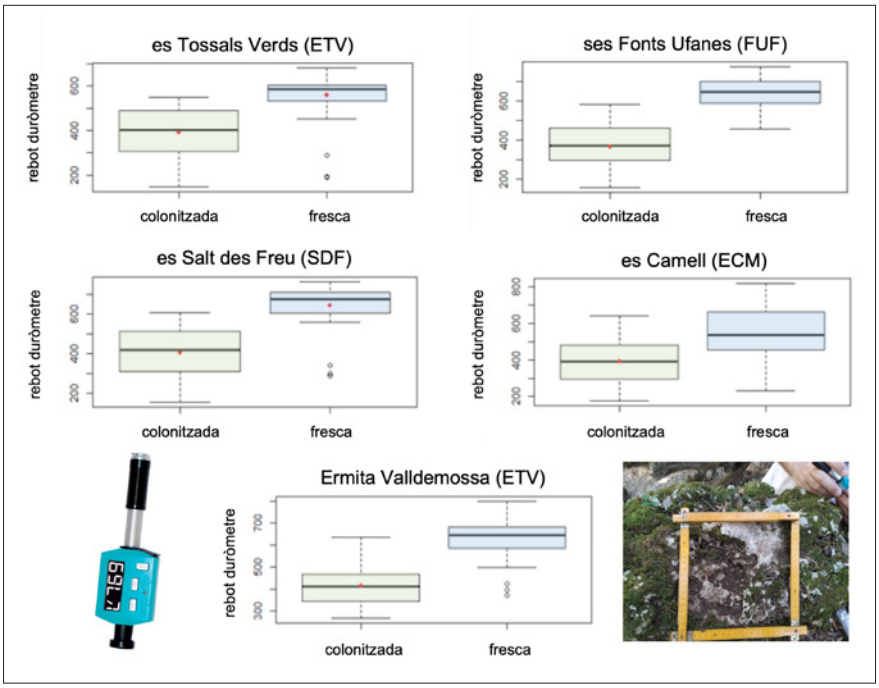


Figura 5: Diagrames de caixa dels valors de rebot del duròmetre a les superfícies de roca colonitzades pels pans de molsa i a les superfícies de roca fresca de cada localitat d'estudi.
Figure 5: Boxplots of durometer rebound values on rock surfaces colonized by moss mats and on fresh rock surfaces from each study locality.

Rebot duròmetre	EVM		SDF		ETV		ECM		FUF	
	col	*fres*	col	*fres*	col	*fres*	col	*fres*	col	*fres*
Mitjana	415	*628*	407	*646*	391	*556*	393	*542*	367	*638*
Desviació estàndard	84	*87*	124	*101*	103	*98*	118	*136*	105	*75*
Mínim	267	*370*	156	*289*	147	*189*	177	*230*	160	*458*
Màxim	636	*799*	609	*762*	548	*681*	640	*817*	584	*774*

Taula 6: Diferències entre el valor de rebot del duròmetre entre les mostres de roca colonitzades (col) pels pans de molsa i la roca fresca (fres) a cada localitat.
Table 6: Differences between the durometer rebound value between colonized rock samples (col) by moss mats and fresh rock samples (fres) at each locality.

	EVM	SDF	ETV	ECM	FUF
Profunditat màxima del front d'alteració (mm)	0,18	0,19	0,47	0,38	0,14
Profunditat de la penetració dels rizoides (mm)	0,15	0,42	2	0,51	1,5
Eix màxim dels critalls, micritització (mm)	0,05	0,06	0,08	0,06	0,05

Taula 7: Profunditat del front d'alteració i evidències de bioerosió de les mostres de roca colonitzades per molses.
Table 7: Weathering depth and bioerosion evidences from rock samples covered by moss mats.

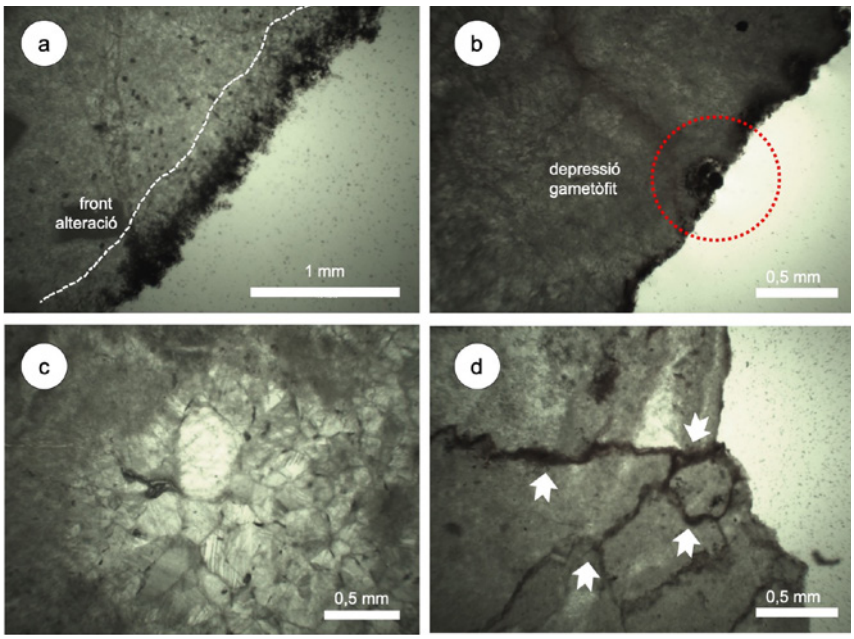


Figura 6: Fotografies al microscopi petrogràfic de làmines primes de les mostres de roca sota el pa de molsa. a) Detall de la profunditat del front d'alteració d'es Camell (ECM) on s'aprecia la presència d'hifes i altres elements orgànics en els primers mil·límetres de la roca, així com la micritització dels cristalls; b) Detall d'una depressió de corrosió associada a la localització d'un periteci a una mostra de ses Fonts Ufanes (FUF); c) Detall del grau de biomicritització dels cristalls en els primers mil·límetres per sota de la superfície a les mostres des Salt des Freu (SDF); d) els rizoides de les molses i/o les hifes dels fongs penetren varis mil·límetres dins la roca tot aprofitant els límits entre cristalls, fins i tot voltant i subjectant alguns elements minerals com en aquest cas de la mostra d' es Tossals Verds (ETV).

Figure 6: Photographs under the petrographic microscope of thin slices of the rock samples under the moss mats. a) Detail of the depth of the alteration front at es Camell (ECM) where the presence of hyphae and other organic elements can be seen in the first few millimeters of the rock, as well as the micritization of the crystals; b) Detail of a corrosion depression associated with the location of a perithecium in a sample of the Fonts Ufanes (FUF); c) Detail of the degree of biomicritization of the crystals in the first few millimeters below the surface in the Salt des Freu (SDF) samples; d) the rhizoids of the mosses and/or the hyphae of the fungi penetrate several millimeters into the rock while taking advantage of the boundaries between crystals, even wrapping and holding some mineral elements as in this case of the sample from Tossals Verds (ETV).

una relació directa de la resistència de la roca fresca amb la profunditat del front d'alteració, tot i que les mostres de roca fresca amb menor valor de rebot de duròmetre són les que mostren una major longitud de penetració del front d'alteració així com dels rizoides. A les làmines primes s'aprecia que la superfície de la roca presenta evidències d'alteració, típiques de les comunitats pioneres de cianòfits i fongs, com depressions lligades a la instal·lació de gametòfits (Figura 6b) o la micritització de la franja més superficial de la roca (Figura 6c). De més a més també es constata com les hifes i els rizoides aprofiten el contacte entre cristalls per endinsar-se i avançar roca endins (Figura 6d).

En superfície, les observacions amb lupa binocular (Figura 7) permeten descriure la relació entre la micromorfologia de la superfície rocosa amb les estructures o elements dels briòfits. Així, a mode d'exemple, a la Figura 7 es pot apreciar com els briòfits aprofiten estructures preexistents, com depressions prèviament ocupades per líquens, o petites esquerdes per instal·lar-s'hi o subjectar-s'hi (Figura 7a). De la mateixa manera, els rizoides dels briòfits participen en la descamació dels grans/cristalls de la roca i no és estrany trobar casos en què la biomassa dels rizoides acaba desenganxant fragments de roca on altres agents

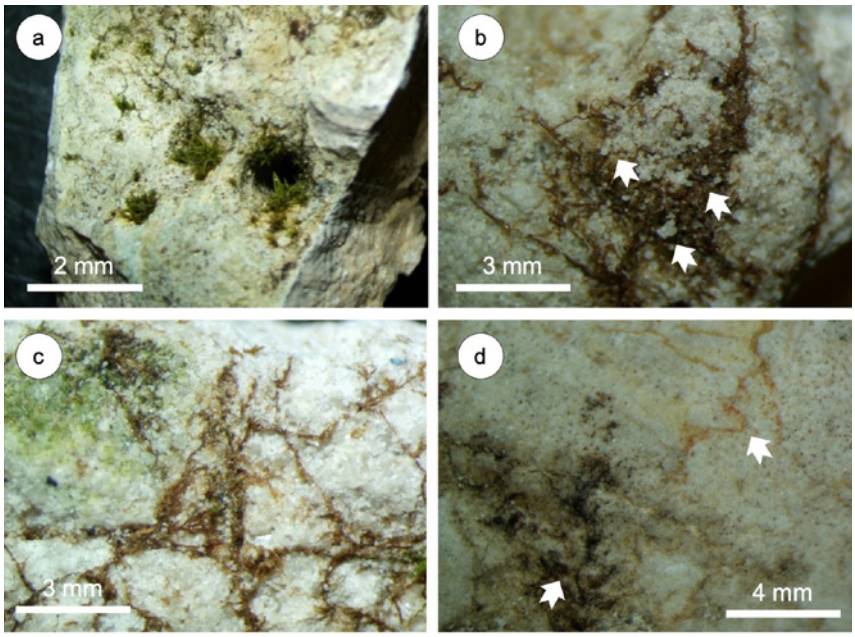


Figura 7: Observacions de lupa binocular relacionades amb la instal·lació i alteració de la superfície de la roca per les molses a ses Fonts Ufanes (FUF). a) Plàntules de molsa aprofiten depressions amb evidències prèvies de colonització per fongs per instal·lar-se i subjectar-se a la roca. b) Els rizoides de les molses participen en la degradació física de la roca, tot aixecant escames o fragments de cristalls com els que indiquen les fletxes. c) Els rizoides s'escampen aprofitant les línies de debilitat de la roca i els límits entre cristalls. d) Els rizoides quan no estan sotmesos al control cristal·logràfic adopten formes meandriformes (marge inferior esquerra) que quan es retiren deixen petits canalicles de la mateixa forma i de coloració vermellosa (marge superior dret).

Figure 7: Binocular lupe observations related to the installation and alteration of the rock surface by the mosses at Fonts Ufanes (FUF). a) Moss seedlings take advantage of depressions with previous evidence of colonization by fungi to settle and attach to the rock. b) The rhizoids of the mosses take part in the physical degradation of the rock, raising rock chips or fragments of crystals as indicated by the flexes. c) The rhizoids spread by taking advantage of the lines of weakness in the rock and the boundaries between crystals. d) The rhizoids, when they are not subjected to crystallographic control, adopt meandering forms (lower left margin) which, when removed, deizen small microrills of the same shape and reddish coloration (upper right margin).

Nanoformes	EVM		SDF		ETV		ECM		FUF	
	col	*fres*	col	*fres*	col	*fres*	col	*fres*	col	*fres*
Corrosió circular i galeries	***	–	***	–	***	–	***	–	***	–
Corrosió del límit cristal·lí	–	***	–	**	*	**	–	**	*	**
Corrosió en V	–	***	–	***	–	***	–	*	–	***
Corrosió polièdrica	–	*	*	*	–	–	–	***	–	*
Suavitzat	***	–	**	–	***	–	***	–	***	–
Micritització	***	–	***	–	***	–	***	–	***	–
Pàtina biològica	**	–	*	–	**	–	**	–	*	–

Taula 8: Síntesi de les nanoformes identificades mitjançant SEM a les mostres de roca colonitzades per pans de molses i roques fresques de les localitats estudiades. *** molt abundant, ** abundant, * presència testimonial, – absent.
Table 8: Synthesis of the nanoforms identified by SEM in the rock samples colonized by moss mats and fresh rocks from the studied localities. *** very abundant, ** abundant, * presence, – absent.

i processos havien contribuït a la fatiga de la roca (Figura 7b). També s'ha observat a les làmines primes que els rizoides de les molses tenen tendència a disposar-se seguint les línies de menor resistència cristal·logràfica (Figura 7c) i quan travessen cristalls o grans de roca més homogenis adopten formes o traçats meandriformes que, en retirar el rizoide, deixen petits canalicles llavorats a la roca de coloració vermellosa (Figura 7d).

Quan es compara de forma semi-quantitativa les nanoformes d'alteració associades a la superfície de les roques de mostra colonitzades i a les de roca fresca mitjançant imatges de SEM (Taula 8), tot partint del catàleg de nanoformes d'alteració del rocam carbonàtic de VILES & MOSES (1998), s'observa que a les mostres colonitzades, procedents de roques que restaven sota la superfície d'un pa de molsa, hi són molt abundants perforacions circulars i galeries que tradicionalment s'associen a l'acció de cianòfits, líquens i fongs, així com un suavitzat general dels grans i cristalls de la roca que són una evidència del grau generalitzat de dissolució (Taula 8). A la Figura 8, per a casos seleccionats de mostres

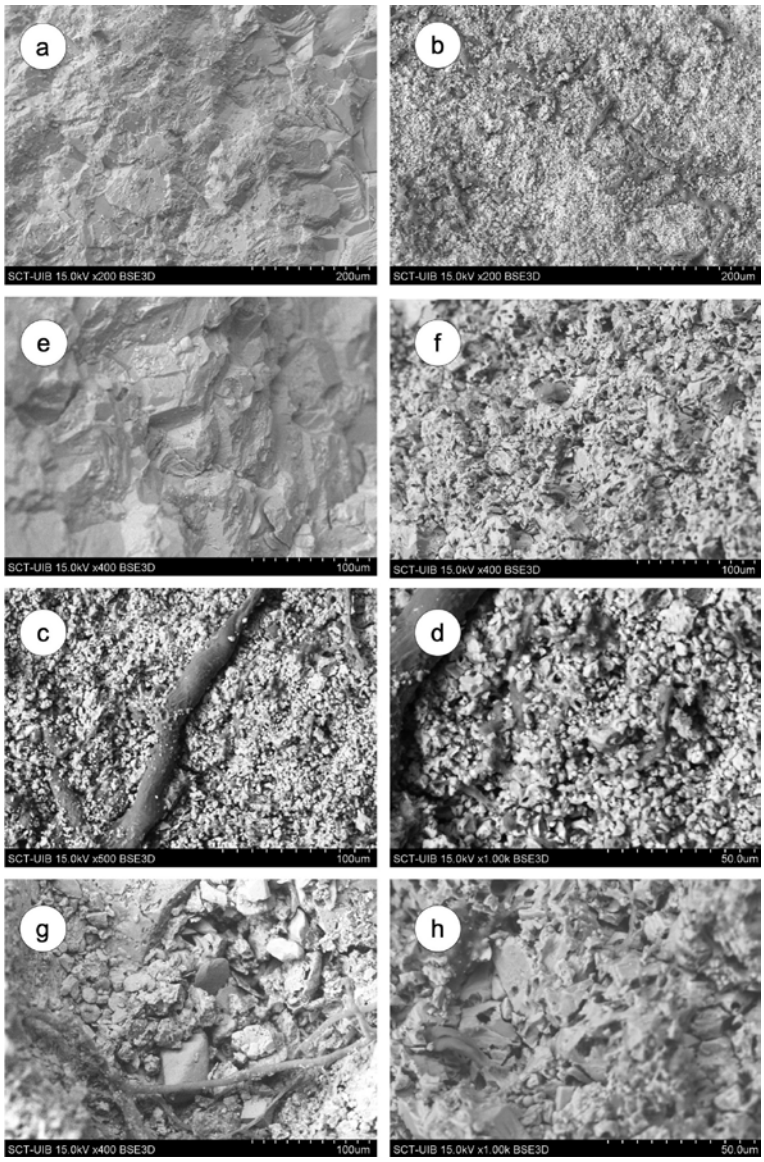


Figura 8: Imatge de SEM de mostres de roca colonitzada i roca fresca. Tant a la mostra de roca fresca d'es Tossals Verds (ETV) (a) com a la de ses Fonts Ufanes (FUF) (e) s'aprecia la dimensió dels cristalls, formes d'alteració controlades per l'estructura cristal·lina o un lleuger atac de dissolució entre límits cristal·lins. Per contra les mostres de les mateixes localitats però corresponents a roca colonitzada, respectivament (b) i (f) és caracteritzen per una dimensió dels cristalls i grans més petita, amb el límit entre ells ben eixamplat per dissolució i nombroses perforacions de planta circular i galeries. Les imatges d'ETV (c i d) i les de FUF (g i h) relatives a la interacció dels rizoides del briòfit i la roca, deixen veure com aquests s'endinsen entre els grans/cristalls i com al seu voltant els grans estan aïllats, el que implica eixamplament del límit cristal·lí, o les evidències d'arrodoniment, suavització o perforacions d'origen biològic són molt abundants.
Figure 8: SEM image of colonized rock and fresh rock samples. In the fresh rock samples from es Tossals Verds (ETV) (a) and in that of Fonts Ufanes (FUF) (e), the size of the crystals are larger and also the nanforms of alteration controlled by the crystalline structure or those related to an slight attack of dissolution between crystalline boundaries are abundant. On the other hand, the samples from the same localities, but corresponding to colonized rock, respectively (b) and (f), are characterized by a smaller size of the crystals and grains. Also, the boundary between crystals are well widened by dissolution and numerous perforations of a circular plan and galleries corrode the crystals and grains. The images of ETV (c and d) and those of FUF (g and h) show the interaction of the bryophyte rhizoids with the rock. Surface smoothing, smaller grains and crystals and abundant forms or circular corrosion and galleries indicate the importance of bioerosion.

procedents d'es Salt des Freu (SDF) (Figures 8a, b, c i d) i d'es Tossals Verds (ETV) (Figures 8e, f, g i h), es pot constatar com les mostres corresponents a roca fresca presenten cristalls de grans dimensions, mentre que les mostres de la superfície, les colonitzades, estan molt micrititzades i la dimensió dels cristalls és força menor. Aquest darrer terme és també evident en el detall de les Figures 8a, 8b, 8g i 8h on es pot apreciar com al voltant dels rizoides dels briòfits, el suavitzat general és palès i les dimensions dels cristalls són menors. De la mateixa manera sobre alguns cristalls es poden apreciar nanoformes de corrosió circular i galeries.

Discussió

Als rocams estudiats, la superfície de la roca carbonàtica es troba coberta per briòfits, entre els quals el més abundant és *Pseudoscleropodium purum*, acompanyat puntualment per *Leucodon sciuroides* i *Leptodon smithii*. Aquests briòfits, en la forma de pans de molsa, cobreixen la superfície de la roca i a escala de detall ocupen espais i cavitats de la roca que han estat modificats prèviament per altres organismes pioners com líquens, algues, fongs i cianobacteris que alteraren la superfície prèviament a la instal·lació de les molses. Tant a les làmines primes (Figura 6) com a les observacions amb lupa binocular (Figura 7), es pot apreciar un conjunt de microformes i restes de cobertura liquènica que són anteriors a la instal·lació de les molses. Aquest micromodelat es creà no només per establir la comunitat litobiòntica pionera, sinó també per proporcionar recer i protecció als organismes front de les condicions adverses de l'exterior (GOBULIC et al., 1980). És per aquest mateix motiu que els briòfits ocupen i reaprofiten aquests espais (Figura 7a i 9).

De fet, els resultats del duròmetre són concloents i l'existència de diferències significatives entre les mostres de roca que resten sota els pans de molsa, i les superfícies fresques de la mateixa roca (Taula 6), suposen una reducció del 50%, com a mínim, de la resistència de la roca. Així doncs, és evident que hi ha un procés d'alteració important del rocam.

Les mateixes làmines primes evidencien el desenvolupament de fronts d'alteració en els primers mil·límetres sota la superfície i un marcat procés de micritització (Figura 6 i Taula 7). Tanmateix no s'ha pogut comprovar que les diferents evidències d'alteració i atac químic de la roca siguin per causa exclusiva de l'activitat dels briòfits, ja que no es pot confirmar que les marques d'atacs químics (*biopitting*) (Figures 7a, 8d i 8g) no siguin el resultat de l'atac dels briòfits i el d'altres microorganismes litobionts previs encara presents a la superfície de la roca. S'hauria d'explorar amb tècniques de biologia molecular si sota el pa de molses hi ha microorganismes autòtrofs relacionats amb la comunitat saxícola pionera, capaços de seguir alterant la roca, malgrat quedar coberts pel briòfit.

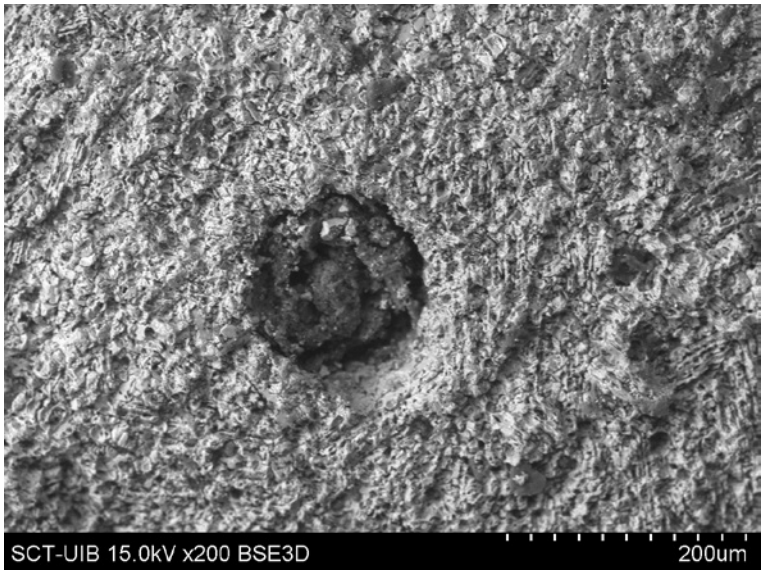


Figura 9: Alvèol característic d'un periteci de fong, reaprofitat per un gametòfit de briòfit a una mostra de roca colonitzada de l'Ermita de Valldemossa (EVM). Al voltant la roca mostra evidències de corrosió de planta circular i galeries que recorden a l'acció de cianòfits i altres microorganismes.
Figure 9: Characteristic alveolus of a fungal perithecia, reused by a bryophyte gametophyte in a sample of colonized rock from the Ermita de Valldemossa (EVM). All around the rock shows evidence of corrosion of a circular plan and galleries reminiscent of the action of cyanophytes and algal microorganisms.

No obstant això, sí que s'ha pogut documentar que els briòfits degraden físicament la superfície i els primers mil·límetres de la roca subjacent, mitjançant el desenvolupament dels rizoides (Figura 6c; Figures 7c, 7d i 7e i Figures 8c, 8d, 8g i 8h). En aquest sentit, aquestes provocarien un impacte destructiu a la roca similar al dels biofilms durant les fases de colonització inicial (ASCASO et al., 1982; POHL & SCHNEIDER, 2002) debilitant la cohesió interna de la roca, alliberant grans, trencant cristalls i eixamplant el límit del contacte entre cristalls. El manifest arrodoniment i suavització dels cristalls-grans que hi al voltant del punt on s'instal·len els rizoides, així com les formes de corrosió circular, impliquen que també hi ha un procés d'alteració química que podria estar lligada a la segregació d'àcids orgànics, com s'ha constatat sobre altres tipus de rocams (JACKSON, 2015).

D'altra banda, els resultats del present treball posen de manifest que els briòfits també realitzen un paper important en el

procés de la successió vegetal, ja que afavoreixen la formació i acumulació de sòl, fet que suposa que, en futures generacions, l'espai, actualment habitat per briòfits, presenti un substrat que permeti el desenvolupament d'altres vegetals més complexos. Els sòls que apareixen sota els pans de molsa són incipients i pobres, i podrien encabir-se en el tipus de formació microedàfica que FIOL (1983, 1985) anomena com a oligosòl, a causa de la seva reduïda potència i desenvolupament. Ara bé, l'escàs percentatge de residu lític dels rocams carbonàtics on s'ha mostrejat (Taula 5) i les diferències, pel que fa a la mineralogia de la roca subjacent i dels sòls (Taules 3 i 4), apunten que l'origen de l'oligosòl no prové de la degradació del rocam sobre el que se situen els briòfits, sinó que han de provenir d'una aportació externa, ja sigui per acumulació de matèria orgànica de l'alzinar o partícules que són aportades per fluxos laminars d'aigua, gravetat o per pluges. La darrera de les possibilitats és la més plausible, perquè tots els afloraments estudiats estan lleugerament part damunt del terra. Tanmateix, l'evidència més palmària és que en la mineralogia dels oligosòls hi apareixen grans quantitats de quars i de minerals del grup de les argiles, especialment caolinita que, atès el poc contingut en quars dels rocams estudiats i l'escàs residu lític –es tracta de calcàries bastant pures–, s'han de relacionar amb les pluges de fang provinents del nord d'Àfrica. FIOL (1983), FORNÓS et al. (1997) i FIOL et al. (2005), que han estudiat les característiques de les pluges de fang que afecten Mallorca, conclouen que la textura llimosa i arenosa i l'alt contingut en quars i minerals de les argiles com la il·lita i la caolinita, són trets distintius de les pluges de fang. Trets que són compartits per les mostres caracteritzades i que plantegen que els pans de molses del sotabosc dels alzinars de la Serra de Tramuntana actuarien com una trampa de sediment i incorporarien aquests elements al·lòctons a la formació del sòl i la consolidació de la comunitat primària.

El caràcter exploratori i descriptiu del treball no ha permès establir quins factors són més rellevants per a l'acumulació d'aquests oligosòls, ja que ni les característiques de les zones d'estudi, ni la quantitat de cobertura briofítica, estan relacionades amb la quantitat de substrat obtingut o els paràmetres físico-químics dels oligosòls caracteritzats.

Conclusions

El present treball caracteritza el paper dels briòfits en l'alteració del rocam i en la formació d'oligosòls al sotabosc dels alzinars de la Serra de Tramuntana a cinc localitats representatives de la muntanya mitjana mediterrània. Els resultats apunten que els briòfits són uns agents actius en l'alteració i erosió biocàrstica, així com en la formació de sòls. Els patrons d'alteració associats a la seva activitat es caracteritzen principalment pels mecanismes d'alteració física, seguits pels químics que, associats als rizoides dels briòfits, ataquen els límits entre els cristalls de la roca i preparen la roca per a l'acció efectiva d'altres processos que com l'acció de l'aigua o l'acidificació del medi acabaran produint altres formes exocàrstiques de majors dimensions.

D'altra banda, l'anàlisi dels oligosòls que es formen sota les molses, indiquen que els briòfits són un captador eficaç d'aerosols, ja que la riquesa en quars i minerals del grup de les argiles contrasta amb la puresa de les roques calcàries que colonitzen i que té forts paral·lelismes amb les característiques texturals i mineralògiques de les pluges de fang.

Agraïments i nota de recordança

Els autors volen agrair a la Direcció General de Biodiversitat i Espais Naturals de la Conselleria de Medi Ambient, Govern Balear, l'autorització per mostrejar i retirar els pans de molsa. També manifesten el seu agraïment a Joan J. Fornós i Lluís Fiol de la Universitat de les Illes Balears pels suggeriments i orientacions relatius a la caracterització mineralògica del rocam i els oligosòls. Igualment importants han estat els comentaris dels revisors anònims i l'ajuda en la determinació d'alguns dels briòfits. El present treball és una contribució a PID2020-112720GB-I00/AEI/ de l'Agència Estatal d'Investigació.

El present treball és un tribut a la memòria del Dr. Àngel Ginés Gracia que amb la seva obra no només es convertí en un pioner en l'estudi de l'exocarst a les Illes Balears, sinó que també fou un dels referents internacionals sobre la matèria. El que quedà palès a *l'International Symposium of Karren Landforms* (Sóller, 1995) que tan brillantment organitzà, juntament altres col·legues. La seva visió geoecològica del modelat càrstic, l'enfocament evolutiu i de successió ecològica-morfològica a propòsit de les microformes exocàrstiques, així com la recerca experimental sobre els processos

biocàrstics han marcat profundament l'agenda de recerca i la perspectiva d'investigadors d'arreu, de més a més dels baleàrics, entre els quals ens hi comptam. Mentre escric aquesta nota (LGP) no puc oblidar l'extraordinària experiència que fou visitar, de la seva mà, el *Klasicni Kras* i la cova de Postojna (Eslovènia).

Bibliografia

ASCASO, C., GALVÁN, J. & RODRIGUEZ-PASCUAL, C. (1982): The weathering of calcareous rocks by lichens. *Pedobiologia*, 24: 219-229.

BLAND, W. & ROLLS, D. (1998): *Weathering. An introduction to the scientific principles*. Arnold, London.

BLOTT, S. J. & PYE, K. (2001): Gradistat, a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1237-1248.

BOLÒS, O. (1996): *La vegetació de les Illes Balears. Comunitats de plantes*. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.

CAO, W., XIONG, Y., ZHAO, D., TAN, H. & QU, J. (2020): Bryophites and the symbiotic microorganisms, the pioneers of vegetation restoration in karst rocky desertification areas in southwestern China. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104 (2): 873-891.

CARTER, D. W. & AROCENA, J. M. (2000): Soil formation under two moss species in sandy materials of central Brittish Columbia (Canada). *Geoderma*, 98 (3-4): 157-176.

CASAS, C., BRUGUÉS, M. & CROS, R. M. (2001): *Flora dels briòfits dels Països Catalans, I: Molses*. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.

CHEN, J., BLUME, H. P., & BEYER, L. (2000): Weathering of rocks induced by lichen colonization—a review. *Catena*, 39 (2): 121-146.

CROS, R. M., SÁEZ, L. & BRUGUÉS, M. (2008): The bryophytes of Balearic Islands: an annotated checklist. *Journal of Bryology*, 30 (1): 74-95.

DANIN, A. & GARTY, J. (1983): Distribution of cyanobacteria and lichens on hillsides of the Negev highlands and their impact on biogenic weathering. *Z. Geomorph. N.F.,* 27: 423-444.

DONG, Y. P., HUANG, H., SONG, W., SUN, X. C., WANG, M., ZHANG, W., WANG, K. L., LIU, C.Q. & LIU, X. Y. (2019): Natural ^{13}C and ^{15}N abundance of moss-substrate systems on limestones and sandstones in a karst area of subtropical China. *Catena*, 180: 8-15.

FIOL, L. A. (1983): *Estudi del poblament florístic de l'habitació urbana de Palma de Mallorca*. Tesis de licenciatura inèdita, Universitat de Palma de Mallorca, Palma.

FIOL, L. A. (1985): Estudi d'una formació microedàfica a l'habitació urbana de Palma de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 29: 37-62.

FIOL, L. A., FORNÓS, J. J. & GINÉS, A. (1996): Effect of biokarstic processes on the development of solutional rillenkarren in limestone rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(5): 446-452.

FIOL, L., FORNÓS, J. J., GELABERT, B. & GUIJARRO, J. A. (2005): Dust rains in Mallorca (Western Mediterranean): Their occurrence and role in some recent geological processes. *Catena*, 63: 64-84.

FORNÓS, J. J., CRESPÍ, D. & FIOL, L. A. (1997): Aspectes mineralògics i texturals de la pols procedent de les pluges de fang a les Illes Balears: la seva importància en alguns processos geològics recents. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 40: 113-122.

FORNÓS, J. J. & GELABERT, B. (1995): Litologia i tectònica del carst de Mallorca / Lithology and tectonics of Majorcan karst. *Endins*, 20 – *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 27-44.

GELABERT, B. (1998): La estructura geológica de la mitad occidental de la isla de Mallorca. *Memorias del Instituto Geotécnico Minero de España*, Madrid.

GEHRANN-JANSSEN, C. (1995): *On the biopitting corrosion by epilithic and endolithic lichens on carbonate rocks – biophysical and biochemical weathering aspects*. Tesis doctoral. University of Oldeburg, Oldeburg.

GINÉS, A. (1998a): L'exocarst de la Serra de Tramuntana de Mallorca. In: Fornós, J.J. (Ed.), *Aspectes geològics de les Balears*: 361-389. Universitat de les Illes Balears, Palma.

GINÉS, A. (1999): *Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica*. Tesi Doctoral, Departament de Biologia Ambiental, Universitat de les Illes Balears, Palma.

GINÉS, A., GINÉS, J., FORNÓS, J.J., BOVER, P., GÓMEZ-PUJOL, L., GRÀCIA, F., MERINO, A. & VICENS, D. (2012): An introduction to the Quaternary of Mallorca. In: GINÉS, A., GINÉS, J., GÓMEZ-PUJOL, L., ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (Eds.), Mallorca: A Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 18: 13-53.

GINÉS, J. (1998b): L'endocarst de la Serra de Tramuntana de Mallorca. In: Fornós, J.J. (Ed.), *Aspectes geològics de les Balears*: 391-421. Universitat de les Illes Balears, Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009a): Mid-mountain karrenfields at Serra de Tramuntana in Mallorca Island. In: GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T. & DREYBRODT, W. (Eds.), *Karst Rock Features, Karren Sculpturing*: 375-390. ZRC Publishing, Ljubljana.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009b): Proposta d'una nova classificació morfogenètica de les cavitats càrstiques de l'illa de Mallorca. *Endins*, 33: 5-18.

GOBULIC, S., FRIEDMANN, I. & SCHNEIDER, J. (1980): The lithobionthic ecological niche, with special reference to micro-organisms. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51: 475-478.
GÓMEZ-PUJOL, L. (2006): *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Tesis doctoral, Universitat de les Illes Balears, Palma.
GORBUSHINA, A. A. & KRUMBEIN, W. E. (2000): Subaerial microbials mats and their effects on soil and rock. In: RIDING, R.W. & AWRAMIK, S.M. (Eds.), *Microbial sediments*: 161-170. Springer-Verlag, Berlin.
GOUDIE, A.S. (1986): *The human impact*. Basil Blackwell, Oxford.
HOPPERT, M., FLIES, C., POHL, W., GÜNZL, B. & SCHNEIDER, J. (2004): Colonization strategies of lithobiontic microorganisms on carbonate rocks. *Environmental Geology*, 46 (3): 421-428.
JACKSON, T. A. (2015): Weathering, secondary minerals genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment. *Geoderma*, 251-252: 78-91.
JENNINGS, J. N. (1985): Karst Geomorphology. Basil Blackwell, New York.
KRUMBEIN, W.E. & LAPO, A. 1996. *Vernadsky biosphere as a basis of geophysiology. Gaia in Action-Science of The Living Earth*. Floris Books, Edinburgh.
LONGTON, R. E. (1992): Role of bryophytes and lichens in terrestrial ecosystems. In: BATES, J. W. & FARMER, A. W. (Eds.), *Bryophytes and lichens in a changing environment*: 32-65. Clarendon Press, Oxford.
MCILROY DE LA ROSA, J. P., WARKE, P. A. & SMITH, B. J. (2012): Microscale biopitting by the endolithic lichen *Verrucaria baldensis* and its proposal role in mesoscale solution basin development on limestone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37 (4): 374-384.
MOTTERSHEAD, D. & LUCAS, G. (2000): The role of lichens in inhibiting erosion of a soluble rock. *The Lichenologist*, 32 (6): 601-609.
POHL, W. & SCHNEIDER, J. (2002): Impact of endolithic biofilms on carbonate rock surfaces. *Geological Society, London, Special Publications*, 205 (1): 177-194.
POMAR, F., GÓMEZ-PUJOL, L., FORNÓS, J. J., DEL VALLE, L. & NOGALES, B. (2017): Limestone biopitting in coastal settings: A spatial, morphometric, SEM and molecular microbiology sequencing study in the Mallorca rocky coast (Balearic Islands, Western Mediterranean). *Geomorphology*, 276: 104-115.
POMAR, L. (1976): *Procesos telodiagenéticos en rocas carbonatadas del litoral catalán y Baleares: su relación con microorganismos*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona.
ROSSELLÓ, J. A. & GINÉS, À. (1980): Introducció a la brioflora dels avencs mallorquins. *Endins*, 7: 27-35.
SÁEZ, L. (2020): *Llibre Vermell dels Briòfits Amenaçats de les Illes Balears*. Conselleria de Medi Ambient i Territori, Palma.
SZYMANSKI, W. (2017): Chemistry and spectroscopic properties of surface horizons of Artic soils under different types of tundra vegetation – A case study from the Fuglebergsletta coastal plain (SW Spitsbergen). *Catena*, 156: 325-337.
TRUDGILL, S. T. (1985): *Limestone geomorphology*. Longman, London.
VILES, H. A. (1988): Organisms and karst geomorphology. In: VILES, H.A. (Ed.), *Biogeomorphology*: 319-350. Blackwell, Oxford.
VILES, H. A. (1995): Ecological perspectives on rock surface weathering: towards a conceptual model. *Geomorphology*, 13 (1-4), 21-35.
VILES, H. A. (2012): Microbial geomorphology: A neglected link between life and landscape. *Geomorphology*, 157: 6-16.
VILES, H. A. (2020): Biogeomorphology: Past, present and future. *Geomorphology*, 366: 106809.
VILES, H. A., GOUDIE, A., GRAB, S. & LALLEY, J. (2011): The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in a geomorphology and heritage science: a comparative analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36: 320-333.
VILES, H. A. & MOSES, C.A. (1998): Experimental production of weathering nanomorphologies on carbonate stone. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 31: 347–357.
WILHELM, K., VILES, H. A. & BURKE, O. (2016): Low impact Surface hardness testing (Equotip) on porous surfaces – advances in methodology with implications for rock weathering and Stone deterioration research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41: 1027-1038.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

La necrópolis talayótica de la Cova des Robiols (Puigpunyent) y el origen de los enterramientos en cal en Mallorca

Jaume DEYÀ [1, 2], Javier ARAMBURU [3] y Guy DE MULDER [4]

[1] Grupo de investigación DAMARC. Deià, Mallorca. Email: jaume_deya@hotmail.com
[2] ArqueoTramuntana. Sóller, Mallorca.
[3] Investigador independiente.
[4] Ghent University. Department of Archaeology. Gante, Bélgica.

Abstract

We present in this paper the Talayotic funerary levels of the Cova des Robiols (Puigpunyent, Mallorca). It is concluded that during the end of the Talayotic period (c.750-550 B.C.) no fewer than 163 individuals of all ages and both sexes were buried in the cave, with a homogeneous set of ceramic and metallic grave goods. At the time of transition to the Balearic/Postalayotic culture, around c.550 B.C., all the remains were set on fire and were buried under a layer of lime and slabs detached from the ceiling.

Resumen

Presentamos en este artículo los niveles funerarios talayóticos de la Cova des Robiols (Puigpunyent, Mallorca). Se concluye que durante el final del período talayótico (c.750-550 a.C.) se inhumaron en la cavidad no menos de 163 individuos de todas las edades y ambos sexos, con un ajuar cerámico y metálico homogéneo. En el momento de transición a la cultura baleárica/postalayótica, hacia c.550 a.C. se prendió fuego a todos los restos, que quedaron sepultados bajo una capa de cal y losas desprendidas del techo.

Deyà, J.; Aramburu, J. y De Mulder, G. (2024): La necrópolis talayótica de la Cova des Robiols (Puigpunyent) y el origen de los enterramientos en cal en Mallorca.
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 67-82. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 17 juliol 2024; **Revisat:** 16 agost 2024; **Acceptat:** 20 agost 2024.
Publicat online: 27 agost 2024.

Introducció

Las prácticas funerarias en Mallorca y Menorca en el primer milenio a.C. (cultura talayótica c.1100-c.550 y cultura baleárica/postalayótica c.550-c.123 a.C.; CALVO & GUERRERO, 2011; ARAMBURU, 2020), siguen siendo poco conocidas tanto por su complejidad y variedad de ritos como por los pocos yacimientos excavados con técnica y metodología arqueológica actuales. Por ello, presentamos en este artículo nuestros recientes trabajos en la Cova des Robiols (Puigpunyent, Mallorca) centrándonos en la utilización funeraria de la cavidad durante el final de la cultura talayótica.

La cueva está catalogada oficialmente con el código JA-36A en el inventario de elementos patrimoniales del municipio y es conocida en los círculos espeleológicos isleños (MINGUILLÓN & GARCÍA, 2015). Esta se abre en una formación rocosa de calizas dolomíticas del Triásico Medio. Presenta tres accesos a su interior (Figura 1) siendo el central donde se halla el vestíbulo de unos 140 m² que ha sido sujeto de este estudio. Parte del yacimiento (no excavado) se encuentra sepultado por el derrumbe de la cornisa de la cavidad (Figura 2). En el año 2017 se llevó a cabo un primer sondeo (DEYÀ et al., 2017), confirmando la presencia de enterramientos en cal, para posteriormente programarse una excavación más amplia en 2021.

La excavación ha podido documentar una ocupación humana que abarca desde finales del tercer milenio a.C. hasta época andalusí, aunque también hay niveles prehumanos con *Myotragus balearicus* (DEYÀ & HERNÁNDEZ, 2024). En los primeros tiempos de uso antrópico, la cavidad fue utilizada como espacio de hábitat estacional para transformarse en necrópolis colectiva desde el navético hasta mediados de la época baleárica/postalayótica con inhumaciones, cremaciones y enterramientos en cal.

Aunque el objetivo de la excavación de 2021 se centraba en documentar y entender el conjunto de unidades estratigráficas (UEs) que conforman los registros arqueológicos de los enterramientos en cal

del final de la prehistoria mallorquina, la intervención permitió documentar dos niveles superpuestos con presencia de cal, pero de cronologías y con rituales diferenciados: un nivel superior de inicios del periodo baleárico/postalayótico (UE-03/08), que no es abordado en este artículo, y un nivel inferior (UE-30/80) que será presentado y analizado a continuación.

Estado de la cuestión del mundo funerario talayótico

La cultura talayótica, tanto en Mallorca como en Menorca, se ubicaría cronológicamente *grosso modo* entre el 1100/1050 a.C. y mediados del siglo VI a.C. (ARAMBURU, 2020). De esta cultura se han investigado sobre todo sus poblados y talayots, por lo que actualmente se dispone de un cuantioso *corpus* documental de la arqueología de "los vivos" (ARAMBURU, 1998, 2023). Esta situación contrasta con el gran vacío y la pobre calidad de la información de su mundo funerario (LULL et al., 2008), caracterizado, como a continuación veremos, por un escaso número de yacimientos investigados.

Partimos de la base de la tradición funeraria de la fase final de la cultura navética, caracterizada por inhumaciones colectivas en cuevas (naturales y artificiales) y abrigos con cierre ciclópeo. Los yacimientos hasta ahora conocidos para la transición entre ambas culturas serían contados, como por ejemplo Son Matge, en Valldemossa (WALDREN, 1982) donde su excavador documenta un nivel que atribuye a la fase talayótica, con restos humanos quemados y en algunos puntos con cal. En cambio, SALVÀ (2013) lo reubica en el naviforme II-B, (1200-900 a.C.) caracterizado por una gran presencia de cerámicas tipo perfil en "S" y de algunas copas con asa. En hueso, botones con perforación en "V" y placas triangulares con perforación central. Y finalmente, en metal de cobre y bronce: punzones, espirales, colgantes tipo copa, tubos, discos con círculos concéntricos, puntas de lanza y un depósito formado por una ajorca, restos de una espada y un cuchillo de hoja triangular.

Hay que mencionar también el Coval d'en Pep Rave, en Sóller (ENSEÑAT, 1973; COLL, 1991; SALVÀ & CALVO, 2007), con ajuares que parecen situarlo en el navético final/talayótico (vasos de perfil en "S", botones con perforación en "V", plaquetas triangulares con perforación central y punzones de bronce y puntas de flecha/lanza tubular). El elemento clave de este yacimiento es la aparición de los cuerpos humanos desarticulados, pero con los huesos claramente quemados, hecho atribuido a fuegos rituales de purificación del espacio funerario quemando los restos ya descarnados.

Los yacimientos donde se documentan niveles funerarios plenamente de época talayótica los encontramos en los abrigos rocosos de Son Matge en Valldemossa, Son Gallard en Deià, (WALDREN, 1982; GUERRERO et al., 2005), la Covatxa de Can Sec en Alaró (ARAMBURU & MARTÍNEZ, 2014) y la Cova Gregòria en Valldemossa (VAN STRYDONCK et al., 2005), siendo esta última solo conocida por dataciones radiocarbónicas que sitúan su uso antes de 766 a.C. Salvo el yacimiento de Can Sec los restantes presentan la existencia de enterramientos colectivos con cremaciones y presencia

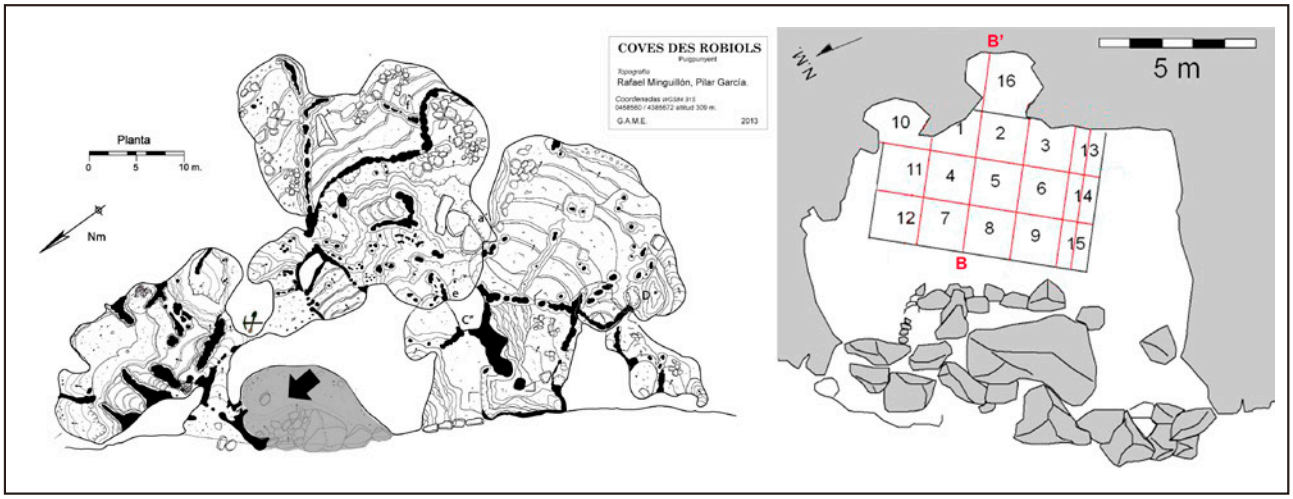


Figura 1: Ubicación de la intervención arqueológica sobre la planimetría total de la cueva (MINGUILLÓN & GARCÍA, 2015) y sectorización de esta.
Figure 1: Location of the archaeological intervention on the total planimetry of the cave (MINGUILLÓN & GARCÍA, 2015) and its sectorization.

Figura 2: Vista general de la cueva desde el interior con detalle de la bóveda y la cornisa colapsada.
Figure 2: General view of the cave from the interior, detailing the vault and the collapsed cornice.

de cal. Algunas propuestas (VAN STRYDONCK, 2020) sitúan la Serra de Tramuntana, entre el 800-700 a.C., como origen de esta novedad ritual (la cal) expandiéndose y popularizándose por toda la isla en la fase baleárica/postalayótica hasta el siglo II a.C.

La Covatxa de Can Sec (ARAMBURU & MARTÍNEZ, 2014) en Alaró es una minúscula cavidad de unos dos por dos metros de planta y una altura máxima de un metro. A pesar de haber sido expoliada, las dataciones radiocarbónicas y la uniformidad del conjunto cerámico indican que se utilizó como espacio de inhumaciones colectivas en el siglo IX y comienzos del VIII a.C, continuando así la tradición de la cultura navética.

Pero al mismo tiempo, como hemos comentado, tenemos indicios de cremaciones en el Coval d'en Pep Rave y en Son Matge. En este último yacimiento (WALDREN, 1982) encontramos una de las mayores secuencias cronológicas hasta ahora documentadas, con superposición de varias necrópolis de inhumaciones y de cremaciones con y sin cal. El depósito, de entre 50-70 cm de espesor (niveles 7 a 10 del sector este), se caracteriza por acumulaciones de huesos en una sucesión de niveles de cenizas, carbones y capas de cal, donde aparecen restos humanos quemados en diferentes grados en cada uno de estos estratos. El ajuar estaba compuesto por cientos de vasijas, la mayoría adosadas a la parte interna del muro de cierre ciclópeo y algunos objetos de bronce. La complejidad de estos compactos niveles con gran acumulación de restos humanos, junto con la falta de experiencia previa y de una metodología definida para este tipo de registros, provocó que la excavación y sus resultados fueran un poco confusos, implicando probablemente una mezcla de niveles durante el proceso de intervención. Si tenemos en cuenta la poca precisión de las dataciones radiocarbónicas debido a lo expuesto, la única forma de intentar diferenciar las fases es el análisis de los ajuares. De esta manera CALVO & GUERRERO (2011) concluyeron que los nuevos rituales de cremación y de la cal se iniciaron en el intervalo de tiempo del 920-750 a.C. aunque el hecho de que los materiales no se publicaran por niveles hace difícil sostener esa cronología.

Respecto a Son Gallard, WALDREN (1982, 1998) proporciona pocos datos estratigráficos en cuanto a las fases de la necrópolis talayótica y baleárica/postalayótica, presentando en su tesis parte del material exhumado. En 2003 se llevó a cabo otra intervención (GUERRERO et al., 2005) que permitió documentar la secuencia estratigráfica, aunque las dataciones obtenidas no proporcionaron datos concluyentes.

Aunque a veces se cita la necrópolis de tumbas al aire libre de Son Real (TARRADELL & HERNÁNDEZ-GASCH, 1998) como perteneciente a la cultura talayótica, el ajuar de las tumbas más antiguas, que imitan talayots, nos remite a inicios del baleárico/postalayótico, con presencia abundante de objetos de hierro, que están ausentes en la cultura talayótica mallorquina (BALAGUER, 2005).

Por tanto vemos como, hasta el día de hoy, no se ha podido intervenir en una necrópolis talayótica colectiva inalterada en base a metodologías de excavación y análisis propios de intervenciones del siglo XXI.

Metodología de excavación y problemáticas

La intervención arqueológica se inició con el propósito de excavar en extensión cada uno de los estratos en un espacio delimitado de 6 x 5 m. Para una mejor ubicación y triangulación de los elementos hallados, esta área de excavación fue finalmente subdividida en 16 cuadrículas (Figura 1). Dicha estrategia se pudo aplicar hasta que aparecieron los contextos de enterramientos en cal, momento en que se tuvo que replantear el método.

Hasta ahora no existía una metodología específica para la excavación de cavidades con el rito de la cal, más allá de las excavaciones "a pico y pala" con un registro documental muy pobre de las estratigrafías y distribución espacial de los ajuares tanto en planta como en sección. En Son Matge (WALDREN, 1982), en los años 70-80 de la pasada centuria, se llevó a cabo un primer intento de excavación metódica en este tipo de contextos. Pero fue en la Cova de Son Pellisser (ARAMBURU & MARTÍNEZ, 2015) donde se intervino por primera vez con una metodología *ad hoc*, pasando de excavar todo el volumen de enterramientos en cal como una unidad a dividirlo en "paquetes" de enterramientos con su ajuar individualizado, al tiempo que realizando el estudio antropológico. Poco después se hicieron algunos pequeños sondeos en la Cova de s'Alova en Sóller (DEYÀ, 2019) y Na Dent en Manacor (VAN STRYDONCK et al., 2015). En Menorca se intervino en una cavidad en l'Albufera de Ciutadella (Sintes, com. pers.) y se realizó una toma de muestras de la Cova de Na Prior situada en el Barranc de Binigaus (VAN STRYDONCK et al., 2017).

El primer problema a la hora de intervenir en estos estratos es que no conocemos cuál fue el proceso ritual de estos enterramientos, lo que no permite prever cual sería la mejor forma de proceder. El segundo es que la cal forma una capa, generalmente compacta y dura, donde se embuten ajuares con los restos óseos quemados, retorcidos, contraídos y muy fragmentados, complicando extraordinariamente la excavación para documentarlos en su emplazamiento original. Además, los estratos vinculados con estos paquetes de huesos (cal, piedras, carbones, etc.) no son homogéneos, insertándose unos en los otros. Todos estos elementos combinados hacen de la excavación de enterramientos en cal un auténtico desafío metodológico.

Para abordar este problema se decidió incluir el método de excavación por *décapages* (Figura 3) de los estratos funerarios directamente vinculados con los enterramientos en cal talayóticos, con centenares de huesos humanos aparentemente revueltos. Se perfilaba capa por capa, tomando fotografías cenitales por cuadrícula para dibujar e identificar sobre tableta cada uno de los elementos arqueológicos (Figura 4) así como la interrelación entre las unidades estratigráficas (UEs). Posteriormente, se realizaba una toma de imágenes fotogramétricas para complementar los datos espaciales (Figuras 3 y 4). El *décapage* es una técnica de excavación casi centenaria, pero todavía vigente y ampliamente usada en la arqueología actual.

El método utilizado ha de mejorarse y perfilarse con nuevas intervenciones, pero nuestra experiencia podrá servir como base para futuras excavaciones en estos contextos arqueológicos.

Los resultados de la excavación

Se abrió una cata en extensión de unos 6 x 5 m de superficie con una potencia estratigráfica de origen antrópico de unos 2,5 m de profundidad. Este espacio conserva una altura máxima de unos 4-5 m sobre el piso actual. La bóveda (Figura 2) se caracteriza por ser curvada, exenta de formaciones, de color ennegrecido y agrietada/laminada. Todo ello se podría explicar por un contacto directo y constante con las altas temperaturas ocasionadas por una acción continúa de fuego en su interior.

Como hemos comentado, la ocupación de la cavidad abarca niveles previos a la ocupación humana, con presencia de restos óseos de *Myotragus balearicus* (UE-87 entre 5900-5700 a.C.; datación RICH-33497: 6946±28 BP), pero los primeros restos culturales se inscriben en el calcolítico (se dató un hueso humano en la UE-83 en 2470-2200 a.C.: RICH-33499: 3860± 37 BP). También hubo una necrópolis de inhumaciones en el navético con dataciones entre 1620-1450 a.C (UE-81; dataciones RICH-33500: 3273±25 BP y RICH-33501: 3269±25 BP, ambas sobre hueso humano), pero estos niveles están muy alterados por las necrópolis posteriores.

Con posterioridad a los niveles objeto de este estudio encontramos enterramientos en cal típicos del baleárico/postalayótico (UE-03/08) datados en los siglos V-II a.C. que son objeto de otra publicación.

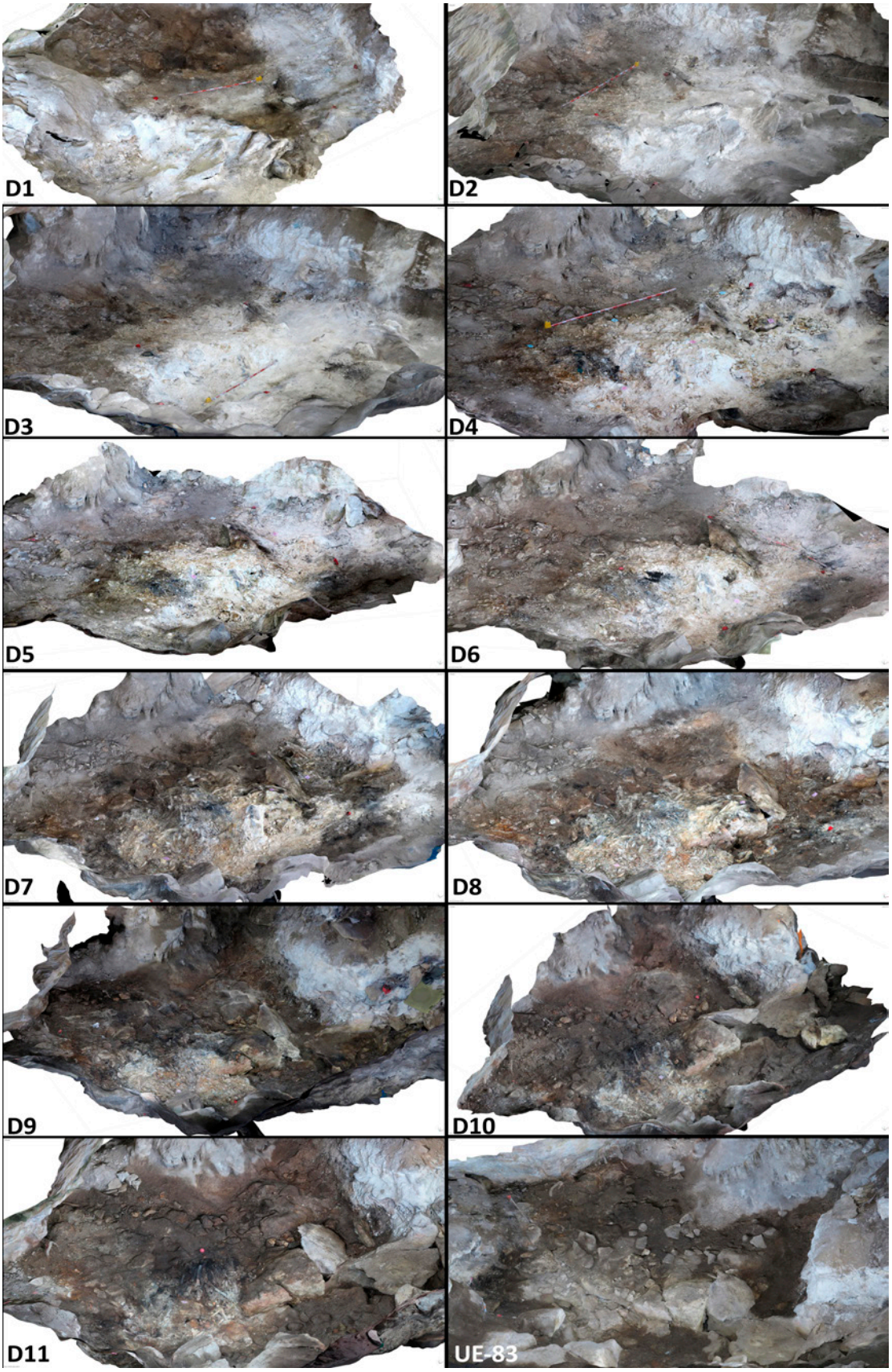


Figura 3: D1 a D11) Secuencia de la excavación del cúmulo de restos humanos (UE-30 y UE-80) representado por los diferentes *décapages* (D) realizada a partir de fotogrametría. UE-83) Unidad estratigráfica atribuida a un empedrado/nivelado del espacio funerario.
Figure 3: D1 to D11) Excavation sequence of the mound of human remains (UE-30 and UE-80) represented by the different *décapages* (D) created through photogrammetry. UE-83) Stratigraphic unit attributed to a paving/leveling of the funerary space.

Finalmente, los niveles superficiales con restos de cerámica tanto romana como andalusí no fueron datados por carbono-14 (^{14}C) por hallarse mezclados con materiales de los siglos XIX-XX, habiendo desaparecido por completo los depósitos originales.

Los niveles objeto del presente estudio (Figura 5) comprenden las UE-30, 40, 80 y 80a y se enmarcarían en el final del talayótico, previo a la transición a la Edad del Hierro (baleárico/postalayótico). Estos niveles, a primera vista, siguen un patrón estratigráfico (DEYÀ, 2016) muy similar a los niveles de la necrópolis superior de cal, pero con una disposición de huesos y materiales sustancialmente diferentes.

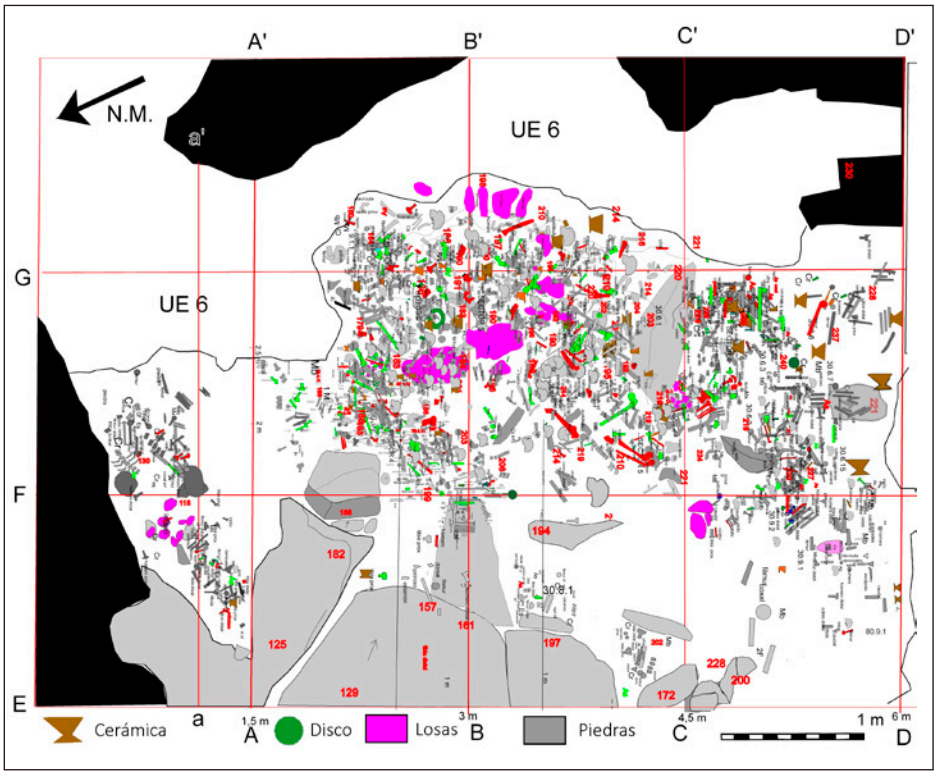


Figura 4: Ejemplo de una de las plantas de distribución de los restos arqueológicos realizada. Huesos humanos: rojo (lateral derecho), verde claro (lateral izquierdo) y gris (indeterminado). Objetos cerámicos: marrón/naranja. Objetos metálicos: verde oscuro.
Figure 4: Example of one of the distribution plans of the archaeological remains created. Human bones: red (right side), light green (left side) and gray (indeterminate). Pottery objects: brown/orange. Metal objects: dark green.

Bajo los enterramientos en cal baleáricos/postalayóticos encontramos la UE-09, nivel de tierra rubefactada, donde empezaron a aflorar grandes lajas de piedras (Figura 6) rojizas/grisáceas, orientadas en la misma dirección e hincándose casi verticalmente solapándose parcialmente unas sobre otras. En algunos puntos y en cotas superiores aparecían piedras sin prácticamente sedimento (UE-40) y, bajo ellas, otra capa (UE-30a) de losas entre cuyos huecos había láminas pequeñas y finas de piedra, entremezcladas con cal.

Estas UEs no eran homogéneas en toda la superficie, muy probablemente debido a remociones sufridas por la preparación y nivelación del lugar para llevar a cabo lo que sería el nivel superior de enterramientos en cal. Una vez retiradas estas lajas empezó a aflorar un nivel que destacaba por

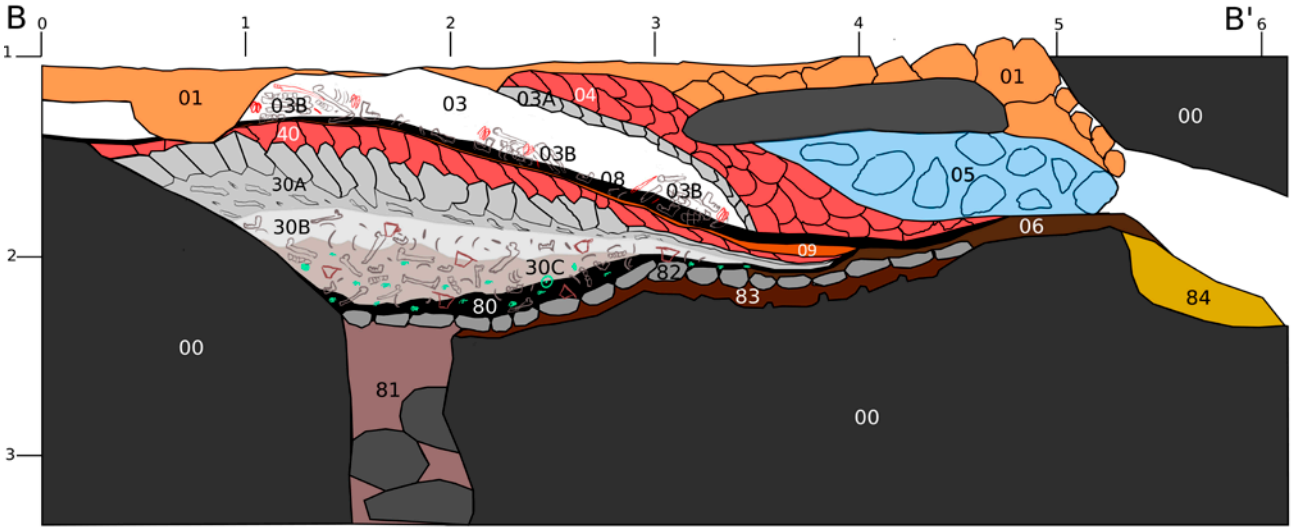


Figura 5: Sección B-B' de la cata (ver Figura 1) donde se aprecian los niveles y unidades mencionados en el texto.
Figure 5: Section B-B' of the excavation (see Fegure 1) where the levels and units mentioned in the text are shown.

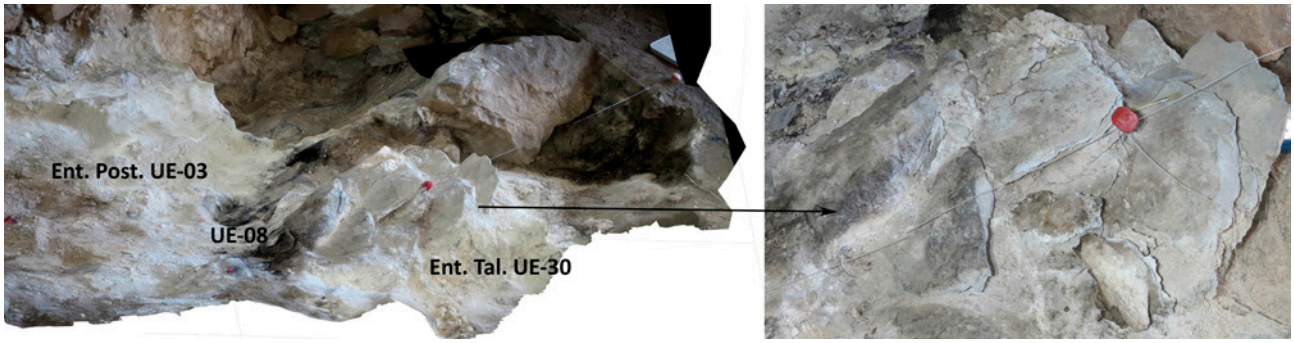


Figura 6: Superposición de los dos periodos de enterramientos en cal (UE-03/30) con detalle de la acumulación de lajas procedentes del colapso del techo (UE-40). También puede observarse la UE-08 (carbones).
Figure 6: Superposition of the two periods of lime burials (UE-03/30) detailing the accumulation of slabs from the ceiling collapse (UE-40). The UE-08 (charcoal) can also be observed.

observarse una cal bastante pura (UE-30b), con algunas lajas muy deshechas, que se desintegraban al tocarse. La potencia de la cal no era homogénea, pero habitualmente alcanzaba hasta 20-30 cm. Los huesos humanos iban apareciendo a medida que se profundizaba en el nivel, llegando a un punto (UE-30c) en el que el nivel estaba completamente saturado de huesos humanos calcinados y aparentemente entremezclados, con ajuares dispersos tanto horizontal como verticalmente. Precisamente, esta disposición nos lleva a pensar que la capa de cal no se había formado con los huesos, sino que respondía a una filtración heterogénea que se acumuló sobre estos, explicándose así porqué en algunos puntos de la zona central de la acumulación de huesos la cal no está casi presente, mientras que en otros penetra hasta cotas bastante más profundas (Figura 7).

En las cotas inferiores de esta UE-30c los huesos se embutían parcial o completamente dentro de un nivel negruzco situado en la base (UE-80) que descansaba, a su vez, sobre un antiguo empedrado (UE-82) realizado en parte sobre el lecho de la cueva. En los puntos donde esta UE-80 descansaba sobre niveles de sedimento se pudieron documentar restos de tierra rubefactada (Figura 8) de color marrón-anaranjado (UE-80a).

Por lo tanto, lo que se ha documentado es la existencia de un montículo formado por una gran acumulación de huesos humanos quemados cubierto este, en su cota más alta, por una capa de cal. En algunos puntos la cal se habría filtrado a cotas más bajas, aunque en la zona intermedia de la acumulación de huesos, esta era prácticamente inexistente. En la cota inferior del cúmulo los restos humanos se insertaban en un nivel de carbones y cenizas. Un fenómeno que pudo observarse reiteradamente es la existencia de gran cantidad de huesos largos que, simultáneamente, estaban insertos en cada una de las UEs mencionadas (UE-30b, UE-30c y UE-80).

Un factor adicional observado es la bioturbación ocasionada por las raíces (Figura 8), que penetraron en las zonas de cenizas y las absorbieron, dejando sin rastro de estos niveles en algunos puntos.

Finalmente, la UE-81 se corresponde con unas grandes grietas, bajo el nivel del citado enlosado UE-82, donde parte de los materiales se filtraron y entremezclaron.

Figura 7: a) Corte estratigráfico general de UE-30/80. b) Detalle de UE-30c donde se observa una pieza cerámica *in situ* embutida en el paquete de huesos sin cal.
Figure 7: a) General stratigraphic section of UE-30/80. b) Detail of UE-30c where a pottery piece can be seen *in situ* embedded in the bone package without lime.

A modo de resumen, los estratos de la fase analizada en este estudio (Figura 5) aparecen recogidos en la Tabla 1.

La excavación del paquete de huesos resultó muy compleja. El procedimiento consistió primero en perfilar la acumulación de huesos para lo que fue retirándose la parte de la costra de cal que los cubría. Posteriormente, se delimitó una primera capa de huesos que se fotografiaron de forma cenital, identificándolos individualmente sobre la imagen, al tiempo que se realizaba una toma de datos fotogramétricos, antes de ser finalmente retirados. A continuación, se procedió de la misma forma con la siguiente capa hasta documentar un total de 10 *décapages*.

UE-40	Rocas/lajas de color rojizo caídas por el derrumbe del techo seguramente por termoalteración.
UE-30	Nivel de cal sobre un denso paquete de huesos humanos calcinados. El subnivel **30a** consiste en losetas grisáceas-blancas y cal desprendidas del techo. El subnivel **30b** es una costra de cal con huesos humanos integrados y por debajo (**30c**) un paquete de huesos compactos aparentemente sin cal. Los huesos por lo general aparecen con coloraciones blancas/grises.
UE-80	Nivel de carbones y cenizas situado bajo la UE-30. Parte de los huesos de esta UE superior se embuten en este mismo nivel. Por lo general los huesos son de coloración negruzca hacia grises.
UE-80a	Manchas puntuales dentro de la UE-80 del nivel anaranjado/rojizo. No se conservaba de forma continua por lo que se dejó integrada dentro de la misma UE de combustión. Esto es debido a que la combustión se realizó sobre un empedrado y no directamente sobre sedimento.

Tabla 1: Esquema de la estratigrafía de los enterramientos en cal de la fase talayótica en la Cova des Robiols.
Table 1: Stratigraphic schema of the lime burials from the talayotic phase in Cova des Robiols.

Se pudo comprobar que el paquete de huesos formaba una especie de cúmulo (Figura 8) que, como hemos mencionado, estaba cubierto por una espesa capa de cal y, por encima, losas de piedras calcinadas. En los primeros *décapages* la cal era compacta y se entremezclaba con los huesos, pero en cotas intermedias/inferiores apenas existía cal y su textura era polvorienta, filtrándose entre los huesos en el mismo momento del proceso de excavación. Los restos humanos aparecían principalmente de color blanquecino/ grisáceo en la UE-30c y de color negro en la UE-80, lo que nos lleva a pensar que la potencia de las llamas fue más intensa en las cotas más altas.

Como se ha comentado se observaba una clara acumulación de cuerpos, unos sobre los otros, sin ningún tipo de distinción o separación entre ellos. Los cuerpos por lo general no aparecen completamente articulados, pero sí se identifican numerosas conexiones anatómicas: pelvis/fémur, columna vertebral, pies/mano, cráneo/mandíbula, tibia/peroné, etc. (Figura 9). Al mismo tiempo, también existen grupos de huesos largos de las extremidades, todos ellos unidos y alineados conjuntamente, lo que indicaría que la mayoría de los individuos fueron depositados en conexión anatómica, decúbito lateral y fuertemente plegados. Los huesos largos y las columnas vertebrales aparecen orientados norte-sur (n=34 casos), este-oeste (n=25) y otras (n=38) por lo que no parece que hubiera una orientación precisa.

El total de restos humanos identificados es de 21.890 (14.221 de la UE-30 y 7.669 de la UE-80). El número mínimo de individuos (NMI) es de 163 calculado en base al número de petrosos derechos (115 de la UE-30 y 48 de la UE-80). Se documenta el enterramiento de hombres y mujeres, sin que, debido al alto grado de alteración de los huesos diagnósticos, se pueda afirmar cuál era el porcentaje de cada sexo. El porcentaje de huesos de subadultos (menores de 20 años) es bajo, en

Figura 8: a) Ejemplo de la bioturbación de UE-80. b) Detalle de UE-80/80a. c) Vista general del cúmulo de huesos en UE-30c donde se puede observar la variedad de coloración por zonas en una misma cota.
Figure 8: a) Example of the bioturbation in UE-80. b) Detail of UE-80/80a. c) General view of the bone mound in UE-30c, where the variety of coloration by zones at the same level can be observed.

Figura 9: a) Ejemplo de paquete de huesos largos. Restos de conexiones anatómicas representativas: b) y c) columnas vertebrales; d) individuo de en posición fetal; e) articulación del pie.
Figure 9: a) Example of a bundle of long bones. Remains of representative anatomical connections: b) and c) vertebral columns; d) body in a fetal position; e) foot articulation.

torno al 5%, con mayoría de infantiles II (3-12 años). También se ha identificado la existencia de dos trepanaciones. Para abordar el estudio de este conjunto de restos óseos se han tenido en cuenta los siguientes criterios: la clasificación por edades se hizo a partir de la métrica diafisaria, el estado de fusión (BUIKSTRA & UBELAKER, 1994) y la dentición (SCHOUR & MASSLER, 1941). En cuanto a la estimación sexual, según rasgos, se efectuó en base al cráneo y el coxal (BUIKSTRA & UBELAKER, 1994), la sínfisis púbica (BROOKS & SUCHEY, 1990) y la superficie auricular del ilion (LOVEJOY et al., 1985).

Los restos de animales domésticos son muy escasos: 24 huesos de caprino y 4 de bovino, todos ellos también quemados. Además, cabe mencionar el considerable número de vértebras caudales de bovinos documentadas entre los cuerpos y ajuares. Hay que destacar la presencia de microfauna (Valenzuela, com. pers.) donde fueron documentados: huesos de ratón (*Apodemus sylvaticus*) y de lirón (*Eliomys quercinus*), además de presencia de *ferreret* (*Alytes* sp.) y aves (no determinadas). Todos aparecen en la cota baja de la UE-80 y también quemados. Este tipo de concentración de microfauna es compatible con la acumulación puntual de restos de egagrópilas.

En cuanto al ajuar cerámico (Figuras 10 y 11), se han identificado 52 vasijas, dispersas en todo el volumen de las UE-30 y UE-80, a las que habría que añadir 14 de la UE-81 (nivel de acumulación de material filtrado en las grietas de la cavidad). Por tanto, estaríamos hablando de un NMI (a partir del

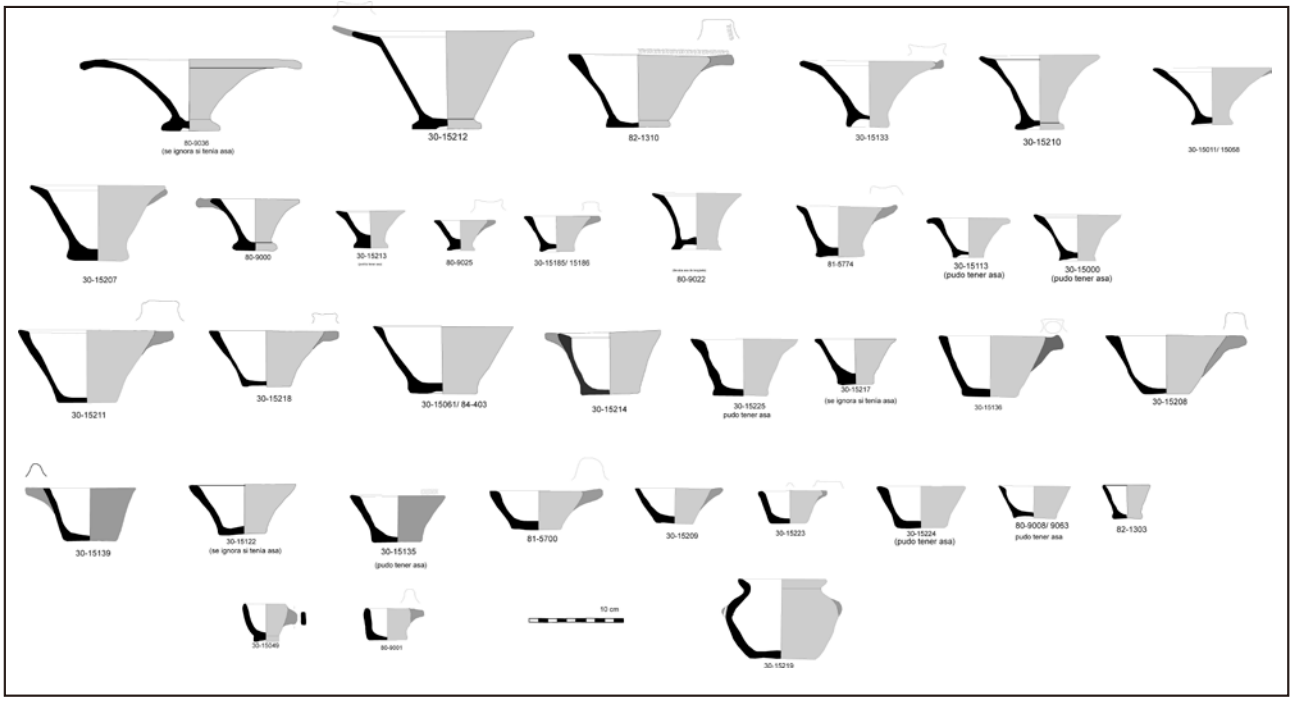


Figura 10: Perfiles del material cerámico documentado (piezas completas). Colaboración de Marta B. Noel en la elaboración de los dibujos.
Figure 10: Profiles of the documented pottery material (complete pieces). Collaboration of Marta B. Noel in the creation of the drawings.

Figura 11: Material cerámico *in situ* en UE-30b/30c.
Figure 11: *In situ* pottery material in UE-30b/30c.

número de bases identificadas) de 66 vasijas donde la mayoría son copas y, a nivel de pastas, todas con desgrasante mineral.

Los objetos (Figura 12) de cobre y bronce son 89 fragmentos de espirales, 34 de tubos, 17 de punzones (tres de ellos con mango de hueso), nueve fragmentos de torques o pulsera, dos coleteros pequeños y uno grande, tres discos, dos puntas de flecha/jabalina, un aro y, finalmente, una gran ajorca o brazalete que contiene más de la mitad del cobre presente en estos niveles. Estos objetos se documentan mayoritariamente en las UEs 80 y 30, aunque algunas piezas se localizaron en la UE-81 debido a que probablemente se filtraron en esta UE procedentes de cotas superiores. En hueso se hallaron dos punzones y cuatro botones de los tipos equilátero con doble perforación en la base, equilátero con perforación transversal y prismática.

Todo el ajuar citado aparece disperso al igual que la disposición de los cuerpos, por lo que en la mayoría de los casos no se ha podido establecer una correlación entre ajuares e individuos. Tan solo una acumulación de espirales, a modo de posible collar, pudo ponerse en relación con los restos articulados de un tronco superior de un individuo (Figura 13a). Otro caso es el de un disco con una alineación de espirales que formarían parte de un posible collar (Figura 13b). Hay que apuntar, además, que todos los objetos se encuentran altamente termoalterados (Figura 14): el metal con signos de refundición, la cerámica con deformaciones y proceso de vitrificación/ebullición, etc.

Respecto a la madera utilizada como combustible, se recogieron cuatro fragmentos de acebuche (*Olea europea* var. *sylvestris*) y uno de pino (*Pinus* sp.) en la UE-30, así como cinco de acebuche en la UE-80. La identificación se ha realizado a partir de la observación del plano transversal, longitudinal

Figura 12: Materiales metálicos (bronce y cobre) y de hueso. 1: Cova des Robiols. 2: Son Matge. 3: Cova des Drac de Cala Santanyí.
Figure 12: Metallic (bronze and copper) and bone materials. 1: Cova des Robiols. 2: Son Matge. 3: Cova des Drac de Cala Santanyí.

Figura 13: Concentraciones de metales en UE-30b: a) Restos de tronco superior de individuo con posible collar de espirales. b) Posible collar formado por espirales y disco. c) Conjunto formado por la ajorca, disco, cilindros y espirales.
Figure 13: Concentrations of metals in UE-30b: a) Remains of the upper trunk of an individual with a possible spiral necklace. b) Possible necklace made of spirals and a disc. c) Set consisting of a bracelet, disc, cylinders and spirals.

tangencial y longitudinal radial, mediante microscopio óptico de luz reflejada con 50, 100 y 400 aumentos; las observaciones se han comparado con una colección propia de referencia.

Para establecer la cronología de estos niveles, contamos en primer lugar con cinco dataciones de radiocarbono (Programa OxCal 4.4 y curva de calibración IntCal 20) realizadas en el laboratorio del *Royal Institute for Cultural Heritage* (KIK-IRPA) de Bruselas, que aparecen recogidas en la Tabla 2.

Estas dataciones requieren explicación. La muestra B-676941 puede sorprender por ser demasiado antigua, pero hay que tener en cuenta que era un tarso apenas quemado de la periferia de UE-30, donde todos los huesos estaban termoalterados. Se envió a datar con la esperanza de que no hubiera sido afectado por el fuego, pero parece más plausible la explicación de que procede realmente de un nivel inferior (navético) donde había inhumaciones sin combustión. Por tanto, la consideramos una intrusión.

Los intentos de datar huesos quemados no arrojaron resultados positivos, por lo que se procedió a datar cuatro carbones: tres de ellos caen en el intervalo 760-410 a.C. (uno de los carbones procede de *Arbutus unedo*), resultados que nos parecen los más coherentes cronológicamente hablando. La cuarta datación, realizada sobre un carbón de *Olea*, es más antigua: 900-790 a.C. y como se observa difiere considerablemente de las anteriores.

Respecto a la cronología del ajuar, la cerámica de estos niveles es extraordinariamente uniforme, dominada por copas y vasos con lengüeta, que tiene paralelos en el denominado "Horizonte Son Ferragut", correspondiente al final de la cultura talayótica, en torno al c. 700-550 a.C., tal y como ha sido

Figura 14: Fragmentos de cerámicas termoalteradas.
Figure 14: Fragments of thermally altered pottery.

propuesto por uno de nosotros (ARAMBURU, 2020).

Los ajuares metálicos no proporcionan una datación más precisa, dado que hasta ahora ninguna necrópolis de esta época había podido ser datada en detalle, aunque las semejanzas con los niveles talayóticos de Son Matge son obvias con un ajuar metálico prácticamente similar, exceptuando los colgantes tipo copa que no aparecen en la Cova des Robiols (nos referimos a materiales inéditos procedentes de la Cova del Drac de Cala Santanyí, exhumados por Antoni Matheu y Bartomeu Enseñat en el año 1967). Igual sucede con gran parte de los elementos de hueso y botones. También se ha de mencionar una de las puntas de flecha (UE-30) que, a pesar de su mal estado, recuerda a las puntas fenicias, datadas en Ibiza a mediados del siglo VI a.C. (RAMON, 1983).

Sigla	Fecha B.P.	Fecha ±2 σ a.C.	Materia	UE
B-676941	2969 ± 30	1265-1053	hueso humano	30
RICH 34642	2657 ± 26	900-790	carbón (*Olea* sp.)	30
RICH 33507	2456 ± 24	760-410	carbón (*Pinus* sp.)	30
RICH 34506	2458 ± 24	760-410	carbón (*Arbutus unedo*)	80
RICH 34644	2448 ± 24	750-410	carbón (*Olea* sp.)	80

Tabla 2: Relación de dataciones radiocarbónicas realizadas hasta el momento en la Cova des Robiols.
Table 2: List of radiocarbon datings conducted to date in Cova des Robiols.

Discusión y conclusiones

La intervención en la Cova des Robiols ha permitido documentar unos contextos funerarios talayóticos, perfectamente sellados por los niveles baleáricos/postalayóticos y de los que hasta el momento tan solo se disponía de datos ambiguos y poco sólidos.

En la fase talayótica de la zona excavada de la cueva se han identificado al menos 163 individuos (NMI) de ambos sexos. Entre ellos se han identificado 31 individuos infantiles (hasta 12 años; SCHEUER et al., 2010), aunque sus huesos representan solo el 4,08 % del total. Hay que pensar que algunos más infantiles pudieron quedar completamente calcinados/desintegrados; a pesar de ello barajamos la posibilidad de que no todos los infantiles y juveniles tenían derecho a ocupar este lugar. Se hace difícil poder afirmar si en el resto de la cavidad, por excavar, existen más individuos o si todo el conjunto funerario se había centrado en este punto de la cueva.

La cronología de los enterramientos se establece en el final de la cultura talayótica, entre c. 700-550 a.C. Aunque hay indicios de enterramientos de cronologías anteriores (Navético) no los hay del talayótico pleno (c. 1100-700 a.C.).

En cuanto al ritual, a partir de los datos expuestos, se puede afirmar que la cremación de los cuerpos se realizó *in situ* en la cavidad de una sola vez y sin que estuviera presente la cal de forma consciente, tal y como se argumentará a continuación.

Los cuerpos fueron depositados en posición decúbito supino, fuertemente encogidos, seguramente atados, algunos envueltos en pieles de bovinos, como indica la presencia de 96 vértebras caudales de estos animales que podrían atribuirse a las colas presentes en las mismas pieles (estas han aparecido dispersas y entremezcladas con los cuerpos y ajuares). En algunos pocos casos irían acompañados de objetos de uso personal de cobre/bronce: tubos y espirales que formarían parte de collares o adornos del pelo, así como punzones, puntas de flecha, discos o, en un único caso excepcional, de una ajorca o gran brazalete. La presencia de estos elementos, claramente exclusivos de pocos individuos, nos indicaría un estadio inicial de diferenciación social que sería visible a través de la materialidad de los ajuares individuales que los acompañan, pero no en el ritual.

Hay que empezar señalando que la deposición de los cuerpos no fue en un único evento, aunque sí su cremación. A partir de los restos humanos hallados y sus características deposicionales se pudo observar que no todos los cuerpos se encontraban en el mismo estado de preservación previo a la cremación. Algunos individuos (Figura 9 b-e) preservaban conexiones anatómicas (incluso después de su combustión); en cambio otros estaban formados tan solo por paquetes de huesos largos alineados (Figura 9a), lo que evidencia que se trataba de cuerpos que ya se habían desarticulado previamente.

A la misma conclusión se llega observando el patrón de las estrías longitudinales o perpendiculares de los huesos calcinados como indicadores del estado de descomposición del difunto (ETXEBERRIA, 1994). Si consideramos que se contabilizó un NMI de más de un centenar de individuos con diferentes grados de descomposición hay que entender que se trata de una deposición de cuerpos durante un periodo de tiempo largo. La presencia de egagrópilas en esta fase funeraria tan solo fue documentada en la zona más baja del paquete de huesos (UE-80). En la fase superior de los enterramientos en cal, las egagrópilas se entremezclaban con los huesos y el ajuar indicando que los cuerpos fueron quemados en su posición original, siendo estos expuestos durante un largo periodo de tiempo. Este fenómeno nos hace proponer que la inexistencia de egagrópilas en la UE-30 sea como resultado del desplazamiento de los restos humanos desde su lugar de deposición primaria para ser acumulados sobre la pira para su consecuente cremación. Este hecho habría provocado que estos restos de microfauna se precipitaran sobre el lecho de la cavidad o sobre los troncos que acabarían convirtiéndose después de la combustión en la UE-80.

Las evidentes señales de termoalteración (color, encogimiento, grietas, etc.) en la práctica totalidad de los huesos son una prueba inequívoca del uso de la cremación. Los escasos huesos no quemados aparecieron en el entorno del cúmulo, donde no fueron afectados por la combustión. Como se ha comentado anteriormente para la datación B-676941, es muy probable que estos huesos perteneciesen a la fase precedente y que, por razones postdeposicionales, posiblemente al remover los restos humanos antes de la pira final, acabaran en la UE-80. Las temperaturas que se alcanzaron rondarían y superarían los 900º según el color blanco de los huesos (VAN STRYDONCK et al., 2013) y los efectos en los objetos tanto metálicos, de refundición, o cerámicos (vitrificación de la arcilla; ver Figura 14). Gracias al análisis realizado en el laboratorio de microscopia de los *Serveis Cientificotècnics* de la UIB se observó en la ajorca un proceso de separación de la aleación del bronce, cobre y estaño ocasionado por las altas temperaturas sobre el metal.

Resulta aparentemente contradictorio afirmar que no fue un ritual en cal como sí sucedió en los niveles baleáricos/postalayóticos, cuando hemos mencionado la presencia de hasta 20 cm de cal y losas sobre y entre los huesos. Sin embargo, a diferencia de los niveles superiores de la Edad del Hierro, aquí no hay unos pocos cuerpos separados, diferenciados y cubiertos por un cúmulo de cal. En los niveles talayóticos la capa de cal cubre todos los cuerpos con posterioridad a su acumulación.

Barajamos dos hipótesis para explicar este evento. La primera es que durante la época talayótica los cuerpos no se quemaban (como sucedía en Can Sec) pero al comenzar la cultura baleárica/postalayótica se decidió cerrar los enterramientos anteriores haciendo un gran ritual en cal. En este se depositaba una gran cantidad de leña amontonando sobre ella los cuerpos y cubriéndolo todo con una capa de piedras calizas.

La segunda hipótesis, que consideramos la más ajustada a los datos, es que los baleáricos/postalayóticos simplemente prendieron fuego a los restos humanos talayóticos depositados durante decenas de años. Estos los amontonaron, conjuntamente con los ajuares, sobre una pira de leña y la combustión del conjunto provocaría el derrumbe paulatino de la bóveda. El efecto horno provocado por dicha combustión dentro de la cueva generaría, por sí misma, unas dinámicas de corrientes de aire que retroalimentarían e incrementarían exponencialmente la potencia calorífica.

Durante este proceso no solo fueron afectados los ajuares y los propios difuntos, calcinándose estos, sino también la propia cavidad. La naturaleza calcárea de la roca y la exposición de su bóveda al impacto continuo de las llamas y altas temperaturas tuvieron como consecuencia dos procesos simultáneos (Figura 15): por una parte, la calcinación del techo, convirtiendo la propia piedra en cal y, por otra, su fragmentación y caída en forma de láminas/escamas, tanto finas como de cierta envergadura, sobre el fuego. Esto fue generando una capa de cal, más o menos pura, entremezclada con laminitas medio deshechas que se recocían sobre las brasas. Esta primera capa de cal y laminitas iría filtrándose en las zonas más altas del cúmulo de huesos, entremezclándose con ellos. Los cambios térmicos y la absorción del calor por la cúpula implicaron el agrietamiento y el desprendimiento de lajas de mayor calibre, hasta colapsos de cierta envergadura en algunos puntos (Figura 6). Los procesos postdeposicionales, como la presión o filtraciones de agua posteriores, dieron como resultado la cimentación de la capa de cal.

Ambas hipótesis no descartan que durante la fase talayótica ya se hubieran realizado también fuegos rituales. Sería interesante poder testar ambos casos reproduciendo el ritual, aunque no ha sido posible hasta el momento.

Por tanto, el ritual de la fase talayótica de la Cova des Robiols se inscribiría en las inhumaciones con o sin fuego ritual que observamos en otras cuevas o abrigos como Can Sec, Son Matge o Coval

Figura 15: Fotogramas extraídos de un vídeo de un proceso de incendio de cavidad para su ampliación volumétrica donde puede observarse el laminamiento/exfoliación del techo y la curvatura resultante tan característica de la bóveda. Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=tB3s-sAsI2g&t=914s

Figure 15: Frames extracted from a video of a cavity fire process for volumetric expansion, showing the lamination/exfoliation of the ceiling and the resulting characteristic curvature of the vault. Source: https://www.youtube.com/watch?v=tB3s-sAsI2g&t=914s

d'en Pep Rave. En Menorca, el paralelo más cercano sería la Cova del Pas datada entre el c. 1200 y el c. 800 a.C. (FULLOLA et al., 2007), donde, gracias al excepcional estado de preservación de la cavidad, se pudo documentar que los cuerpos fueron fuertemente atados con cuerdas, en posición fetal y envueltos por un sudario realizado, en algunos casos, por una piel de bovino que conservaría la cola (vértebras caudales), como en el caso de la Cova des Robiols.

Asistimos, dentro de unas mismas características generales (inhumaciones colectivas en cueva o abrigo con alguna diferenciación social de rango identificada por la presencia de objetos, como los colgantes, discos o la ajorca, de carácter individual), a un proceso evolutivo del ritual funerario entre el final del periodo navético y a lo largo del talayótico, con una introducción paulatina del fuego. Esto nos permite proponer que estamos ante un posible concepto de amortización, purificación o sellado del espacio funerario, coincidente con la adopción de un nuevo rito (los enterramientos en cal) en la fase final del talayótico.

En cuanto a los ajuares, vemos innovaciones (como la evolución de los colgantes tipo copa, con un ejemplo primitivo en la Cova des Càrritx), pero también pervivencias, como los discos (Cova des Càrritx y Son Matge) y espirales (Cova des Càrritx y son Matge), y en hueso los botones y láminas de varias tipologías (Coval d'en Pep Rave y Son Matge), las cerámicas de perfil en "S" (Cova des Càrritx, Son Matge, Coval d'en Pep Rave y un solo caso en la Cova des Robiols).

Respecto a la inexistencia de necrópolis talayóticas, este fenómeno responde más a un problema de método que a un problema de falta de yacimientos, debido a que en muchas necrópolis existe una superposición de niveles de cremaciones con cal. La excavación de todos como si se trataran de un mismo periodo implicó entremezclar sus contextos, sobre todo a nivel de ajuares metálicos. Por este motivo en las excavaciones antiguas no se identificaron niveles de estas cronologías, pero sí objetos que ahora mismo podemos enmarcar claramente en estos contextos.

En todos los yacimientos ya citados, incluido el caso de la Cova des Robiols, destaca la total ausencia de elementos de hierro. En los yacimientos talayóticos no funerarios sucede lo mismo, con alguna excepción que habría que evaluar con detalle para descartar que no se trate de una intrusión. Por ello atribuir el concepto cronológico de Hierro I al periodo talayótico solo tiene explicación si nos referimos al contexto europeo, encajando mejor la cultura talayótica en las características de las sociedades del Bronce Final.

La utilización del fuego a gran escala como forma de purificación de las necrópolis de la cultura precedente por parte de los baleáricos/postalayóticos, nos remite a la amortización de los turriformes y otros edificios en poblados mediante su destrucción por fuego, hecho constatado en todos los que se han excavado últimamente: Cas Canar, Son Fred, Son Fornés, Ses Païsses, Can Sec 1 y 2 y recientemente en el Serral de les Abelles, en este caso con amortización de una espada de bronce (ROSSELLÓ & CAMPS, 1971, SUREDA et al., 2021, DEYÀ & GALERA, 2023). ¿Podría vincularse este fenómeno con algún tipo de purificación simbólica debido a un cambio cultural que surge con el nacimiento del periodo baleárico? En cualquier caso, la Cova des Robiols ha proporcionado luz al mundo funerario del talayótico y al nacimiento del rito de los enterramientos en cal, tan característicos de la fase final de la prehistoria mallorquina y menorquina.

Agradecimientos

Agradecer al propietario Antoni Font y a todos los colaboradores: Marta Blanco, Marc Mas, Marta Quetglas, María Ortiz, Amalia Pérez-Juez, Mark Van Strydonck, José Antonio Martínez, Toni Gaya, Gabriel Pascual, Lara Oliver, Josep Juárez, Ana Victoria, Mª de Lluc Far, Pere Rullan, Alex Valenzuela, Xavier Busquets, Sebastia Borras, Antònia Amengual, Natalia Elisa, Joan Mateu, Jaume Balaguer y Manolo Muñoz.

En memoria de Àngel Ginés, gran maestro, científico y persona.

Bibliografia

ARAMBURU, J. (1998): *El patrón de asentamiento de la cultura talayótica de Mallorca*. El Tall. Palma.

ARAMBURU, J. (2020): *Ensayo de periodización de la Prehistoria de Mallorca, I, II, III y IV*.
https://www.academia.edu/90982632/Periodizaci%C3%93n_de_la_Prehistoria_de_Mallorca_I_Revision_2022
https://www.academia.edu/91048547/Periodizacion_de_la_prehistoria_de_Mallorca_II_Revision_2022
https://www.academia.edu/91267059/Ensayo_de_Periodizaci%C3%93n_de_la_Prehistoria_de_Mallorca_III
https://www.academia.edu/91267149/Ensayo_de_Periodizaci%C3%93n_de_la_Prehistoria_de_Mallorca_IV

ARAMBURU, J. (2023): *El patrón de asentamiento de la cultura talayótica de Mallorca. Una revisión 25 años después.*
https://www.academia.edu/106471958/El_patr%C3%B3n_de_asentamiento_de_la_cultura_talay%C3%B3tica_de_Mallorca

ARAMBURU, J. & MARTÍNEZ, J.A. (2014): *Can Sec (Alaró, Mallorca) La covacha.*
https://www.academia.edu/20196187/Can_Sec_Alar%C3%B3_Mallorca_La_covacha

ARAMBURU, J. & MARTÍNEZ, J.A. (2015): *La Cova de Son Pellisser (Calvià, Mallorca).*
https://www.academia.edu/37232671/Son_Pellisser_Sala_2_pdf
https://www.academia.edu/20196879/La_cova_de_Son_Pellisser_Calvi%C3%A0_Mallorca_Sala_1_niveles_inferiores_y_3
https://www.academia.edu/20196930/La_cova_de_Son_Pellisser_Mallorca_Sala_1_Estudio_antropol%C3%B3gico_II_Patolog%C3%ADas_marcas_de_estr%C3%A9s_y_variaciones_discont%C3%ADnuas
https://www.academia.edu/20196845/La_cova_de_Son_Pellisser_Calvi%C3%A0_Mallorca_estudio_antropol%C3%B3gico_I_Cuantificaci%C3%B3n
https://www.academia.edu/31351909/La_cova_de_Son_Pellisser_Calvi%C3%A0_Mallorca_sala_1_Los_ajuares
https://www.academia.edu/20196904/La_cova_de_Son_Pellisser_Calvi%C3%A0_Mallorca_Sala_1_El_ritual_funerario_con_cal

BALAGUER, P. (2005): *Aproximación cronotipológica a la materialidad del postalayótico mallorquín: El ajuar funerario no cerámico*. Trabajo de investigación de tercer ciclo. Universitat Autònoma de Barcelona.
http://www.recercat.cat/handle/2072/4334

BROOKS, S. & SUCHEY, J. (1990): Skeletal age determination based on the Os Pubis: a comparison of the Acsadi-Nemeskéri and Suchey-Brooks methods. *Human Evolution*, 5: 227-238.

BUIKSTRA, J. & UBELAKER, D. (1994): Standars for Data collection from human skeletal remains. arkansas archeological survey. *Research Series*, 44. Fayetevile. Arkansas.

CALVO, M. & GUERRERO, V. (2011): La cultura talayòtica. In: CALVO, M. & AGUARELES, A. (Coord.) *Calvià Patrimonio Cultural*. Fundación Calvià. 89-112.

COLL, J. (1991): Seriación cultural de los materiales del Coval d'en Pep Rave (Sóller, Mallorca) Elementos calcolíticos y talayóticos. *Trabajos de Prehistoria*, 48: 75-101.

DEYÀ, J. (2016): Coves forn? Noves reflexions entorn al ritu de la calç a Mallorca. *VII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears*, Maó. 411-420.

DEYÀ, J. (2019): Resultats preliminar de la intervenció en enterraments en calç a la cova de s'Alova (Sóller). *VIII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears*, Alcúdia. 179-189.

DEYÀ, J. & HERNÁNDEZ, J. (2024): *Les arrels de Puigpunyent. Un viatge per la seva prehistòria*. Ajuntament de Puigpunyent.

DEYÀ, J. & HERNÁNDEZ, J; RULLÁN, P. (2017): Recerca i contribució al patrimoni arqueològic de Puigpunyent. *IV Jornades d'Estudis Locals de Puigpunyent.* Ajuntament de Puigpunyent. 29-39.

DEYÀ, J. & GALERA, P. (2023): El talayot del Serral de les Abelles (Puigpunyent). 60 años después. *IX Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears*. Pendiente edición.

ENSEÑAT, B. (1973): Coval d'en Pep Rave. *XII Congreso Nacional de Arqueología*, Zaragoza. 281-282.
ETXEBARRIA, F. (1994): Aspectos macroscópicos del hueso sometido al fuego. Revisión de las cremaciones descritas en el País Vasco desde la arqueología. *Munibe Antropologia - Arkeologia*, 46: 111-116.
FULLOLA, J.M.; GUERRERO, V.; PETIT, M.A; CALVO, M; MALGOSA, A.; ARMENTANO, N.; ARNAU, P.; CHO, S. ESTEVE, X.; FADRIQUE, T.; GALTÉS, I.; GARCIA, E.; FORNÉS, J.; JORDANA, X.; PEDRO, M. RIERA, J.; SINTES, E. & ZUBILLAGA, M. (2007): La Cova del Pas (Ferreries, Menorca). Un jaciment cabdal en la prehistòria de les Balears. *Unicum,* 7: 10-20.
GUERRERO, V.; ENSENYAT, J.A.; CALVO, M. & ORVAY, J. (2005): El abrigo rocoso de Son Gallard-Son Marroig. Nuevas aportaciones treinta y siete años después. *Mayurqa*, 30: 81-140.
LOVEJOY, C.; MEINDL, R.; PRYZBECK, T. & MENSFORTH, R. (1985): Chronological metamorphosis of the auricular surface of the ilium: a new method for the determination of adult skelewtal age at death. *American Journal of Physical Anthropology,* 68: 15-28.
LULL, V.; MICÓ, R.; PALOMAR, B.; RIHUETE, C. & RISCH, R. (2008): *Cerámica talayótica. La producción alfarera mallorquina entre ca. 900 y 550 antes de nuestra era*. Col·lecció d'Arqueoecologia Social Mediterrània, núm. 1, edicions Bellaterra, Barcelona.
MINGUILLÓN, R. & GARCÍA, P. (2015): Coves des Robiols. Cavidades de sa Roteta (Puigpunyent, Mallorca). *Gota a gota*, 9: 67-73.
RAMON, J. (1983): Puntas de flecha de bronce fenicio-púnicas halladas en Ibiza: algunos materiales inéditos. *Homenaje al profesor Martín Almagro Basch*, vol. 2, Madrid. 309-323.
ROSSELLÓ, B. & CAMPS, J. (1971): Excavaciones en los talayots de Son Serralta (Puigpunyent, Mallorca). *Noticiario Arqueológico Hispánico*, 15: 11-36.
SALVÀ, B. (2013): *Arqueometal·lúrgia com a reflex de l'estratificació social a les Illes Balears*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona. Barcelona. http://hdl.handle.net/2445/53887
SALVÀ, B. & CALVO, M. (2007): Noves contribucions a l'estudi del Coval d'en Pep Rave. *I Jornades d'Estudis Locals a Sóller*. Sóller, 2007. 113-126.
SCHOUR, I. & MASSLER, M. (1941): The development of the human dentition. *Journal of American Dental Association*. 28: 1153-1160.
SCHEUER, L SCHEUER, l.; BLACK, S. & SCHAEFER, M. (2010): *Juvenile Osteology: A Laboratory and Field Manual*. Academic Press.
SUREDA, P., DEYÀ, J.; GALERA, P.; MURILLO-BARROSO, M. & SALVÀ-SIMONET, B. (2021): Emblematic objects for societies in transition. An archaeological and archaeometric study of the sword of Serral de ses Abelles (Puigpunyent, Mallorca). *Journal of Archaeological Science: Reports,* 40 (Part A): 103-201.
TARRADELL, M. & HERNÁNDEZ-GASCH, J. (1998): Son Real. Necrópolis talayótica de la edad del hierro. Catálogo e inventarios. *Arqueomediterrània*, 3 (1). Treballs de l'Àrea d'Arqueologia de la Universitat de Barcelona. Barcelona.
VAN STRYDONCK, M. (2020): *45 años de investigación físico-química sobre los enterramientos en cal de Menorca y Mallorca. 1975-2020*. Consell Insular de Menorca.
VAN STRYDONCK, M.; BOUDIN,M.; ERVYNCK,A.; ORVAY, J & BORMS, H. (2005): Spatial and temporal variation of dietary habits during the prehistory of the Balearic Islands as reflected by ^{14}C, $\delta^{15}N$ and $\delta^{13}C$ analyses on human and animal bones. *Mayurqa 30*: 523-542.
VAN STRYDONCK, M.; DECQ, L.; VAN DEN BRANDE, T; BOUDIN, M.; RAMIS, D.; BORMS, H. & DE MULDER, G. (2013): The Protohistoric "Quicklime Burials" from the Balearic Islands: Cremation or Inhumation. *International Journal of Osteoarcheology.* 106.
VAN STRYDONCK, M.; HAYEN, R.; BOUDIN, M.; VAN DEN BRANDE, T.; SALAS, M.; RAMIS, D.; BORMS, H. & DE MULDER, G. (2015): ^{14}C Dating of the lime burial of Cova de Na Dent (Mallorca, Spain): optimization of the sample preparation and limitations of the method, *Radiocarbon*, 57: 161–171.
VAN STRYDONCK, M.; DE MULDER, G.; ANGLADA. M. & FONTAINE, L. (2017): Els Enterraments en calç de Sa Cova De Na Prior (Barranc de Binigaus, Menorca), *VII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears*, Menorca 2016, Maó. 65-74.
WALDREN, W. (1982): Balearic Prehistoric Ecology and Culture. The Excavation of Certain Caves, Rock Shelters and Settlements. *BAR International Series 149*. Oxford. Archaeopress.
WALDREN, W. (1998): The Beaker Culture of the Balearic Islands, *BAR, International Series 709*, Western Mediterranean Series 1, Oxford.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Aproximació al catàleg de briòfits i traqueòfits de la Cova de sa Gleda (Manacor, Mallorca)

Pere Miquel MIR-ROSSELLÓ [1]

[1] Grup d'Ecologia Interdisciplinària, Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca. Email: peremiquelmir@gmail.com

Abstract

In this study a floristic inventory of the Cova de sa Gleda, a Special Area of Conservation (SAC) within the Natura 2000 Network, is presented. Two visits were conducted during the year 2024, and the species of bryophytes and tracheophytes present were inventoried. In total, 46 plant species were identified, with a notable proportion of bryophytes and pteridophytes (48% of the total). The vegetation generally exhibits a strong nitrophilous character, although in some areas typically cave-dwelling communities can be observed. Some of the species present, such as *Asplenium sagittatum*, *Lophocolea heterophylla*, *Sibthorpia africana*, and *Thamnobryum alopecurum*, are particularly noteworthy due to their rarity outside the Serra de Tramuntana. This study, in addition to being the first taxonomic list for Cova de sa Gleda, is the continuation of a series of previous works in Balearic caves that are essential for understanding the biota and ecology of these unique habitats.

Resum

En aquest estudi es presenta un inventari florístic de la Cova de sa Gleda, una Zona d'Especial Conservació (ZEC) dins la Xarxa Natura 2000. Es realitzaren dues visites durant l'any 2024 i s'inventariaren les espècies de briòfits i traqueòfits presents. En total, s'identificaren 46 espècies de plantes, destacant una elevada proporció de briòfits i pteridòfits (48 % del total). La vegetació presenta generalment un elevat caràcter nitròfil, tot i que a algunes zones es poden apreciar comunitats típicament cavernícoles. Algunes de les espècies presents, com *Asplenium sagittatum*, *Lophocolea heterophylla*, *Sibthorpia africana* o *Thamnobryum alopecurum*, són interessants principalment per la seva raresa fora de la Serra de Tramuntana. El present estudi, a més de ser un primer llistat taxonòmic a la Cova de sa Gleda, és la continuació de tot un seguit de treballs previs a cavitats balears essencials per entendre la biota i ecologia d'aquests hàbitats tan particulars.

Mir-Rosselló, P. M. (2024): Aproximació al catàleg de briòfits i traqueòfits de la Cova de sa Gleda (Manacor, Mallorca).
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 83-90. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 13 setembre 2024; **Revisat:** 19 setembre 2024; **Acceptat:** 23 setembre 2024.
Publicat online: 1 octubre 2024.

Introducció

Les comunitats fotòtrofes presents a coves i avencs són relativament pobres i limitades, a més de generalment poc estudiades i conegudes. Pel que fa a la part botànica, poques angiospermes i gimnospermes aconsegueixen viure a entorns tan foscos, i poc més enllà de les entrades solen ser substituïdes quasi per complet per criptògames com els briòfits, pteridòfits, líquens o cianobacteris, millor adaptats a aquestes condicions (FIOL, 1995; MULEC, 2018; PUGLISI et al., 2018). De fet, aquests grups se solen veure afavorits, com a mínim a nivell de competitivitat, per les condicions microclimàtiques d'humitat i ombra que s'assoleixen dins les cavitats. Actualment, les plantes cavernícoles s'enfronten a amenaces derivades de l'activitat humana, com la nitrificació o l'activitat turística (REN et al., 2021). Per tant, conèixer les comunitats fotòtrofes que ocupen hàbitats com les entrades de coves i avencs és essencial per entendre el funcionament dels ecosistemes presents i establir mesures de gestió i conservació adequades.

Tot i que la flora de les Illes Balears es considera ben coneguda, els estudis on es presenten dades botàniques a cavitats no són molt comuns, ja que es troben limitats a treballs amb dades disperses (KNOCHE, 1921-1923; KOPPE, 1965; SLOOVER, 1967; LLORENS,1972; DUNK, 1977; SÁEZ et al., 2006; PERICÀS et al., 2009), alguns treballs més específics (MAHEU, 1912; ROSSELLÓ & GINÉS, 1980; GINÉS, 1983; GRUP ESPELEOLÒGIC EST, 1986; GINÉS & GINÉS, 1992; GINARD et al., 2010; BOVER et al., 2011; MANZANO et al., 2014) i dues revisions (FIOL, 1995; ROSSELLÓ & PERICÀS, 2011). Tot i així, quasi totes les espècies de falgueres i com a mínim el 25 % de les espècies de briòfits presents a les Balears es troben dins cavitats (ROSSELLÓ & PERICÀS, 2011), essent algunes d'aquestes espècies exclusives d'aquests hàbitats. A diferència dels traqueòfits, els

briòfits requereixen d'un major nombre d'estudis a les Illes Balears, especialment fora de la Serra de Tramuntana, on es concentren la majoria de dades i cites bibliogràfiques. Un treball molt destacable, tant pel que fa al coneixement de la biota de coves mallorquines com pel que fa a la briologia de les Illes, és el de ROSSELLÓ & GINÉS (1980). En aquest treball es recopilaren dades de 36 taxons de briòfits a 23 coves i avencs arreu de l'illa de Mallorca. Entre els briòfits inventariats, destaca la presència d'espècies rares i amenaçades com *Orthothecium intricatum*, *Rhizomnium punctatum* o *Taxiphyllum wisgrillii*, pràcticament exclusives d'aquests hàbitats a nivell local (ROSSELLÓ & PERICÀS, 2011; SÁEZ, 2020). Aquest és un clar exemple de la importància de realitzar més treballs botànics a les cavitats balears, per tal de conèixer millor les espècies que hi són presents i poder realitzar mesures de gestió adequades.

El present treball és una aproximació a les espècies de plantes presents a la Cova de sa Gleda. Es presenta un inventari dels diferents tàxons de briòfits i traqueòfits, seguit de comentaris sobre les comunitats vegetals destacables a la cova i algunes espècies d'interès.

Material i mètodes

La Cova de sa Gleda es troba situada dins la possessió de Son Josep, Manacor (39°29'54"N 3°16'33"E; Datum ETRS89), considerada una Zona d'Especial Conservació (ZEC) dins la Xarxa Natura 2000 (ES5310054). Es tracta d'una cavitat càrstica formada dins materials del miocè superior, amb una boca de 30 m x 17 m i una sala de 80 m x 40 m com a dimensions màximes, i 35,5 m de fondària (FORNÓS et al., 1989; Figura 1). A la zona central de la sala s'acumulen grans blocs de roca, que formen un pendent suau en direcció a un llac que ocupa la zona Est de la sala. Dins la sala destaca un bosc de figueres (*Ficus carica*) que ocupa gran part de l'espai i dificulta l'accés a certes zones (Figura 2). Les particularitats de la cova, i especialment l'hàbitat aquàtic que representa el llac, permeten la presència de diverses espècies d'invertebrats d'especial interès (BAQUERO et al., 2007). Tot i la rellevància de les diferents cavitats i formacions subaquàtiques de sa Gleda (GRÀCIA et al., 2007, 2020), el present estudi se centrarà en la zona corresponent a l'accés terrestre, concretament la sala principal i algunes de les parets i zones més fosques.

Es realitzaren dues visites a la zona d'estudi, als mesos de febrer i maig de 2024. A cada prospecció s'anotaren els diferents tàxons de briòfits i traqueòfits presents a la cova, incloent-hi la part més externa. Quan una identificació totalment fiable al camp no era possible, es prengué mostra de la planta per a la seva identificació al laboratori. La identificació de briòfits es va realitzar amb les claus de CASAS et al. (2009) per a hepàtiques i GUERRA et al. (2006, 2010, 2014, 2018) i BRUGUÉS & GUERRA (2015) per a molses, i la de traqueòfits amb la clau de GIL & LLORENS (2017). La taxonomia segueix el criteri de HODGETTS et al. (2020) per als briòfits i de *Plants of the World Online* (https://powo.science.kew.org/) per als traqueòfits. Finalment, es va elaborar un llistat de les espècies de plantes presents a la Cova de sa Gleda, presentant els tàxons per grups de plantes (hepàtiques, molses, pteridòfits i angiospermes), i dins cada grup ordenats alfabèticament per famílies.

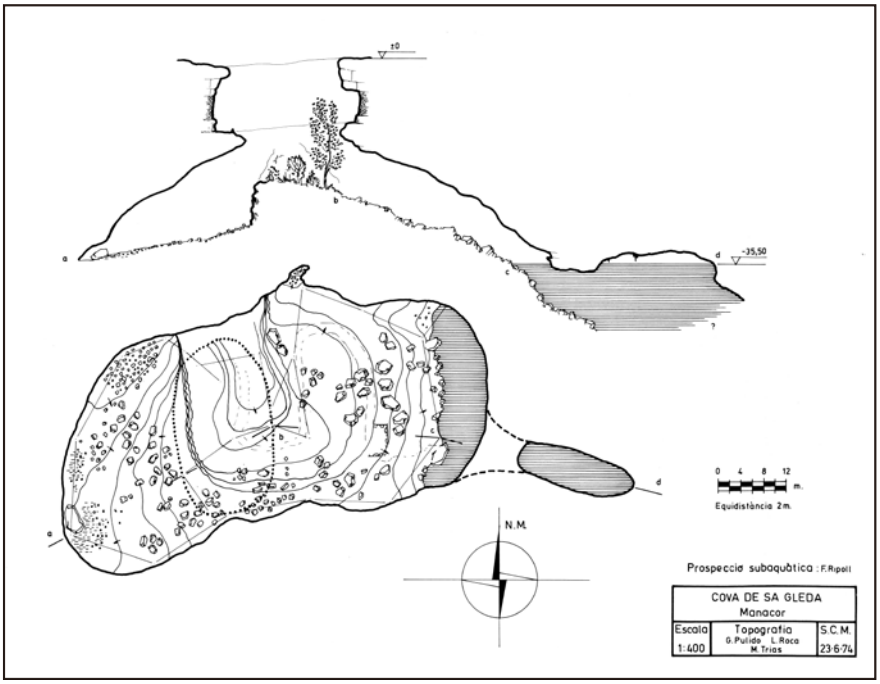


Figura 1: Topografia de la sala d'entrada de la Cova de sa Gleda. (Font: FORNÓS et al., 1989).
Figure 1: Topography of the entrance chamber to Cova de sa Gleda. (Source: FORNÓS et al., 1989).

BRIÒFITS
Hepàtiques
LOPHOCOLEACEAE *Lophocolea heterophylla* subsp. *heterophylla* (Schrad.) Dumort.
LUNULARIACEAE *Lunularia cruciata* subsp. *cruciata* (L.) Dumort. ex. Lindb.
RADULACEAE *Radula complanata* (L.) Dumort.
Molses
BRACHYTHECIACEAE *Brachythecium rutabulum* var. *rutabulum* (Hedw.) Schimp. *Kindbergia praelonga* (Hedw.) Ochyra *Microeurhynchium pumilum* (Wilson) Ignatov & Vanderp. *Oxyrrhynchium hians* (Hedw.) Loeske *Rhynchostegiella tenella* (Dicks.) Limpr. *Scorpiurium circinatum* (Bruch) M.Fleisch. & Loeske
BRYACEAE *Ptychostomum capillare* (Hedw.) Holyoak & N.Pedersen
FISSIDENTACEAE *Fissidens taxifolius* Hedw. *Fissidens viridulus* (Sw.) Wahlenb.
NECKERACEAE *Thamnobryum alopecurum* (Hedw.) Gangulee
POTTIACEAE *Eucladium verticillatum* (With.) Bruch & Schimp. *Tortella flavovirens* var. *flavovirens* (Bruch) Broth. *Tortella squarrosa* (Brid.) Limpr. *Tortula marginata* (Bruch & Schimp.) Spruce *Trichostomum brachydontium* Bruch

Taula 1: Llistat d'espècies de briòfits de la Cova de sa Gleda.
Table 1: Checklist of bryophyte species of Cova de sa Gleda.

Llistat taxonòmic de les espècies de plantes presents a la Cova de sa Gleda

En total, s'identificaren 46 tàxons de plantes a la Cova de sa Gleda, essent 18 briòfits (39,1 %; Taula 1) i 28 traqueòfits (60,9 %; Taula 2). Pel que fa als briòfits, es divideixen en 3 hepàtiques pertanyents a 3 famílies (16,7 %) i 15 molses pertanyents a 5 famílies (83,3 %). Els traqueòfits es divideixen en 4 pteridòfits pertanyents a 3 famílies (8,7 %) i 24 angiospermes pertanyents a 20 famílies (52,2 %). Cal destacar l'elevat percentatge de criptògames (briòfits i pteridòfits, 47,8 %) presents a la zona d'estudi, on es troben en el seu òptim. De fet, la majoria d'espècies presenten un cert caràcter umbròfil. A més, alguns dels tàxons són característics de comunitats vegetals típiques de cavitats, però també n'hi ha que presenten un cert caràcter nitròfil. A continuació es descriu aquest tipus de vegetació amb més detall.

La vegetació de la Cova de sa Gleda i espècies d'interès

Probablement la formació més notòria de la cavitat sigui el bosc de figueres (*Ficus carica*) que ocupa la major part de la sala i que afecta la resta de la biota de la cova (Figura 2). Primer, a partir de la primavera i fins a finals de l'estiu els nombrosos peus de *F. carica* condicionen la lluminositat de la cova, donat que és l'època en què presenten fulles. Així, durant l'època càlida la cova es manté fosca i fresca. D'altra banda, existeix un efecte biòtic pel que fa a la matèria orgànica produïda per les figueres, en forma de fulles caduques i d'escorça i fusta en descomposició. A més, tant l'escorça com la fusta de *F. carica* és un substrat important per diferents espècies de briòfits. A la cova, els briòfits *Rhynchostegiella tenella* (molsa pleurocàrpica) i *Radula complanata* (hepàtica foliosa) s'han trobat creixent sobre l'escorça de *F. carica*. Tot i que generalment aquest arbre no és adequat com a foròfit, a alguns avencs i torrents, molt ombrívols i humits, s'ha vist portant aquestes i altres espècies de briòfits

Figura 2: Aspecte de la sala principal de la Cova de sa Gleda durant l'hivern, destacant la formació de *Ficus carica* L. sense fulles. (Foto: Vicenç Pla).
Figure 2: View of the main chamber of Cova de sa Gleda during winter, highlighting the leafless *Ficus carica* L. formation. (Photo: Vicenç Pla).

(MIR-ROSSELLÓ, observació personal). A més, sobre les restes de fusta en descomposició s'ha trobat l'hepàtica foliosa *Lophocolea heterophylla* (Figura 3). Aquesta espècie es considera *Quasi Amenaçada* a les Illes Balears (SÁEZ, 2020). El nucli poblacional de la Cova de sa Gleda, a més de suposar un punt interessant de cara a la conservació de l'espècie, també és la segona cita mallorquina fora de la Serra de Tramuntana, després d'una cita per SÁEZ et al. (2006) a un alzinar de Son Servera.

A més de l'aportació de matèria orgànica d'origen vegetal, la principal font de nitrogen orgànic té el seu origen en la població de coloms que habita la cova. Així, dins la cova cal destacar l'elevada proporció de vegetació nitròfila (*Parietarietea*; LLORENS et al., 2021). Una de les plantes més comunes al sòl i a les parets de la cova, indicadora d'aquest tipus de vegetació, és *Parietaria judaica*, acompanyada de la falguera *Polypodium cambricum* i l'hepàtica *Lunularia cruciata*. A més, cal destacar la molsa *Scorpiurium circinatum*, que tot i no considerar-se estrictament nitròfila, sembla veure's beneficiada per la matèria orgànica, el nitrogen i la foscor, de manera que és l'espècie amb major cobertura al sòl i a les roques de la cova estudiada. També s'ha pogut observar un niu d'au (no identificada) fabricat amb fragments de *S. circinatum* dins una perforació a una de les parets (Figura 4), incrementant el seu valor ecològic dins la cova. Tot i que l'ús de briòfits per a la confecció de nius d'ocells està ben estudiat (e.g., MOYLE, 1976; RYDGREN et al., 2023), aquesta sembla ser la primera vegada que es documenta un niu totalment confeccionat amb briòfits a les Illes Balears.

A les zones més fosques, especialment a les parets més verticals i humides, les comunitats nitròfiles deixen pas a comunitats més típicament cavernícoles i similars a altres cavitats mallorquines (ROSSELLÓ & GINÉS, 1980; ROSSELLÓ & PERICÀS, 2011). Així, destaquen les falgueres *Asplenium sagittatum* (Figura 5), relativament rara fora de la Serra de Tramuntana però amb diversos peus en bon estat a la Cova de sa Gleda, i *Adiantum capillus-veneris* a les parets més humides. Aquestes falgueres es troben acompanyades per diferents espècies de briòfits com *Fissidens viridulus* o *L. cruciata*, a més de cianofícies. El caràcter cavernícola de la vegetació de la cova ve indicat, a més de per la presència d'*A. sagittatum*, per diferents redols de *Thamnobryum alopecurum* (Figura 6). Aquesta molsa pleurocàrpica, d'aspecte dendroide, és una de les espècies més comunes a les cavitats mallorquines (ROSSELLÓ & GINÉS, 1980). A Mallorca, *T. alopecurum* només es coneix fora de la Serra de Tramuntana a la Cova de sa Gleda, a

TRAQUEÒFITS
Pteridòfits
ASPLENIACEAE *Asplenium sagittatum* (DC.) Bange *Asplenium trichomanes* subsp. *quadrivalens* D.E.Mey.
PTERIDACEAE *Adiantum capillus-veneris* L.
SELAGINELLACEAE *Selaginella denticulata* (L.) Spring
Angiospermes
ANACARDIACEAE *Pistacia lentiscus* L.
APIACEAE *Smyrnium olusatrum* L.
ARACEAE *Arisarum vulgare* O.Targ.Tozz. *Arum italicum* Mill.
ASPARAGACEAE *Asparagus acutifolius* L.
ASTERACEAE *Sonchus oleraceus* L.
CRASSULACEAE *Umbilicus horizontalis* (Guss.) DC.
DIOSCOREACEAE *Dioscorea communis* (L.) Caddick & Wilkin
GERANIACEAE *Geranium purpureum* Vill.
MORACEAE *Ficus carica* L.
OLEACEAE *Olea europaea* subsp. *europaea* L.
OXALIDACEAE *Oxalis pes-caprae* L.
PLANTAGINACEAE *Sibthorpia africana* L.
POACEAE *Melica minuta* L. *Oloptum milliaceum* (L.) Röser & Hamasha
RANUNCULACEAE *Clematis cirrhosa* L.
RHAMNACEAE *Rhamnus alaternus* L.
ROSACEAE *Rubus ulmifolius* Schott
RUBIACEAE *Galium aparine* subsp. *aparine* L. *Rubia peregrina* subsp. *longifolia* (Poir.) O.Bolòs
SMILACACEAE *Smilax aspera* L.
SOLANACEAE *Solanum nigrum* L.
URTICACEAE *Parietaria judaica* subsp. *judaica* L. *Urtica membranacea* Poir. ex Savigny

Taula 2: Llistat d'espècies de traqueòfits de la Cova de sa Gleda.
Table 2: Checklist of tracheophyte species of Cova de sa Gleda.

Figura 3: *Lophocolea heterophylla* subsp. *heterophylla* (Schrad.) Dumort. creixent sobre fusta en descomposició de *F. carica*. (Foto: Pere M. Mir-Rosselló).
Figure 3: *Lophocolea heterophylla* subsp. *heterophylla* (Schrad.) Dumort. growing on decaying wood of *F. carica*. (Photo: Pere M. Mir-Rosselló).

Figura 4: Niu d'ocell (no identificat) confeccionat amb fragments de *Scorpiurium circinatum* (Bruch) M.Fleisch. & Loeske. (Foto: Vicenç Pla).
Figure 4: Bird's nest (unidentified) made with fragments of *Scorpiurium circinatum* (Bruch) M. Fleisch. & Loeske. (Photo: Vicenç Pla).

l'Avenc de sa Paret (ROSSELLÓ & GINÉS, 1980) i al Barranc de Son Cifre (MIR-ROSSELLÓ, dades inèdites).

Cal destacar que les espècies relativament rares fora de la Serra de Tramuntana però presents a la Cova de sa Gleda no es limiten a les criptògames. L'angiosperma *Sibthorpia africana*, endemisme balear, també habita les parets de la cova, presentant principalment un creixement lianoide (Figura 7). Tot i no considerar-se una espècie amenaçada ni particularment escassa, la seva restricció geogràfica atorga un valor afegit a la diversitat existent a la cova que ens ocupa. Per tant, aquesta presència d'espècies rares i vulnerables, així com d'endemismes, fa que la Cova de sa Gleda sigui un espai d'interès conservacionista a nivell botànic, més enllà del seu interès espeleològic i faunístic prèviament documentat (FORNÓS et al., 1989; BAQUERO et al., 2007; GRÀCIA et al., 2007). A més, també seria interessant estudiar altres organismes presents a la cavitat però que no han estat objecte d'aquest estudi, com puguin ser algues, cianobacteris o líquens. Aquests darrers fotòtrofs arriben

Figura 5: *Asplenium sagittatum* (DC.) Bange. (Foto: Vicenç Pla).
Figure 5: *Asplenium sagittatum* (DC.) Bange. (Photo: Vicenç Pla).

Figura 6: *Thamnobryum alopecurum* (Hedw.) Gangulee. (Foto: Pere M. Mir-Rosselló).
Figure 6: *Thamnobryum alopecurum* (Hedw.) Gangulee. (Photo: Pere M. Mir-Rosselló).

a formar extensions importants a certs punts de la cova, ja siguin el líquens com a cortícoles o saxícoles, o els cianobacteris i algues, essent predominants a les parets més fosques de la cova. Així, tot i que el present estudi suposa una rellevant aportació al coneixement botànic de la Cova de sa Gleda, encara hi ha una proporció important de la biodiversitat pendent de l'estudi que li correspon.

Figura 7: *Sibthorpia africana* L. amb creixement lianoide. (Foto: Pere M. Mir-Rosselló).
Figure 7: *Sibthorpia africana* L. with lianoid growth. (Photo: Pere M. Mir-Rosselló).

Conclusions

El present estudi suposa el primer inventari florístic de la Cova de sa Gleda, on s'han trobat 46 espècies de plantes, destacant una elevada proporció de briòfits i pteridòfits. Algunes de les espècies presents, com *Asplenium sagittatum*, *Lophocolea heterophylla*, *Sibthorpia africana* o *Thamnobryum alopecurum*, són interessants a nivell corològic i/o de conservació, principalment per la seva raresa fora de la Serra de Tramuntana. Futurs estudis similars a altres coves i avencs, preferentment incloent altres organismes fotòtrofs no contemplats aquí (algues, cianobacteris i líquens), serien interessants de cara a comprendre millor la biota i l'ecologia de les cavitats de les Illes Balears així com la seva rellevància dins el patrimoni natural del territori.

Agraïments

El present treball es dedica a Àngel Ginés. Tot i que generalment no reben l'atenció que mereixen, els seus estudis aquí citats han estat de gran importància per a la botànica balear. Malgrat haver-lo conegut molt breument, vull fer constar l'energia i l'entusiasme que mostrava a l'hora de xerrar sobre cavitats i els organismes que hi habitaven. Sens dubte, una gran persona i entusiasta de la seva feina, i una trista pèrdua per a la ciència balear.

Es vol agrair a Francesc Gràcia per la proposta del treball i acompanyar l'autor a la cova per als mostrejos, així com als propietaris de la finca de Son Josep i a la Conselleria d'Agricultura, Pesca i Medi Natural per permetre l'entrada a la propietat i a la cova, així com a Damià Vicens i Juan José Enseñat per acompanyar-nos i a Vicenç Pla per les fotografies. El present treball ha estat finançat per una *Ayuda del Programa de Formación de Profesorado Universitario* (FPU21/03500), Ministerio de Universidades, Gobierno de España.

Bibliografia

BAQUERO, E.; VADELL, M. & JORDANA, R. (2007): Sa Gleda cave (Majorca, Balearic Islands) and its fauna, with description of a new species of Oncopoduridae (Collembola). *Subterranean Biology*, 5: 29-34.

BOVER, P.; GINARD, A.; ROSSELLÓ, J.A.; CRESPÍ, D.; GRÀCIA, F. & VICENS, D. (2011): L'endocarst i les mines de la serra de na Burguesa (Mallorca, Illes Balears). 2. Estat actual del coneixement paleontològic, de la vegetació pteridofítica i briofítica de les entrades de les cavitats i biospeleològic. *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 54: 197-218.

BRUGUÉS, M. & GUERRA, J. (eds.) (2015): *Flora Briofítica Ibérica. Volumen II.* Universidad de Murcia - Sociedad Española de Briología. 355 pàgs. Murcia.

CASAS, C.; BRUGUÉS, M.; CROS, R.M.; SÉRGIO, C. & INFANTE, M. (2009): *Handbook of liverworts and hornworts of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands.* Institut d'Estudis Catalans. 177 pàgs. Barcelona.

DUNK, K.V.D. (1977): Zur Moosvegetation von Mallorca. *Herzogia*, 4: 409-413.

FIOL, L. (1995): Flora de les entrades de les cavitats de Mallorca / Flora at the cavity entrances in Mallorca. *Endins*, 20 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 145-153.

FORNÓS, J.J.; PRETUS, J.L. & TRIAS, M. (1989): La cova de sa Gleda (Manacor, Mallorca). Aspectes geològics i biològics. *Endins*, 14-15: 53-60.

GIL, L. & LLORENS, L. (2017): *Flora vascular de les Illes Balears. Clau analítica.* (2na edició). Universitat de les Illes Balears, col·lecció materials didàctics. 219 pàgs. Palma.

GINARD, A.; VICENS, D; ROSSELLÓ, J.A.; PONS, G.X.; MIR-GUAL, M.; PLA, V; CRESPÍ, D.; BARCELÓ, M.A. & BOVER, P (2010): Pteridòfits i briòfits de les cavitats de la serra de na Burguesa (Serra de Tramuntana, Mallorca). *Endins*, 34: 69-86.

GINÉS, A. (1983): *Bioespeleología del karst mallorquín. Datos ecológicos preliminares.* Tesi de Llicenciatura. Universitat de les llles Balears. 219 pàgs. Palma. Inèdit.

GINÉS, A. & GINÉS, P. (1992): Principals característiques climàtiques des Clot des Sero (Calvià, Mallorca). *Endins*, 17-18: 37-42.

GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J.; CLAMOR, B.; FEBRER, M. & GAMUNDÍ, P. (2007): La cova de sa Gleda I. Sector clàssic, sector ponent i sector cinc-cents (Manacor, Mallorca): Geomorfologia, espeleogènesi, sedimentologia i hidrologia. *Endins*, 31: 43-96.

GRÀCIA, F.; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; FERNÁNDEZ, J.F.; CLAMOR, B.; MASCARÓ, G.; PÉREZ, J.; FORNÓS, J.J.; ANSALDI, D.; BORNEMANN, D.; FRANGLEN, N.; GRANELL, Á.; GAMUNDÍ, P. & ENSEÑAT, J.J. (2020): Sistema Gleda-Camp des Pou (Manacor, Mallorca): estat de la qüestió. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 1-32.

GRUP ESPELEOLOGIC EST (1986): S'Era d'Escorca (Escorca, Mallorca) i algunes cavitats veïnes. *Endins*, 12: 3-11.

GUERRA, J.; BRUGUÉS, M.; CANO, M.J. & CROS, R.M. (eds.) (2010): *Flora Briofítica Ibérica. Volumen IV.* Universidad de Murcia - Sociedad Española de Briología. 317 pàgs. Murcia.

GUERRA, J.; CANO, M.J. & ROS, R.M. (eds.) (2006): *Flora Briofítica Ibérica. Volumen III.* Universidad de Murcia - Sociedad Española de Briología. 305 pàgs. Murcia.

GUERRA, J.; CANO, M.J. & BRUGUÉS, M. (eds.) (2014): *Flora Briofítica Ibérica. Volumen V.* Universidad de Murcia - Sociedad Española de Briología. 261 pàgs. Murcia.

GUERRA, J.; CANO, M.J. & BRUGUÉS, M. (eds.) (2018): *Flora Briofítica Ibérica. Volumen VI.* Universidad de Murcia - Sociedad Española de Briología. 463 pàgs. Murcia.

HODGETTS, N.G.; SÖDERSTRÖM, L.; BLOCKEEL, T.L.; CASPARI, S.; IGNATOV, M.S.; KONSTANTINOVA, N.A.; LOCKHART, N.; PAPP, B.; SCHRÖCK, C.; SIM-SIM, M.; BELL, D.; BELL, N.E.; BLOM, H.H.; BRUGGEMAN-NANNENGA, M.A.; BRUGUÉS, M.; ENROTH, J.; FLATBERG, K.I.; GARILLETI, R.; HEDENÄS, L.; HOLYOAK, D.T.; HUGONNOT, V.; KARIYAWASAM, I.; KÖCKINGER, H.; KUČERA, J.; LARA, F. & PORLEY R.D. (2020): An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus. *Journal of Bryology*, 42: 1-116.

KNOCHE, H. (1921-1923): *Flora balearica: étude phytogéographique sur les lles Baléares.* Imp. Roumégous et Déhan. 554 pàgs. Montpellier.

KOPPE, F. (1965): Bryologische Beobachtungen auf der Insel Ma- llorca. *Botaniska Notiser*, 118: 25-48.

LLORENS, L. (1972): Anotaciones a la flora balear. *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 17: 55-62.

LLORENS, L.; GIL, L.; TÉBAR, F.J.; CARDONA, C.V. & CAPOTE, M.F. (2021): *La vegetació de Mallorca i Cabrera. Bases per a la interpretació i gestió d'hàbitats i paisatge vegetal.* Govern de les Illes Balears. 273 págs. Palma.

MAHEU, J. (1912): Exploration et flore souterraine des cavernes de Catalogne et des lIes Baléares. *Spelunca*, 8: 361 -465.

MANZANO, X.; MORAGUES, E. & SÁEZ, L. (2014): Noves dades sobre la distribució i l'estat de conservació de la falguera *Dryopteris filix-mas* (Dryopteridaceae) a les Illes Balears. *Orsis,* 28: 121-128.

MOYLE, S.M. (1976): Bryophytes used in construction of bird nests. *Bryologist*, 79: 95-98.

MULEC, J. (2018): Phototrophs in caves. In: MOLDOVAN, O.T.; KOVÁČ, L. & HALSE, S. (eds.) *Cave Ecology.* Springer Nature Switzerland. 91-106. Cham.

PERICÀS, J.; GINÉS, A. & ROSSELLÓ, J.A. (2009): New bryophyte records from Majorca (Balearic Islands). *Flora Montiberica*, 43: 87-91.

PUGLISI, M.; KÜRSCHNER, H. & PRIVITERA, M. (2018): Phytosociology and life syndromes of bryophyte communities from Sicilian caves, a clear example of relationship between bryophytes and environment. *Plant Sociology*, 55: 3-20.

REN, H.; WANG, F.; YE, W.; ZHANG, Q.; HAN, T.; HUANG, Y.; CHU, G.; HUI, D. & GUO, Q. (2021): Bryophyte diversity is related to vascular plant diversity and microhabitat under disturbance in karst caves. *Ecological Indicators*, 120: 106947.
ROSSELLÓ, J.A. & GINÉS, A. (1980): Introducció a la brioflora dels avencs mallorquins. *Endins*, 7: 27-35.
ROSSELLÓ, J.A. & PERICÀS, J. (2011): La flora de les cavitats càrstiques de les Balears: què en sabem? *Endins,* 35 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears,* 17: 237-240.
RYDGREN, K.; INDREEIDE, B.; SLAGSVOLD, T. & LAMPE, H.M. (2023): Nest building in titmice Paridae: Selectivity in bryophyte use. *Ecology and Evolution*, 13: e9852.
SÁEZ, L. (2020): *Llibre Vermell dels Briòfits Amenaçats de les Illes Balears.* Conselleria de Medi Ambient i Territori. 219 pàgs. Palma.
SÁEZ, L.; BRUGUÉS, M.; CASAS, C.; CROS, R.M. & BALAGUER, P. (2006): Briófitos nuevos o interesantes para las Islas Baleares. *Boletín de la Sociedad Española de Briología*, 28: 11-23.
SLOOVER, J.L. de (1967): Quelques Bryophytes recueillies a Majorque. *Les Naturalistes Belges*, 18: 389-394.

Recursos en línia

Royal Botanic Gardens / Plants of the World Online: https://powo.science.kew.org/

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Cavitats costaneres i modelat litoral entre cala Marçal i cala Brafi (Felanitx, Mallorca)

Gabriel SANTANDREU [1], Francesc GRÀCIA [1,2,3], Sebastià GARRIGA [1], Juan J. ENSEÑAT [1] i Bernat GAVIÑO [1]

[1] Societat Espeleològica Balear. Palma. Email: bielsant@yahoo.es
[2] Societat d'Història Natural de les Balears. Palma.
[3] Grup de Recerca Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma.

Abstract

A new contribution to the study of the coastal cavities of Felanitx (SE Mallorca), between Cala Marçal and Cala Brafi, is presented, including the unique element of the es Faralló d'en Fred stack. Based on the mapping of the 14 cavities located in the study area and the description of the geomorphological elements found in each one, we discuss the role of coastal and karst processes in the genesis and evolution of the caves and classify the coastal cavities differentiating them between marine, karstic or karstic-marine captures. Some of the studied cavities are active, while others are inherited and can be interpreted as an indicator of ancient sea level positions during the Plio-Quaternary.

Resumen

Se presenta una nueva aportación al estudio de las cavidades costeras del litoral de Felanitx (SE de Mallorca) comprendidas entre cala Marçal y cala Brafi, incluyendo el elemento singular de la estaca rocosa de es Faralló d'en Fred. A partir de la cartografía de las 14 cavidades ubicadas en el sector estudiado y de la descripción de los elementos geomorfológicos que en ellas se encuentran, se clasifica el papel de los procesos costeros y kársticos en su génesis y evolución, diferenciando entre cavidades marinas, kársticas o capturas kárstico-marinas. En términos espeleogenéticos, algunas de las cavidades estudiadas son activas, mientras que otras son heredadas y pueden interpretarse como un indicador de antiguas posiciones del nivel del mar durante el Plio-Cuaternario.

Santandreu, G.; Gràcia, F.; Garriga, S.; Enseñat, J.J. i Gaviño, B. (2024): Cavitats costaneres i modelat litoral entre cala Marçal i cala Brafi (Felanitx, Mallorca).
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 91-110. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 26 juny 2024; **Revisat:** 20 setembre 2024; **Acceptat:** 29 setembre 2024.
Publicat online: 16 octubre 2024.

Introducció

Amb aquest nou treball es continua amb l'objectiu de fomentar el coneixement detallat de les coves litorals de la zona costanera del terme de Felanitx. Igualment es manté la pretensió d'oferir un punt de partida per a propers estudis que consolidin un coneixement més complet d'aquests fenòmens litorals. En aquesta ocasió, s'aborda un tram costaner que conforma la continuació natural dels sectors tractats en treballs anteriors (*vid.* SANTANDREU et al., 2020, 2021, 2022) i que s'estén cap al SW des del nucli de Portocolom. L'abast espacial de l'estudi inclou el tram de costa que queda comprés entre les dues macro-formes costaneres més representatives del terme: cala Marçal –caló d'en Marçal; caló en Marçal, segons AGUILÓ (1991)–, a l'extrem septentrional, i cala Brafi –amb la variant cala Bràfia, recollida per AGUILÓ (1980, 1991), resultat de l'articulació endèmica felanitxera de la *-a* final a les esdrúixoles–, a l'extrem meridional (Figura 1).

El sector de costa estudiat té un marcat caràcter rectilini que només s'interromp coincidint amb la presència de les dues cales que estan associades a cursos fluvio-torrencials i articulen, en bona mesura, aquest tram de costa. Llevat de les badies de les cales, on l'accés a la mar és més assequible, la resta del sector

es caracteritza per l'omnipresència de penya-segats tallats en el rocam del miocè superior. Aquests –tot seguint els tipus morfològics de penyes proposats per a la classificació de costes rocoses de BALAGUER (2007) a partir d'EMERY & KUHN (1982) i TRENHAILE (1987)– són majoritàriament penya-segats aplomats (*plunging cliff*), amb alçades entre 10 i 15 m s.n.m., penya-segats de perfil convex i trams de perfil esglaonat que acostumen a finalitzar en una secció vertical. És precisament en aquesta àrea de penya-segats verticals i de marcat caràcter lineal on es localitzen bona part de les cavitats tractades. A més, l'estudi també s'ha fet extensiu a algunes coves submarines –conegudes sobretot als àmbits de la pesca o el busseig esportiu– localitzades en aquest mateix sector de costa. Aquesta circumstància ha donat peu a consolidar tècniques exploratòries que fins ara havien estat escassament implementades en anteriors treballs relatius a les cavitats litorals. Per a l'exploració i topografia de cavitats totalment submergides s'han introduït, a l'apartat metodològic, les tècniques de espeleobusseig. Sempre dutes a terme per persones ben experimentades i coneixedores d'aquests àmbits tan peculiars. Aquesta circumstància ha permès documentar de forma sistemàtica, noves tipologies de cavitats relacionades amb nivells marins pretèrits i que presenten clares evidències de formes d'erosió litoral de caràcter relicte.

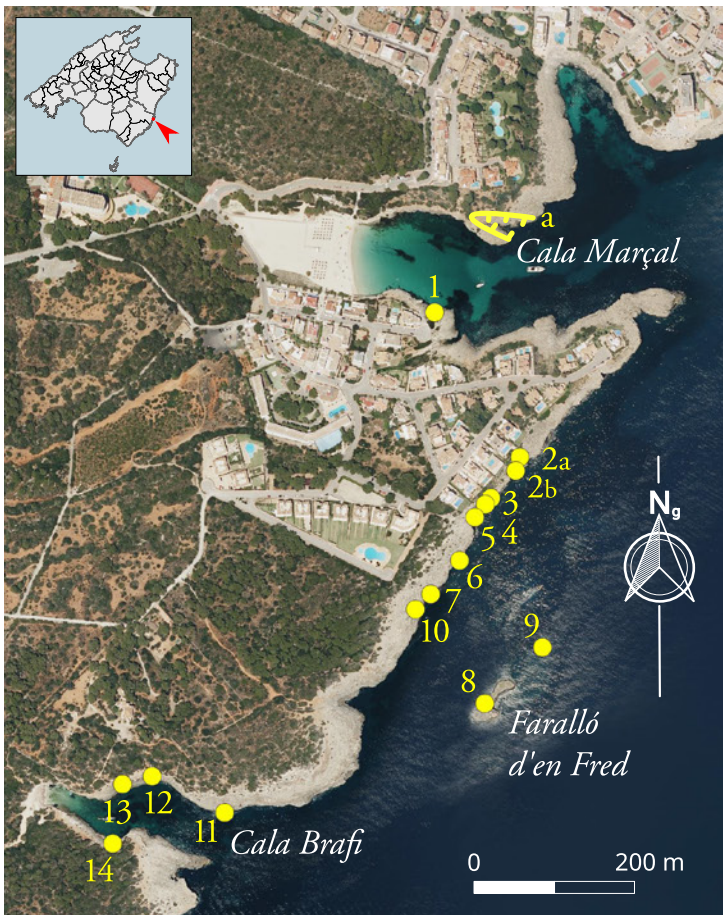


Figura 1: Mapa de la zona d'estudi i localització de les cavitats. 1) Dolç des Racó des Tamarell. 2) Cova des Coloms o cova des Vellmarí. 3) Coves de na Fonda I. 4) Cova de la Marededéu. 5) Coves de na Fonda II o Es Secret . 6) Cova des Conducte. 7) Cova des Faralló d'en Fred. 8) Túnel des Faralló d'en Fred. 9) Cova de s'Altina des Faralló. 10) Coves de na Blonqueta. 11) Cova dels Eriçons d'Arena o dels Escorballs. 12) Cova de sa Pesquera de ses Orades. 13) Cova des Cocons Plans. 14) Cova Rotja. a) Cavitat esbaldregada (Font: Base topogràfica SEB sobre imatges orto-fotogràfiques IDEIB).

Figure 1: Location map of the caves in the study area. 1) Dolç des Racó des Tamarell. 2) Cova des Coloms or cova des Vellmarí. 3) Coves de na Fonda I. 4) Cova de la Marededéu. 5) Coves de na Fonda II or Es Secret. 6) Cova des Conducte. 7) Cova des Faralló d'en Fred. 8) Túnel des Faralló d'en Fred. 9) Cova de s'Altina des Faralló. 10) Coves de na Blonqueta. 11) Cova dels Eriçons d'Arena or dels Escorballs. 12) Cova de sa Pesquera de ses Orades. 13) Cova des Cocons Plans. 14) Cova Rotja. a) Collapsed cave (Source: SEB topographic data base over IDEIB ortophotographic images).

Apunts generals, geogràfics i geomorfològics de la zona d'estudi

El sector costaner del sud-est de l'illa de Mallorca es caracteritza per presentar un relleu tabular postorogènic, els condicionants de base del qual són la litologia i el control estructural (ROSSELLÓ et al., 2007). Els materials que componen aquest planell, que finalitza abruptament en forma de penya-segats verticals sobre el mar, pertanyen al miocè superior. Es tracta de calcarenites i calcisiltites, a més de calcàries esculloses massives, que culminen amb la unitat escullosa, els manglars, els estromatòlits i les planes oolítiques del Complex Terminal (FORNÓS & POMAR, 1983). Des d'un punt de vista estructural, el diaclasament per distensió, així com la fracturació paral·lela a la línia de costa, condiciona el traçat i característiques morfològiques de la línia de costa (FORNÓS & GELABERT, 1995; FORNÓS et al., 2005) i el desenvolupament de les cales (GÓMEZ-PUJOL et al., 2013).

Pel que fa al modelat, el tram estudiat en aquest treball està delimitat per cala Marçal a l'extrem septentrional del sector i cala Brafi al meridional. Ambdues cales, presenten els atributs propis que ROSSELLÓ (1995, 2005) atribueix a la definició terminològica de cala com a element geomorfològic. A grans trets, un entrant marí delimitat per parets verticals, resultat de la inundació per l'ascens del nivell marí d'una petita vall tallada a un planell calcari. A més, en la seva configuració hi contribueixen processos i agents fluvials, marins, càrstics i estructurals (FORNÓS et al., 2013). Tal com apunten GÓMEZ-PUJOL et al. (2013), ambdues cales comparteixen trets comuns amb altres localitzades a la marina de Llevant, que es poden sintetitzar en uns valors de longitud/penetració que presenten

la tendència a ser més llargs que amples, una marcada incisió en el planell calcari i un important rebliment de sediments holocens que resulten en un característic fons pla a la secció final dels barrancs i que són ocupats per una barrera o restinga arenosa.

Cala Marçal està orientada sobre un eix principal de 95º. Té un tirat de 400 m i una amplada de la boca de la cala, delimitada per l'extrem del caló d'en Manuell al nord i sa punta des Jonc o de cala Marçal al sud, de 180 m. El curs o tiratge de la cala penetra terra endins 2.000 m, tot drenant el planell i la connexió amb els modestos relleus de les Serres de Llevant que actuen de conca de recepció. El costat nord de la cala presenta un perfil de penya-segats verticals d'entre 4 i 5 m d'alçada, que se redueix a mesura que s'apropa al fons de la cala. El costat sud és un tram lleugerament rectilini marcat per la verticalitat de les timbes, les quals incrementen de cota topogràfica a mesura que s'allunyen del fons de la cala, fins arribar a l'extrem de la punta des Jonc on assoleixen prop de 10 m d'alçada.

Al coster nord de l'entrada de la cala, s'observen les cicatrius recents d'un fragment de penya-segat arrabassat o esllavissat. Es tracta de l'esbaldregada de la part superior del penya-segat, afavorida per l'erosió basal. Un dels costats dels penya-segat, conserva bona part de la indentació que penetra 8 m en forma de balma. Aquest element, com és habitual en aquests tipus de perfil resultant, contribueix a afegir inestabilitat al conjunt (TRENHAILE, 2015). L'acció de l'impacte de l'aigua sobre la façana del penya-segat, al contacte amb el nivell marí on l'atac de l'onatge produeix l'efecte de martelleig més continuat i virulent, ha contribuït al desenllaç del col·lapse. El resultat és la reculada del penya-segat.

Ja pròpiament dins la cala, i al mateix costat nord, es localitza un indret anomenat es caló de sa Senyora (AGUILÓ, 1991). Es tracta d'un entrant marí que no està associat a cap curs torrencial i que transcorre obliquament a la línia de la costa amb una orientació de 105º. Té la part més baixa envaïda per la mar a mode de caleta amb blocs arrodonits per l'acció marina. L'amplada de la boca no supera els 10 m i la penetració és de 25 m, extrem que constitueix el fons de l'esquerda, igualment ocupat per blocs. A més, al perfil del penya-segat s'hi localitza una terrassa, una plataforma d'abrasió relicta a 4,80 m s.n.m., que sembla atendre a l'efecte de l'erosió diferencial i a la discontinuïtat dels estrats que es poden resseguir a ambdós costats de l'entrant. Terra endins, continua l'acumulació de blocs descavalcats de la part superior del penyal deixant constància d'un moviment de masses de proporcions discretes. Tot plegat dona peu a pensar que la configuració actual es pot deure al col·lapse d'una cavitat d'erosió marina, la qual ha estat successivament desmantellada i afectada per diferents episodis de transgressió i regressió marina.

Al fons de cala Marçal, s'ha acumulat una platja arenosa que en temps relativament recents tancava un petit aiguamoll fangós (ROSSELLÓ, 1964), avui reduït a la mínima expressió. El costat sud de la cala està intensament antropitzat amb la part superior dels penya-segats totalment urbanitzada. A la rodalia del racó des Tamarell, els penyals presenten una inflexió que coincideix amb un curs fluvio-torrencial d'escassa entitat. Es tracta d'un torrentó, amb una conca de recepció molt modificada, que transcorre dintre de l'àrea urbanitzada i que presenta un tram final amb cert encaixament, desguassant finalment a l'indret conegut com el caló de ses Dones. En aquest punt destaquen les cicatrius d'una pedrera que ha llavorat l'extensió d'una duna fòssil, possiblement de cronologia pleistocena. Des d'aquest indret fins a la punta des Jonc, que tanca la cala pel sud, és una costa bastant monòtona, amb entrants comptats d'escassa rellevància i amb perfil de les timbes majoritàriament vertical.

Entre la punta des Jonc i sa Ferradura, els penya-segats estan orientats a mar oberta. És un segment de costa marcadament rectilini que presenta una orientació SW-NE. Malgrat això, a l'extrem NE, prop de sa punta des Jonc, hi ha un entrant conegut com a cala Poi, que res té a veure amb la definició canònica d'aquest tipus de macroformes costaneres. Igualment, hi destaca una esquerda vertical pregona que solca el penya-segat de dalt a baix. Així doncs, des d'aquest indret fins es racó de sa Ferradura al SW, discorren 600 m lineals. És un perfil de costa bàsicament vertical, on els penya-segats arriben a assolir els 15 m d'alçada, caient aplomats dins la mar. Al contacte amb el nivell marí s'observen les formes habituals d'erosió i bioconstrucció: una marcada visera, *notch* (ang.), treballada per l'erosió mecànica de l'onatge i la bioerosió; i una tenassa, *trottoir* (fr.), o relleix recobert de formacions biogèniques. En cap moment s'observa el contacte amb una plataforma litoral heretada. En aquesta tipologia de penya-segats verticals, independentment de la seva litologia i disposició estructural, el desenvolupament del modelat està molt lligat als processos marins i en grau més baix als subaeris (EMERY & KUHN, 1982; STEPHENSON, 2014). D'aquesta manera cal observar que, a la zona, el perfil costaner es troba modificat per la presència de diverses cavitats: la cova des Coloms, les coves de na Fonda i la cova des Conducte (veure Figura 1), totes elles molt condicionades per la dinàmica litoral. La primera amb tres obertures, una a la terrassa superior, una altra a mitjana alçada de les penyes i una darrera, de grans dimensions, al nivell marí. Aquesta darrera entrada modifica substancialment la fisonomia del penya-segat. En el cas del conjunt de cavitats de na Fonda, ocupen la part mitjana d'aquest penya-segat, tot rompent el seu perfil vertical. Ambdues coves estan associades a

una plataforma litoral relicta que té la base a 6-7 m s.n.m. En el cas de la cova des Conducte, la cavitat es correspon amb una gran balma, d'uns 30 m d'obertura per una alçada de 6,50 m, situada al nivell marí a mode de cova d'abrasió litoral activa.

En aquest indret destaca la presència d'un element geogràfic singular: es faralló d'en Fred. Es tracta d'un illot que tal com indica el genèric, sobresurt punxegut d'enmig de la mar. Es troba allunyat uns 120 m de la costa i té una superfície de 1.220 m^2 (MAYOL, 2020). Presenta dues zones ben diferenciades: un promontori cap al SW d'una alçada de 9 m i una extensa plataforma cap al NE, situada entre 1 i 2 m s.n.m., coneguda com sa tenassa des Faraió [sic] (AGUILÓ, 1991). L'illot actua de testimoni i vestigi d'antics nivells marins (GRÀCIA et al., 2001) així com un clar indicador del retrocés costaner (ROSSELLÓ, 1964). La singularitat d'aquest element, ha propiciat l'aparició de diversos topònims, com la cova des faralló d'en Fred (AGUILÓ, 1991), i neotopònims: es túnel des Faralló, i s'altina des Faralló.

A l'alçada des faralló d'en Fred i seguint la costa en direcció SW, els penya-segats perden alçada, mantenint un perfil majoritàriament vertical amb la part superior convexa, que arriba a passar a un perfil general més convex i finalment esglaonat (Figura 2). Per tant, en aquesta zona, es pot observar cert equilibri entre els diferents processos marins i subaeris en el modelat, si més no, amb una certa rellevància d'aquests darrers. A tall d'il·lustració de la interferència entre els diferents processos, a la terrassa que ocupa el frontal de la cova de na Blonqueta, o a la rodalia de sa Ferradura, sobre aquest escalonament en forma de terrasses, hi apareixen marmites de grans dimensions, algunes de les quals encara conserven blocs de dimensions mètriques a l'interior. Tot plegat es pot interpretar com les successives empremtes dels canvis glacioeustàtics durant el quaternari. És precisament a l'indret des racó de sa Ferradura on la línia de costa abandona la linealitat per formar una espècie de cap costaner, avantsala de cala Brafi. Les penyes assoleixen l'alçada més baixa del sector amb un accés a la mar relativament assequible. En aquest punt, quan esdevenen fortes pluges, es forma un reguerol que drena cap a la mar des de la terrassa superior dels penya-segats i és habitual observar-hi cocons amb un vistós color marró arran dels sediments dipositats al seu fons per l'escolament superficial.

A l'extrem sud de la zona d'estudi, s'hi troba, finalment, cala Brafi. Aquesta macro-forma presenta un traçat lleugerament sinuós o meandriforme, tot i que la disposició general és 104º. La boca de la cala està delimitada per s'entrada [*sic*] de cala Brafi i els Llissos al nord i sa punta de sa Galera al sud. L'amplada entre aquests dos punts és de 53 m. El tirat de la cala és de 205 m amb un perfil marcadament asimètric. El costat nord presenta l'extrem més allunyat de la cala amb penya-segats de perfil convex que minven en alçada i guanyen en irregularitat amb algunes terrasses intercalades a mesura que avancen terra endins. La cala, correspon a la desembocadura d'un torrent amb timbes verticals a costat i costat. El llit del barranc, està ocupat per blocs, còdols i arenes. El costat meridional difereix notablement del septentrional, essent un perfil de costa baixa, més aviat un pla inclinat que cau amb un rost suau cap a l'aigua. Tan sols a l'alçada de la cova Rotja, les penyes assoleixen alçada i una certa verticalitat fins a arribar al punt màxim a sa punta de sa Galera. Aquest darrer indret

Figura 2: Diverses vistes de la zona d'estudi. a) Perfil de costa de penya-segats verticals entre sa Punta de cala Marçal i les coves de na Fonda, situades a la timba del planell calcari en primer terme. b) Entre el Faralló d'en Fred i el racó de sa Ferradura, el perfil de costa és majoritàriament convex, perdent alçada de forma progressiva cap al SW (Foto: G. Santandreu).

Figure 2: Several views of the study area. a) Coastal profile of cliffs, between Punta de Cala Marçal and the Coves de na Fonda, located on the cliff face of the limestone platform. b) Between the Faralló d'en Fred and sa Ferradura cape, the coastal profile is mainly convex, and cliff face decrease in height southward (Photo: G. Santandreu).

destaca per oferir un aflorament on s'aprecia la geometria tabular dels diferents estrats de la seqüència del miocè superior que apareixen lleugerament inclinats cap a la mar. El contacte entre els nivells, la naturalesa litològica i el grau de cimentació de cada una de les unitats, juntament amb l'erosió diferencial, han resultat en unes penyes molt rectilínies i de perfil esglaonat. En canvi, a l'extrem de sa punta, el rocam forma una galera, una superfície rocosa plana que sobresurt lleugerament sobre el nivell marí, fruit del desmantellament dels penyals per l'energia de l'onatge que tendeix a concentrar-se en aquests sortints de la costa.

Al llarg de tot aquest tram, les mostres de *karren* o lapiaz litoral, es corresponen amb les més habituals desenvolupades sobre rocam carbonatat costaner, tal com exposen GÓMEZ-PUJOL et al. (2011) tot seguint la classificació morfològica de FORD & WILLIAMS (1989). Abunden formes positives romanents, tant lineals com negatives i altres de planta arrodonida, amb un variat mostrari de escales i processos generadors. A la zona més pròxima a la mar, zona morfològica exposada directament als agents marins, destaca la presència de pinacles que atapeeixen densament algunes àrees. Sobre aquests sovint s'hi superposen de forma intensa alvèols i microalvèols. Terra endins es dona una substitució progressiva d'aquestes formes. Així a la transició entre l'àrea d'estopeig de l'onatge i el domini dels esquits, els pinacles són substituïts majoritàriament per cocons, estries; i en menor abundància per microsolcs. Són especialment abundants els cocons amb dimensions de centimètriques a mètriques. A tota la zona superior dels penya-segats, l'existència de sòls és pràcticament nul·la. En aquesta àrea més allunyada dels agents marins, s'observen conductes de subsòl en procés d'exhumació o bé ben desenterrats. Tot i no tractar-se de formes pròpiament lligades als processos de dissolució, també es poden observar a distintes alçades sobre el nivell marí, alguns exemples de marmites de gegant, moltes de les quals encara conserven els còdols que les formaren.

Descripció de les cavitats

Dolç des Racó des Tamarell

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522366 4362208)

Al costat de migjorn de cala Marçal, molt a prop des caló de ses Dones, s'hi troba un paratge conegut com el racó o la pesquera des Tamarell, lloc clarament identificable on s'aixeca un esvelt i solitari exemplar de *Tamarix gallica* arrelat a l'esquerp roquissar. AGUILÓ (1991) documenta com en aquell redol costaner es tenia constància de l'existència d'aigua dolça que brollava dins la mar. Segons el mateix Aguiló, devers l'any 1932/1933 es provà de fer un pou per accedir a aquesta deu, empresa que no prosperà, però que donà peu a aprofitar el forat per sembrar-hi un exemplar del citat arbust, el qual avui en dia encara es mostra ben vigorós tot guardant la memòria del fet.

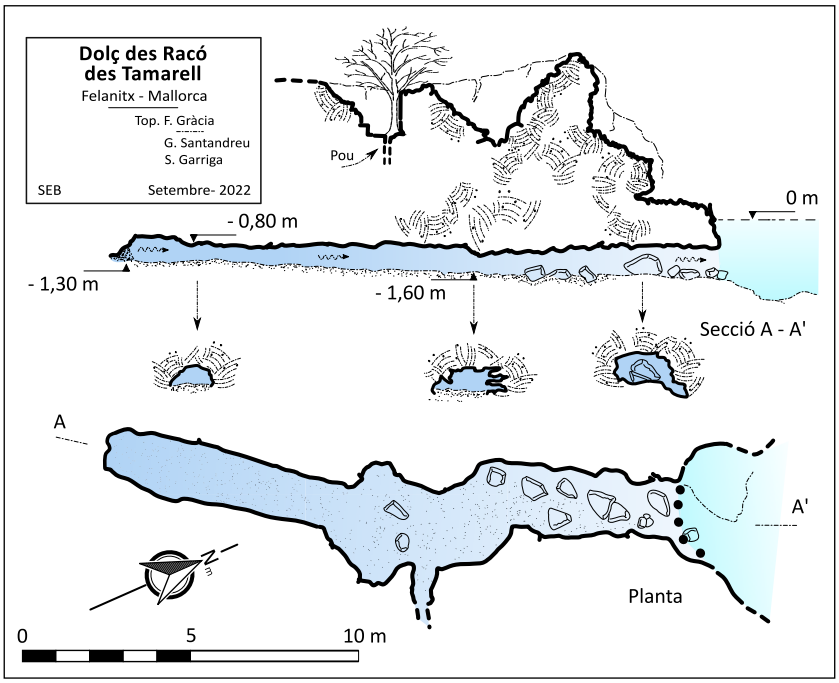


Figura 3: Topografia des Dolç des Racó des Tamarell (Felanitx).
Figure 3: Topographic survey of the Dolç des Racó des Tamarell (Felanitx).

El mes de juny de l'any 2022, G. Santandreu i S. Garriga, durant una prospecció aquàtica per la zona, localitzaren, molt a prop del racó des Tamarell, un covitxol submergit on era molt evident una notable fredor de l'aigua. Igualment, en aquest mateix punt, era ben visible l'efecte d'una haloclina que enterbolia les aigües. Informat el company F. Gràcia, a les primeries del mes d'agost, feu una primera immersió a la boca on es donava aquest fenomen i verificà una possible continuació subaquàtica, però l'ús d'un equip inadequat per desenvolupar aquesta tasca aconsellaren desistir i deixar l'exploració per una altra ocasió. Finalment, a principis de setembre, F. Gràcia en realitzà l'exploració i la topografia. En aquesta incursió verificà que es tracta d'un conducte

que actua de surgència d'aigua dolça, recolzant el testimoni recollit per AGUILÓ (1991). La cavitat és una galeria excavada per complet dins eolianites pleistocenes (Figura 3). Tot plegat evidencia que l'espeleogènesi sembla estar relacionada amb el drenatge de les aigües subterrànies i la zona de mescla costanera, fenomen que és ben evident també al seu interior, ja que es veu clarament que funciona com a surgència i es visualitza una haloclina ben marcada. La temperatura interior, a data 3 de setembre de 2022, era de 18 ºC, mesura que es correspon amb aquest tipus de masses d'aigua vinculades a surgències. La galeria té una orientació NE-SW, una penetració de 17,5 m i una amplada d'1,5 m, que assoleix els 3,5 m a la part més espaiosa. L'alçada del conducte és de 0,5 a 0,9 m, amb presència d'alguns blocs a la part inicial, per la qual cosa és una cavitat molt claustrofòbica, ja que l'escafandrista, malgrat portar tancs laterals i de petites dimensions, es troba molt encaixat per progressar (Figura 4). La fondària general del pis, recobert per arenes, està compresa entre -1,7 i -1,3 m i el sostre a -0,8 m.

Figura 4: Sortint de l'estreta galeria excavada dins eolianites pleistocenes que forma es Dolç des Racó des Tamarell (Foto: G. Santandreu).
Figure 4: Exit of the narrow gallery carved within Pleistocene eolianites, forming the Dolç des Racó des Tamarell (Photo: G. Santandreu).

Cova des Coloms o cova des Vellmarí

(Coord. UTM-ETRS89 31S: Boca superior 522473 4362028 / boca marina 522468 4362011)

Es tracta d'una cavitat que marca la fisonomia del penya-segat en aquest tram litoral tant per les diverses boques, terrestres com marines, com pel volum interior. Està orientada sobre un eix principal NE-SW, al llarg del qual es disposen els distints espais que la configuren; identificats amb els següents neotopònims: el *salt de s'Esclat*, la *sala des Vellmarí* i la *sala del Tresor* (Figura 5).

L'entrada terrestre es localitza a la part superior de les penyes, anunciada per una depressió, una dolina de col·lapse en forma d'embut rocós que desemboca a un passatge vertical. Aquesta connexió amb la superfície ha evolucionat aprofitant els plans de debilitat del rocam. En aquest indret, el mes de gener del 2018, s'hi precipità un veí de la zona, resultant ferit de gravetat i, finalment, rescatat amb èxit després d'un operatiu laboriós (ANÒNIM, 2018). Aquest accés, batejat arran del desafortunat incident com el *salt de s'Esclat*, té aproximadament 10 m de fondària i comunica amb el costat est de la cavitat mitjançant una zona terrestre formada per un replà rocós enlairat de l'aigua (Figura 6).

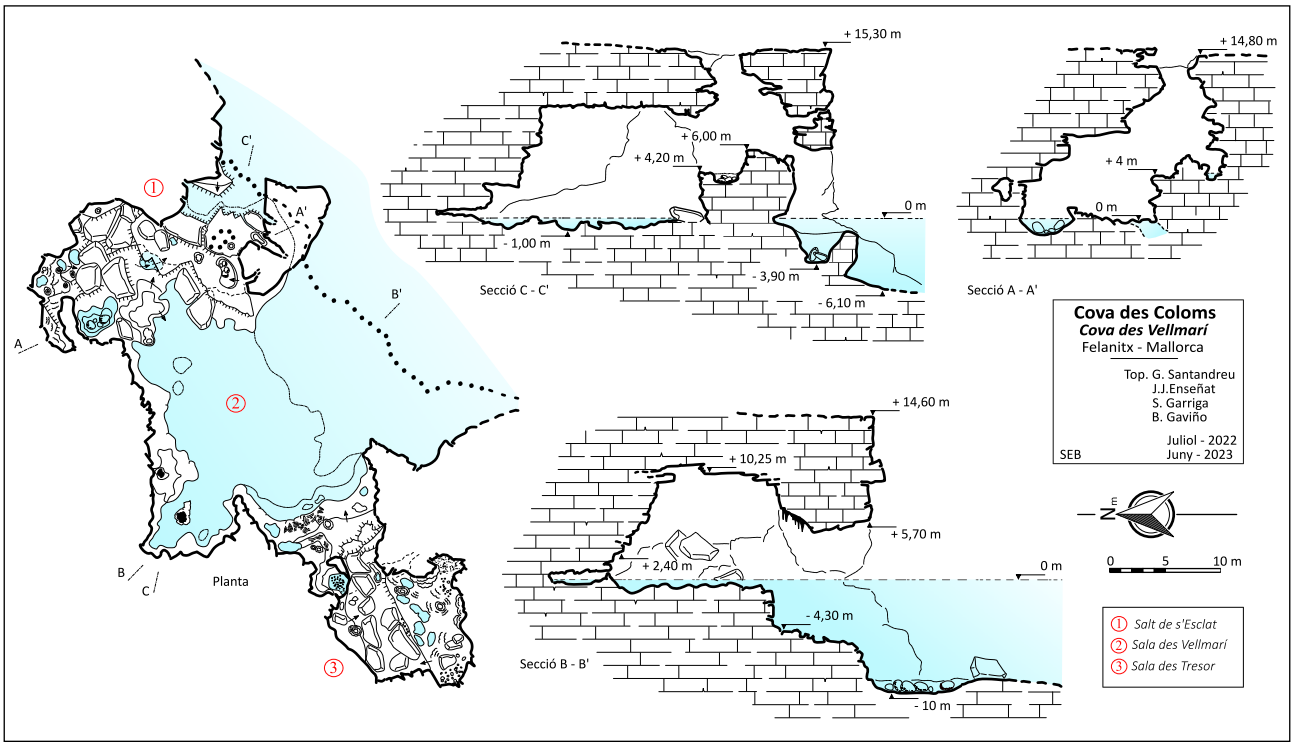


Figura 5: Topografia de la cova des Coloms o cova des Vellmarí (Felanitx).
Figure 5: Topographic survey of the Cova des Coloms or Cova des Vellmarí (Felanitx).

Figura 6: Cova des Coloms. Remuntant el *Salt de s'Esclat*, únic accés terrestre que comunica la zona superior dels penya-segats amb el sector nord de la cavitat (Foto: G. Santandreu).
Figure 6: Cova des Coloms. The caver climbs the *Salt de s'Esclat*, the unic terrestrial access from the upper part of the cliffs, which pass through to the north sector of the cavity (Photo: G. Santandreu).

Les boques marines són dues: una oberta en aquesta mateixa zona, a mitjana alçada del penya-segat a 6 m s.n.m.; i una altra a nivell de la mar que és l'accés principal a la *sala des Vellmarí*. Aquesta última boca, amb unes dimensions de 25 m d'ample per una alçada de 6 m, és, sens dubte, la més vistosa. A l'interior, el sòtil assoleix una alçada que sobrepassa els 10 m. En conjunt aquesta sala representa una àrea de 322 m^2 dels quals, 185 m^2 estan ocupats per les aigües marines (Figura 7). L'extrem E, on enllaça amb el *salt de s'Esclat*, està ocupat per grans blocs agrupats i dipositats sobre una plataforma litoral desenvolupada a diverses alçades resultat de l'acció marina. S'aprecien marmites, tant actives com inactives, i en algun reducte aïllat apareixen uns minsos recobriments calcaris. La resta de la sala, és un espai diàfan ocupat per la mar. Destaca la presència d'una extensa tenassa, majoritàriament plana i d'aspecte polit en alguns trams, constantment batuda per l'onatge, que té uns 10 m de penetració cap a l'interior i una profunditat entre els 0,60 m i 1 m de fondària. Sobre aquesta antiga plataforma s'ha instal·lat un *trottoir*, sens dubte afavorit per la continuada turbulència de les aigües que augmenten els nivells d'O_2 fomentant la precipitació dels carbonats i la bioconstrucció (Figura 8). Al costat

Figura 7: *Sala des Vellmarí* a la cova des Coloms, de dimensions considerables que comparteix part terrestre i aquàtica. Comunica amb l'exterior per la gran boca marina oberta al nivell de les aigües. S'aprecia, a la zona aquàtica, la tenassa lleugerament submergida que n'ocupa bona part. Al fons, es localitza l'accés a la *sala des Tresor*, aïllada de la resta de la cavitat (Foto: G. Santandreu).
Figure 7: *Sala des Vellmarí* in the Cova des Coloms, a place with remarkable dimensions containing terrestrial and aquatic zones. It exhibits a large marine entrance at sea level. In the aquatic zone, a large ledge partially submerged can be observed. In background there is the access to the *Sala des Tresor* (Photo: G. Santandreu).

Figura 8: Zona aquàtica de la *sala des Vellmarí* a la cova des Coloms. Destaca la plataforma litoral amb recobriment de *trottoir* de grans dimensions (Foto: G. Santandreu).
Figure 8: Aquatic zone of the *Sala des Vellmarí* in the Cova des Coloms. Notice the width of the shore platform and the bioconstructions (*trottoir*) that cover the platform edge and the inner horizontal surface (Photo: G. Santandreu).

SW torna a comparèixer la part terrestre amb una duna fòssil molt erosionada situada gairebé al nivell de les aigües. L'extrem està ocupat per una cambreta enlairada uns 4 m que queda aïllada de la resta de la cavitat, la *sala del Tresor*, amb unes dimensions irregulars de 12 x 12 m i sostre baix, ocupant uns 45 m^2. Destaca l'ornamentació litoquímica en forma de colades, estalactites i estalagmites aïllades. La sala presenta un fort contrast entre un costat i l'altre. Així el trespol del costat S està recobert de *gours* engalanats pels característics regruixos i perfils calcaris, mentre la part N, està recoberta per blocs despresos del sostre i totalment nua de cap formació litoquímica, fet que denota el col·lapse d'aquesta part de la cambra.

En aquesta cavitat, el control estructural sembla haver tingut cert predomini en l'evolució de l'espai subterrani. En alguns indrets es poden apreciar amb claredat la disposició de les fractures i diàclasis que segueixen l'orientació dominant SW-NE. Aquestes semblen haver actuat com a línies preferents de fractura del rocam propiciant el desenvolupament volumètric de la cova. La correspondència entre els buits deixats pels despreniments i els fragments rocosos despresos, sovint és ben evident. Referent a la disposició orogràfica del penya-segat, es pot apuntar un major grau d'incidència de la insolació. Tal com han observat BALAGUER & FORNÓS (2003) a altres indrets de la costa del Llevant de Mallorca, aquesta orientació es pot traduir en un augment de la temperatura, repercutint en els materials rocosos, i afegint intensitat en l'acció d'alguns processos d'alteració mecànics basats en la contracció i expansió tèrmica. En l'actualitat els fenòmens erosius pròpiament litorals es mantenen actius, retreballant les zones més exposades de la cavitat, especialment a la boca marina. La configuració de distintes boques, tant al nivell marí com obertes al penya-segat, així com la presència de restes d'eolianites a l'interior, permet intuir la relació de la cavitat amb pretèrits nivells marins diferents de l'actual. La boca superior de la cavitat, ben segur ha actuat en algun d'aquests moments com a bufador. Avui dia, aquesta funcionalitat es reserva a excepcionals episodis lligats a fortes tempestes marines (*e.g.* la tempesta Glòria de gener del 2020).

AGUILÓ (1991) recull fins a cinc topònims distints relatius a la cavitat esmentada. Tot i aquesta varietat, accepta com a més difosa la primera forma,

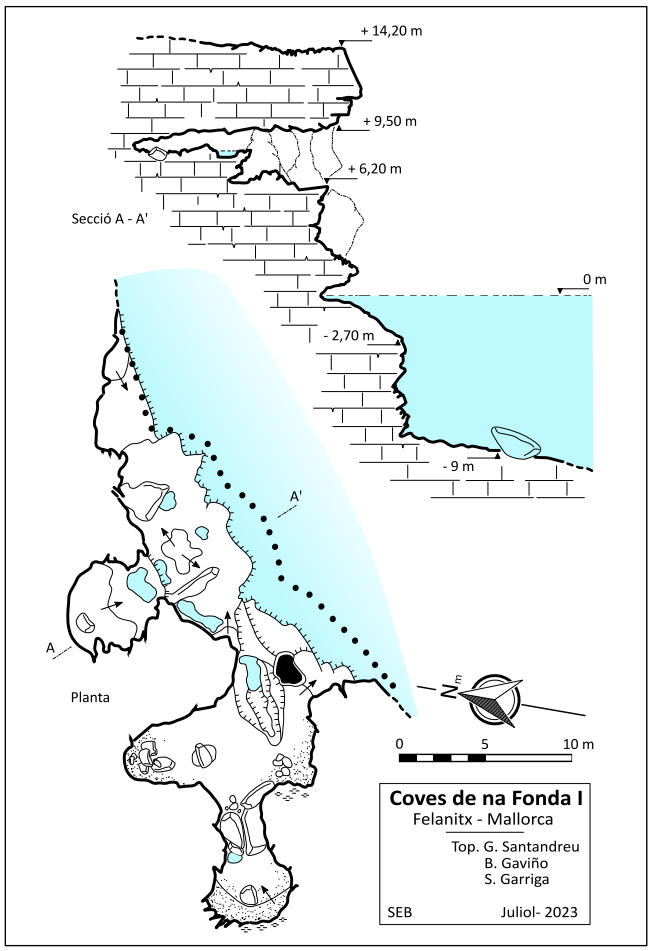


Figura 9: Topografia de les coves de na Fonda I (Felanitx).
Figure 9: Topographic survey of the Coves de na Fonda I (Felanitx).

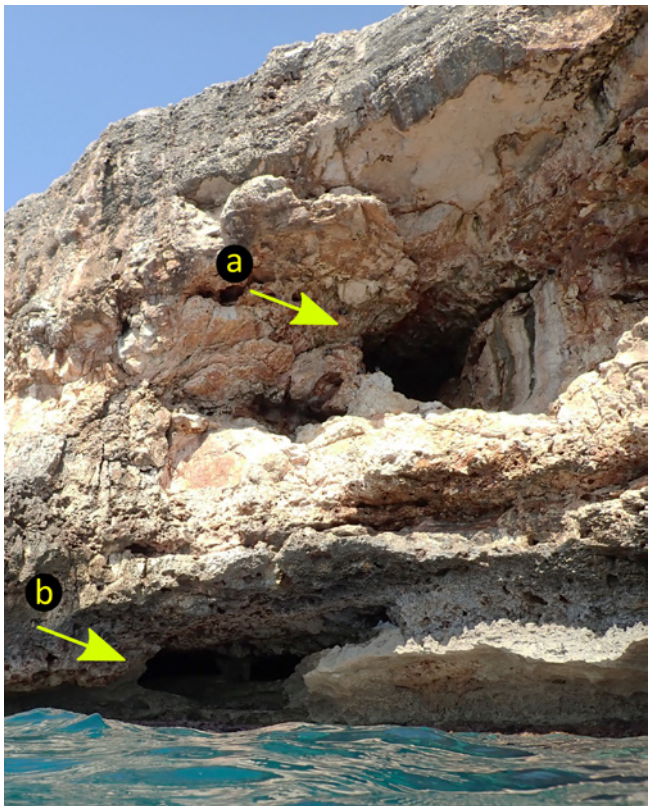


Figura 10: Vista de les coves de na Fonda I (a) i de la cova de la Marededéu (b). S'observa la lleugera superposició d'ambdues cavitats, més evident a l'orientació de les galeries que les formen. La primera enlairada uns 6 m s.n.m. associada a una antiga plataforma litoral i la segona, encara activa, resta oberta a l'actual nivell marí amb processos erosius operatius. A la boca d'accés d'aquesta, es pot entreveure la columna estalagmítica possible origen metafòric del topònim (Foto: G. Santandreu).
Figure 10: View of the Coves de na Fonda I (a) and the Cova de la Marededéu (b). Both caves are located in same cliff face, one above the other. The highest one rests at 6 m a.s.l. and it is related to a former and non-active shore platform. The second one, at the present sea level, experiences active marine erosive and shaping processes. At the entrance of the cave there is a column, which is highly possible that gives the name to the cave in a metaphorical sense (Photo: G. Santandreu).

la qual fa referència als esbarts de coloms que freqüenten la cova. Interessant és l'altra variant que s'ha optat per recollir al text, que al·ludeix a la foca mediterrània (*Monachus monachus*), la presència de la qual, segons testimonis orals recollits per Aguiló, fins l'any 1945 encara era habitual a la cova.

Coves de na Fonda I

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522437 4361977)

És la primera d'un conjunt de cavitats obertes a mitjana alçada dels penya-segats, situació que les fan bastant inaccessibles tant per mar com per terra. Prenen el nom d'una pesquera de la zona. Es tracta d'una cova d'erosió marina inactiva que s'obri a uns 6 m s.n.m. amb una planta molt irregular definida per dos àmbits separats. El més destacable és una galeria de 20 m i una amplada màxima d'11m que segueix una direcció dominant de 260º (Figura 9). Presenta el pis a distints nivells amb un espai central d'una amplada màxima d'11 m x 1,70 m d'alçada. Al fons s'hi localitza una cambreta aïllada de 5 x 4 m amb una alçada entre 0,80 i 1 m amb abundància de sediment argilós als costats. La resta de la cavitat no és més que un coval que s'obri cap a xaloc amb el rocam molt fragmentat mostrant abundants motlles de bivalves. La penetració màxima a la roca és d'una dotzena de metres i una amplada d'uns 25 m.

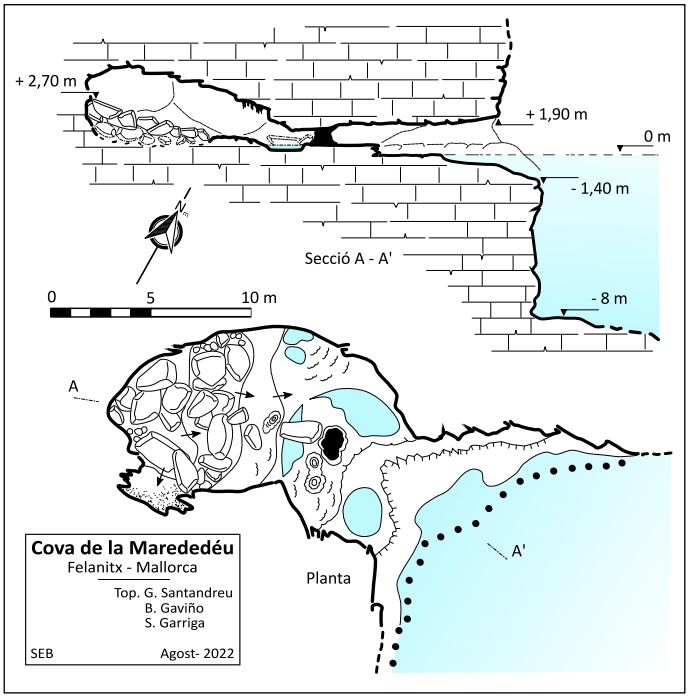


Figura 11: Topografia de la cova de la Marededéu (Felanitx).
Figure 11: Topographic survey of the Cova de la Marededéu (Felanitx).

Cova de la Marededéu

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522430 4361969)

Cavitat oberta al nivell marí actual, que es desenvolupa lleugerament baix el costat meridional de la cova descrita anteriorment (Figura 10). La balma de l'entrada té una amplada de 15 m i una alçada de gairebé 2 m. Aquestes dimensions es redueixen a un passatge de 5 m per 1 m d'alt que dona accés a la cova. Els recobriments litoquímics són presents en aquest indret en forma d'un trespol ben pla recobert de capes de colada pavimentària (clarament visibles al frontal erosionat per la mar) i una columna solitària que en divideix l'accés. És precisament aquesta formació calcària la que, segons AGUILÓ (1991), donaria origen al nom de la cova. Superat aquest passatge, la cavitat forma una sala de 9 x 12 m i 2,50 m d'alçada, orientada a 255º (Figura 11). Aquesta orientació coincideix amb els 260º de la galeria principal de la cova de na Fonda I . El sector inicial d'aquesta cambra està ocupat per diversos gorgs, però la resta d'espai és un rost ascendent de blocs amuntegats per l'onatge. Alguns redols del sostre de la sala presenten acumulacions incipients d'estalactites i petites banderes, algunes d'elles afectades per processos de descalcificació. Igualment, a una cota entre 2,50 i 3 m sobre el nivell actual de la mar, s'observen abundants motlles del mol·lusc *Lithophaga lithophaga*, així com empremtes de fauna coral·lina, possiblement *Astrocoenia lobatorotundata*.

Figura 12: Coves de na Fonda II. El conjunt de les coves de na Fonda, s'obri a una plataforma litoral relicta actualment situada entre 6 i 7 m s.n.m. (en primer terme a la imatge), la qual cosa condiciona l'accés tant terrestre com marítim i en defineix el perfil del penya-segat (Foto: G. Santandreu).
Figure 12: Coves de na Fonda II. The set of the Coves de na Fonda is carved on a relict shore platform located between 6 and 7 m a.s.l. (foregorund). This difficult both, land and sea access, and also characterizes de cliff profile (Photo: G. Santandreu).

Coves de na Fonda II o Es Secret

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522417 4361953)

Es localitza a continuació de la cova de na Fonda I, i està situada igualment a mitjana alçada del penya-segat, a una altura de 6,80 m s.n.m. (Figura 12). Tot plegat sembla apuntar que

ambdues cavitats pogueren ser en origen una sola amb una gènesi comuna lligada a l'erosió marina, i que en l'actualitat es mostren separades pel desmantellament del penya-segat.

La boca de la cova és de 28 m amb una plataforma d'erosió relicta ben evident a la zona exterior. Cap a l'interior assoleix en direcció NW els 20 m amb alguns sectors diferenciats. La part meridional està definida per un relleix rocós que mostra la roca mare nua i ben treballada per acció marina. En canvi, el tram nord presenta major complexitat amb un arc o columna fruit de l'erosió litoral, a més d'una notable acumulació de blocs que n'ocupen la part més interior. L'alçada a la boca és de 6 m, que es redueixen cap a l'interior fins als 2 m (Figura 13).

A uns 14 m cap al fons, coincidint on la cova presenta una raconada aïllada de l'exterior, s'aprecien uns elements clarament antròpics. Es tracta d'un mur de pedres que tanca i dissimula aquest darrer tram. Puntualment, els blocs rocosos estan falcats amb tascons treballats de fusta. Aquest mur delimita un espai recollit i aïllat de la resta de la cova que forma una estança d'uns 8 x 6 m i d'una alçada d'entre 1 i 1,50 m. L'extrem nord es troba tancat per un altre mur bastit de pedra en sec, de factura més treballada, i d'una alçada d'1 m (Figura 14). Tot i això, l'estança encara es perllonga per sobre d'aquest mur 2 m més amb un passatge estret. Les tasques per habilitar l'espai també són evidents al trespol, que ha estat picat, aplanat i rebaixat en algun indret, deixant al descobert acumulacions d'argiles i el que semblen microbretxes quaternàries de clastes centimètrics angulosos i de matriu argilosa. Tot plegat permet establir com hipòtesi plausible que l'objecte de tals habilitacions respongui a un ús lligat a les activitats de contraban, talment un secret. Malgrat el dificultós accés, tant per mar com per terra (per altra banda, requisits necessaris d'aquests tipus d'espais), sembla que es tractés d'un lloc de transbord i, en primera instància, d'amagatall de les mercaderies fraudulentes. Aquests tipus d'activitats estarien ben arrelades i foren intensament practicades arreu del litoral de migjorn i llevant de l'illa fins a temps relativament recents (MUT, 2017). En el cas de la zona que ens ocupa trobem al noticiari *El Balear* (ANÒNIM, 1884) una nota que es fa ressò d'aquestes pràctiques. Amb data de 7 de juliol de 1884, cita: «*La fiscalía militar de Marina, llama a los dueños de 48 bultos de*

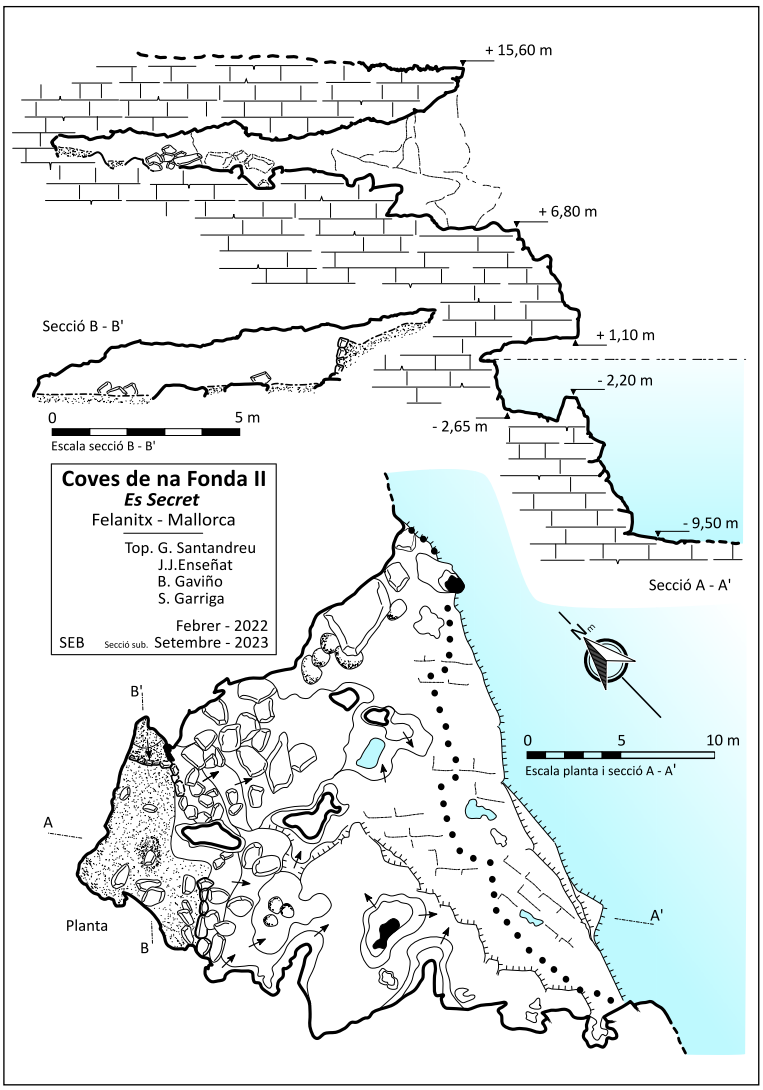


Figura 13: Topografia de les coves de na Fonda II o es Secret (Felanitx).
Figure 13: Topographic survey of the Coves de na Fonda II or es Secret (Felanitx).

Figura 14: Vista de la part més interior de les coves de na Fonda II, on es localitza l'espai habilitat com a secret de contraban i el mur que en tanca un dels costats. Escala: 1 m (Foto: G. Santandreu).
Figure 14: View of the innermost part of the Coves de na Fonda II, where the place was adapted for smuggling, with a masonry wall enclosing one side. Graphical scale: 1 m (Photo: G. Santandreu).

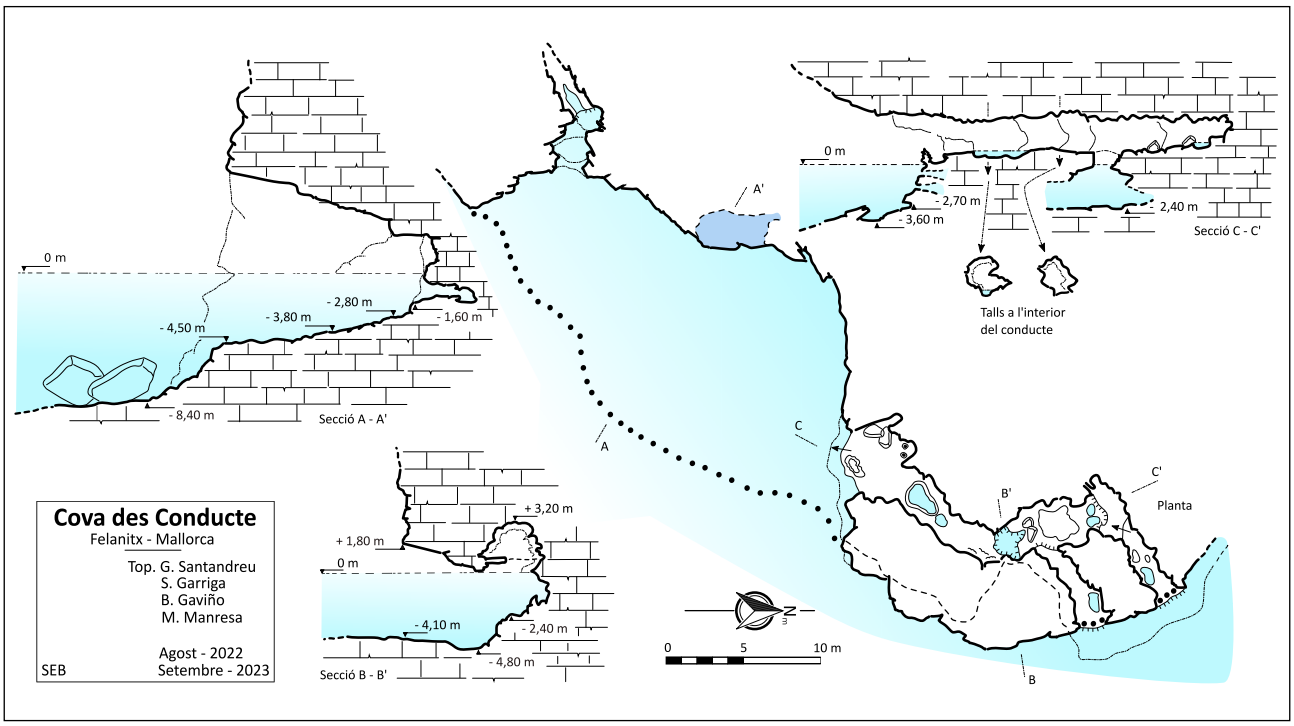


Figura 15: Topografia de la cova des Conducte (Felanitx).
Figure 15: Topographic survey of the Cova des Conducte (Felanitx).

tabaco apresados por fuerzas de la escampavía Pez dentro de una cueva cerca de Porto-Colom...». No es tracta d'un fet puntual, posteriorment, i ja al llarg de les primeres dècades dels s. XX, l'intercanvi de requeriments entre la Comandància de Carabiners de Palma, el batle de la Vila i la Comandància de Marina, serà contínua, deixant una dilatada constància documental d'aquestes pràctiques il·lícites arreu del litoral de migjorn (ROSSELLÓ, 2009).

Cova des Conducte

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522398 4361899)

És una gran balma situada al nivell marí, tractant-se, per tant, d'una cova d'erosió marina activa. Orientada cap a SE, l'obertura de la boca és de 30 m, endinsant-se un màxim de 16 m a les penyes, mentre que l'alçada de la visera és de 6,50 m. Aquesta cova *a priori*, poca cosa més que un entrant marí de modestes dimensions, donà a conèixer en el transcurs de la seva exploració l'existència en els seus extrems de dos conductes que s'endinsen dins el rocam i que li confereixen un caire geomorfològic peculiar (Figura 15). S'ha d'esmentar que aquests conductes, sobretot el localitzat al costat septentrional, no semblen en origen fruit del mateix procés d'erosió marina que condiciona la existència de la balma.

Al costat SW s'obri al nivell marí una estreta galeria inundada, de 8 m de llargària, que acaba en un colze on l'estretor i l'efecte de la fluctuació de la superfície de l'aigua la converteixen en impenetrable. En canvi, al costat N s'obri a un 1 m s.n.m. un passatge de majors dimensions, que es desenvolupa en bona part de forma paral·lela a la mar per l'interior del penya-segat. Està orientat a 30º fins que a uns 12 m de l'entrada forma un colze cap a 340º on penetra 10 m més. En el canvi d'orientació, la galeria presenta el pis enfonsat i la mar penetra formant un petit bufador de 2 x 2 m. En aquest punt el conducte ha estat capturat per l'erosió de la balma exterior amb la qual es comunica per un pas sifonat (veure secció B - B' a la Figura 15). El tram final del conducte té dues obertures laterals estretes que guaiten a l'exterior del penya-segat a una alçada de 2 m s.n.m. Pel que fa a l'alçada, el conducte és bastant regular, entre els 2 i 2,50 m, assolint de forma puntual els 3,50 m a l'indret del bufador. A diversos punts del conducte, però sobretot a la part inicial, s'aprecien denses colònies de *Chthamalus stellatus*, que a trams, en folren gairebé tot el trespol. Les parets del conducte es mostren totalment recobertes i llavorades per irregularitats amb morfologies de tipologia alveolar i algunes lleugerament espongiformes. A més, en algun tram d'aquest, es poden observar al manco dues formes aparentment de dissolució disposades horitzontalment que formen una espècie de *notch* (Figura 16). La simple observació no ens permet aclarir si es tracta del fruit de l'erosió desenvolupada aprofitant les diferencies de textura de la roca o bé, morfologies de dissolució que podrien correspondre a nivells

d'inundació propis de les de cavitats càrstiques. La disposició inusual del conducte associat a una cavitat d'erosió marina activa, la seva morfologia així com les formes citades, fan pensar que es pugui tractar en origen d'un conducte excavat per dissolució en condicions freàtiques, posteriorment retocat pels agents marins. Per tant, i amb certes reserves pel que fa al sentit estricte del terme (*vid.* MONTORIOL-POUS, 1971), podríem parlar de la captura càrstica-marina, d'un element relacionat amb el modelat endocàrstic propi del rocam carbonatat.

Cova des Faralló d'en Fred

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522362 4361857)

De les diverses coves litorals que es localitzen en aquest tram de litoral, aquesta es troba pràcticament enfront del Faralló, del qual n'agafa el nom (Figura 17). S'obri a una cota de 2 m s.n.m, a la base dels penya-segats que en aquest punt assoleixen una alçada de 12 m. Destaca la presència de les restes d'eolianita, corresponent a una duna plio-quaternaria adossada al penya-segat, per sota de l'obertura de la boca (Figura 18). Des de la mar, la boca de la cova, queda dissimulada per un penyal. La cara interior d'aquest, presenta un lateral recobert per colades parietals i pavimentàries, així com les restes d'un massís estalagmític molt desmantellat per l'erosió marina. La cavitat té una obertura de 15 m i una fondària de 10 m tot i que la penetració màxima al penya-segat cap a l'est, és també de 15 m, indret on s'acumulen gran quantitat de blocs. L'alçada mitjana és de 2 m, arribant als 3 m tot aprofitant la depressió d'una gran marmita al costat nord (Figura 19). A l'interior, algunes columnes de precipitat calcari, a més de pilars excavats a la roca mare, compartimenten l'estança. A indrets puntuals es poden observar espeleotemes en forma de petites banderes, colades, microgours i fins i tot, conjunts d'una espècie de botrioïdals o formes de percolació penjades al sòtil. És interessant ressaltar

Figura 16: Cova des Conducte. Extrem de la galeria que connecta amb l'exterior. S'aprecia com les parets i sòtil del conducte es troben recobertes d'abundants morfologies d'aspecte alveolar i espongiforme. A més, destaquen unes formes disposades horitzontalment, similars a una entalladura, que tant podrien ser fruit de l'erosió com de processos de dissolució (Foto: G. Santandreu).

Figure 16: Cova des Conducte. The end of the gallery connects to outside of the cave. Alveolar and honeycomb-like corrosion features cover the lateral and roof passage walls. Also, near horizontal corrosion notch-like features can be seen at different heights in the lateral walls. The genesis of this feature could be related with solution (Photo: G. Santandreu).

Figura 17: Vista des de l'interior de la cova des Faralló. Al fons, la característica silueta del Faralló, que en domina tot l'indret (Foto: G. Santandreu).

Figure 17: Inner view of the Cova des Faralló. In the background, the characteristic silhouette of the Faralló dominates the seascape (Photo: G. Santandreu).

Figura 18: En primer terme, duna fòssil de cronologia plistocena, per sota l'entrada de la cova des Faralló d'en Fred. El marcat *notch* que es pot observar a l'esquerra de la persona, ha desaparegut totalment a l'alçada de la cova. També s'observa en primer terme la marcada tenassa semi submergida folrada d'organismes (Foto: G. Santandreu).

Figure 18: In the foreground, fossilized dune, from Pleistocene period, placed under the entrance of the Cova des Faralló d'en Fred. The clearly visible notch, on the left of the person, has disappeared completely close to the cave. Also, a ledge in the current sea level (*trottoir*) can be appreciated covered by encrusting organisms (Photo: G. Santandreu).

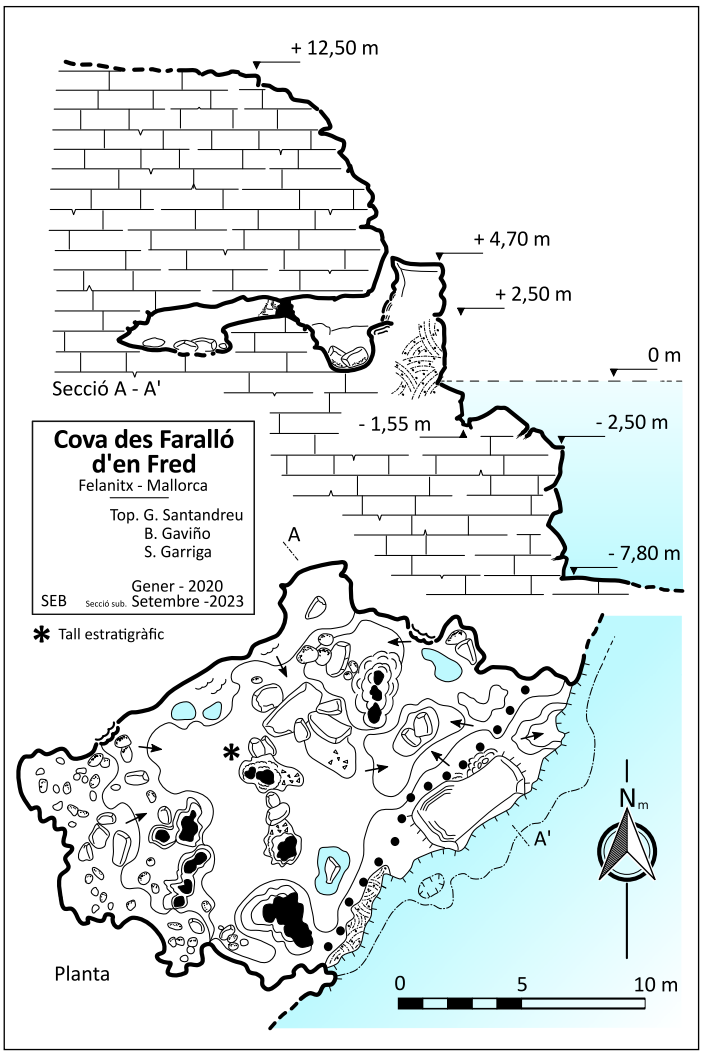


Figura 19: Topografia de la cova des Faralló d'en Fred (Felanitx).
Figure 19: Topographic survey of the Cova des Faralló d'en Fred (Felanitx).

el recobriment d'unes gruixudes estalagmites per sediments arenosos compactats que han estat posteriorment desenterrades per l'erosió marina (Figura 20a). També és pertinent deixar constància de l'existència d'una resta de ceràmica i d'un os indeterminat, inserts a un paquet d'arenes cimentades, adossades al fons rocós de la cova (Figura 20b). Si més no, la presència de restes òssies en cavitats litorals d'aquestes característiques és relativament habitual, la de fragments ceràmics no ho és tant. A més, el fragment que es mostra en secció, presenta restes de partícules de desgreixant d'aspecte molt similar al d'algunes pastes de factura prehistòrica, cosa que en faria encara més inusual la seva localització en aquest indret tan remot. Tot plegat, evidencia una complexa estratigrafia que testimonia els diferents estadis espeleocronològics de la cavitat (Figura 21).

Túnel des Faralló d'en Fred

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522430 4361721)

Tres són els farallons del terme municipal de Felanitx: el Faralló de sa Boca o Farallonet, (AGUILÓ, 1991 ho testimonia també amb la forma de la sufixació diminutiva «Faraionet») i que està ubicat al costat de llevant de la bocana de Portocolom, el Faralló de Cala Ferrera, situat a la cala referida i aquest tercer, anomenat Faralló d'en Fred, a uns 120 m de la costa i molt proper a cala Brafi. És sense dubte aquest darrer illot, el més conegut i emblemàtic de la costa felanitxera (Figura 22). La seva superfície és de 1.220 m^2, amb una alçària màxima de 9 m a la part més meridional (MAYOL, 2020), encara que una gran part de l'illot és una plataforma plana que s'eleva poc més d'un metre de la mar, el que es coneix com sa tenassa des Faraió [sic] (AGUILÓ, 1991). El topònim prové del malnom d'un antic propietari de les terres amb què confronta, Francesc "Fred" (AGUILÓ, 1991).

L'illot es troba travessat en direcció NW-SE per aquest túnel submarí. Es tracta d'un exemple d'arc d'abrasió marina d'època pleistocena quan el nivell marí era inferior a l'actual. Té unes dimensions de 14 m de longitud i poc menys de 5 m d'amplària mitjana, llevat de les amplades de les boques, especialment la situada més a ponent, que supera

Figura 20: a) Espeleotemes recoberts per arenes cimentades de cronologia pleistocena. L'erosió ha deixat al descobert part d'aquestes formacions. b) Fragment ceràmic (perfil) i ós dins una escletxa d'arenes compactades. Escala 10 cm (Fotos: G. Santandreu).
Figure 20: a) Speleothems covered by Pleistocene consolidated sands are partially exposed by erosion. b) Pottery fragment (profile) and a bone, inside a crack fullfilled by compacted sand. The scale shown is 10 cm long (Photos: G. Santandreu).

els 8 m. El sostre és gairebé pla i possiblement segueix un pla d'estratificació, amb una cota de -2,6 m; mentre el fons és més irregular, situat entre els -6,70 i -9 m, i incrementa la fondària a la zona interior del túnel. L'alçària varia entre els 4,10 i els 6,40 m (Figura 23). A l'interior dels arcs s'hi observen morfologies i elements propis d'abrasió/erosió marina, com són la presència de còdols arrodonits i marmites. A les proximitats de les dues entrades hi ha camps de blocs de gran mida producte del desmantellament de l'illot.

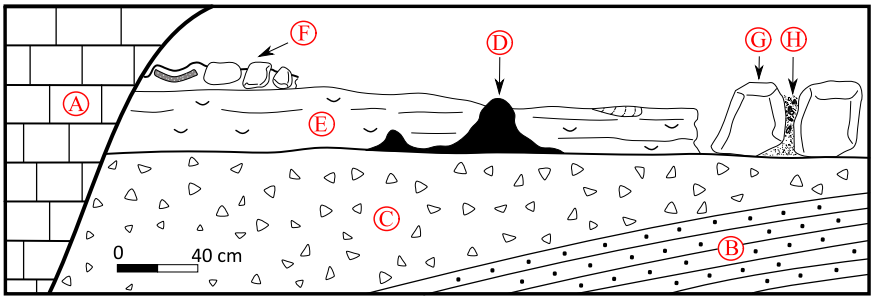


Figura 21: Tall estratigràfic a la cova des Faralló d'en Fred. A: Miocè. B: Eolianita, de cronologia plistocena. C: Bretxes cimentades amb matriu vermellosa. D: Espeleotema, estalagmita. E: Arenes de platja cimentades amb fauna marina (*Cerithium vulgatum*), de cronologia pleistocena. F: Arenes cimentades amb clastes on s'hi pot observar el perfil d'un fragment de ceràmica de factura possiblement prehistòrica. G: Blocs rocosos. H: Arenes de platja amb mol·luscs marins d'edat holocena.
Figure 21: Stratigraphic section of the Cova de Faralló d'en Fred. A: Miocene bedrock. B: Eolianite, from Pleistocene period. C: Consolidated breccia with red matrix. D: Speleothem, stalagmite. E: Consolidated beach sand with marine fossils (*Cerithium vulgatum*), Pleistocene aged. F: Consolidated sands mixed with clasts containing pottery, probably corresponding to prehistoric period. G: Rocky boulders. H: Beach sands with Holocene mollusks.

Figura 22: Es Faralló d'en Fred. Just on acaba el promontori enlairat que el defineix i comença la tenassa, es localitza sotaiguada, l'entrada de ponent al túnel submarí, un gran arc d'erosió marina (Foto: G. Santandreu).
Figure 22: A great submerged erosion arc starts where the promontory, that defines Es Faralló d'en Fred, ends and begins the marine ledge (Photo: G. Santandreu).

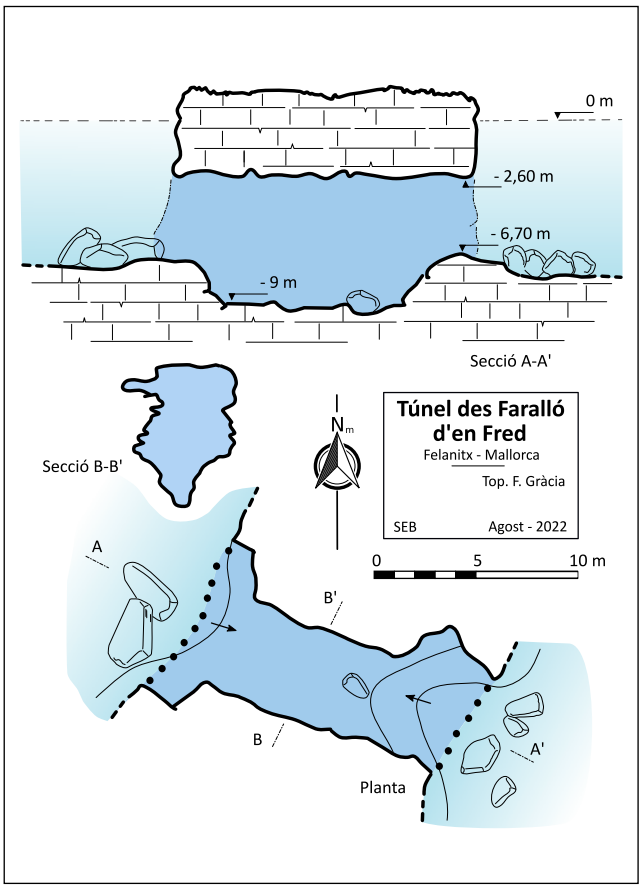


Figura 23: Topografia del túnel des Faralló d'en Fred (Felanitx).
Figure 23: Topographic survey of the Túnel des Faralló d'en Fred (Felanitx).

Cova de s'Altina des Faralló

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522502 4361791)

Cavitat submarina que es localitza a uns 50 m al nord de l'illot del Faralló d'en Fred, a una fondària d'uns 14 m. La seva gènesi correspon clarament a una cavitat d'erosió marina. Presenta dues boques a cada extrem de la cavitat, una zenital al costat SW, de poc més de 4 m de diàmetre i una altra molt més ampla a l'extrem NE, de 13 m. L'interior guanya amplada a mesura que s'acosta a l'extrem NE, on passa dels 6 m d'amplària als 13 m a la part més distal. En canvi, l'alçada és constant entre 1 m i 1,5 m. Tant el pis com el sostre són molt plans (Figura 24). Aquest darrer està travessat per multitud de petits forats, no detectables a simple vista. L'entrada que mira a llevant, està fraccionada per diverses columnes de roca, que atorguen una bella estampa gòtica a la cavitat (Figura 25). El fons marí que constitueix la part exterior de la cova forma part d'una plataforma litoral i es troba recoberta de la fanerògama *Posidonia oceanica*.

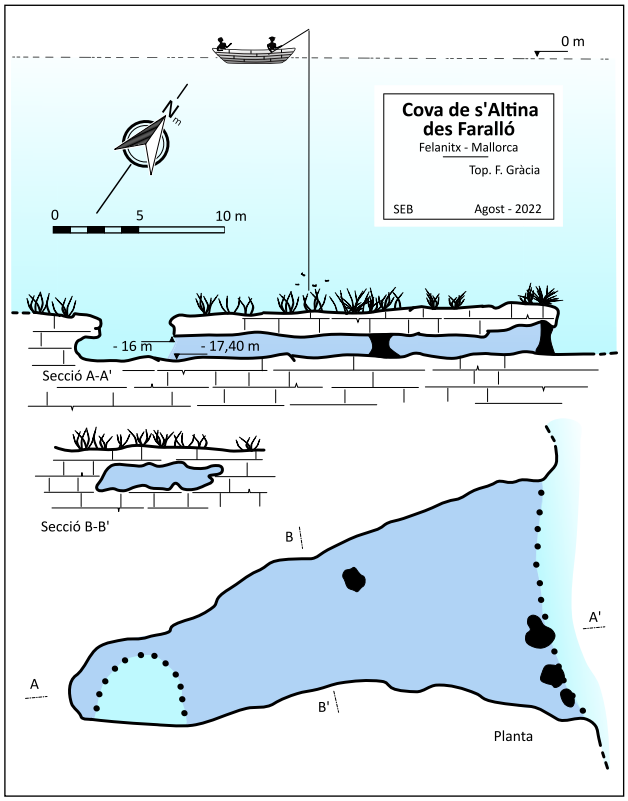


Figura 24: Topografia de sa cova de s'Altina des Faralló (Felanitx).
Figure 24: Topographic survey of the Cova de s'Altina des Faralló (Felanitx).

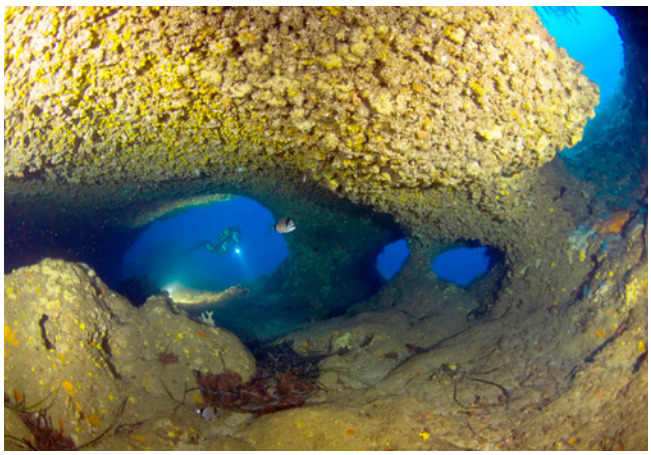


Figura 25: Cova de s'Altina des Faralló, situada a uns 14 m de fondària sota el nivell marí. Molt vinculada a processos erosius, presenta diverses obertures en forma d'arcs a l'entrada que mira al llevant (Foto: T. Cirer).
Figure 25: Cova de s'Altina des Faralló, located 14 m below the sea level. It is very related to marine erosive processes. It has several apertures arc-shaped in the east entrance (Photo: T. Cirer).

Coves de na Blonqueta

(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522343 4361838)

Es tracta de dos covitxols d'escàs desenvolupament possiblement vinculats a diversos episodis d'erosió marina (Figura 26). Ambdós agafen el nom d'una pesquera de la zona coneguda com na Blonqueta, malnom encara existent a s'Horta (AGUILÓ, 1991). Les dues cavitats es troben ubicades al mateix penyasegat, superposades una sobre l'altra. La inferior, té la boca a 4 m s.n.m. i la superior a 7,5 m. Aquesta disposició, a l'espera de trobar altres indicadors més concloents, podria ser un indici de distints nivells marins que haguessin participat en la seva evolució. El coval superior té una obertura a la boca de 6 m i s'endinsa en direcció 270º amb rost ascendent amb alguns blocs acumulats, fins a un màxim de 8 m, extrem on s'hi observen sediments al·lòctons de tipus argilós. És de sostre baix, sense superar l'1,70 m d'alçada. La coveta inferior, de menor desenvolupament està orientada a 250º, té una boca de 4 m, 8,5 m de fondària i una alçada de 2,30 a l'entrada que es redueix a 0,65 cm a l'extrem interior. A l'entrada destaca una esvelta columna fruit de l'efecte de l'erosió marina sobre la roca. Als peus d'aquesta s'hi localitza una marmita ocupada per un gran bloc rocós molt treballat, pràcticament redó (veure Secció C-C' figura 26). Es pot intuir que la cova, degué tenir unes dimensions majors. A la terrassa marina que la precedeix, s'hi troben alguns blocs de caires angulosos i mida considerable, que denoten l'enfonsament d'un voladís preexistent. En aquesta terrassa són abundants i variats els exemples de *karren* litoral (cocons, estries i pinacles).

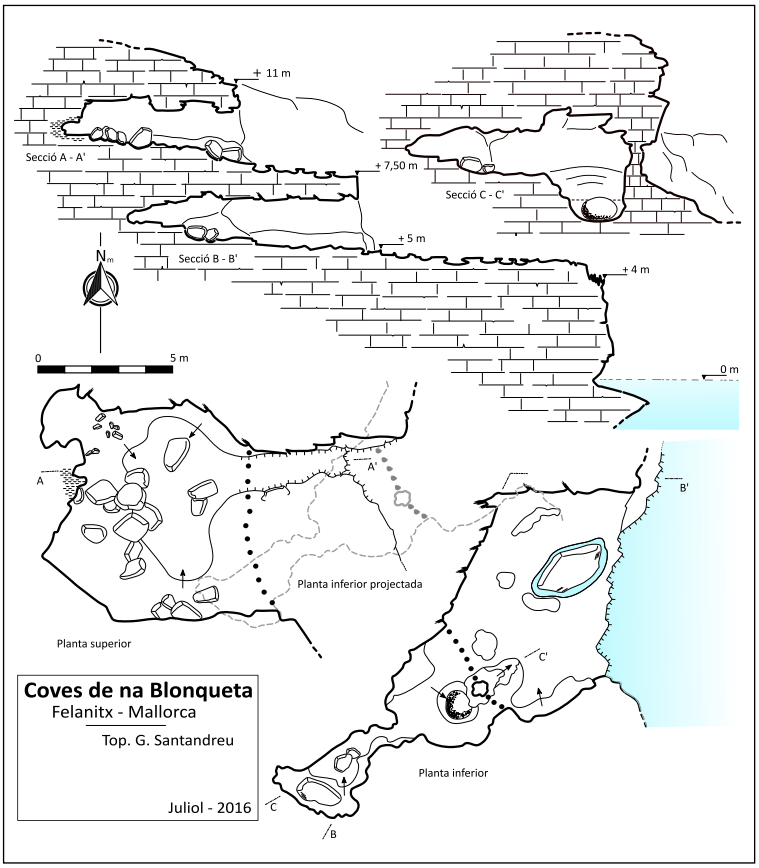


Figura 26: Topografia de les coves de na Blonqueta (Felanitx).
Figure 26: Topographic survey of the Coves de na Blonqueta (Felanitx).

Cova dels Eriçons d'Arena o dels Escorballs
(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522105 4361584)

Cavitat subaquàtica situada al costat nord de cala Brafi, al lloc conegut com s'entrada de cala Brafi (AGUILÓ, 1991). La boca, d'11,3 m d'ample, s'obri a la base dels penya-segats a una fondària de 6 m, amb un fals sostre que es perllonga a l'exterior. Les dimensions de la cova són de 24 m de llargària per 18 m d'amplària màxima, encara que els darrers metres, per la poca alçada del sostre, són molt complicats i angostos de recórrer. La fondària sota l'aigua de la cavitat està compresa entre els 6 i els 8,4 m. L'alçada varia entre 1,4 m a l'entrada i els 0,5 a 0,7 m (Figura 27). La quantitat de sediment arenós acumulat deu fer minvar el volum de la cavitat i possiblement impedeix accedir a les zones més interiors de la cova. El fons és pla i la cavitat sembla seguir un pla d'estratificació. Els espeleotemes, de reduïdes dimensions, són presents en forma d'algunes estalagmites aïllades i columnes als laterals. El seu fons es troba recobert per arenes i hi ha poca diferència de fondària entre el fons més proper a l'entrada i la part interior de la cavitat, producte del rebliment associat a les arenes i al seu retreballament per l'onatge. La gènesi sembla clarament producte de l'erosió marina en un període regressiu pleistocènic. Es pot inferir que el buit original de la cavitat s'hauria format amb anterioritat a l'ascens postglacial de l'holocè, sent posteriorment reomplert de sediments subactuals. Per altra banda, la discreta decoració estalagmítica indica clarament unes condicions vadoses molt diferents a les actuals.

Al seu interior s'aprecien abundants closques de *Schizaster canaliferus*, espècie d'eriçó irregular endèmic del Mediterrani, que viu en fons d'arena i fang, on ha estat trobat entre els 10 m fins als 100 m de profunditat. Les seves dimensions són fins a 75 mm de llargada i el seu nom té relació amb el fort enfonsament de la tercera zona ambulacral, que correspon a la zona anterior del cos. La profunditat de la cavitat, entre els 6 i 8 m és lleugerament inferior a la cota on es troba habitualment. Els falsos coralls i poliquets també són freqüents. La cova també és coneguda amb el nom de cova dels Escorballs entre els pescadors esportius que en destaquen la presència d'*Sciaena umbra*.

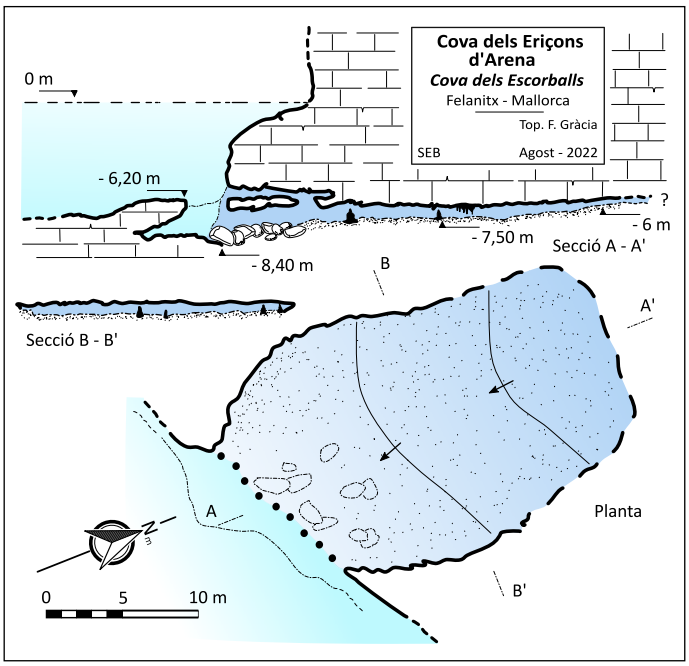


Figura 27: Topografia de la cova dels Eriçons d'Arena o dels Escorballs (Felanitx).
Figure 27: Topographic survey of the Cova dels Eriçons or dels Escorballs (Felanitx).

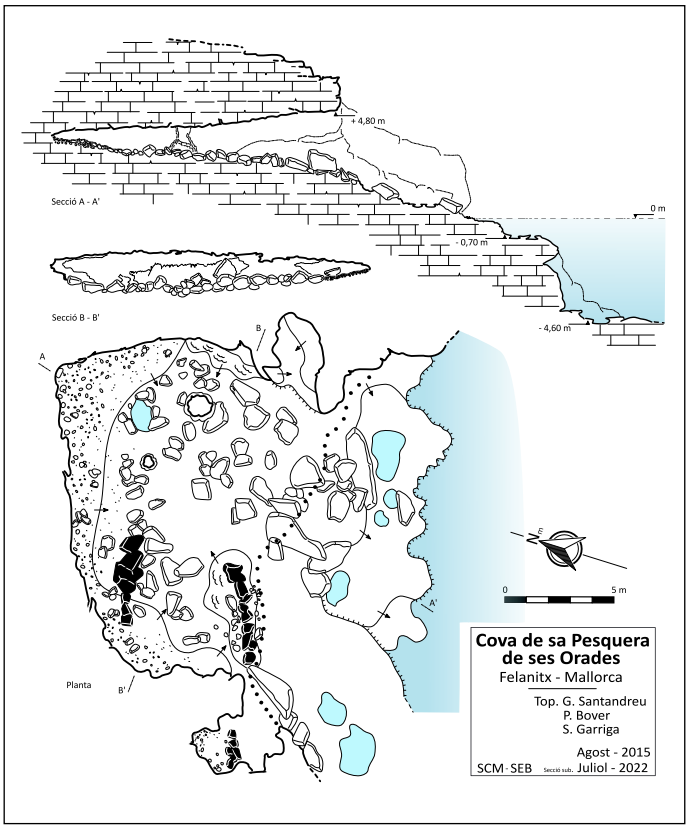


Figura 28: Topografia de la cova de sa Pesquera de ses Orades (Felanitx).
Figure 28: Topographic survey of the Cova de sa Pesquera de ses Orades (Felanitx).

Cova de sa Pesquera de ses Orades
(Coord. UTM-ETRS89 31S: 522014 4361629)

S'obre al lateral nord de cala Brafi. És un coval originat per erosió marina actualment inactiu, que té una boca de 18 m d'amplada. La boca s'obri a 2 m s.n.m. amb un voladís de 3 m d'alçada, amb presència de gran nombre de blocs provinents del desmantellament del voladís, fet que s'accentua a l'extrem de ponent on aquests, cobreixen part de la boca. El perfil exterior és un coster atapeït de formes variades de *karren* litoral, que cau en suau rost cap a la mar, on s'hi localitza una plataforma mig submergida. L'interior és una estança d'uns 15 x 13 m (Figura 28), totalment farcida de blocs

Figura 29: Grans cocons irregulars excavats sobre una antiga plataforma d'abrasió molt a prop de la cova des Cocons Plans. A la zona també abunden nombroses formes de *karren* litoral (Foto. G. Santandreu).
Figure 29: Big irregular basin pools carved on an ancient marine terrace close to the Cova des Cocons Plans. The area exhibits conspicuous littoral karren assemblages (Photo: G. Santandreu).

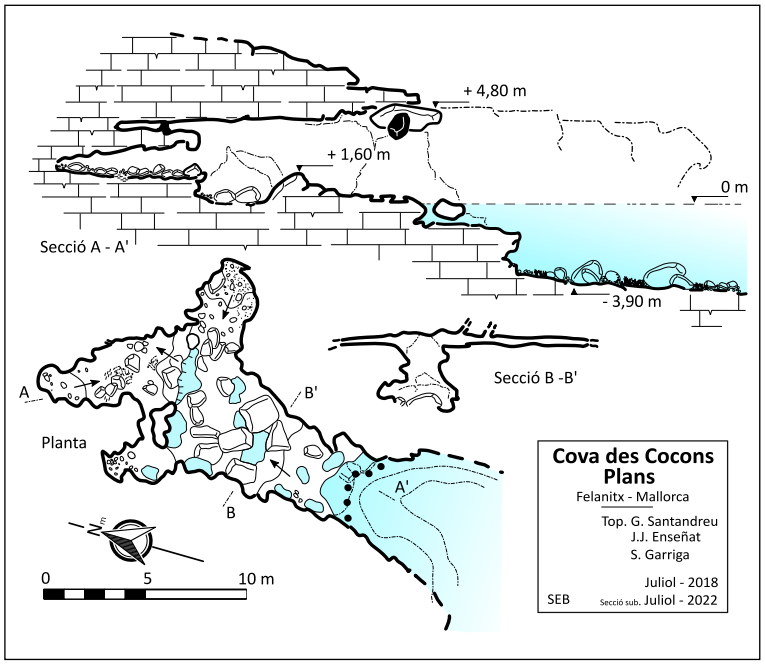


Figura 30: Topografia de la cova des Cocons Plans (Felanitx).
Figure 30: Topographic survey of the Cova des Cocons Plans (Felanitx).

d'aspecte rodat, dipositats per les envestides de la mar, formant un rost ascendent cap a l'interior que en fa disminuir l'alçada fins a fer-se impenetrable. Presenta dues columnes clarament diferenciades dels dipòsits litoquímics, tractant-se de les restes de la roca mare on s'excava la cavitat, molt erosionades i treballades per l'acció marina. Al costat occidental s'hi localitzen algunes minses colades pavimentàries. La cova pren el nom de la pesquera que s'ubica en aquest indret.

Cova des Cocons Plans
(Coord. UTM-ETRS89 31S: 521977 4361619)

Es troba a uns metres de la cavitat anterior, en direcció a ponent. En aquest indret els penya-segats mostren a mitjan alçada una terrassa marina totalment plana que es pot associar a un antic nivell d'erosió marina, la qual contrasta amb la resta del paratge de rost més marcat i perfil irregular. Està solcada per grans cocons interconnectats sovint plens d'aigua. Són aquests cocons plans el que donen nom al lloc i per extensió, a la cavitat (Figura 29). La cova es localitza al fons d'un passadís rocós, amb evidències de tractar-se de part del voladís de la cova, actualment desmantellat. A la zona més propera a l'entrada, s'observa al fons marí una espècie de tàlveg, un canal sinuós excavat al rocam. La cavitat s'obri al nivell marí, el qual agrana minsament els primers metres de tirat de la cova, encara que, els dies de temporal, l'onatge penetra amb força al seu interior. Es pot definir com una galeria rectilínia orientada a 360º que amida 4 m a la boca i s'endinsa 16 m. El voladís exterior està format en part, per blocs rocosos, els quals es troben encaixats entre ells en un precari equilibri. L'amplada interior és d'un mínim de 3 m a l'inici amb un engrandiment, a mitjan cova, que arriba als 10 m. Té una alçada constant al voltant dels 3 m, llevat de la part final on es redueix a un passatge de poc més d'1 m d'alt (Figura 30). En aquests indrets més profunds, s'hi poden observar paquets de sediments argilosos d'aspecte plàstic que rebleixen els buits del rocam, així com acumulacions compactades de còdols rocosos. Sembla que el procés d'excavació de la cavitat s'ha vist afavorit per la presència d'un pla d'estratificació horitzontal molt marcat. Aquest, tot i que és impenetrable per la seva estretor (d'uns 0,40 m aproximadament), en alguns indrets s'endinsa uns 8 m més (veure Secció B-B' Figura 30).

Cova Rotja
(Coord. UTM-ETRS89 31S: 521965 4361545)

Es localitza al costat sud de cala Brafi, a una raconada on els penya-segats del miocè comencen a assolir certa altura. La seva boca és ben visible, destacant el reompliment de llims i argiles rogencs, que li donen nom (AGUILÓ, 1991). Tot i això, no és més que un petit voladís, treballat per erosió marina que s'obri a 2 m s.n.m. L'amplada de la boca és de 8 m, amb una alçada de 2 m, i una penetració

màxima de 7 m (Figura 31). Com s'ha esmentat, presenta la particularitat de tenir bona part del seu interior reomplert per una espessa capa de sediment de color vermell de textura molt fina, la qual arriba a assolir una potència d'1,50 m. Aquest mateix material s'observa als voltants de l'exterior de la cova, farcint esquerdes i buits del rocam. Sols amb aquestes evidències, es podria atribuir aquesta deposició de sediments a un moment posterior al procés de gènesi de la cova, la qual cosa implicaria un nivell marí més baix. Els sediments podrien haver estat arrossegats per un flux d'aigua circulant dins del caixer del barranc, tractant-se, per tant, del registre d'una avinguda fluvio-torrencial. Posteriorment, la pujada del nivell marí i l'acció de l'erosió marina haurien buidat parcialment la cova.

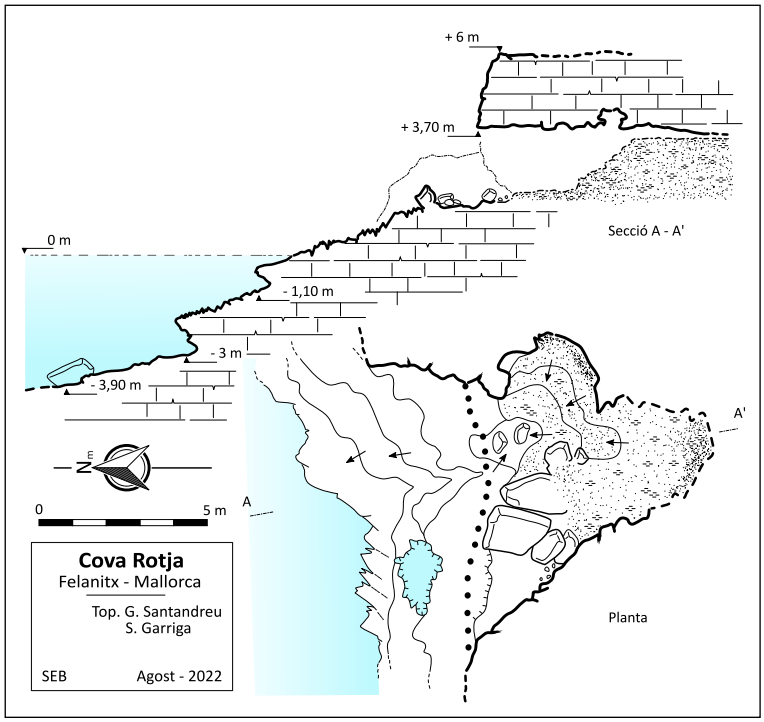


Figura 31: Topografia de la cova Rotja (Felanitx).
Figure 31: Topographic survey of the Cova Rotja (Felanitx).

Conclusions

La situació de la majoria de les cavitats costaneres, tant a la part mitjana i alta de les façanes dels penya-segats com a la seva base, ha condicionat les tasques d'exploració i topografia. En ocasions, s'ha optat pels mètodes propis de l'espeleologia vertical, a d'altres, on l'accés aquàtic era obligat, s'ha adaptat el mètode d'exploració i topografia en aquests espais aquàtics, sempre condicionats per l'estat de la mar.

Des de criteris estrictament geomorfològics, es podria concloure que de les catorze cavitats estudiades al present treball, quatre es desenvolupen totalment sota les aigües. Aquestes s'ajusten als atributs i característiques de formes d'erosió marina, un procés en l'actualitat inactiu en haver quedat part davall de la línia de costa i on l'acció hidràulica de l'onatge es veu considerablement reduïda. Altres sis exhibeixen formes que emmascaren o matisen la gènesi marina. La seva situació a diverses alçades dels penya-segats i l'absència d'elements típics del modelat endocàrstic les defineix com a coves litorals d'abrasió marina no actives i per tant es poden vincular a successius processos de transgressió i regressió marina. Les quatre cavitats restants, arran de la seva posició respecte el nivell marí, avui per avui encara experimenten processos d'erosió marina.

En altres casos les cavitats conserven elements que es poden atribuir a una espeleogènesi associada als processos càrstics. Així la cova des Conducte, a part del coval exterior, clarament vinculat a l'abrasió marina, presenta una part formada per una galeria que sembla associada a un nivell freàtic, tot i que posteriorment ha estat capturada per la mar.

S'ha observat com el desenvolupament d'alguna de les coves de major volum (p.e. la cova des Coloms) sembla haver estat condicionat pel control estructural que coincideix amb una orientació a *grosso modo* W-E, paral·lela a la dels penya-segats i la línia de costa.

Un altre aspecte a tenir en compte és el desmantellament dels penya-segats que a vegades té a veure amb l'efecte pneumàtic de l'onatge que es deriva de l'acció combinada de l'aigua i l'aire sobre la roca. La interacció entre ambdós elements, es manifesta quan es conjuguen especialment en omplir amb certa pressió els clivells, fissures i esquerdes del rocam, afavorint l'arrabassament de fragments de roca. El fenomen s'ha pogut constatar amb la reculada d'algun tram de costa, més enllà de l'efecte sobre les cavitats.

A banda dels trets geomorfològics, algunes de les cavitats (coves de na Fonda II i la cova des Faralló d'en Fred), presenten interessants aspectes etnològics, antropològics o històrics. La primera, com a cavitat habilitada en part, per servir de secret lligat a tasques de contraban bastant comunes i esteses fins temps relativament recents. La segona presenta al seu interior un solitari fragment ceràmic, que en una primera interpretació i arran de l'aspecte de la pasta, podria ser considerat com d'origen prehistòric. Tot i que sense un estudi més acurat, no es pot afinar una atribució cronològica més precisa.

Agraïments

A Damià Vicens que ha aportat de forma incondicional l'interessant tall estratigràfic de la cova des Faralló d'en Fred i ha permès la seva publicació. A Lluís Gómez-Pujol pels enriquidors comentaris aportats en el transcurs de la revisió del manuscrit. A Miquel «Mix» Manresa per la seva agradable companyia, les bones jornades amb *The Dead Chanquetes* i el seu valuós suport logístic a bord de la «*Centolla II*». A Jaume Veny i Joan Ramón, aficionats a la pesca submarina, que han compartit informació sobre algunes de les coves submergides. A Toni Cirer que ha cedit una de les seves excel·lents imatges subaquàtiques per il·lustrar aquest treball. A na Maria José Mas per la lectura atenta del manuscrit. A l'amic Pere Bover amb qui iniciàrem, ja fa una dècada, el recorregut per aquestes costes i penyals.

Dedicam aquest treball a la memòria del company Àngel Ginés, amb un record especial del seu esperit amable i generós, sempre disposat a compartir el seu extens saber del món subterrani.

Bibliografia

AGUILÓ, C. (1980): La toponímia marina de Felanitx, Santanyí i Ses Salines (Mallorca). *Randa*, 10 (2): 25-49.

AGUILÓ, C. (1991): *La toponímia de la costa de Felanitx*. Centre Cultural de Felanitx. 105 pàgs. Felanitx.

[ANÒNIM] (1884): *El Balear. Diario político*. Año III, n. 740. Palma, lúnes 7 de julio de 1884. 4 pàgs.

[ANÒNIM] (2018): Un home ferit greu en caure per una encletxa a les penyes, a Cala Marçal. *Felanitx. Setmanari d'interessos locals*. Any LXXXII, nº 4.078, Divendres 5 de gener de 2018.

BALAGUER, P. (2007): Inventari quantitatiu de les costes rocoses de Mallorca. In: PONS, G.X. & VICENS, D. (eds.). *Geomorfologia Litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerda Barceló*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 14: 201-230. Palma.

BALAGUER, P. & FORNÓS, J.J. (2003): Processos erosius als penya-segats costaners del SE de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània Occidental): dades preliminars de l'erosió contínua per disgregació granular. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 46: 37-50.

EMERY, K.O. & KUHN, C.G. (1982): Sea cliffs: their processes, profiles and classifications. *Geological Society of America Bulletin*, 93: 644-654.

FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (1989): *Karst Geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman. 601 pàgs. London.

FORNÓS, J.J.; BALAGUER, P.; GELABERT, B. & GÓMEZ-PUJOL, L. (2005): Pleistocene formation, evolution and retreat rates of a carbonate coastal cliff (Mallorca Island, Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, SI 49: 15-21.

FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (1995): Litologia i tectònica del carst de Mallorca. *Endins*, 20: 27-43.

FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F. & GÓMEZ-PUJOL, L. (2013): El papel del karst en la morfogénesis costera: el ejemplo de las calas de Mallorca y Menorca. *Geo-Temas*, 14: 67-70.

FORNÓS, J.J & POMAR, L. (1983): Mioceno superior de Mallorca: Unidad Calizas de Santanyí («Complejo Terminal»). In: POMAR, L.; OBRADOR, A.; FORNÓS, J.J: & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (eds.) *El Terciario de las Baleares. Guía de las Excursiones del X Congreso Nacional de Sedimentología*: 177-206. Institut d'Estudis Baleàrics, Universitat de les Illes Balears. Menorca.

GÓMEZ-PUJOL, L. (2006): *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes carbonatades de Mallorca*. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra. Universitat Illes Balears. 223 pàgs. Palma.

GÓMEZ-PUJOL, L.; FORNÓS, J.J. & POMAR, F. (2011): El *karren* litoral a les Illes Balears. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 69-84.

GÓMEZ-PUJOL, L.; GELABERT, B.; FORNÓS, J.J.; PARDO-PASCUAL, J.E.; ROSSELLÓ, V.M.; SEGURA, F. & ONAC, B.P. (2013): Structural control on the presence and character of calas: Observations from Balearic Islands limestone rock coast macroforms. *Geomorphology*, 194: 1-15.

GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; LANDRETH, R.; VICENS, D. & WATKINSON, P. (2001): Evidències geomorfològiques dels canvis del nivell marí. In: PONS, G.X. & GUIJARRO, J.A. (eds.) *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 9: 91-119. Palma.

MAYOL, J. (2020): *Atles de les petites illes i els illots de les Balears*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 29. 357 pàgs. Palma.

MONTORIOL-POUS, J. (1971): Estudio de una captura kárstico-marina en la isla de Cabrera (Baleares). *Acta Geológica Hispánica*, 4, año VI: 89-91.

MUT, T. (2017): *Al·lots avui hi ha festa!. Secrets i confidències desconegudes del contraban mallorquí (1930-1990)*. 334 pàgs. Palma.

ROSSELLÓ, R. (2009): *Noticiario de Felanitx (1870-1912)*. 502 pàgs. Felanitx.

ROSSELLÓ VERGER, V.M. (1964): *Mallorca. El Sur y Sureste.* Cámara de Comercio, Industria y Navegación. 553 pàgs. Palma.

ROSSELLÓ VERGER, V.M. (1995): Les cales, un fet geomòrfic epònim de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 38: 167-180. Palma.

ROSSELLÓ VERGER, V.M. (2005): Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica. *Cuadernos de Geografía*, 77: 1-18.

ROSSELLÓ VERGER, V.M.; BALAGUER, P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; PARDO-PASCUAL, J.E. & SEGURA, F. (2007): El modelado de la costa rocosa oriental de Mallorca: macro, meso y microformas. In: FORNÓS, J.J; GINÉS, J. & GÓMEZ-PUJOL, L. (eds.) *Geomorfologia Litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 153-172. Palma.

SANTANDREU, G.; BOVER, P.; ENSEÑAT, J.J.; GAVIÑO, B. & GRÀCIA, F. (2022): Relacions entre endocarst i dinàmica litoral. El cas de cala Barbacana -Portocolom- (Felanitx, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 5: 63-85. Palma.

SANTANDREU, G.; ENSEÑAT, J.J. & GAVIÑO, B. (2020): Les cavitats litorals de sa Punta -Portocolom- (Felanitx, Mallorca), 1ª part. Descripció, topografia i aspectes geomorfològics. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 93-114.

SANTANDREU, G.; ENSEÑAT, J.J.; GAVIÑO, B. & BOVER, P. (2021): Les cavitats litorals de sa Punta -Portocolom- (Felanitx, Mallorca), 2ª part. Descripció, topografia i aspectes geomorfològics. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 4: 89-101.

STEPHENSON, W. (2014): Rock Coasts. In: MASSELINK, G. & GEHRELS, R. (eds.) *Coastal environments & Global change*. American Geophysical Union & Wiley: 356-379 pàgs. Chichester.

TRENHAILE, A. (1987): *The geomorphology of rock coasts*. Oxford University Press. 384 pàgs. Oxford.

TRENHAILE, A. (2015): Coastal notches: Their morphology, formation and function. *Earth-Science Reviews*, 150: 285-304.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Coastal cave characteristics and speleothems as indicators of sea-level change in the eastern Adriatic

Nina LONČAR [1] & Petra KOVAČ KONRAD [2]

[1] University of Zadar, Department of Geography, Trg kneza Višeslava 9, 23000 Zadar, Croatia. Email: nloncar@unizd.hr
[2] Dinaric Hub d.o.o, Svibanjčica 4a, 10000 Zagreb, Croatia

Abstract

So far, the exploration of coastal and submerged karst caves in Croatia has provided significant insights into the complex interplay between geological, hydrological, and biological processes. This study gives an overview of coastal caves and submerged speleothems in the eastern Adriatic as natural archives for reconstructing past sea-level changes. The research focuses on the distribution and characteristics of completely or partially submerged caves, together with the recent cave-diving discoveries and collected speleothems. Detailed analyses, including U-series dating and mineralogical assessments, reveal that certain caves were shaped during periods of lower sea levels, with the oldest speleothems dating back over 500,000 years. The discovery of Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) in the Adriatic has placed Croatia among the few regions globally contributing to POS based sea-level research, being the 6th location identified and researched worldwide. This finding provides an important tool for reconstructing relative sea levels in the Adriatic, marking significant progress in both speleological and sea-level studies. Variations in cave distribution, morphology, and speleothem formation emphasize the need for ongoing exploration and conservation of these fragile ecosystems. As the impacts of climate change become increasingly evident, coastal karst caves in Croatia will continue to serve as archives for understanding Earth's past and predicting future environmental changes. Future research should expand knowledge of these systems, refine cave-diving sampling techniques, and develop strategies for their sustainable management and conservation.

Resum

L'exploració de les coves càrstiques costaneres i submergides a Croàcia ha proporcionat una visió significativa de la complexa interacció entre els processos geològics, hidrològics i biològics. Aquest estudi ofereix una visió general de les coves litorals i els espeleotemes submergits a l'Adriàtic oriental com a arxius naturals per a reconstruir els canvis pretèrits del nivell de la mar. La investigació se centra en la distribució i les característiques de les coves submergides total o parcialment, així com en els recents descobriments fets amb l'espeleobusseig a les coves i els espeleotemes recollits. Les anàlisis detallades, incloses les datacions mitjançant les sèries de l'urani i les avaluacions mineralògiques, revelen que determinades coves es van formar durant períodes de nivells del mar més baixos, amb els espeleotemes més antics datats que es remunten a més de 500.000 anys. El descobriment de sobrecreixements freàtics en espeleotemes (POS) a l'Adriàtic ha situat Croàcia entre les poques regions del món que contribueixen a la investigació del nivell del mar basada en els POS, essent la sisena ubicació identificada i investigada a tot el món. Aquesta troballa proporciona una eina important per reconstruir els nivells relatius de la mar a l'Adriàtic, i representa un progrés significatiu tant en els estudis espeleològics com en les investigacions sobre el nivell de la mar. Les variacions en la distribució de les coves, la seva morfologia, així com la formació dels espeleotemes, emfatitzen la necessitat d'exploració i conservació contínua d'aquests fràgils ecosistemes. A mesura que els impactes del canvi climàtic es facin cada cop més evidents, les coves càrstiques costaneres de Croàcia continuaran servint com a arxius per entendre el passat de la Terra i predir els futurs canvis ambientals. La investigació futura hauria d'ampliar el coneixement d'aquests sistemes, perfeccionar les tècniques de mostreig de busseig en coves i desenvolupar estratègies per a la seva gestió i conservació sostenibles.

Lončar, N. & Kovač Konrad, P. (2024): Coastal cave characteristics and speleothems as indicators of sea-level change in the eastern Adriatic.
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 111-124. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 27 setembre 2024; **Revisat:** 8 octubre 2024; **Acceptat:** 10 octubre 2024.
Publicat online: 22 octubre 2024.

Introduction

Croatian coastline is one of Europe's most geologically complex and significant regions, largely due to its karst topography. Speleogenesis in Croatian karst regions is driven by tectonically fractured limestone and dolomite (KUHTA & BAKŠIĆ, 2001; GARAŠIĆ, 2021; MIŠUR et al., 2021; STROJ et al., 2024) with hydrogeological factors facilitating rock dissolution and erosion, particularly in high-activity areas (GARAŠIĆ, 2021). Karstification varies across regions, influenced by tectonic activity, leading to diverse karst forms (BOGNAR et al., 2012). As part of the external Dinaric Karst

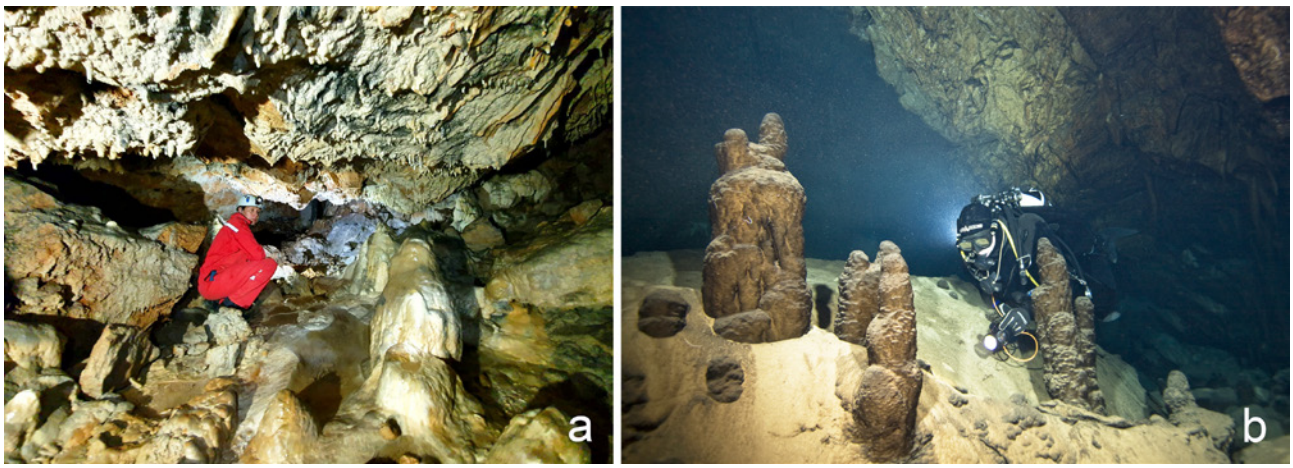


Figure 1: a) Urinjka cave entrance and b) stalagmites in submerged chamber (Photos: P. Kovač Konrad).
Figura 1: a) Entrada de la cova d'Urinjka i b) estalagmites a la cambra submergida (Fotos: P. Kovač Konrad).

the coastal region of Croatia hosts a wide range of caves, from dry air-filled systems to partially or fully submerged ones. These caves provide insights into the region's environmental history: climate change (RUDZKA et al. 2012; LONČAR et al., 2017, 2019), and sea-level changes (SURIĆ et al., 2009; SURIĆ & JURAČIĆ, 2010, LONČAR et al., 2024) during the Pleistocene and Holocene epochs. This paper aims to give an overview of the distribution, characteristics, and scientific significance of Croatia's coastal and submerged caves, with special emphasis on anchialine caves.

One of the first detailed descriptions of a coastal cave in Croatia was given in 1920 by Croatian geologist Josip Poljak, who described the cave "Urinjska špilja" near Rijeka (Figure 1). Between 1968 and 1975, Srećko Božičević and Mirko Malez conducted geological and paleontological research on coastal caves, primarily on the islands of Lošinj, Cres, and Rab. Research on anchialine caves along the Croatian Adriatic coast intensified after 2005, led by Branko Jalžić. Since then, a multidisciplinary team formed, conducting extensive studies on water, sediment, and biota, with contributions from the Croatian Biospeleological Society, Croatian Natural History Museum, Ruđer Bošković Institute (BILANDŽIJA et al., 2009), and various caving clubs and professional associations. Notably, cave diving in coastal karst environments is inherently difficult due to poor visibility, strong tidal currents, and the risk of structural instability. Many caves contain narrow passages that are difficult to navigate, and the presence of fine sediments can complicate sampling and data collection. In recent years, cave-diving research has contributed significantly to our understanding of these caves, especially those that are submerged. The research in Medvjeđa špilja cave on Lošinj island (Croatia) that led to discovery of first Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) in Adriatic contributed to the regional sea-level research, as these formations can provide accurate data on past sea levels. Therefore, the paper also highlights the importance of speleothem based sea-level research.

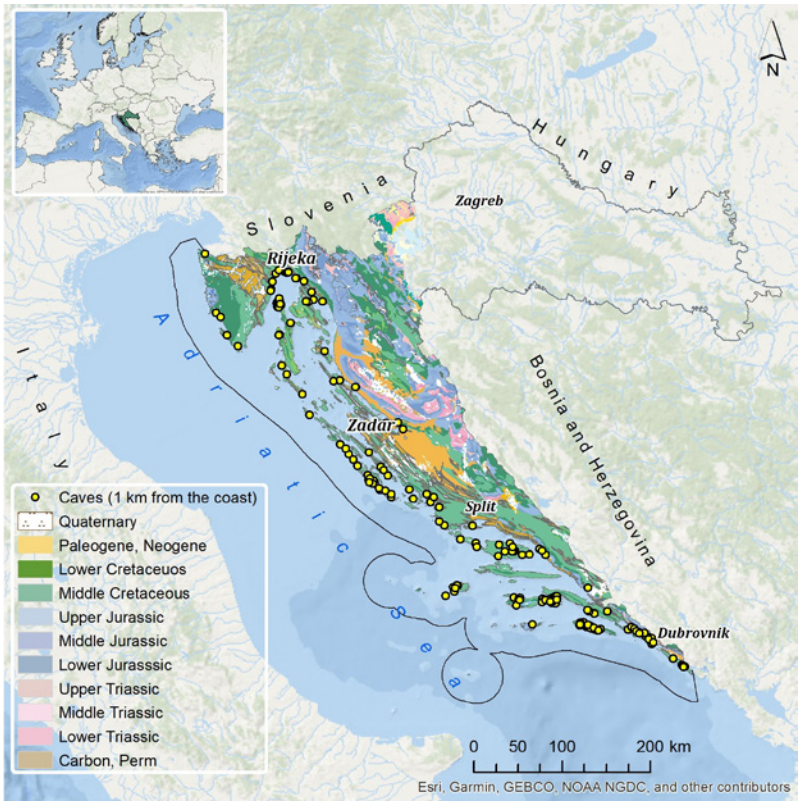


Figure 2: Lithostratigraphy of Croatian Dinaric Karst belt (based on the Geological Map of the Republic of Croatia, scale 1:300 000, Croatian Geological Survey) and cave distribution within 1 km from the coastline (N. Lončar).
Figura 2: Litostratigrafia del cinturó càrstic dinàric de Croàcia (basat en el Mapa Geològic de la República de Croàcia, escala 1:300 000, Servei Geològic de Croàcia) amb la distribució de les coves situades a menys d'1 km de la línia de costa (N. Lončar).

General characteristics and distribution of Croatian coastal caves

Croatian coastal region as a part of Dinaric karst, is characterized by thick, tectonically disturbed, and well-karstified carbonate rocks with a frequent occurrence of variegated caves (Figure 2) (VLAHOVIĆ et al., 2005; BOGNAR et al., 2012). Coastal karstification is a specific process that occurs in areas where karst landscapes intersect with the sea, resulting in the formation of caves and pits in both vadose (above the water table) and phreatic (below the water table) zones (VAN HENGSTUM et al., 2015). These karst caves develop over millions of years, influenced by both terrestrial and marine processes. Along the Adriatic coast, tectonic activity has played a major role in shaping the landscape, leading to the formation of faults and fractures that serve as pathways for water to dissolve the surrounding rock (SURIĆ et al., 2014; GARAŠIĆ, 2021) resulting in the formation of both vertical and horizontal caves. The Croatian coastal region, including islands, is dominated by karst aquifers, which exhibit high permeability and rapid water transmission through fissures, conduits, and underground channels (TERZIĆ et al., 2010, 2021). Most groundwater, especially on islands, is stored in these karst aquifers (BONACCI & ROJE-BONACCI, 2003) that are mainly accessible through vertical caves.

The Cadaster of Caves of the Republic of Croatia (BIOPORTAL, 2024) lists more than 5,500 caves, though the actual number is estimated to exceed 10,000 (SURIĆ et al., 2010; GARAŠIĆ, 2021). Among these are Croatia's coastal caves, which are distributed along the eastern Adriatic coastline (Figure 2). They differ by origin, type, geomorphological features, hydrology, and level of submergence (Figure 3). The highest concentrations of explored and described caves along the coast and islands in Croatia are found on islands: Mljet (71), Kornati archipelago (51), Cres (50), Korčula (40), and Brač (25). The specificity of Brač and Cres is that pits predominate (92%, 74% respectively), while on Korčula the proportions are equal. However, unlike Mljet and Kornati, the existence of anchialine caves has not been confirmed so far on Cres, Korčula, and Brač Islands.

Caves in the coastal zone can be classified into two main types: littoral or sea caves formed by a combination of wave erosion and tectonic activity (BUNNELL, 2004), and partially or completely submerged karst caves (BUNNELL, 2004; FURLANI et al., 2012). In the Croatian coastal zone, they typically appear as shallow notches and hollows in rocky coastlines at the waterline or slightly above it, though they can also be submerged (Figure 4). The term *garma* is often used to describe such caves, while in some cases, people use term *sea caves* when they refer to submerged karst caves where marine (euhaline) conditions are established. Many littoral caves are named Golubinka (Pigeon Cave) (Figure 4a), as they are often inhabited by pigeons, or Medvidina (Monk Cave), after the monk seals that once lived in them. Well-known examples include caves in the Kornati archipelago, Mljet Island (Figure 4b,d), Vis Island, Cres Island, and the Dubrovnik area. On the islands of Cres and Hvar, there are also numerous caves and semi-caves formed in coastal breccia (Figure 4e). Among these is Plava Grota on Cres Island, which is described as a flank margin cave formed in a coastal setting in talus breccia facies (OTONIČAR et al., 2010).

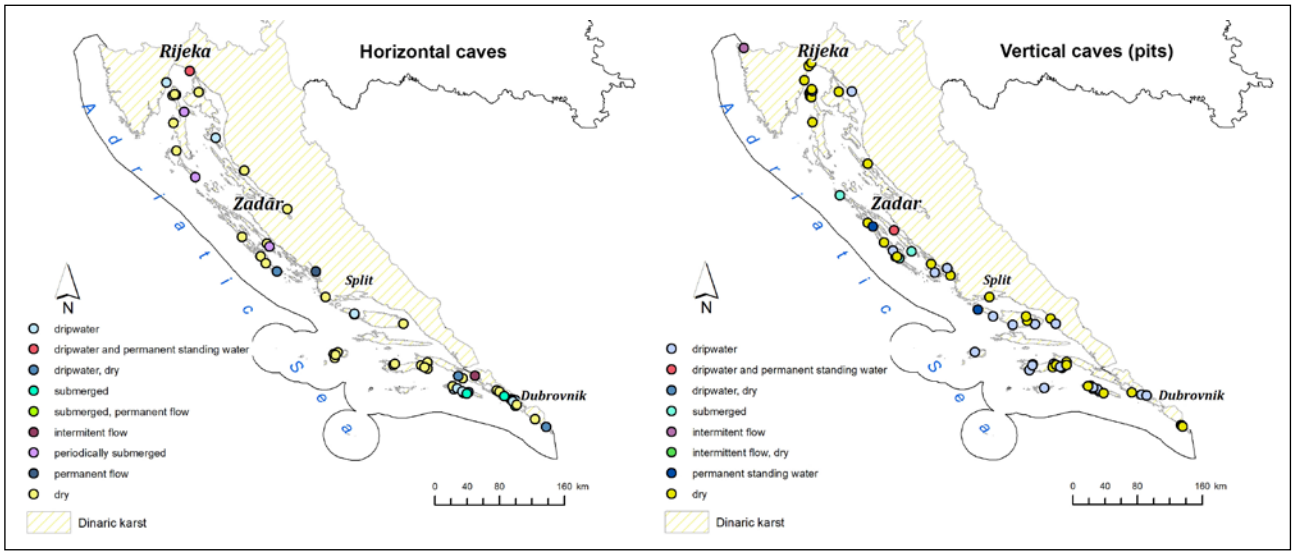


Figure 3: Types of coastal caves and their hydrologic characteristics (N. Lončar).
Figura 3: Tipus de coves costaneres i les seves característiques hidrològiques (N. Lončar).

Partially or fully submerged caves (Figure 5) formed during periods of lower sea levels and were subsequently inundated due to post-glacial sea-level rise (SURIĆ et al., 2010) particularly during the Holocene, making them important indicators of past climate changes. These caves primarily developed in Upper Cretaceous and Paleogene limestone, which was exposed subaerially during glacial maxima when sea levels were significantly lower. Submerged caves also include underwater karst springs (*vruljas*) (Figure 6), which occur along the karst coastline. These springs were flooded by sea-level rise or coastal subsidence resulting from climate change and geological processes. Most of these springs, likely formed during the Pleistocene low sea levels, are believed to still be active (KRANJC, 2004).

According to the available data (SURIĆ et al. 2010; BIOPORTAL, 2024; personal archive; oral communications) 267 of all coastal caves are partially or completely submerged caves. However, considering the official and estimated number of caves on the mainland, this number is likely significantly higher. Completely marine conditions are present in 153 of these caves, while the rest contain water of varying salinity and underwater springs.

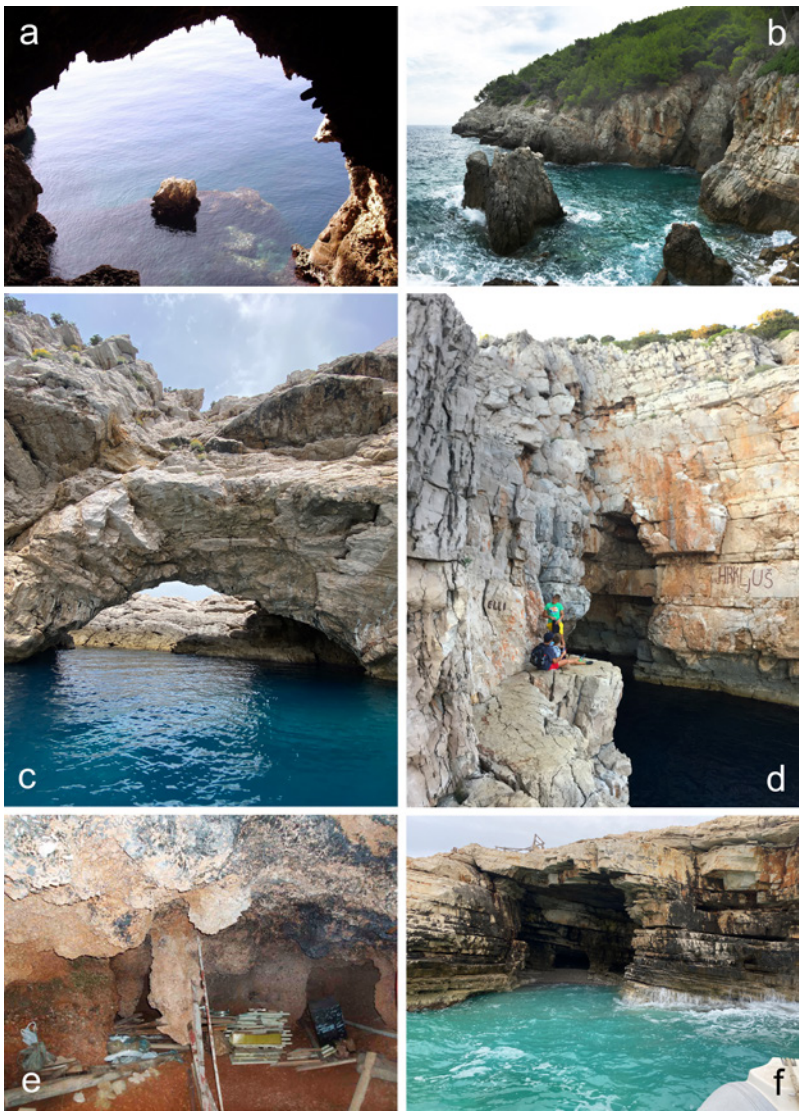


Figure 4: a) Golubinka, Dugi otok island, b) Ropa, Mljet island, c) Plava špilja, Koločep island, d) Odisejeva špilja, Mljet island, e) coastal cave formed in breccia, Hvar Island, and f) špilja u uvali Kolobarica, Kamenjak peninsula, Istria (Photos: N. Lončar).
Figura 4: a) Golubinka, illa de Dugi otok, b) Ropa, illa de Mljet, c) Plava špilja, illa de Koločep, d) Odisejeva špilja, illa de Mljet, e) cova costanera formada dins bretxes, illa de Hvar, i f) špilja u uvali Kolobarica, península Kamenjak, Istria (Fotos: N. Lončar).

Anchialine caves

From an ecological point of view, anchialine caves are characterized by stratified water columns containing layers of freshwater, saltwater, and brackish water, formed through the mixing of these sources (HOLTHUIS, 1973; ILIFFE, 2000). Together with marine caves they support unique ecosystems adapted to these dynamic conditions (STOCK et al., 1986). These systems are part of karst groundwater networks, accessed through features like sinkholes, blueholes, and flooded caves, which host unique anchialine and marine cave ecosystems and provide space for sediment deposition (LITTLE & VAN HENGSTUM 2019). The overview of the history of the term "Anchialine" is given by BISHOP et al. (2015) who proposed a new definition: '*a tidally-influenced subterranean estuary located within crevicular and cavernous karst and volcanic terrains that extends inland to the limit of seawater penetration*.' Anchialine caves are hydrographically connected to the sea via groundwater circulation through primary porosity or host rock fractures, and can be flooded by saline groundwater or a meteoric freshwater lens (ILIFFE, 2000; LITTLE & VAN HENGSTUM, 2019). Their upper meteoric water body, separated from a saline groundwater mass below, is progressively mixed and discharged into the ocean (LITTLE & VAN HENGSTUM, 2019). Their tidal fluctuations of the groundwater column can be influenced by the horizontal inflow of seawater into the karst basin, and even the freshwater discharge of the coastal aquifers (STOCK et al., 1986; VAN HENGSTUM et al., 2011).

In Croatia, there are around 100 known anchialine caves (Figure 2), most of which have been found within 1 km of the coastline (BAKRAN-PETRICIOLI, 2016), with the majority located within 100 m (BILANDŽIJA et al., 2009). These caves are widespread along the coast, on the

Figure 5: Rikavica (Roar) Cave, an example of a formerly dry cave submerged due to sea-level rise. The cave is named after the roaring sounds produced by waves passing through cracks during strong wave action. (a) Entrance, (b) speleothems covered by biogenic overgrowths (Photos: M. Baričević).
Figura 5: Cova Rikavica, un exemple de cova antigament seca submergida a causa de la pujada del nivell de la mar. La cova rep el nom dels rugits produïts per les ones que travessen les esquerdes durant l'acció de les fortes onades. (a) Entrada, (b) espeleotemes coberts per un fort creixement biogènic (Fotos: M. Baričević).

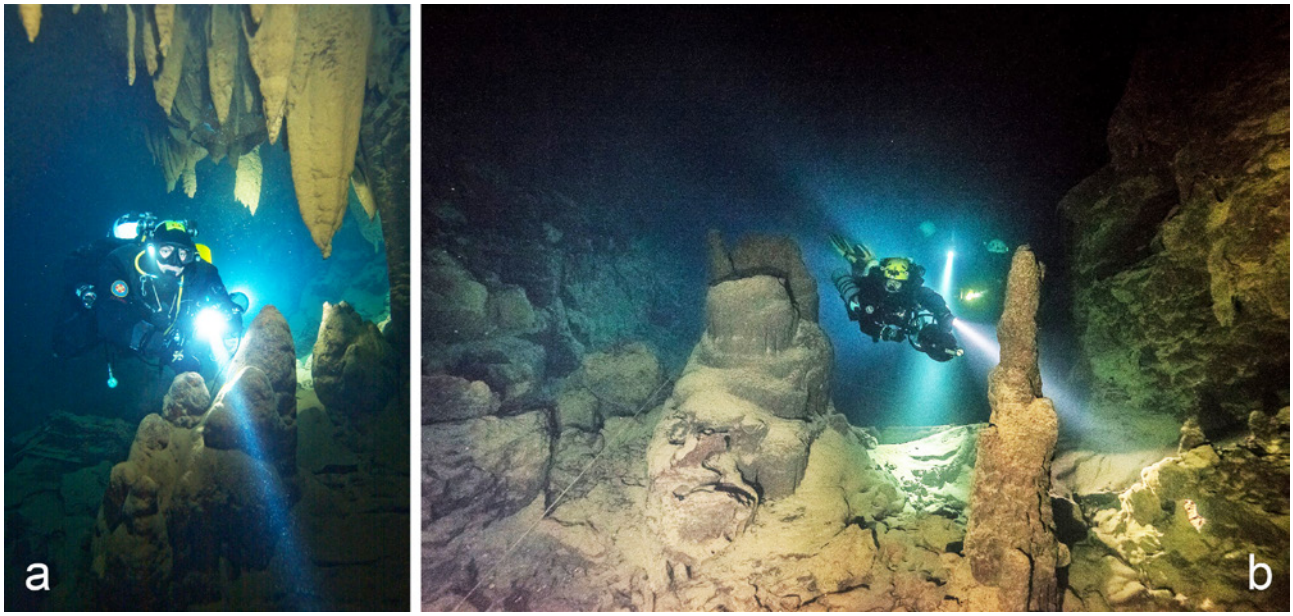


Figure 6: Speleothems in submerged pasages in *vruljas* near Starigrad-Paklenica. a) Zečica, b) Modrič (Photos: P. Kovač Konrad).
Figura 6: Espeleotemes en galeries submergides (*vruljas*) prop de Starigrad-Paklenica. a) Zečica, b) Modrič (Fotos: P. Kovač Konrad).

islands, and at the lower reaches and mouths of rivers flowing into the Adriatic, from the Istrian Peninsula to the Dubrovnik area (GOTTSTEIN MATOČEC et al., 2002; BAKRAN-PETRICIOLI, 2016). Croatian anchialine caves are generally small to medium-sized pits with simple morphology, characterized by narrow entrances and steep vertical shafts, often leading to deeper submerged sections. Many feature submerged passages and chambers, shaped by both tectonic activity and karst processes. Hydrologically, these caves have limited water circulation, resulting in stratification and the formation of haloclines, where freshwater overlays denser saline layers (KAJAN et al., 2021). The hydrodynamics are influenced by tidal movements, though these effects are often dampened due to restricted connectivity with the open sea (RADOLOVIĆ et al., 2015). The lack of direct surface connection and variable hydrodynamics result in distinct salinity gradients within their water columns (KAJAN et al.,2021; TERZIĆ et al., 2021). One exception is the almost completely submerged Y-Cave on Dugi Otok Island. Despite its shallow depth (max. –11.5 m) and exposure to the open sea, tidal and wave energy do not disrupt water stratification (RADOLOVIĆ et al., 2015). The cave exhibits stratified water layers, with varying influences from seawater and freshwater mixing, and distinct hydrodynamic effects. A dissolution effect (mixing corrosion) has also been observed in the shallowest part of the cave (RADALOVIĆ et al., 2015).

The longest and one of most researched anchialine cave is Medvjeđa špilja (Bear Cave) (Figure 7) on Lošinj Island (N. Adriatic). Discovered in 1926, the cave spans 245 m in length, with most

Figure 7: Dry (a) and submerged (b) parts of Medvđeđa špilja anchialine cave (Photos: P. Kovač Konrad, N. Lončar).
Figura 7: Parts seques (a) i submergides (b) de la cova anquihalina de Medvđeđa špilja (Fotos: P. Kovač Konrad, N. Lončar).

sections submerged. It has been explored multiple times between 1974 and 2004 (JALŽIĆ, 2007). The entrance, measuring 1.5 m x 1.0 m, is located approximately 55 m inland from the sea and 17.5 m above sea level. From the entrance, it descends to a lake (Figure 7a) at the base of a bell-shaped hall before diving into submerged channels (Figure 7b). These submerged sections contain multiple halls and channels connected by narrow passages. The significant presence of large speleothems suggests long-term paleoclimatic conditions favorable for their growth (SURIĆ et al., 2007; LONČAR et al., 2024). Some areas feature cave columns up to 4 m tall and over 2 m in diameter. In addition to its geomorphological significance, the cave is also an important paleontological and biospeleological site. One of the most noteworthy paleontological discoveries in the cave is the finding of cave bear remains (*Ursus spelaeus*) in 1926, after which the cave was named.

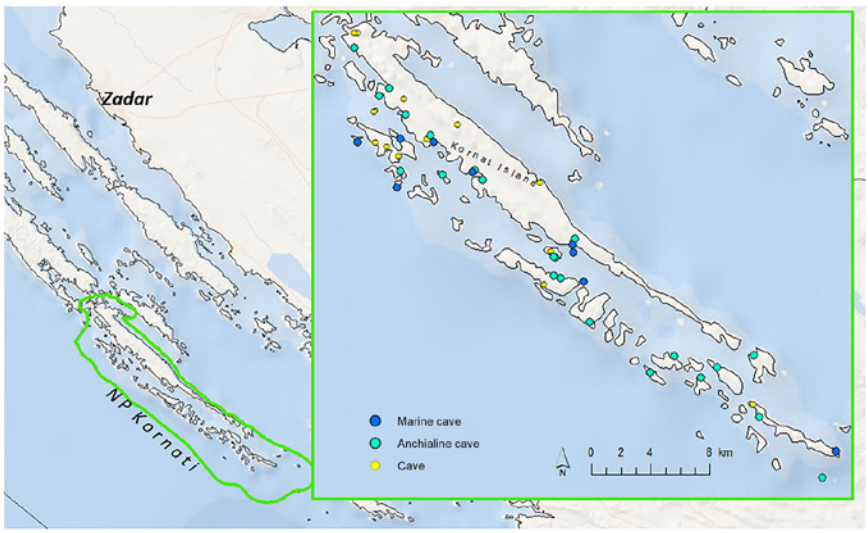


Figure 8: Distribution and types of caves within NP Kornati (N. Lončar).
Figura 8: Distribució i tipus de coves dins del Parc Nacional de Kornati (N. Lončar).

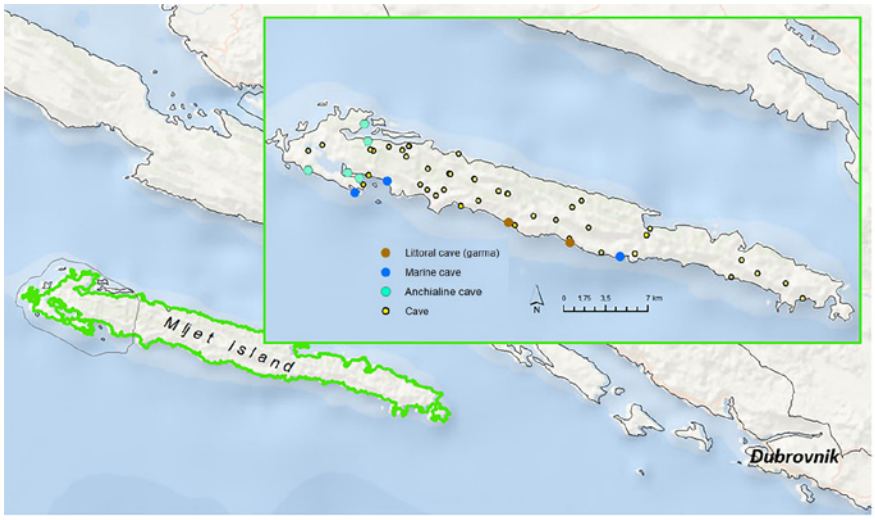


Figure 9: Distribution and types of caves on Mljet Island (N. Lončar).
Figura 9: Distribució i tipus de coves a l'illa de Mljet (N. Lončar).

Among the most explored coastal caves and pits are of National Parks (NP) "Kornati" (Figure 8) and "Mljet" NP, including the entire island (Figure 9), due to the good cooperation between the management of public institutions and speleological associations and the need for an inventory. By the end of 2019, 51 caves were explored within the Kornati NP. Most of the caves (33) are anchialine. The water on their pool surfaces is nearly entirely

Figure 10: Traces of a rope (at the right side of the picture) in the Jama iznad Vrulja pit (NP Kornati), used for water extraction (Photo: B. Jalžić).
Figura 10: Empremta d'una corda usada per a l'extracció d'aigua (a la dreta de la imatge), en el pou d'accés a Jama iznad Vrulja (Parc Nacional de Kornati) (Foto: B. Jalžić).

fresh, and salinity increasing with depth. The abundance of underground water has made these caves valuable resources for early humans and more recent inhabitants along the coast, who used them for water extraction (Figure 10) and other purposes making them important archeological sites (RADIĆ ROSSI & CUKROV, 2017).

The Kornati archipelago covers 320 km², with about 69.5 km² across 150 islands, islets, and rocks, some periodically inundated. Kornati National Park spans 217 km², including the main island Kornat (32.5 km²) and 88 other islands and islets (17.5 km²) (Figure 8). A common characteristic of most caves in the Kornati region is their shallow depth, short length, and limited number of side channels. One reason for their shallow depth is the altitude of the entrances, which are typically situated up to 20 meters from the shoreline (Figure 6) and between 10 and 20 meters above sea level. Analysis of Cave Cadastre data showed that such characteristics are also common in caves found in other coastal areas and islands. The deepest cave (70 m) in Kornati, and overall one of the deepest anchialine explored in Croatia so far is Blitvica cave (Figure 11) on the island of Piškera. The dry part is 20 m deep and the submerged part is 50 m deep, thus a collapsed material at the bottom of the pit has blocked access, suggesting the cavity may extend deeper. Cave is rich in speleothems especially in the submerged parts.

Besides Blitvica, two of the deepest anchialine caves in Croatia are Jama u Podstražišću on Brač Island, with a 45 m dry section and a cave lake over 50 m deep, and Stračinčica on Korčula Island, which reaches a depth of 88 m, including a 40 m water column (CUKROV et al., 2009).

Mljet Island, the southernmost large island in Croatia, stretches 37 km in a NW-SE direction. Mljet National Park spans nearly 5,300 ha in the NW, including a 500 m sea zone, islets, and rocks, covering about one-third of the island (Figure 9). Among notable natural features in NP are Veliko and Malo Jezero (the Mljet Lakes), semi-enclosed karst depressions submerged due to the Holocene sea-level rise, now connected to the open sea by a narrow, shallow channel (VANIČEK et al., 2000). Today, 71 caves are known on the island of Mljet, of which 9 are sea caves, 4 contain freshwater, and 5 are anchialine (JALŽIĆ et al., 2021) (Figure 9). The most notable caves are located in Bjejajka Bay, on Cape Lenga, and at the foot of Sv. Spasa, where one of the largest dripstones in the Croatian karst is found (OZIMEC, 2003). Jama Bjejajka (Figure 12) is particularly significant for its vertical entrance, leading to a submerged section characterized by varying salinity and the presence of speleothems. The entrance descends 10 meters, with collapsed rocks and sediment partially covering the lake. The lake extends to the end of the pit, divided by a narrow passage and a stone barrier. Beyond this point, there is a steep dry section, rich in various speleothems, which are also found in the submerged parts of the passage. The lake continues through a submerged passage to the pit's terminus, with a maximum water depth of 16.5 meters.

Figure 11: The interior of the Blitvica cave (Piškera island, Kornati NP) (Photo: P. Kovač Konrad).
Figura 11: Interior de la cova Blitvica (illa de Piškera, Parc Nacional de Kornati) (Foto: P. Kovač Konrad).

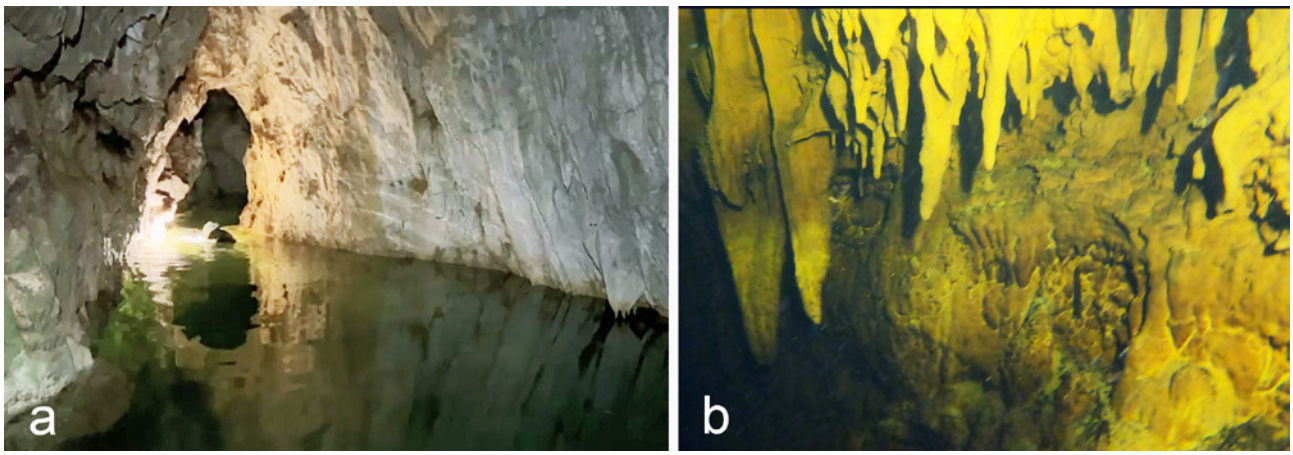


Figure 12: Bjejajka cave passage (a) and submerged speleothems (b) (Photos: M. Baričević, N. Lončar).
Figura 12: Galería de la cova de Bjejajka (a) i espeleotemes submergits (b) (Fotos: M. Baričević, N. Lončar).

Water levels fluctuate, mainly influenced by tides and freshwater inflow from the surface (JALŽIĆ et al., 2021).

One of the unique features of Mljet Island is the presence of caves at the bottom of Mljet lakes. In Malo Jezero, two pits reach depths of 38 and 50 meters, respectively, and continue further into impassable fissures. While no freshwater outflow has been observed, it is likely that freshwater flows under certain conditions. One of them, Onofrijeva jama, is a former freshwater spring which likely lost its hydrological role when Malo Jezero was connected to the sea by an artificial channel. This change led to poor water circulation, eutrophication, temperature extremes, and anoxia (JALŽIĆ et al., 2021).

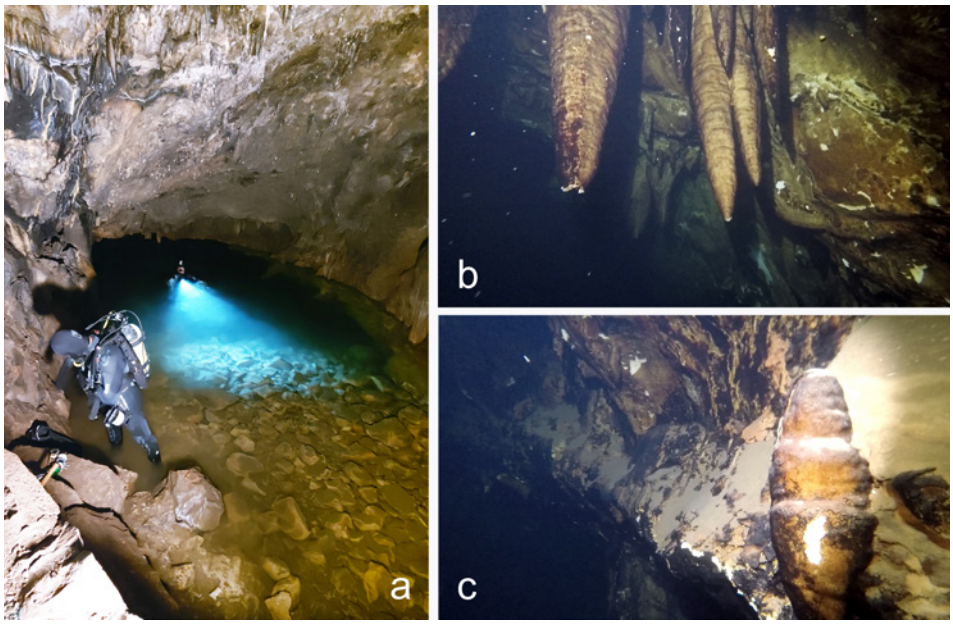


Figure 13: Šipun cave lake (a), corroded speleothems (b), and sediment (c) in submerged parts (Photos: I. Konjevod, N. Lončar).
Figura 13: Llac de la cova de Šipun (a), espeleotemes corroïts (b) i sediment (c) en les parts submergides de la cova (Fotos: I. Konjevod, N. Lončar).

Besides their various morphological characteristics, anchialine caves of the eastern Adriatic Sea are biologically unique and rich in species. They display high microbial diversity and endemism, with distinct community patterns influenced by salinity gradients and cave location (KAJAN et al., 2021) reflecting complex adaptations to dynamic environmental conditions. One of the most significant caves is Šipun (Figure 13), where over 100 species of fauna and around 10 species of protists were discovered. By 2017, 19 species had been described, the highest number in Croatia, with 15 recognized as taxonomically valid (OZIMEC, 2012; OZIMEC & BAKOVIĆ, 2017). Šipun Cave, located near Dubrovnik at an elevation of 24 m above the Adriatic Sea, is a half-submerged cave with a single main passage stretching 120 m. This passage is divided into a dry section and a lake (Figure 13a). The dry part, arranged for tourism, contains numerous speleothems, many of which are broken, likely due to tectonic activity. The submerged section begins at the lake featuring stalactites, cave curtains, and some columns and stalagmites. Certain stalactites show corrosion from exposure to brackish water (Figure 13b). Fine-grained sediment, likely washed in from outside, has accumulated throughout the gallery (Figure 13c) leading to poor visibility and challenging diving conditions.

Speleothems in coastal and submerged caves

Speleothems are essential for reconstructing past environmental conditions in karst caves. Unlike inland vadose caves, the formation of speleothems in anchialine and submerged caves is influenced by the presence of marine waters, which can inhibit growth or cause dissolution (BUNNELL, 2004). Coastal caves generally exhibit fewer speleothems. Speleothems, mostly stalactites and stalagmites, have been found in over 140 partially or completely submerged caves (SURIĆ et al., 2010). Research on submerged speleothems in Croatian caves has advanced significantly over the past decade. Surić and colleagues (e.g., SURIĆ et al., 2009; SURIĆ & JURAČIĆ, 2010) conducted one of the first comprehensive studies on marine biogenic overgrowth on submerged speleothems in the eastern Adriatic. By 2018, 22 submerged speleothems from 10 caves, at depths ranging from –1.5 m to –53 m, were analyzed, yielding radiometric ages (U-Th, ^{14}C) from 310 ka to 3.3 ka BP (SURIĆ, 2018). More recent work by LONČAR et al. (2020, 2021, 2024) has focused on sea-level reconstruction using phreatic overgrowths on speleothems (POS), while also collecting and analyzing submerged speleothems as part of these investigations. The latest and oldest submerged speleothems were collected as part of the SeaLeveL project. Speleothem subsamples were dated using the U-series disequilibrium method with a Thermo Neptune Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (MC-ICPMS) at the Department of Earth and Planetary Sciences, University of New Mexico, USA. For further details on the methodology, refer to ASMEROM et al. (2006). In Medvjeđa špilja at depth of -12 m a stalagmite ML-12 was collected. The upper part is dated to approximately 400,000 years, while older sections are beyond the range of uranium-thorium dating. A stalactite from Kravljačica submerged pit (Figure 14) in the Kornati archipelago collected at the depth of -36 m was dated to 436,013 ± 25,099 years BP.

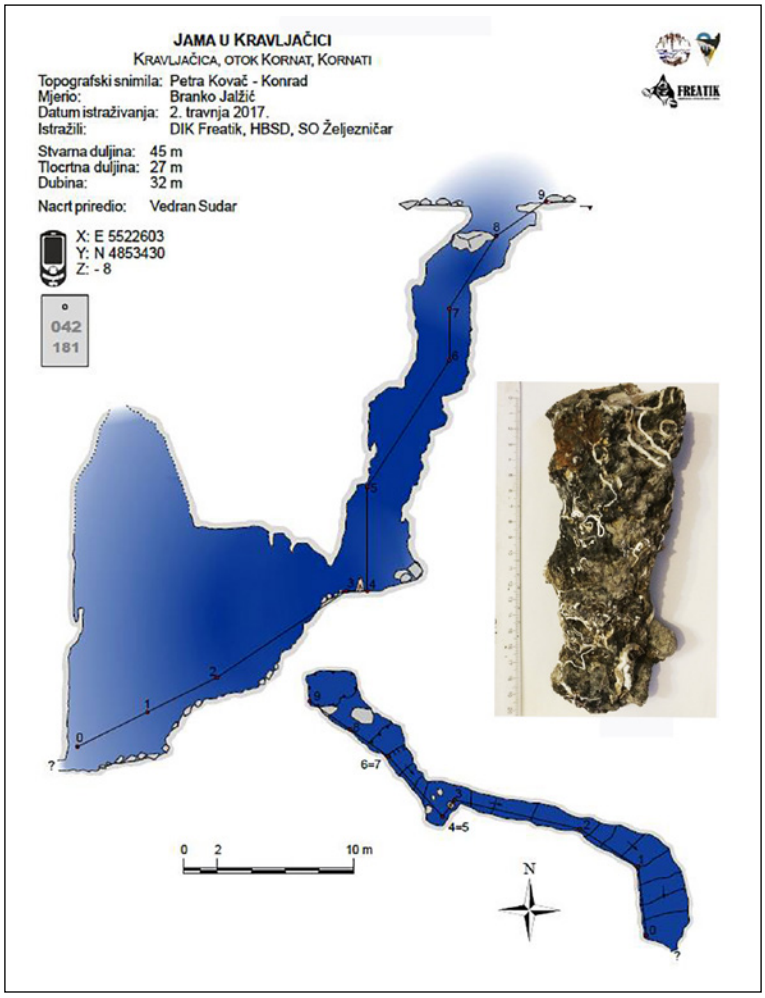


Figure 14: Kravljačica cave plan and profile and sample KRA-1.
Figura 14: Planta i perfil de la cova de Kravljačica i mostra KRA-1.

Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) in Croatia

The formation of POS in partially submerged caves challenges traditional assumptions about speleothem development, demonstrating that coastal karst caves can, under specific conditions, support the growth of unique calcite formations that serve as sea-level indicators. POS are secondary carbonate encrustations that form around existing vadose speleothems in coastal caves under favorable geochemical conditions (GINÉS et al., 1981; FORNÓS et al., 2002). Their growth occurs at sea level and within the tidal range, as long as sea level remains stable (DUMITRU et al., 2021). The first detailed study of POS as sea-level indicators in Mallorca began in 1972 at Cova de sa Bassa Blanca (GINÉS & GINÉS, 1974). POS have since been used for sea-level reconstructions in Sardinia (TUCCIMEI et al., 2012), Japan (MIKLAVIČ et al., 2018), Cuba (DE WAELE et al., 2017, 2018), Bermuda (HARMON et al., 1978), and Mexico (JENSON, 2018), contributing significantly to our understanding of Late Pleistocene sea-level highstands and Holocene stability.

The finding of POS at –1.28 ± 0.15 m below present sea level in Medvjeđa Špilja (LONČAR et al., 2024) (Figure 15), the first finding of POS in the Adriatic, represents one of the most significant findings in recent years. Uranium-series of POS sample from Medvjeđa Špilja confirmed that these

formations date back to the Holocene (LONČAR et al., 2024), providing new sea-level index points for the eastern Adriatic coast. Mineralogical analyses identified the fibrous overgrowth as calcite, with both the overgrowth and supporting soda straw showing similar trace element compositions, indicating a chemically consistent drip and groundwater source. Uranium-series dating of POS MLp-1 suggests that approximately 2,800 years ago, sea level remained stable for about 300 years at this depth of around –1.28 ± 0.15 m. This aligns with the previously recorded stable period between 3,250 and 2,800 cal yr BP in the southern Adriatic (LONČAR et al., 2024; and the references therein).

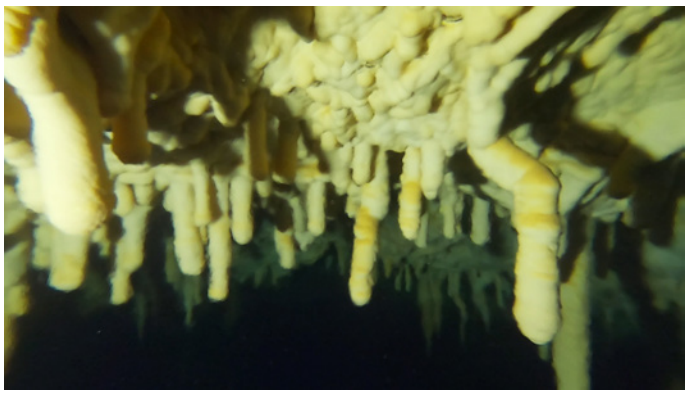


Figure 15: POS in Medvjeđa špilja "little lake" (Photo: N. Lončar).
Figura 15: POS al petit llac de la cova de Medvjeđa (Foto: N. Lončar).

Additionally, two presumably POS samples (SIP-1 and SIP-2) have been collected in Šipun Cave at depth of -1.2 m and -2.2 m below current mean sea-level. U-Th dating revealed that the youngest parts of SIP-1 are over 479,394 ± 33,634 BP (Figure 16a), while dating of SIP-1's older laminae and sample SIP-2 showed that they were deposited beyond the U-Th method's range, indicating an age of over 600,000 years (Figure 16a, b) or a slight alteration of the calcite. After cutting and XRD analysis, SIP-1 was identified not as a POS, but as a well-laminated stalactite, making it the oldest dated stalactite from an anchialine cave in Croatia.

Mineralogical analyses of SIP-2 revealed minimal magnesium levels, suggesting a non-marine or brackish origin for the carbonates, except in the outer crust. The zoned crystals in the inner part of SIP-2 (Figure 16c) resemble those found in POS from Japan (MIKLAVIČ et al., 2018). Exposure to brackish conditions could stimulate the growth of fibrous calcite crystals, as fluctuations in water chemistry, such as varying magnesium or calcium concentrations, favor fibrous or layered crystallization. Thus, the speleothem could undergo diagenetic alteration, with partial dissolution followed by the re-precipitation of new mineral phases influenced by the water's chemistry. Therefore, it is not possible to clearly characterize SIP-2 as a POS.

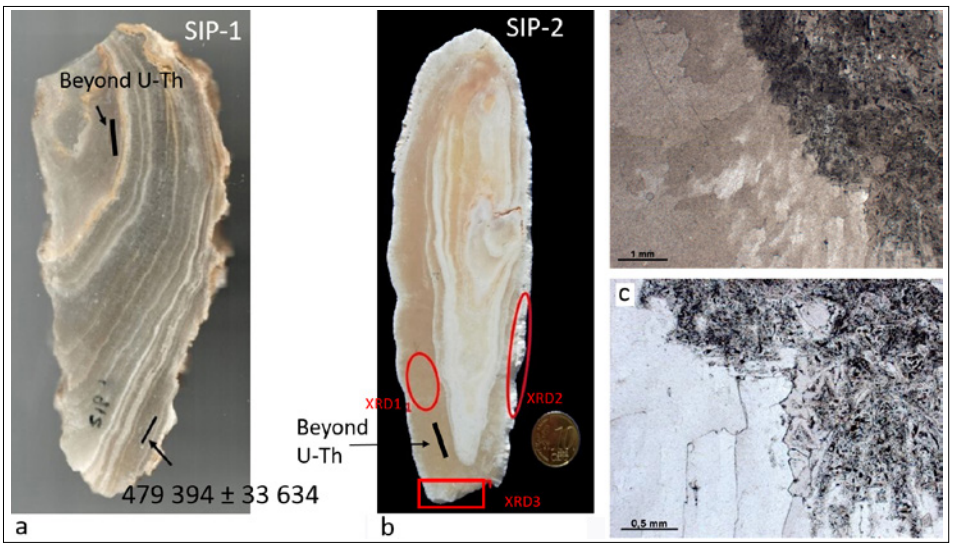


Figure 16: Cross section and ages of speleothems SIP-1 (a) and SIP-2 (b) and SIP-2 thin sections (c).
Figura 16: Secció transversal i edats dels espeleotemes SIP-1 (a) i SIP-2 (b) i làmines primes del SIP-2 (c).

Conclusions

Croatia's coastal and submerged caves represent a unique intersection of marine and terrestrial geological, hydrological, and biological processes, offering valuable insights into past sea-level changes, karst formation, and paleoclimate. The spatial distribution of these caves highlights the complex interplay of tectonic activity, sea-level rise, and karst processes, with notable regional variations in cave morphology and hydrology. Tectonic activity has played a significant role in shaping coastal cave morphology, particularly where fault zones intersect with the coastline. The gradual rise in sea levels since the Last Glacial Maximum (~21,000 years ago) has transformed many karst caves into partially or fully submerged systems and anchialine or euhaline environments, particularly along the eastern Adriatic coast.

This study reveals significant regional variations in the distribution and characteristics of Croatia's coastal caves. The highest concentration of caves is in middle and south Dalmatia (middle Adriatic). The most of partially and completely submerged caves have been explored in Kornati National Park and on Mljet Island, where the combination of well-stratified carbonate rocks, tectonic activity, and post-glacial sea-level rise has created ideal conditions for coastal cave presence, with both horizontal and vertical passages.

Recent cave-diving research, particularly within the SeaLeveL project, has expanded the knowledge of these caves, uncovering new sites and providing valuable speleothem samples for geochronological analysis. The speleothems ML-12, SIP-1, and KRA-1, dating back over 500,000 years, provide insights into the long-term karst development and past environmental conditions of the Adriatic region. Their age suggests that these caves were formed during periods of lower sea levels, with karst processes actively shaping the landscape. The continued deposition of speleothems in anchialine caves (Medvjeđa špilja and Šipun) after the last sea-level rise indicates that certain parts of these caves remained suitable for mineral growth despite partial submersion, reflecting complex geomorphological and hydrological conditions.

The discovery of the first Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) in the Adriatic marks a significant milestone in the study of coastal karst systems in Croatia, providing a precise marker for past sea levels and contributes to the understanding of the region's paleoenvironment. Speleothem MLp-1 exposed that ca. 2,800 years ago, relative sea level was stable for about 300 years at a depth of approximately −1.28 ± 0.15 m below the current mean sea level. The presence of POS in the Adriatic suggests that this phenomenon may be more widespread than previously thought. These findings highlight the potential for further discoveries of POS in other coastal caves, particularly those located near paleo-shorelines.

Future research should focus on exploring previously unexplored caves, particularly in regions likely to contain POS and other significant speleothems. The integration of advanced technologies such as underwater drones and remote sensing could further enhance our ability to explore submerged caves and collect high-quality data. Additionally, further geochronological studies of POS and other speleothems are needed to refine the timeline of sea-level changes in the Adriatic, contributing to a broader understanding of global climate change.

Acknowledgements

We are grateful to Branko Jalžić for the consultations, valuable information on the caves, diving research and provided photo, and to Marko Baričević for his participation in cave-diving prospection and for providing underwater photographs. To all cavers who participated in the research, as well as Kornati National Park, Mljet National Park for the data and field support. To Xisco Gràcia and Tony Merino for the shared expertise and fieldwork experience on POS research in the coastal caves of Mallorca. Special appreciations go to Joan J. Fornós, **Angel Ginés** (deceased in January-2024), and Joaquín Ginés**,** for their generous sharing of knowledge about POS, their encouragement in advancing research, and their commitment to fostering learning through our collaboration and fieldwork.Their kindness and expertise have greatly contributed to the progress of the study of POS in Croatia. Part of cave prospection and all speleothem analyses were funded by the Croatian Science Foundation project IP-2019-04-9445.

References

ASMEROM, Y.; POLYAK, V.J.; SCHWIETERS, J. & BOUMAN, C. (2006): Routine high-precision U–Th isotope analyses for paleoclimate chronology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (18): A24.

BAKRAN-PETRICIOLI, T. (2016): Morska staništa - Priručnik za inventarizaciju i praćenje stanja / Marine habitats - *Manual for inventory and condition monitoring*. Zagreb, Hrvatska agencija za okoliš i prirodu. [in Croatian]

BILANDŽIJA, H.; JALŽIĆ, B.; CUKROV, M. & CUKROV, N. (2009): Anchialine caves in Croatian karst area. *Anchialine ecosystems: Reflection and prospects*. Palma de Mallorca. Organisers Anchialine Ecosystems, str. 12-12.

BISHOP, R.E.; HUMPHREYS, W.F.; KRŠINIĆ, F.; SKET, B.; ILIFFE, T.M.; ŽIC, V.; MOORE, W.S.; CUKROV, N.; CUKROV, M.; BOXSHALL, G.A., & POHLMAN, J.W. (2015): 'Anchialine' redefined as a subterranean estuary in a crevicular or cavernous geological setting. *Journal of Crustacean Biology* 35 (4): 511–514.

BOGNAR, A.; FAIVRE, S.; BUZJAK, N.; PAHERNIK, M. & BOČIĆ, N. (2012): Recent Landform Evolution in the Dinaric and Pannonian Regions of Croatia. In: *Recent Landform Evolution.* Heidelberg, New York (NY), Dordrecht, London: Springer, 313-344.

BONACCI, O. & ROJE-BONACCI, T. (2003): Groundwater on small Adriatic karst islands. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 50 (1): 41-44.

BUNNELL, D. (2004): Littoral caves. In J. GUNN (Ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn. 1050-1054.

CUKROV, N.; JALŽIĆ, B.; BILANDŽIJA, H. & CUKROV, M. (2009): Research history and anchialine cave characteristic in Croatia In: *Anchialine ecosystems : Reflection and prospects: Book of abstracts*, Palma de Mallorca. 19-20.

DE WAELE, J.; D'ANGELI, I.M.; BONTOGNALI, T.; TUCCIMEI, P.; SCHOLZ, D.; JOCHUM, K.P.; COLUMBU, A.; BERNASCONI, S.M.; FORNÓS, J.J.; GRAU GONZÁLEZ, E.R. & TISATO, N. (2018): Speleothems in a north Cuban cave register sea-level changes and Pleistocene uplift rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43: 2313–2326.

DE WAELE, J.; D'ANGELI, I.M.; TISATO, N.; TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; VILLA, I.M.; GRAU GONZÁLEZ, E.R.; BERNASCONI, S.M., & BONTOGNALI, T. (2017): Coastal uplift rate at Matanzas (Cuba) inferred from MIS5e phreatic overgrowths on speleothems. *Terra Nova*, 29 (2): 98–105.

DUMITRU, O.A.; POLYAK, V.J.; ASMEROM, Y. & ONAC, B.P. (2021): Last interglacial sea-level history from speleothems: a global standardized database. *Earth System Science Data*, 13: 2077–2094.

FORNÓS, J.J.; GELABERT, B.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; TUCCIMEI, P. & VESICA, P. (2002): Phreatic overgrowths on speleothems: a useful tool in structural geology in littoral karstic landscapes. The example of eastern Mallorca (Balearic Islands). *Geodinamica Acta*, 15: 113–125.

FURLANI, S.; CUCCHI, F. & BIOLOCHI, S. (2012): Late Holocene widening of karst voids by marine processes in partially submerged coastal caves (northeastern Adriatic Sea) [JB]. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 35: 129–140.

GARASIC, M. (2021): The Dinaric Karst System of Croatia - Speleology and Cave Exploration. In: *Cave and Karst Systems of the World*. Springer International Publishing.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1974): Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con las formaciones marinas del Cuaternario. *Boletin de la Sociedad de Historia Natural de las Baleares*, 19: 11–28.

GINÉS, J.; GINÉS, A. & POMAR, L. (1981): Morphological and mineralogical features of phreatic speleothems occurring in coastal caves of Majorca (Spain). In: BECK, B.F. (Ed.), *Proceedings of the Eighth International Congress of Speleology,* Bowling Green, Kentucky, 2: 529–532.

GOTTSTEIN MATOČEC, S.; OZIMEC, R.; JALŽIĆ, B.; KEROVEC, M., & BAKRAN-PETRICIOLI, T. (2002): *Raznolikost i ugroženost podzemne faune Hrvatske/Diversity and threat of subterranean fauna in Croatia*. Ministarstvo zaštite okoliša i prostornog uređenja, Zagreb, 1-82. [in Croatian]

HARMON, R.S.; SCHWARCZ, H.P. & FORD, D.C. (1978): Late Pleistocene sea level history of Bermuda. *Quaternary Research*, 9: 205–218.

HOLTHUIS L. B. (1973): Caridean shrimps found in land-locked saltwater pools at four Indo-West Pacific localities (Sinai Peninsula, Funafuti Atoll, Maui and Hawaii Islands), with the description of one new genus and four new species. *Zoologische Verhandelingen*, 128 1 48 pls. 1-7.

ILIFFE, T.M. (2000): Anchialine cave ecology. In: Wilkens, H., D.C. Culver i W.F. Humphreys (Eds). *Subterranean ecosystems*, 59-76.

JALŽIĆ, B. (2007): Medvjeđa Špilja na otoku Lošinju/Bear Cave on the island of Lošinj. *Speleolog,* 55: 45–55. [in Croatian]

JALŽIĆ, B.; ČUKOVIĆ MALENICA T.; MIHOCI, T.; BEDEK, J.; BILANDŽIJA, H.; BREGOVIĆ, P.; DRAŽINA, T.; JALŽIĆ, V.; KOMERIČKI, A.; KOVAČ KONRAD, P. et al. (2021): *Caves of the island Mljet in pictures and words*, Nacionalni park Mljet, Hrvatsko biospeleološko društvo, Zagreb.

JENSON, A.; SCHWARTZ, B.: LI, Y. & GAO, Y. (2018): The implications and limitations of phreatic overgrowths of speleothems as sea level indicators: Quintana Roo, Mexico. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 50 (6), 147–146.

KAJAN, K.; CUKROV, N.; CUKROV, N.; BISHOP-PIERCE, R., & ORLIĆ, S. (2021): Microeukaryotic and Prokaryotic Diversity of Anchialine Caves from Eastern Adriatic Sea Islands. *Microbial Ecology*, 83 (2): 257–270.

KRANJC, A. (2004): Dinaric karst. In: GUNN, J. (ed.) *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Taylor & Francis Books, Inc., 591-594.

KUHTA, M. & BAKŠIĆ, D. (2001): Karstification Dynamics and Development of Deep Caves on the North Velebit Mt. – Croatia. In: *Speleology in the third millenium: Sustainable Development of Karst Environments.* Brasilia.

LITTLE, S.N. & VAN HENGSTUM, P.J. (2019): Intertidal and subtidal benthic foraminifera in flooded caves: Implications for reconstructing coastal karst aquifers and cave paleoenvironments. *Marine Micropaleontology,* 149: 19–34.

LONČAR, N.; BAR-MATTHEWS, M.; AYALON, A.; SURIĆ, M. & FAIVRE, S. (2017): Early and mid-Holocene environmental conditions in the eastern Adriatic recorded in speleothems from Mala Špilja Cave and Velika Špilja cave (Mljet Island, Croatia). *Acta Carsologica*, 46: 229–249.

LONČAR, N.; BAR-MATTHEWS, M.; AYALON, A.; FAIVRE, S. & SURIĆ, M. (2019): Holocene climatic conditions in the eastern Adriatic recorded in stalagmites from Strašna Peć Cave (Croatia). *Quaternary International*, 508, 98–106.

LONČAR, N.; FAIVRE, S.; BAKRAN-PETRICIOLI, T.; MIKLAVIČ, B.; ONAC, B.P.; BAREŠIĆ, J.; KOVAČ KONRAD, P. & HORVATIĆ, D. (2020): Algal Rims And Phreatic Overgrowths On Speleothems (POS) As Indicators Of Relative Sea Level Change Along The Eastern Adriatic Coast. *Proceedings of International Association of Geomorfologists Conference "The Role of Geomorphology in Modern Society"*, Athens, Greece.

LONČAR, N.; MIKLAVIČ, B.; ONAC, B.P.; KOVAČ KONRAD, P. & FAIVRE, S. (2021): Submerged speleothems and phreatic overgrowths on speleothems (POS) as indicators of relative sea-level change along the eastern Adriatic coast. *Proceedings of 6th Regional Scientific Meeting on Quaternary Geology: Seas, Lakes and Rivers*, 27–29. 9 2021, Ljubljana, Slovenija.

LONČAR, N.; FAIVRE, S.; MIKLAVIČ, B.; ONAC, B P.; POLYAK, V.J., & ASMEROM, Y. (2024): Characterization of phreatic overgrowths on speleothems precipitated in the northern Adriatic during a sea-level stillstand at ca. 2.8 ka. *Quaternary Research*, 118: 88–99.

MIKLAVIČ, B.; YOKOYAMA, Y.; URATA, K.; MIYAIRI, Y. & KAN, H. (2018): Holocene relative sea level history from phreatic overgrowths on speleothems (POS) on Minami Daito Island, Northern Philippine Sea. *Quaternary International*, 471: 359–368.

MIŠUR, I.; BUDIĆ, M.; KURETIĆ, T. & KORBAR, T. (2021): Tectonic Influence on Speleogenesis of Sea Caves on Biševo Island (UNESCO Global Geopark Vis Archipelago, Adriatic Sea, Croatia). *Geosciences*, 11: 341.

OTONIČAR, B.; BUZJAK, N.; MYLROIE, J. & MYLROIE, J. (2010): Flank margin cave development in carbonate talus breccia facies: an example from Cres Island, Croatia. *Acta Carsologica,* 39 (1): 79-91.

OZIMEC, R. (2003): Otok Mljet – preliminarni speleološko-biospeleološki prikaz otoka/Island of Mljet - preliminary speleological and biospeleological description of the island. *Subterranea Croatica*, 1: 30–38. [in Croatian]

OZIMEC, R. (2012): Ecology, Biology and Vulnerability of Šipun Cave (Cavtat, Dubrovnik, Croatia). *Natura Croatica* ,21, Suppl. 1: 86-90.

OZIMEC, R. & BAKOVIĆ, N. (2017): Podzemna anhijalina jezera: primjer špilje Šipun (Cavtat, Dubrovnik, Hrvatska) / Underground anchialine lakes: Example of Šipun Cave (Cavtat, Dubrovnik, Croatia). *Proceedings conference: znanstveno stručni skup Upravljanje jezerima i akumulacijama u Hrvatskoj I okrugli stol o aktualnoj problematici Vranskog jezera kod Biograda na Moru Biograd na Moru*, 4. - 6. svibnja 2017., Biograd na Moru (Hrvatska/Croatia).

RADIĆ ROSSI, I. & CUKROV, N. (2017): Archaeological Potential of the Anchialine Caves in Croatia. In: *Under the Sea: Archaeology and Palaeolandscapes of the Continental Shelf*. Amsterdam: Springer, 2017. 255-266.

RADOLOVIĆ, M.; BAKRAN-PETRICIOLI, T.; PETRICIOLI, D.; SURIĆ, M. & PERICA, D. (2015): Biological response to geochemical and hydrological processes in a shallow submarine cave. *Mediterranean Marine Science,* 16: 305–324.

RUDZKA, D.; MCDERMOTT, F., & SURIĆ, M. (2012): A late Holocene climate record in stalagmites from Modrič Cave (Croatia). *Journal of Quaternary Science*, 27 (6): 585–596.

STOCK J.H.; ILIFFE T.M. & WILLIAMS D. (1986): The concept "anchialine" reconsidered. *Stygologia,* 2: 90–92.

STROJ, A.; LACKOVIĆ, D.; SASOWSKY, I.D.; BAJO, P. & GLUMAC, B. (2024): The application of cave morphological and sedimentary deposit investigations to unravel tectonic history and landscape evolution: Insights from Veternica Cave, Medvednica Mountain, Croatia. *Geomorphology*, 446: 109000.

SURIĆ, M. (2018): Speleothem-based Quaternary research in Croatian karst – a review. *Quaternary International*, 490: 113-122.

SURIĆ, M.; JALŽIĆ, B. & PETRICIOLI, D. (2007): Submerged speleothems – expect the unexpected. Examples from the Eastern Adriatic coast (Croatia). *Acta Carsologica*, 36 (3): 389–396.

SURIĆ, M.; RICHARDS, D.; HOFFMANN, D.; TIBLJAŠ, D. & JURAČIĆ, M. (2009): Sea level change during MIS 5a based on submerged speleothems from the eastern Adriatic Sea (Croatia). *Marine Geology*, 262: 62-67.

SURIĆ, M. & JURAČIĆ, M. (2010). Late Pleistocene – Holocene environmental changes – records from submerged speleothems along the Eastern Adriatic coast (Croatia), *Geologia Croatica*, 63 (2): 155-169.

SURIĆ, M.; LONČARIĆ, R. & LONČAR, N. (2010): Submerged caves of Croatia: distribution, classification and origin. *Environmental Earth Sciences*, 61: 1473–1480.

SURIĆ, M.; KORBAR, T. & JURAČIĆ, M. (2014): Tectonic constraints on the late Pleistocene-Holocene relative sea-level change along the north-eastern Adriatic coast (Croatia). *Geomorphology*, 220: 93–103.

TERZIĆ, J.; PEH, Z., & MARKOVIĆ, T. (2010): Hydrochemical properties of transition zone between fresh groundwater and seawater in karst environment of the Adriatic islands, Croatia. *Environmental Earth Sciences*, 59 (8): 1629–1642.

TERZIĆ, J.; GRGEC, D.; LUKAČ REBERSKI, J.; SELAK, A.; BOLJAT, I. & FILIPOVIĆ, M. (2021): Hydrogeological estimation of brackish groundwater lens on a small Dinaric karst island: Case study of Ilovik, Croatia. *Catena*, 204: 105379.

TUCCIMEI, P.; ONAC, B.P.; DORALE, J.A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; SPADA, G.; RUGGIERI, G. & MUCEDDA, M. (2012): Decoding last interglacial sealevel variations in the western Mediterranean using speleothem encrustations from coastal caves in Mallorca and Sardinia: a field data–model comparison. *Quaternary International*, 262: 56–64.

VAN HENGSTUM P.J.; SCOTT D.B.; GRÖCKE D.R. & CHARETTE M.A. (2011): Sea level controls sedimentation and environments in coastal caves and sinkholes. *Marine Geology*, 286: 35–50.

VAN HENGSTUM, P.J.; RICHARDS, D.A.; ONAC, B.P. & DORALE, J.A. (2015): Coastal caves and sinkholes. In: SHENNAN, I.; LONG, A.J. & HORTON, B.P.C (eds.), *Handbook of Sea-Level Research.* John Wiley & Sons, Hoboken, pp. 83–103.

VANIČEK, V.; JURAČIĆ, M.; BAJRAKTAREVIĆ, Z. & ĆOSOVIĆ, V. (2000): Benthic Foraminiferal Assemblages in a Restricted Environment - An Example from the Mljet Lakes (Adriatic Sea, Croatia). *Geologia Croatica*, 53 (2): 269-279.

VLAHOVIĆ, I.; TIŠLJAR, J.; VELIĆ, I. & MATIČEC, D. (2005). Evolution of the Adriatic carbonate platform: palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 220: 333–360.

Online resources

Bioportal of the Ministry of Environmental Protection and Energy of Republic of Croatia, https://bioportal.hr/gis/ June 24, 2024.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Els bogamarins fòssils de dues coves del miocè superior del llevant i migjorn de Mallorca

Josep QUINTANA [1], Francesc GRÀCIA [2, 3] i Joan J. FORNÓS [2, 3]

[1] Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont, Universitat Autònoma de Barcelona. Email: picoguevo@gmail.com
[2] Grup de Recerca Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca.
[3] Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca.

Abstract

Four species of echinoidea: *Echinolampas (Echinolampas) hoffmanni* Desor in Agassiz et Desor, 1847, *Echinolampas (Echinolampas) algirus* Pomel, 1887, *Echinolampas (Echinolampas) hemisphaerica* (Lamarck, 1816) and *Clypeaster aichinoi* Checchia -Rispoli, 1925, are described and figured. Of all these species, the finding of *E. (E.) hoffmanni* and *E. (E.) algirus*, were considered, until now, as two Pliocene species (*E. [E.] hoffmanni* also has been recorded in the Middle-Upper Pleistocene of Sicily). The finding of these two taxa in the rocks of the submerged caves from the Upper Miocene of Mallorca is, therefore, the first record in the Miocene of the Mediterranean basin, while *C. aichinoi* is the first citation in the Upper Miocene of the Balearic Islands. All specimens come from Cova dets Ases (Felanitx), except *Echinolampas (Echinolampas) algirus* which was found in Cova des Serral (Manacor). They have been located in detached rocks associated with submerged collapse halls or galleries, using underwater speleology techniques. The fossils protrude from the rock due to differential erosion, by the chemical aggressiveness of the waters.

Resum

En el present treball es descriuen i figuren quatre espècies d'equinoïdeus: *Echinolampas (Echinolampas) hoffmanni* Desor in Agassiz et Desor, 1847, *Echinolampas (Echinolampas) algirus* Pomel, 1887, *Echinolampas (Echinolampas) hemisphaerica* (Lamarck, 1816) i *Clypeaster aichinoi* Checchia-Rispoli, 1925. De totes aquestes espècies, resulta especialment interessant la troballa de *E. (E.) hoffmanni* i *E. (E.) algirus*, considerades, fins ara, com dues espècies pliocèniques (*E.* [*E.*] *hoffmanni* també s'ha registrat en el plistocè mitjà-superior de Sicília). La troballa d'aquests dos tàxons a les roques de coves subaquàtiques del miocè superior de Mallorca suposa, per tant, el primer registre en el miocè de la conca Mediterrània, mentre que *C. aichinoi* suposa la primera citació en el miocè superior de les illes Balears. Tots els exemplars procedeixen de la cova dets Ases (Felanitx), excepte *Echinolampas (Echinolampas) algirus,* que es va trobar a la cova des Serral (Manacor), i foren localitzats en roques despreses associades a sales o galeries d'esfondrament sotaiguades, mitjançant tècniques d'espeleologia subaquàtica. Els fòssils sobresurten de la roca per corrosió diferencial, a causa de l'agressivitat química de les aigües.

Quintana, J.; Gràcia, F. & Fornós, J. J. (2024): Els bogamarins fòssils de dues coves del miocè superior del llevant i migjorn de Mallorca.
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 125-134. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 11 setembre 2024; **Revisat:** 2 octubre 2024; **Acceptat:** 14 octubre 2024.
Publicat online: 29 octubre 2024.

Introducció

Les referencies als equinoïdeus del miocè superior de Mallorca i Menorca es remunten, com a mínim, al segle XIX (HERMITE, 1879; BARBER, 1996), època durant la qual va existir un interès notable pels fòssils i la paleontologia. En aquesta època, i tal com es dedueix dels comentaris inclosos en les excursions del canonge maonès Francesc Cardona i Orfila realitzades entre 1878 i 1881 (BARBER, 1996), molts de fòssils (inclosos els bogamarins) es recollien fàcilment a la superfície de les terres de conreu, on els exemplars encara eren abundants.

De llavors ençà, molts dels jaciments paleontològics "clàssics" de les Balears estan pràcticament esgotats. Al ser més inaccessibles, els jaciments situats a l'interior de coves han conservat, més o menys inalterada, la seva riquesa paleontològica. Per les seves especials característiques, les coves inundades encara conserven els fòssils en un estat pristi. En aquest sentit, és possible trobar-hi exemplars molt interessants que, degut a l'acció erosiva o antròpica, s'han perdut de forma irremediable en altres jaciments.

A les coves de Mallorca s'han citat alguns bogamarins fòssils en galeries i sales actualment en condicions vadoses. A la cova des Pas de Vallgornera s'ha citat el gènere *Clypeaster* Lamarck, 1801, on fins i tot es parla d'un sector i galeria dels Clypeasters a causa de la seva abundància (MERINO et al., 2007). En aquesta cavitat, a més d'aquest gènere, també s'han documentat altres bogamarins (MERINO, 2023). A la cova de sa Balma des Quartó, BERMEJO et al. (2014) fan referència a l'abundància del gènere *Clypeaster* i altres bogamarins fòssils indeterminats. En altres coves només es fa menció, d'una forma molt genèrica als fòssils de bogamarins, únicament indicant que són abundants, com és el cas de la cova Genovesa (GRÀCIA, 2015), en aquest cas, en galeries sotaiguades. Les coves del Drac (GRÀCIA, 2015) també presenten algunes zones amb equinoderms.

Aquest treball és el primer, dins jaciments càrstics del miocè superior, on es profunditza en l'estudi d'aquests invertebrats fòssils.

Descripció geològica

La cova dets Ases (Felanitx) i la cova des Serral (Manacor) estan situades a la marina de Llevant, caracteritzada des d'un punt de vista geomorfològic, per conformar una plataforma tabular post-orogènica formada per roques carbonàtiques del miocè superior i que, a la línia de costa, es caracteritzen per formar penya-segats força verticalitzats. Aquestes s'adossen als relleus estructurats formats, principalment, per les roques mesozoiques que conformen els relleus de les serres de Llevant i que són considerats com el basament pre-miocè. Aquesta plataforma tabular post-orogènica està constituïda per una seqüència que va del tortonià al messinià i està formada, en la seva majoria per calcarenites, calcàries oolítiques i estromatolítiques així com calcàries esculloses representades per diversos subambients. La seva naturalesa calcària la fa susceptible dels processos de carstificació. Cal afegir, en aquest cas, la seva localització litoral, la qual cosa implica tota una sèrie de processos relacionats amb la mescla d'aigües marines i meteòriques i una evolució condicionada per l'oscil·lació del nivell marí. Això fa que, a part dels processos de dissolució, hi intervenen tota una sèrie de reajustaments mecànics, relacionats amb els períodes en que les galeries romanen en condicions vadoses. Les davallades del nivell freàtic al llarg dels períodes freds, faciliten els processos de col·lapse de les voltes en perdre aquestes part de la sustentació.

La roca predominant on s'han localitzat els fòssils correspon, en línies generals, a calcisiltites ben cimentades amb presència de grans gruixats o molt gruixats (puntualment graves) amb una textura *packstone* (puntualment *floatstone/rudstone*). La composició és totalment bioclàstica formada en la seva major part per fragments de mol·luscs, principalment bivalves difícils de reconèixer pel grau de trencament de les valves, excepte algun ostreid, plaques i pues d'equinoderms, abundants foraminífers (especialment textulàrids), fragments d'algues vermelles i exemplars de diferents espècies d'equinoderms.

Aquestes calcisiltites s'haurien sedimentat en un medi d'aigües someres, de fàcies de lagoon, o ja en plataforma més oberta, un poc més profunda, relacionada amb un talús escullós distal. En qualsevol cas, el membres del gènere *Echinolampas* Gray, 1825 (gènere en el qual s'inclouen la majoria d'espècies descrites en aquest treball) es poden considerar bogamarins d'arena, en viure normalment enterrats en la sorra, en comptes de en substrats durs rocosos.

Figura 1: Exemplars d'*Echinolampas* sp. dipositats en posició de vida, a blocs caiguts del sostre i basculats a la sala dels Bogamarins. Els fòssils són visibles per l'acció de la corrosió diferencial. La longitud dels exemplars és d'uns 10 cm (Foto: F. Gràcia).
Figure 1: Specimens of *Echinolampas* sp. in life position, located on blocks fallen from the ceiling and tipped in the Sala dels Bogamarins. The fossils protrude from the rock due to differential corrosion. The length of the specimens is about 10 cm (Photo: F. Gràcia).

Corrosió diferencial dels fòssils

La corrosió causada per l'aigua, actual o pretèrita, especialment a la zona de mescla entre l'aigua dolça i l'aigua salada, pot produir la dissolució diferencial de la roca i els fòssils (Figura 1), arran de la qual els fòssils es fan més visibles o es desprenen,

incorporant-se al sediment del trespol (GRÀCIA, 2015). L'exploració realitzada en les tres darreres dècades de cavitats subaquàtiques de la plataforma miocènica del llevant i migjorn de Mallorca ha permès el descobriment de jaciments de vertebrats i invertebrats pre-messinians (del miocè superior), tals com la cova de Cala Varques B (GRÀCIA et al., 2000), la cova des Coll (GRÀCIA et al., 2005), el sistema Pirata-Pont-Piqueta (GRÀCIA et al., 2006, 2019) i les coves del Drac (GRÀCIA et al., 2018). La corrosió diferencial en aquestes coves a tret a la llum restes de tortugues terrestres de gran mida (*Geochelone/Cheirogaster* sp.), així com restes de tortugues d'aigües salabroses (*Trionyx* sp.). També s'han localitzat grans ossos de cetacis. Les dents i vèrtebres de peixos són també relativament freqüents (GRÀCIA, 2015).

Els invertebrats marins (equinoderms, gasteròpodes i bivalves) són molt abundants i sobresurten en gran quantitat a la roca mare de moltes de les cavitats. A la cova des Pas de Vallgornera també s'han documentat, a més a més de la presència d'abundant fauna invertebrada i vertebrada, espectaculars bioturbacions de decàpodes (MERINO, 2023). A la roca matriu del pliocè i plistocè d'es Dolç també s'ha descrit abundant fauna invertebrada (GRÀCIA et al., 2014). Realment, la majoria de les coves subaquàtiques s'han de considerar jaciments paleontològics per l'elevada presència de restes fòssils.

Localització dels fòssils a les cavitats

Els exemplars fòssils es van trobar a galeries i sales sotaiguades de la cova dets Ases i un d'ells a la cova des Serral. S'han localitzat entre 20 i 30 m per davall la superfície exterior i a uns 2 a 8 m de fondària sota el nivell de la mar, fent servir les tècniques i equipament d'espeleologia subaquàtica (Figura 2). Les coves estan situades al llevant i migjorn de Mallorca, dins zona ANEI (àrea natural d'especial interès) i la cova dets Ases també posseeix la figura ZEC (zona d'especial conservació). La cova des Serral encara està en fase d'exploració i no hi ha una topografia per poder situar la zona on es va trobar l'exemplar.

Les cavitats corresponen a la tipologia de coves de la zona de mescla costanera i s'han generat a causa de l'agressivitat que es deriva de la mescla entre aigües continentals dolces i aigües marines, dins d'un context hidrogeològic d'elevada permeabilitat per mor d'una important porositat primària (GINÉS & GINÉS, 1992, 2007; GINÉS, 2000b). Aquestes coves litorals consten de dues tipologies molt diferents. Per una banda, galeries poc evolucionades, amb abundants morfologies de corrosió, generades en condicions freàtiques les quals es troben, en general, sota el nivell de la mar. Per altra banda, sales i galeries on predominen els blocs caiguts de sostres i parets, les quals, en ocasions, sobresurten de l'aigua a causa de l'ascensió del sostre en produir-se els esfondraments zenitals. Són les anomenades sales d'esfondrament (GINÉS, 2000a). Les entrades terrestres s'obriren a conseqüència d'aquests processos clàstics, en arribar a esfondrar-se la volta de les sales i connectar amb la superfície del terreny. La cova dets Ases presenta també una entrada submarina, la qual permet incloure la cavitat dins les captures càrstico-marines de la plataforma miocènica (GINÉS & GINÉS, 2009, 2011). Algunes de les grans acumulacions de blocs caiguts es troben cimentats per recobriments litoquímics formant colades estalagmítiques i altres espeleotemes, però en ocasions aquests recobriments també es veuen afectats per la corrosió de les aigües, arribant a dissoldre's total o parcialment, deixant veure la roca matriu.

Figura 2: Progressió amb material i tècniques d'espeleologia subaquàtica per la cova dets Ases. S'han localitzat els fòssils entre uns 20 m i 28 m per davall de la superfície exterior i entre 2 m i 8 m de fondària sota el nivell freàtic (Foto: M. A. Perelló).
Figure 2: Progression with equipment and techniques of underwater speleology through Cova dets Ases. The fossils have been located between 20 m and 28 m from surface and between 2 m and 8 m below the wàter table (Photo: M. A. Perelló).

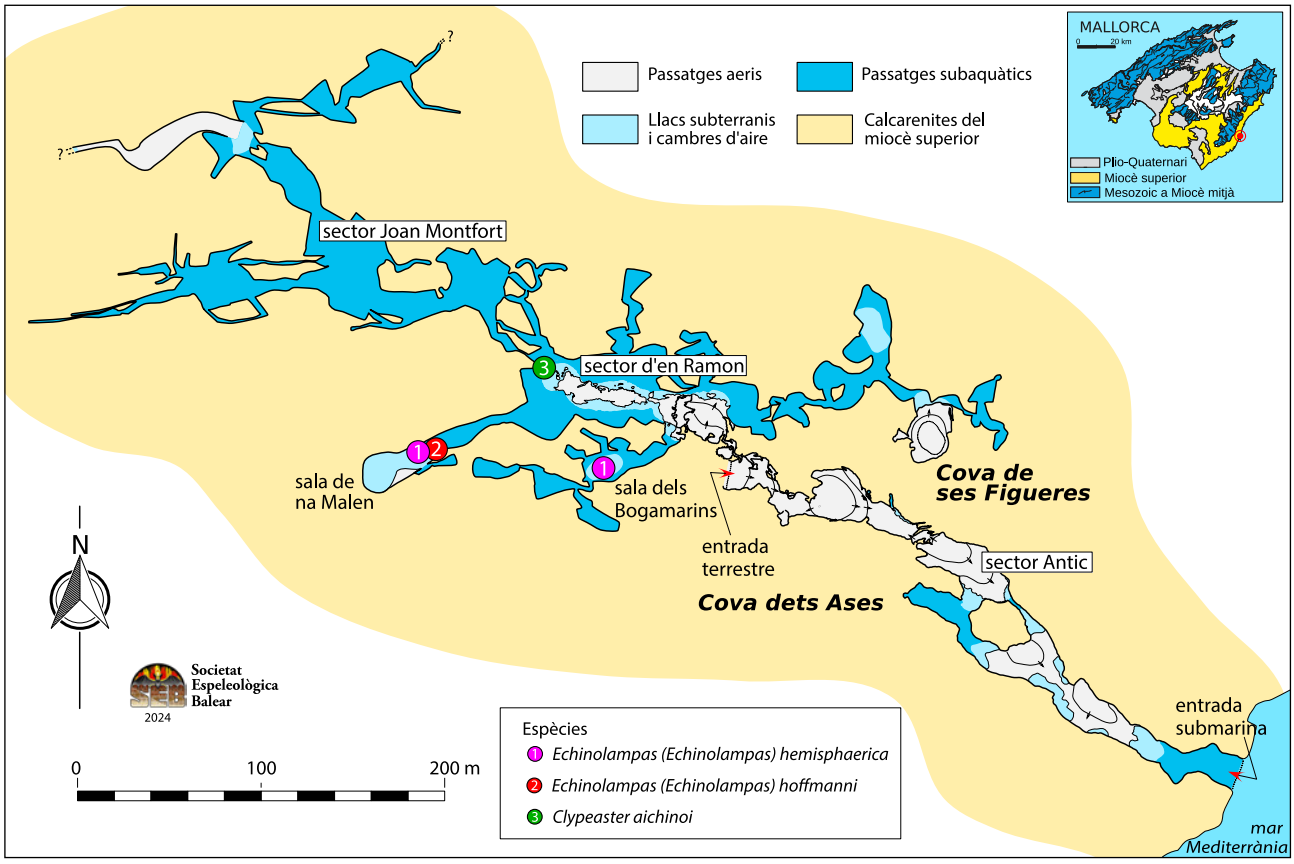


Figura 3: Localització de les espècies descrites a la cova dets Ases. 1) *Echinolampas (Echinolampas) hemisphaerica*; 2) *Echinolampas (Echinolampas) hoffmanni*; 3) *Clypeaster aichinoi*.
Figure 3: Location of the species described in Cova dets Ases. 1) *Echinolampas (Echinolampas) hemisphaerica*; 2) *Echinolampas (Echinolampas) hoffmanni*; 3) *Clypeaster aichinoi*.

Tots els fòssils estudiats en aquest treball s'han trobat a zones sotaiguades, parcialment inclosos en la roca matriu o solts a zones d'esfondrament, entre blocs i roques despreses. Alguns exemplars no s'han intentat extreure a causa de la seva fragilitat. La sala dels Bogamarins (Figura 3) porta aquest nom degut a l'abundància d'aquest tipus de fòssils.

Metodologia de treball

A l'hora de retirar la roca matriu dels fòssils s'han utilitzat mètodes exclusivament mecànics (martell, escarpres i freses giratòries). Abans de retirar la roca matriu dels exemplars més fràgils, s'han consolidat, utilitzant una solució de Paraloid B-72 en acetona en una concentració del 10%, aplicat amb pinzell o xeringa.

Per comptabilitzar el nombre de tubercles, de la superfície dels bogamarins, s'ha utilitzat un marc de paper mil·limetrat de 10 x 10 mm. Dels tubercles situats a l'interior del quadrat, just en el marge del marc de paper, tan sols s'han comptabilitzat aquells en els quals era visible, com a mínim, la meitat de la seva circumferència. La xifra referent a la densitat dels tubercles (nombre de tubercles/cm^2) s'ha de considerar orientativa, al mesurar-se en cada cas en posicions no equivalents, en funció de l'estat de conservació de la superfície de cada un dels exemplars. Les mides s'han pres utilitzant un calibrador digital amb un marge d'error de ± 0,01 mm. Les seccions transversals de les closques s'han dibuixat utilitzant un mesurador de perfils o "pinta de siluetes" de 20 cm de llarg. Els exemplars descrits es conserven en les col·leccions de Societat d'Història Natural de les Balears (MNIB-SHNB: acrònim del Museu de la Naturalesa de les Illes Balears-Societat d'Història Natural de les Balears, Palma de Mallorca) i en la col·lecció paleontològica d'en Josep (Bep) Quintana (Ciutadella de Menorca)(CBQ).

Sistemàtica

Filum	ECHINODERMATA Klein, 1734
Classe	ECHINOIDEA Leske, 1778
Subclasse	EUECHINOIDEA Bronn, 1860

Ordre	ECHINOLAMPOIDA Kroh & Smith, 2010
Família	ECHINOLAMPADIDAE Gray, 1851
Gènere	ECHINOLAMPAS Gray, 1825
Subgènere	ECHINOLAMPAS Gray, 1825

Echinolampas (Echinolampas) hoffmanni Desor in Agassiz et Desor, 1847

Material

Un exemplar complet, molt ben conservat (CBQ-4304) procedent de la cova dets Ases (Felanitx, Mallorca) (Figura 4A-D).

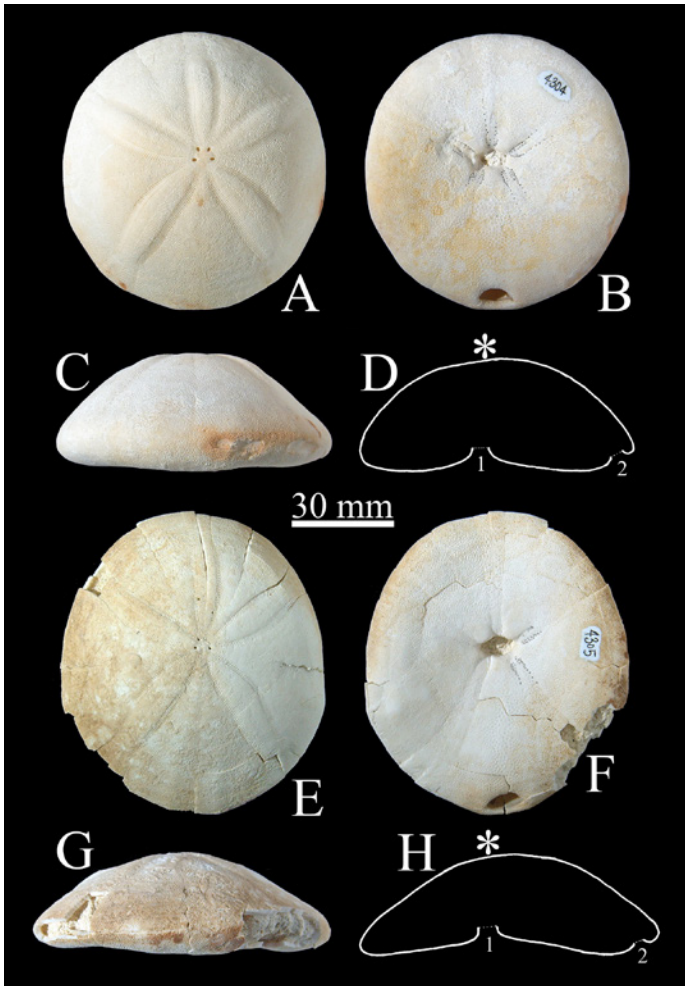


Figura 4: *Echinolampas (Echinolampas) hoffmanni* (A-D) i *Echinolampas (Echinolampas) algirus* (E-H) en vista aboral (A, E), adoral (B, F), lateral (C, G) i en secció transversal antero-posterior (D, H). La posició del sistema apical ve indicada per un asterisc (*), la del peristoma pel número 1 i la del periprocte pel número 2 (Foto: J. Quintana).
Figure 4: *Echinolampas (Echinolampas) hoffmanni* (A-D) and *Echinolampas (Echinolampas) algirus* (E-H) in aboral (A, E), adoral (B, F), lateral (C, G) view and in antero-posterior cross-section (D, H). The position of the apical system is indicated by an asterisk (*), that of the peristome by #1 and that of the periproct by #2 (Photo: J. Quintana).

Localització topogràfica

Sala de na Malen

Descripció

L'exemplar estudiat té una longitud de 94 mm, una amplada de 89,7 mm i una alçada de 40,1 mm. Vista per la cara aboral, la closca mostra un perfil subcircular. El sistema apical és monobasal amb quatre gonòporus i ocupa una posició central. L'exemplar estudiat està tan ben conservat que inclús és possible observar tres dels porus oculars. Pètals lleugerament elevats, molt evidents, amb les columnes dels porus exteriors i interiors amb longituds diferents. Aquesta diferència és petita en els pètals III, I i IV i més evident en els pètals IV i II. Superfície adoral lleugerament enfonsada en les proximitats del peristoma. Aquest té un contorn pentagonal, deprimit en sentit antero-posterior (longitud: 5,7 mm; amplada: 9,3 mm) i lleugerament desplaçat cap al marge anterior. Filodes petaloideus, no gaire desenvolupats, amb un número relativament escàs de porus. Periprocte no elevat, de forma lenticular, lleugerament més gran que el peristoma (longitud: 6,3 mm; amplada: 11,6 mm), situat molt a prop del marge posterior. Tubercles escrobiculats. Els de la superfície aboral són molt petits (diàmetre: 0,5 mm) i densos (202/cm^2), mentre que en la superfície adoral són lleugerament més grans (diàmetre: 0,6 mm) i no tan densos (139/cm^2). En aquest cas, la mida dels tubercles va augmentant des del marge fins al peristoma, on assoleixen el seu major diàmetre.

Comentaris

Vist des de la cara aboral, *E. (E.) hoffmanni es diferencia de E. (E.) hemisphaerica* per un perfil propolcionament més estret. En termes generals, l'àmbit de la cara aboral de *E. (E.) hoffmanni* és més convexa que la de *E. (E.) hemisphaerica,* mentre que

la zona al voltant del periprocte mostra un perfil lleugerament més aplanat en *E. (E.) hemisphaerica.* En canvi, la superfície adoral al voltant del peristoma de *E. (E.) hoffmanni* està proporcionalment menys enfonsada.

ROMAN (1965) cita *E. (E.) hoffmanni* en el pliocè de Pianosa (Italia), Oran (Algeria), Tunísia i en el Cap Juby (Marroc), així com en el pliocè i el sicilià (plistocè mitjà-superior) de Sicília. SANTOLAYA & SILLERO (1995) i LÓPEZ & SILLERO (2005) indiquen la presència d'aquesta espècie a la serra de Santa Pola (Alacant). SAURA-VILAR & GARCÍA-VIVES (2014) la citen en el zanclià, pliocè inferior de Carboneras (Almeria) i en el pliocè superior de l'illa de Rodas (Grècia). Segons SANTOLAYA & SILLERO (1995), *E. (E.) hoffmanni* apareix en el pliocè superior, assoleix el seu apogeu durant el sicilià i s'extingeix durant el tirrenià (plistocè superior). Aquesta espècie és, per tant, el darrer representant del gènere *Echinolampas* en la mar Mediterrània. L'exemplar trobat a la cova dets Ases correspon al primer registre d'aquesta espècie en el miocè superior de la conca mediterrània.

Echinolampas (Echinolampas) algirus Pomel, 1887

Material

Un exemplar procedent de la cova des Serral (Manacor, Mallorca), amb número de registre CBQ-4305 (Figura 4E-H).

Descripció

L'exemplar estudiat té un contorn ovalat, amb una longitud de 95,1 mm, una amplada de 82,9 mm i una alçada de 29,6 mm. Els pètals a penes sobresurten en relació a la superfície aboral. Les columnes dels porus exteriors i interiors tenen una longitud semblant en els pètals III, I i V, mentre que en els pètals II i IV la diferència entre les columnes és bastant marcada. Sistema apical monobasal, amb quatre gonòporus. El sistema apical i el peristoma es troben lleugerament desplaçats cap al marge anterior. Tubercles escrobiculats. En la superfície aboral els tubercles són molt petits (diàmetre: 0,4 mm) i molt densos (258/cm²). En la cara adoral tenen un diàmetre similar (diàmetre: 0,36 mm) i una densitat més baixa (159/cm²). Vist lateralment, el perfil de la closca forma un arc de curvatura suau i molt homogènia. La superfície adoral mostra un enfonsament bastant marcat cap el peristoma. Aquest és més ample que llarg (longitud: 6,3 mm; amplada: 10,6 mm). Filodes petaloideus, poc desenvolupats, amb un número relativament escàs de porus (en l'exemplar estudiat només és possible apreciar els porus en dos dels filodes). Periprocte amb una mida semblant a la del peristoma, elevat, més ample que llarg (longitud: 5,1 mm; amplada: 12,3 mm), de forma lenticular i situat molt a prop del marge posterior.

Comentaris

E. (E.) algirus es una especie de mida relativament gran, amb un contorn ovalat allargat, caracteritzat per una closca proporcionalment baixa, més llarga que ample. ROMAN (1965) indica la presència de *E. (E.) algirus* en el pliocè d'Algèria i Perpinyà (França). El present treball representa la primera indicació d'aquesta espècie en el miocè superior de les Illes Balears i de la conca mediterrània.

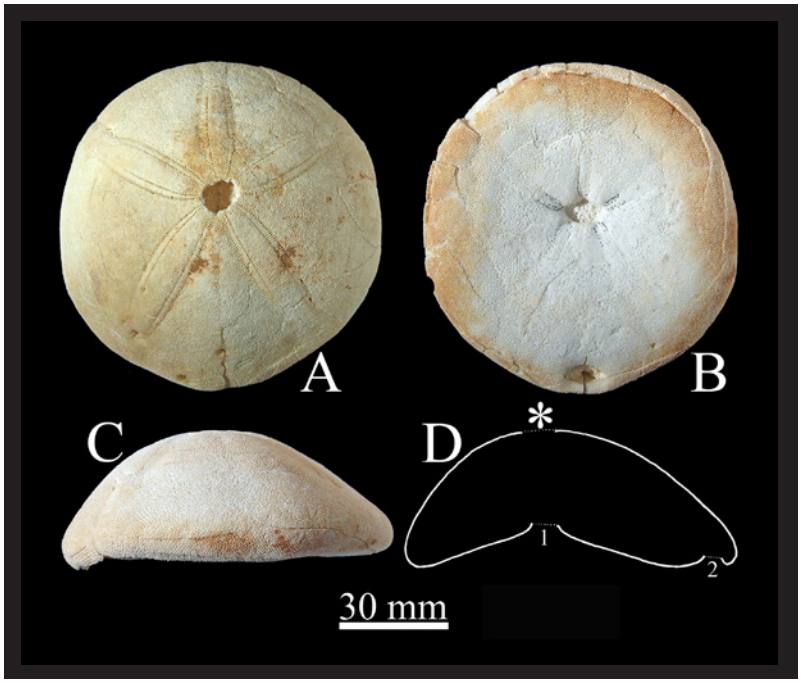


Figura 5: *Echinolampas (Echinolampas) hemisphaerica* (A-D) en vista aboral (A), adoral (B), lateral (C) i en secció transversal antero-posterior (D). La posició del sistema apical ve indicada per un asterisc (*), la del peristoma pel número1 i la del periprocte pel número 2 (Foto: J. Quintana).

Figure 5: *Echinolampas (Echinolampas) hemisphaerica* (A-D) in aboral (A), adoral (B), lateral (C) and antero-posterior cross-section (D) views. The position of the apical system is indicated by an asterisk (*), that of the peristome by #1 and that of the periproct by #2 (Photo: J. Quintana).

Echinolampas (Echinolampas) hemisphaerica (Lamarck, 1816)

Material

Quatre exemplars procedents de la cova dets Ases (Felanitx, Mallorca), amb número de registre MNIB-SHNB-100, MNIB-SHNB-101, MNIB-SHNB-102 i MNIB-SHNB-103 (Figura 5).

Localització topogràfica

Molt abundant, s'ha localitzat a la sala de na Malen i a la sala dels Bogamarins.

Descripció

Vist per la cara aboral mostra un perfil subcircular. El sistema apical és monobasal amb quatre gonòporus i ocupa una posició lleugerament excèntrica al quedar més proper al marge anterior. Lateralment, la closca forma un arc amb una curvatura molt constant des del marge anterior fins al sistema apical, des d'on la curvatura és lleugerament més suau fins a arribar al marge posterior. A la cara aboral, els pètals estan ben desenvolupats, oberts a l'extrem distal, molt lleugerament elevats en relació a la superfície aboral. Les columnes dels porus interiors i exteriors tenen longitud diferent en els ambulacres II-IV i I-V. Les diferencies en les longituds són, emperò, petites. En l'ambulacre III les longituds són les mateixes. Tubercles escrobiculats, molt petits i densos en la cara aboral (205-177/cm^2; diàmetre: 0,47-0,58 mm) i més grans (diàmetre: 0,50-0,75 mm) i poc densos (108-148/cm^2) en la superfície adoral. Peristoma enfonsat, de forma pentagonal, comprimit en sentit antero-posterior (longitud: 7,5 mm; amplada: 12,4 mm), desplaçat cap al marge anterior, situat en l'àrea central, deprimida, de la cara adoral. Filodes no gaire desenvolupats, amb un nombre relativament escàs de porus. Periprocte de forma lenticular, més ample que llarg (longitud: 6,3 mm; amplada: 13,93 mm), situat molt a prop del marge posterior, lleugerament enfonsat. El peristoma i el periprocte tenen mides semblants.

Comentaris

El sistema apical falta en un dels exemplars (MNIBSHNB-101). Les mides de tres dels exemplars (Taula 1) han estat comparades amb les que apareixen en les gràfiques bivariants de PEREIRA (2010). En la gràfica en la qual es representa la relació de l'amplada/longitud enfront de la longitud, la posició d'un dels exemplars (MNIB-SHNB-100) resulta ambigua, al situar-se en la zona de solapament entre *Echinolampas (Echinolampas) barcinensis* Lambert, 1907 i *E. (E.) hemisphaerica*. En canvi, en la gràfica en la qual es compara la relació de l'alçada/longitud enfront de la longitud, aquest exemplar queda situat en la zona definida per *E. (E.) hemisphaerica*, al presentar una relació de l'alçada/longitud major que *E. (E.) barcinensis*.

E. (E.) hemisphaerica està amplament distribuïda en el miocè de tota la conca mediterrània. A les Illes Balears, la presència de *E. (E.) hemisphaerica* ha estat senyalada a Menorca per HERMITE (1879) (Santa Ponça, Ferreries), OBRADOR (1972-1973) (Cala Galdana [Ferreries] i en el Cap d'en Font [Sant Lluís]) i QUINTANA (2022) (port de Ciutadella de Menorca i cala Turqueta [Ciutadella de Menorca]). ROMAN (1965) indica la presència de *E. (E.) hemisphaerica* en el burdigalià (miocè inferior) de Còrcega; en el miocè inferior-mitjà de Portugal, Itàlia continental i Líbia; en el miocè inferior-superior de França continental, Algèria occidental, Viena i Egipte; en el miocè mitjà de Sardenya i oest d'Ucraïna, en el miocè superior d'Hongria i Romania i en el miocè inferior, mitjà i superior de Turquia. És també present a Malta (*Upper limestone*) (WRIGHT & ADAMS, 1864), en el messinià de Melilla (LACHKHEM & ROMAN, 1995), en el miocè mitjà de Bosnia-Herzegovina (MITROVIC-PETROVIC, 1969) i en el miocè mitjà d'Eslovènia (MAJCEN et al., 1997).

Ordre	CLYPEASTEROIDA L. Agassiz, 1835
Família	CLYPEASTERIDAE L. Agassiz, 1835
Gènere	CLYPEASTER Lamarck, 1801

Clypeaster aichinoi Checchia-Rispoli, 1925

Material

Un exemplar complet i ben conservat, parcialment inclòs en la roca matriu, procedent de la cova dets Ases (Felanitx, Mallorca), amb número de registre MNIB-SHNB-104 (Figura 6).

Localització topogràfica

Al rost sotaiguat del final del sector d'en Ramón, a la zona NW.

Descripció

En l'exemplar estudiat, la longitud màxima antero-posterior (143,4 mm) és major que la longitud màxima transversal (137,9 mm). L'alçada màxima és de 52,6 mm. Vist per la cara aboral, mostra un contorn subpentagonal molt arrodonit i poc sinuós. Els pètals són poc prominents i estan oberts en l'extrem distal. En sentit longitudinal formen un arc molt suau, mentre que en sentit transversal són pràcticament plans. Les zones poríferes es troben lleugerament enfonsades. Vista lateralment, la cara aboral mostra un perfil pràcticament semicircular, amb la zona de l'àpex lleugerament més cònic. El periprocte es troba lleugerament desplaçat cap a la meitat posterior. En l'exemplar només és possible observar una petita zona marginal de la superfície adoral situada a l'alçada de la zona interambulacral 3. Aquí, la superfície adoral és plana i forma, en relació a la superfície aboral, un angle de 55º.

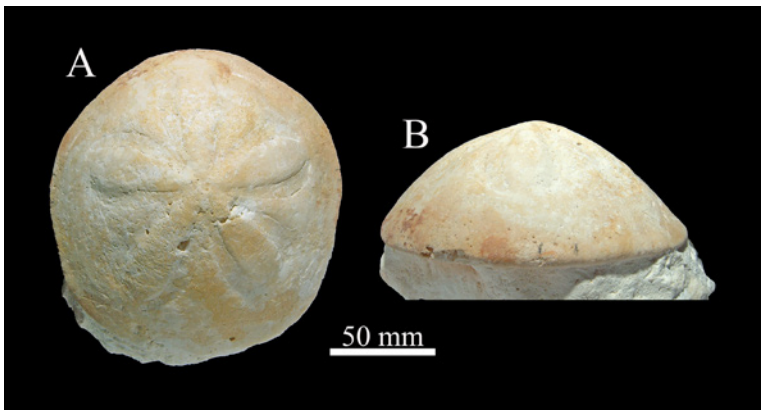


Figura 6: *Clypeaster aichinoi* en vista aboral (A) i lateral (B) (Foto: J. Quintana).
Figure 6: *Clypeaster aichinoi* in aboral (A) and lateral (B) views (Photo: J. Quintana).

Taxon	Font	n	Màx.-mín.	Mitjana	SD
Longitud (mm)					
E. (E.) hoffmanni	Checchia-Rispoli (1907)	11	96-69	84,5	7,6
E. (E.) hoffmanni	Dades pròpies	1	-	94	-
E. (E.) algirus	Pomel (1887)	1	-	84	-
E. (E.) algirus	Dades pròpies	1	-	95,1	-
E. (E.) hemisphaerica	Pereira (2010)	15	115-58	92	16,7
E. (E.) hemisphaerica	Dades pròpies	3	106,2-93,7	101,7	6,9
Amplada (mm)					
E. (E.) hoffmanni	Checchia-Rispoli (1907)	11	91-67	82,6	7,6
E. (E.) hoffmanni	Dades pròpies	1	-	89,7	-
E. (E.) algirus	Pomel (1887)	1	-	82	-
E. (E.) algirus	Dades pròpies	1	-	82,9	-
E. (E.) hemisphaerica	Pereira (2010)	13	105-55	87,9	16,7
E. (E.) hemisphaerica	Dades pròpies	3	102,1-91,3	97,3	5,5
Alçada (mm)					
E. (E.) hoffmanni	Checchia-Rispoli (1907)	11	43-30	37,4	4,2
E. (E.) hoffmanni	Dades pròpies	1	-	40,1	-
E. (E.) algirus	Pomel (1887)	1	-	30	-
E. (E.) algirus	Dades pròpies	1	-	29,6	-
E. (E.) hemisphaerica	Pereira (2010)	12	43,3-27,2	37,8	5,6
E. (E.) hemisphaerica	Dades pròpies	3	47,4-40,1	44,7	4,0

Taula 1: Mides de *Echinolampas* spp. de Mallorca comparades amb les d'altres localitats a partir de diferents fonts bibliogràfiques. n: número d'individus; SD: desviació estàndard.
Table 1: Sizes of *Echinolampas* spp. of Mallorca compared with those of other localities based on different bibliographic sources. n: number of individuals; SD: standard deviation.

Comentaris

C. aichinoi es caracteritza per una closca amb forma de barret, amb la base amb un perfil subpentagonal molt arrodonit i molt poc sinuós. En estar parcialment inclòs en la roca matriu no s'han pogut observar les característiques de la superfície adoral, el periprocte i el peristoma. En termes generals, es pot dir que les proporcions de l'exemplar estudiat són coincidents amb els exemplars descrits per CHECCHIA-RISPOLI (1907) i BAJO CAMPOS (2002). *C. aichinoi* va ser originalment descrit en els sediments tortonians de Belcastro (Calabria, Itàlia), mentre que la citació de BAJO CAMPOS (2002) correspon al tortonià de Sevilla. Aquesta és la primera citació de *C. aichinoi* en el miocè de les Illes Balears.

Conclusions

Per les seves especials característiques, les coves inundades de Mallorca representen un ambient pràcticament inaccessible i per tant, lliure d'influencies antròpiques, raó per la qual s'ha mantingut pràcticament inalterada la seva riquesa paleontològica. En aquest context, el principal agent erosiu és la corrosió diferencial, gracies a la qual s'han pogut recuperar i estudiar quatre especies de bogamarins irregulars del miocè superior: *E. (E.) hoffmanni*, *E. (E.) algirus*, *E. (E.) hemisphaerica* i *C. aichinoi*. Els fòssils procedeixen de la cova dets Ases (Felanitx), excepte *E. (E.) algirus* que ha estat trobat a la cova des Serral (Manacor). Els exemplars s'han recuperat entre els 20 i els 30 m per davall la superfície exterior i a uns 2 a 8 m de fondària sota el nivell freàtic, entre blocs procedents de parets i sostres.

S'ha de remarcar que el descobriment de *E. (E.) hoffmanni* i *E. (E.) algirus*, constitueix el primer registre en el miocè de la conca Mediterrània, ja que fins ara es consideraven com a dues espècies pliocèniques. L'espècie *C. aichinoi* suposa la primera citació en el miocè superior de les illes Balears.

Agraïments

Dedicam aquest treball al Dr. Àngel Ginés, gran espeleòleg i carstòleg, pilar fonamental de l'espeleologia científica de les Balears.

Els autors volen expressar el més sincer agraïment a les següents persones i institucions, sense les quals no hauria estat possible la realització d'aquest treball. En Guillem X. Pons i Buades (Universitat de les Illes Balears) i el *Servei de Documentació i Préstec Interbibliotecari* de la UIB, per l'enviament de referències bibliogràfiques relacionades amb els equínids miocens de la conca mediterrània. En Guillem Pons i na Muns Anglada (Museu de Menorca, Maó) van fer arribar alguns dels equínids de Mallorca a un dels autors (JQ).

També volem agrair a Miquel Àngel Perelló per la troballa d'alguns dels exemplars estudiats.

El present treball forma part del projecte finançat per la Agencia Estatal de Investigación (AEI), amb el número PID2020-112720GB-I00/.

Bibliografia

BAJO CAMPOS, I. (2002): El género Clypeaster (Echinoidea, Clypeasteroida) en el Mioceno superior de Villanueva del Río y Minas (Sevilla, SO de España). *Revista Española de Paleontologia*, 17 (2): 177-188.

BARBER, M. (1996): *Un mahonés ejemplar del siglo XIX. Biografia del Rdo. D. Francisco Cardona y Orfila, Pbro*. Tomo II: apéndices. Ediciones Nura, Menorca. 201 pp.

BERMEJO, J.; MATEU, T.; LÓPEZ, B.; MINGUILLÓN, R.; HERRÁEZ, G. & VILLAR, A. (2014): Cova de sa Balma des Quartó (Manacor, Mallorca). *Endins*, 36: 59-64.

CHECCHIA-RISPOLI, G. (1907): Gli echinidi viventi e fòssil della Sicilia. Parte seconda. Gli echinidi del piano siciliano dei dintorni di Palermo. *Palaeontographia Italica,* 13: 200-231.

GINÉS, A. (2000a): Patterns of collapse chambers in the endokarst of Mallorca (Balearic Islands, Spain). *Acta Carsologica*, 29 (2): 139-148.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1992): Las Coves del Drac (Manacor, Mallorca). Apuntes históricos y espeleogenéticos. *Endins*, 17-18: 5-20.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (2007): Eogenetic karst, glacioeustatic cave pools and anchialine environments on Mallorca Island: a discussion of coastal speleogenesis. *International Journal of Speleology*, 36 (2): 57-67.

GINÉS, J. (2000b): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesi Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 595 pp + 29 làms. Inèdita.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009): Proposta d'una nova classificació morfogenètica de les cavitats càrstiques de l'illa de Mallorca. *Endins*, 33: 5-18.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (2011): Classificació morfogenètica de les cavitats càrstiques de les Illes Balears. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 17: 85-102.
GRÀCIA, F. (2015): *Les cavitats subaquàtiques de les zones costaneres del Llevant i Migjorn de Mallorca*. Tesi Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 984 pàgs. Inèdit.
GRÀCIA, F.; CLAMOR, B. & LAVERGNE, J.J. (2000): Les coves de cala Varques (Manacor, Mallorca). *Endins*, 23: 41-57.
GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; JAUME, D.; FORNÓS, J.J.; URIZ, M.J.; MARTÍN, D.; GIL, J.; GRACIA, P.; FEBRER, M. & PONS, G. (2005): La Cova des Coll (Felanitx, Mallorca): Espeleogènesi, geomorfologia, hidrologia, sedimentologia, fauna i conservació. *Endins*, 27: 141-186.
GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; FORNÓS, J.J.; JAUME, D. & FEBRER, M. (2006): El sistema Pirata-Pont-Piqueta (Manacor, Mallorca): Geomorfologia, espeleogènesi, hidrologia, sedimentologia i fauna. *Endins*, 29: 25-64.
GRÀCIA, F.; GINARD, A.; VICENS, D. & GINÉS, J. (2009): Recull de les cavitats de major recorregut i major fondària de les Balears. *Endins*, 33: 139-152.
GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; GAMUNDÍ, P.; CIRER, A.; FERNÁNDEZ, J.F.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; URIZ, M. J.; MUNAR, S.; VICENS, D.; GINARD, A.; BETTON, N.; VIVES, M. A.; JAUME, D.; MAS, G.; PERELLÓ, M.A.; CARDONA, F. & TIMAR-GABOR, A. (2014): Es Dolç (Colònia de Sant Jordi, ses Salines, Mallorca): cavitat litoral amb influències hipogèniques a les eolianites quaternàries i materials del Pliocè. *Endins*, 36: 69-96.
GRÀCIA, F.; MASCARÓ, G.; PÉREZ, J.; FERNÁNDEZ, J.F; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; ANSALDI, D.; CLAMOR, B.; PERELLÓ, M. A.; VIVES, M. A.; GAMUNDÍ, P.; GRANELL, A.; BETTON, N.; BORNEMANN, D. & FRANGLEN, N. (2018): El Drac subaquàtic (Coves del Drac, Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 117-139.
GRÀCIA, F.; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; FERNÁNDEZ, J.F.; CLAMOR, B.; MASCARÓ, G.; ENSEÑAT, J.J.; FORNÓS, J.J. & PÉREZ, J. (2019): Sistema Pirata-Pont-Piqueta (Manacor, Mallorca): estat de la qüestió. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 2: 69-101.
HERMITE, H. (1879): *Études géologiques sur les iles Baléares. Première partie: Majorque et Minorque.* 362 pp. + 5pls. Paris.
LACHKHEM, H. & ROMAN, J. (1995): Les échinoïdes irréguliers (Néognathostomes et Spatangoïdes) du Messinien de Melilla (Maroc septentrional). *Annales de Paléontologie*, 81 (4): 247-278.
LÓPEZ, J. & SILLERO, C. (2005): *Equínidos fósiles de la provincia de Alicante*. Memorias del Museo Paleontologico de Elche (MUPE). 254 pp.
MAJCEN, T.; MIKUZ, V. & POHAR, V. (1997): Okamine v Paleontoloski zbirki Laskega Muzeja. *Geoloski Zbornik*, 13: 104-118.
MERINO, A. (2023): *La natura amagada. La Cova des Pas de Vallgornera*. Editat per l'autor - Societat Espeleològica Balear. 160 pàgs. Palma.
MERINO, A.; MULET, A.; MULET, G.; CROIX, A. & GRÀCIA, F. (2007): La Cova des Pas de Vallgornera: 40 kilómetros de desarrollo topografiado (Llucmajor, Mallorca). *Endins*, 31: 101-110.
MITROVIC-PETROVIC, J. (1969): Les échinides miocènes du Miocène moyen dans la Bosnie septentrionale (La vallée de la Save en Bosnie). *Acta geologica,* 6: 1123-148.
OBRADOR, A. (1972-1973): *Estudio estratigráfico y sedimentológico de los materiales miocénicos de la isla de Menorca*. Talleres Gráficos Coll (Mahón, Menorca). 183 pp.
PEREIRA, P. (2010): Echinoidea from the Neogene of Portugal mainland. *Palaeontos*, 18: 1-154.
QUINTANA, J. (2022): Adiciones a la fauna equinológica del Mioceno superior de Menorca. (Illes Balears, Mediterráneo occidental). Familias Echinolampadidae y Pliolampadidae. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 65: 117-130.
ROMAN, J. (1965): *Morphologie et évolution des echinolampas (echinides cassiduloïdes)*. Thèses présentées a la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, série A, nº4398. Paris.
SANTOLAYA, J.M. & SILLERO, C. (1995): Guía ilustrada de los equinioideos fósiles de la provincia de Alicante (III). *Cidaris*, 4: 4-48.
SAURA-VILLAR, M. & GARCÍA-VIVES, J.A. (2014): *Nomochirus 5. Neognathostomata II, Cassiduloida, Echinolampadoida*. Asociación Paleontológica y Mineralógica de Onda. 327 pp.
WRIGHT, T. & ADAMS, A.L. (1864): On the fossil echinidae of Malta with additional notes on the Miocene beds of the island, and the stratigraphical distribution of the species therein. *Proceedings of the Geological Society. Postponed Papers*: 470-491.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Algunes dades sobre els gasos de l'atmosfera de la Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca). Avaluació de les concentracions de CO_2 i CH_4 i les seves signatures isotòpiques

Joaquín GINÉS [1, 2], Ángel FERNÁNDEZ-CORTÉS [3], Francesc GRÀCIA [1, 2], Juan J. ENSEÑAT [1], Joan J. FORNÓS [1, 2], José M. CALAFORRA [3] i Àngel GINÉS [1, 2] (†)

[1] Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca. Email: jginesgracia@yahoo.es
[2] Grup de Recerca de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca.
[3] Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Universidad de Almería. La Cañada, Almería.

Abstract

The terrestrial passages and air chambers that are interspersed in the underwater caves of Mallorca frequently present high concentrations of CO_2, which in many cases exceed 50,000 ppm (5 %). During the years 2019 and 2020, a sampling campaign of gases in the atmosphere of Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca) and its underwater sectors was carried out, including also the neighboring Cova de ses Figueres. The CO_2 and CH_4 contents in the atmosphere of the caves have been analyzed, together with the carbon isotopic signature of both gases. The CO_2 concentrations measured in some of the chambers of Cova dets Ases are extraordinarily high, with maximum values greater than 83,000 ppm, and CH_4 concentration almost null (lower than 0.25 ppm). Both gases do not show a seasonal pattern due to the almost fully restricted ventilation of some of the air chambers. The atmospheric dynamics of the investigated caves are outlined, taking the opportunity to carry out a detailed discussion on the origin of the very high levels of CO_2 observed. The results obtained would show the presence of air within the vadose zone (*ground air*), which exhibits specific characteristics linked to very confined environments –high CO_2 content, with a differentiated isotopic signature–, and whose source is relatively disconnected from the epikarst and its edaphic horizon. In addition, there are some evidences on the likely onsite production of CH_4 and its coeval and intense consumption in some air chambers and sectors above the coastal water table.

Resumen

Las galerías terrestres y cámaras de aire que se encuentran intercaladas en las cavidades subacuáticas de Mallorca presentan con frecuencia concentraciones elevadas de CO_2, que en bastantes casos superan los 50.000 ppm (5 %). Durante los años 2019 y 2020 se ha efectuado una campaña de muestreo de los gases de la atmósfera de la Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca) y sus sectores subacuáticos, así como de la vecina Cova de ses Figueres. Se han analizado los contenidos de CO_2 y CH_4 de la atmósfera de las cavidades, así como la señal isotópica del carbono de ambos gases. Las concentraciones de CO_2 medidas en algunas de las salas de la Cova dets Ases son extraordinariamente elevadas, con valores máximos superiores a los 83.000 ppm, y concentraciones de CH_4 casi nulas (inferiores a 0,25 ppm). Ambos gases no muestran un comportamiento estacional debido a la casi nula ventilación de algunas de las cámaras de aire. Se esboza la dinámica atmosférica de las cavidades investigadas, aprovechando para efectuar una discusión detallada sobre el origen de las altas concentraciones de CO_2 observadas. Los resultados obtenidos evidenciarían la presencia de un *aire de la zona vadosa* (*ground air*), que muestra unas características específicas ligadas a ambientes muy confinados –elevado contenido de CO_2, con una diferenciada señal isotópica–, y cuyo origen se encuentra relativamente desconectado del epikarst y su horizonte edáfico. Asimismo, hay alguna evidencia sobre la posible producción *in situ* de CH_4 y su simultáneo e intenso consumo en algunas cámaras de aire y sectores situados por encima del nivel freático costero.

Ginés, J.; Fernández-Cortés, Á.;, Gràcia, F.; Enseñat, J.A.; Fornós, J.J.; Calaforra, J.M. i Ginés, À. (2024): Algunes dades sobre els gasos de l'atmosfera de la Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca). Avaluació de les concentracions de CO_2 i CH_4 i les seves signatures isotòpiques. Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 135-150. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 29 agost 2024; **Revisat:** 5 setembre 2024; **Acceptat:** 10 setembre 2024.
Publicat online: 5 novembre 2024.

Introducció

La presència d'aire enrarit a algunes coves de Mallorca és una circumstància que es dona amb relativa freqüència i que ja fou assenyalada de forma primerenca en algunes publicacions que es remunten al segle XIX, referides a la Cova Nova de Son Lluís, del municipi de Porreres (BOVER, 1839; PUIG y LARRAZ, 1896). Dins d'aquest context, MARTEL (1903) es feu ressò del caràcter

(†) Aquestes investigacions foren promogudes per Àngel Ginés, qui participà en els mostrejos i la posterior interpretació dels resultats. El seu traspàs el gener de 2024 impedí la seva participació activa en la redacció final del present treball.

(†) These investigations were promoted by Àngel Ginés, who was involved in the sampling campaign and the subsequent interpretation of the results. His decease in January 2024 prevented an active participation in writing this paper.

irrespirable de l'aire d'aquesta cova, que atribuí a una concentració elevada de l'*acide carbonique* [sic]; alguns anys després, JOLY (1929) fa una nova exploració de la cavitat i qüestiona la presència de *gaz carbonique*, malgrat que reconeix la manca d'oxigen en alguns indrets de la cova, on no funcionen bé els encenedors de benzina.

Les primeres observacions fiables sobre concentracions elevades de CO_2 en cavitats mallorquines corresponen a l'Avenc de Fangar, que es localitza al municipi de Campanet (ASTIER & VILÁ, 1967; ESCOLÀ, 1970). No obstant això, les mesures i investigacions sistemàtiques sobre la matèria se centraren en la Cova de les Rodes (Pollença), localitat on es mesuraren concentracions de CO_2 superiors a 40.000 ppm (MESTRE, 1980), observant-se un marcat comportament cíclic estacional amb valors molt elevats durant l'estiu i bona part de la tardor, que arribaren fins a 49.000 ppm (GINÉS et al., 1987). Cal recordar que la concentració mitjana de CO_2 a l'atmosfera se situa actualment a l'entorn de 420 ppm.

Amb la gran eclosió de les exploracions espeleològiques a l'illa, al llarg de la segona meitat del segle XX, es constatà que la presència de CO_2 al medi subterrani illenc era un fenomen força habitual, tal i com assenyalaren posteriorment ENCINAS & HELBLING (2011) que remarcaven el caràcter estacional estival de les màximes concentracions mesurades. En aquest sentit, no resulta exagerat afirmar que un percentatge significatiu de les cavitats mallorquines –que podria superar el 5 %, si s'exclouen les balmes i petites cavitats molt superficials– presenten concentracions elevades de CO_2 susceptibles d'afectar negativament les exploracions espeleològiques, arribant a fer-les fins i tot perilloses.

Les investigacions més recents s'han enfocat cap a l'estudi exhaustiu dels cicles anuals observables a la Cova de sa Font (o Cova des Moro) de l'illa de Sa Dragonera, on s'assoleixen concentracions màximes estivals que superen 70.000 ppm de CO_2 (GINÉS et al., 2017, 2022a, 2022b). Aquestes recerques recents s'han basat en l'anàlisi en el laboratori de mostres d'aire d'aquesta cavitat, per tal d'avaluar les concentracions d'alguns gasos de l'atmosfera de la cova (CO_2 i CH_4) i les seves signatures isotòpiques. Cal deixar constància que la major part del que es coneix sobre aquest tema a les nostres illes s'ha treballat en dues cavitats concretes: la Cova de les Rodes (Mallorca) i la Cova de sa Font (Sa Dragonera). Malgrat això, s'han recollit nombroses mesures esporàdiques de CO_2 a moltes altres coves mallorquines (ENCINAS & HELBLING, 2011; ENCINAS, 2014; MULET & RODRÍGUEZ-HOMAR, 2014), com són per exemple la Cova de sa Bassa Blanca, d'Alcúdia, o les nombroses mesures dutes a terme a la Cova Nova de Son Lluís, de Porreres (GINÉS & GINÉS, 2006, 2022), en la qual s'han registrat concentracions de CO_2 superiors a 50.000 ppm amb independència de l'estació de l'any.

El present treball s'ha centrat en la investigació dels gasos de l'atmosfera d'un complex de cavitats subterrànies de la regió càrstica del Migjorn de Mallorca, la qual abasta les zones costaneres del sud i llevant de l'illa (GINÉS & GINÉS, 1989; SERVERA, 1995). El context geològic d'aquesta regió càrstica correspon a una plataforma escullosa litoral del tortonià-messinià, posterior per tant a l'estructuració de l'illa durant el miocè mitjà. Es tracta d'un context prou diferenciat respecte dels ambients on se situen les altres cavitats amb altes concentracions de CO_2 investigades anteriorment com són, per exemple, la Cova de les Rodes o la Cova de sa Font, de l'illa de Sa Dragonera, desenvolupades en dipòsits calcaris estructurats d'edat juràssica. La pretensió d'aquestes pàgines és contribuir a caracteritzar l'atmosfera d'aquests ambients càrstics litorals, valorant el seu enquadrament dins del concepte de *ground air* –aire de la zona vadosa, relativament desvinculat de l'horitzó edàfic– tal i com plantejaren ATKINSON (1977) i MATTEY et al. (2016).

La presència de CO_2 en els sistemes subaquàtics de l'illa

La gran expansió experimentada per les activitats d'espeleobusseig a Mallorca, des dels anys 90 del segle passat, ha convertit les cavitats subaquàtiques del litoral de l'illa en una part substancial del seu patrimoni espeleològic (GRÀCIA et al., 2011). Les exploracions més recents han permès comprovar que l'existència de cambres d'aire –intercalades en les zones submergides de les coves litorals (Figura 1)– suposa sovint problemes respiratoris deguts a concentracions elevades de CO_2 i baixes concentracions d'O_2 (per reemplaçament de gasos).

Algunes publicacions aparegudes els darrers anys, on es descriuen els resultats de les investigacions subaquàtiques en cavitats litorals del municipi de Manacor, han contribuït a documentar els valors de CO_2 de l'atmosfera de les sales i galeries aèries que es localitzen dins d'aquests sistemes subterranis majoritàriament submergits. Per exemple, els mesuraments realitzats als sistemes Gleda-Camp des Pou i Pirata-Pont-Piqueta (GRÀCIA et al., 2019, 2020) permeten situar les concentracions habituals d'aquest gas als passatges terrestres a l'entorn de 2.000 ppm, però amb l'existència d'algunes sales on s'assoleixen valors per sobre de 15.000 ppm

Figura 1: Els sectors subaquàtics de la Cova dets Ases presenten cambres d'aire i galeries terrestres intercalades entre extensos passatges totalment submergits (Foto: M.A. Perelló).
Figure 1: The underwater sectors of Cova dets Ases present air-filled chambers and terrestrial galleries interspersed between completely submerged extensive passages (Photo: M.A. Perelló).

de CO_2 (Taula 1). De fet, al manco a quatre sales aèries del sistema Pirata-Pont-Piqueta s'han mesurat concentracions superiors als 25.000 ppm, amb uns valors màxims estivals de 52.000 ppm a la *sala dels Tres Miracles* (GRÀCIA et al., 2019). Valors fins i tot més elevats han estat documentats a la *sala de la Bella Mort* de les Coves del Drac, en la qual el mes d'abril de 2014 es mesurà una concentració de CO_2 de 58.000 ppm (GRÀCIA et al., 2018). En tots aquests casos sembla observar-se un patró estacional que assoleix uns màxims estivals, encara que no són dramàticament superiors al valors hivernals mesurats (Taula 1).

Cal fer referència ara a les observacions sobre aquesta matèria recopilades als treballs de camp desenvolupats per MULET & RODRÍGUEZ-HOMAR (2014). Entre d'altres dades sobre el CO_2 en cavitats de l'illa, els autors citats remarquen els valors extremadament elevats que es mesuraren a la *sala de na Malen* de la Cova dets Ases, del municipi de Felanitx. En aquesta cambra d'aire, existent dins dels sectors subaquàtics de la cova, es registrà un contingut de CO_2 molt elevat que arribà fins a 99.500 ppm (MULET & RODRÍGUEZ-HOMAR, 2014); val a dir que aquest valor es podria considerar tal vegada una mica exagerat degut a les limitacions tècniques de l'aparell de mesura emprat (*SenseAir CO_2 Alarm*, amb un rang de mesura que arriba fins a 100.000 ppm, però amb molt baixa precisió per damunt de 50.000 ppm). La represa de les exploracions subaquàtiques a la Cova dets Ases, al llarg de l'any 2019, permeté emprendre algunes investigacions sobre els gasos de la seva atmosfera. Es tractava de quantificar de manera fiable les elevades concentracions de CO_2 existents a alguns sectors de la cavitat, al mateix temps que es complementaven les dades que s'havien començat a reunir sobre l'atmosfera dels sistemes subterranis de la regió càrstica del Migjorn de l'illa de Mallorca.

Les cavitats investigades

La Cova dets Ases és sens dubte la cavitat amb més anomenada del municipi de Felanitx, la qual es localitza cap al nord del paratge conegut com s'Algar (Figura 2), a les rodalies del nucli de població de Portocolom situat a la costa oriental de Mallorca. La cova apareix descrita i topografiada a GRÀCIA et al. (1997), amb un desenvolupament conegut aleshores de 625 m; el sector clàssic de la cavitat presenta dos accessos terrestres, localitzats a una alçada propera als 20 m, així com una entrada submarina oberta en la mateixa línea de costa (Figura 3). L'any 2014 es descobrí un nou sector terrestre en la part més occidental de la cova, conegut com a *sector d'en Ramon* (MULET &

LOCALITAT	MUNICIPI	SALA O GALERIA	CO_2 (ppm)		BIBLIOGRAFIA
			hivern	estiu	
Sistema Gleda-Camp des Pou	Manacor	Sala dels Templers	15.000	18.000	Gràcia et al. (2020)
		Sala del Tub	16.000	19.000	
		Sala dels Homes Vells	20.000	25.000	
Sistema Pirata-Pont-Piqueta	Manacor	Sala de la Terra Incògnita	28.000	—	Gràcia et al. (2019)
		Sala de l'Honor	28.000	—	
		Galeria dels Titans	36.000	—	
		Sala dels Tres Miracles	42.000	52.000	
Coves del Drac	Manacor	Sala de la Bella Mort	58.000		Gràcia et al. (2018)
Cova dets Ases	Felanitx	Sala de na Malen	—	99.500	Mulet & Rodríguez (2014)

Taula 1: Concentracions de CO_2 mesurades a cambres d'aire i galeries terrestres intercalades entre les galeries subaquàtiques de coves litorals de Mallorca.
Table 1: CO_2 concentrations measured in air chambers and terrestrial galleries interspersed between the underwater sectors of coastal caves in Mallorca.

RODRÍGUEZ-HOMAR, 2014; BERMEJO, 2020), el qual permet accedir a un extens dèdal de passatges subaquàtics que es troba encara en procés d'exploració; el recorregut actual de la cavitat se situa en torn als 4.000 m, dels quals uns 2.900 m corresponen a galeries submergides. Alguns aspectes rellevants des dels punts de vista morfogenètic i sedimentològic han estat tractats a ENTRENA et al. (2022).

Les investigacions també han involucrat la Cova de ses Figueres (GRÀCIA et al., 1997), petita cavitat que es troba situada per sobre de la trajectòria d'algunes de les galeries subaquàtiques recentment explorades (Figures 3 i 4). Es tracta d'una petita sala d'esfondrament que s'obre ben a prop de les entrades terrestres de la Cova dets Ases, però sense arribar a connectar amb els passatges submergits subjacents.

Ambdues coves es troben excavades en els materials carbonàtics del miocè superior (tortonià-messinià), corresponents a la plataforma litoral postorogènica que voreja les elevacions mesozoiques plegades de les Serres de Llevant. El sistema subterrani de la Cova dets Ases, ben igual que altres sistemes del municipi de Manacor (Coves del Drac, sistema Pirata-Pont-Piqueta, sistema Gleda-Camp des Pou), són exemples representatius de l'endocarstificació litoral en la regió del Migjorn de Mallorca (GINÉS & GINÉS, 1989, 2009). En aquest sentit, les informacions procedents d'aquest conjunt de cavitats del llevant de Mallorca podran aportar dades rellevants sobre l'atmosfera de la zona vadosa dins aquesta plataforma càrstica costanera.

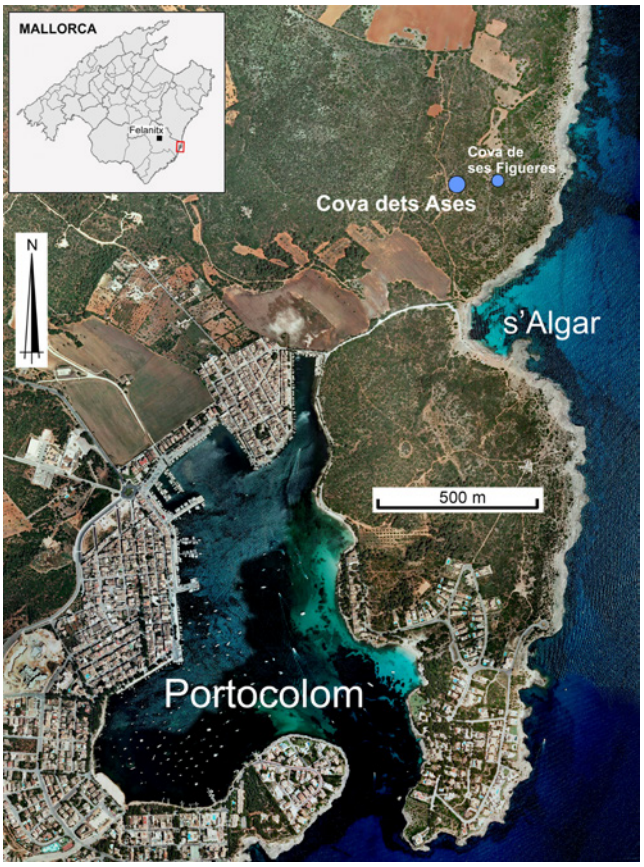


Figura 2: Situació de les cavitats estudiades (ortofotografia PNOA 2008).
Figure 2: Location of the investigated caves (orthophoto PNOA 2008).

Metodologia aplicada

L'estratègia plantejada per a la present recerca consistí en el mostreig dels gasos atmosfèrics a diferents punts de la cova mitjançant la recol·lecció de l'aire subterrani en bosses tipus *Ritter* d'1 L (Figura 5), que eren omplertes a pressió atmosfèrica amb una petita bomba-compressor d'aire d'1,8 L/min accionada amb bateries. En total s'escolliren 8 estacions de mostreig a la Cova dets Ases, situades 4 d'elles a les sales i galeries terrestres de la cavitat, mentre que altres 4 corresponien al mostreig efectuat en sales i cambres d'aire intercalades dins de les extensions subaquàtiques: *sala de na Malen*, *sala Joan Montfort*, *sala dels Bogamarins* i *cambra de ses Figueres* (Figures 3 i 4); aquesta darrera cambra d'aire se situa en la vertical de la Cova de ses Figueres −malgrat que no existeix connexió física entre ambdues cavitats−, que també va ser mostrejada. Es recol·lectaren al mateix temps mostres d'aire exterior així com de l'aire contingut a l'horitzó edàfic per sobre de les sales mostrejades. Per al mostreig de l'aire edàfic se seleccionaren diversos indrets amb una potència significativa de sòl, situats en la vertical de les principals cambres d'aire. En aquests punts s'utilitzà una petita bomba de diafragma amb un cabal de 3,1 L/min, alimentada per una bateria i connectada a un tub metàlic de petit diàmetre (1 cm) amb orificis en un dels extrems, que es va insertar en el sòl una fondària de 14 cm o 31 cm en funció de la potència de l'horitzó edàfic en cada localització.

Durant les tasques de camp, els espeleobussejadors utilitzaren un dispositiu mesurador de CO_2 de la firma *CO2Meter*, amb un rang de mesura fins a 50.000 ppm, sobretot per motius de seguretat en treballar a les cambres d'aire que es troben intercalades entre les galeries subaquàtiques (Figura 5). Aquestes observacions de caràcter puntual, es complementaren amb algunes mesures de temperatura i humitat relativa de l'aire, així com d'O_2 en alguns casos.

Las tasques de mostreig es realitzaren entre els mesos de desembre de 2019 i febrer de 2020, campanya en la qual es recolliren 13 mostres (bosses *Ritter*) d'aire de la cavitat, a més de 4 mostres d'aire exterior, així com altres 5 mostres procedents de l'horitzó edàfic (Taula 2). Aquesta primera

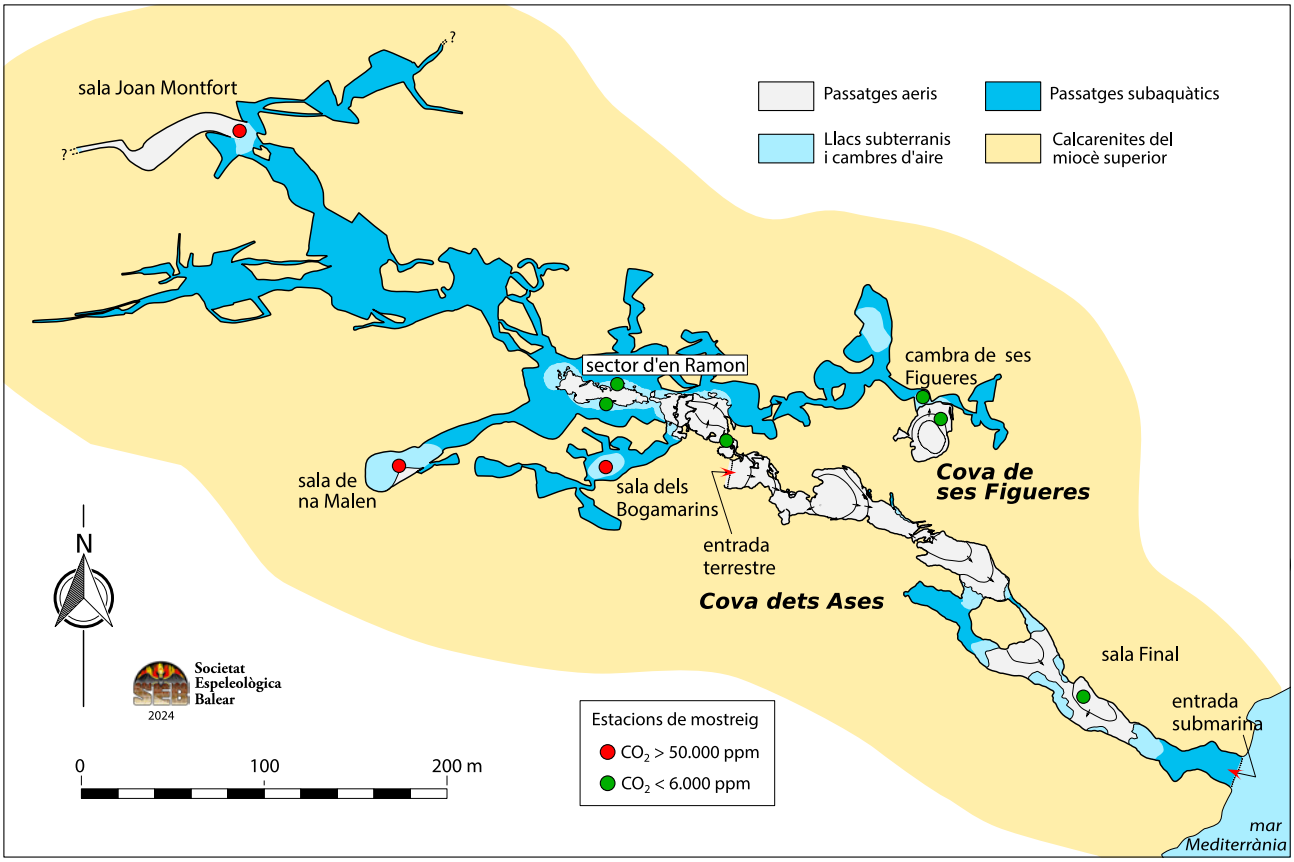


Figura 3: Topografia simplificada de les cavitats estudiades amb indicació de les estacions on s'ha mostrejat l'atmosfera subterrània (Font: Societat Espeleològica Balear).
Figure 3: Simplified planimetry of the studied caves including the location of air sampling stations (Source: Societat Espeleològica Balear).

campanya de presa de mostres es complementà amb un mostreig addicional estival, realitzat en agost de 2020, on es recolliren 4 bosses procedents de la *sala de na Malen* i *sala Joan Montfort* de la Cova dets Ases, que eren dos indrets que presentaven concentracions de CO_2 molt elevades; aquest mostreig estival tenia per objectiu avaluar el possible grau d'estacionalitat dels valors mesurats.

Les bosses d'aire foren analitzades al *Laboratorio de Isótopos Estables* de la *Universidad de Almería*, dins les 48 hores subsegüents a cada mostreig. Es realitzà la medició acurada dels continguts de CO_2 i CH_4 de les

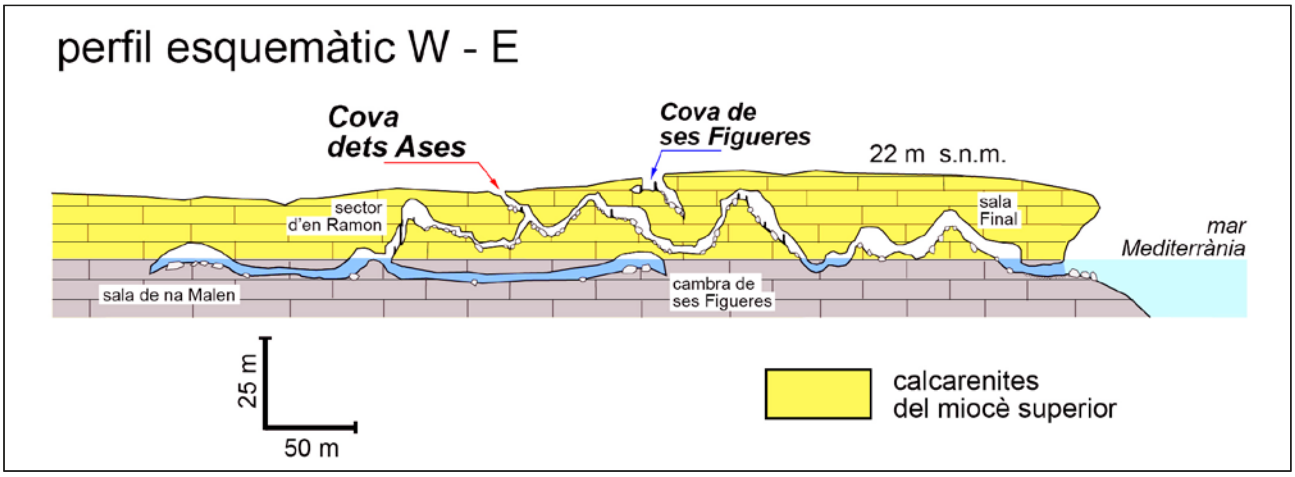


Figura 4: Perfil esquemàtic parcial del sistema subterrani, representat amb la dimensió vertical exagerada (Font: GRÀCIA et al., 1997, modificat).
Figure 4: Partial schematic profile of the underground system, represented with its vertical dimension exaggerated (Source: GRÀCIA et al., 1997, modified).

mostres d'aire recol·lectades, així com la determinació de la composició isotòpica del carboni d'ambdós gasos. Les fraccions molars del CO_2 ($^{12}CO_2$ i $^{13}CO_2$) i la seva signatura isotòpica ($\delta^{13}C$) foren mesurades amb un analitzador *Cavity Ring-Down Spectroscopy Analyser* (CRDS) PICARRO G2201-i (CROSSON, 2008). Les composicions isotòpiques estables d'ambdós gasos (CO_2 i CH_4) s'expressaren com $\delta^{13}C$ (‰) en relació a l'estàndard *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB). S'utilitzaren tres patrons interns amb mescles certificades de CO_2 i de CH_4 per al calibratge de les mesures, així com patrons interns de $\delta^{13}C$-CO_2 (CO_2 obtingut per combustió en sistema CM-CRDS) i de $\delta^{13}C$-CH_4 (cilindres de CH_4 amb $\delta^{13}C$ analitzat per CF-IRMS a IMAU, Utrecht).

Figura 5: Equipament utilitzat pels mostrejos d'aire i les mesures de camp. a) Bosses tipus *Ritter* i bomba-compressor per omplir-les. b) Termòmetre digital i mesurador de la firma *CO2meter*, amb un rang de mesura fins a 50.000 ppm. c) Els mostrejos amb concentracions de CO_2 superiors a 50.000 ppm han fet necessari l'ús d'equips autònoms de respiració, fins i tot fora de l'aigua.
Figure 5: Equipment used for air sampling and field measurements. a) *Ritter*-type bags and pump-compressor to fill them. b) Digital thermometer and *CO2meter* device, which its measurement range reaches 50,000 ppm. c) Sampling with CO_2 concentrations greater than 50,000 ppm have required the use of breathing equipment, even in air-filled passages.

Resultats i discussió

Els resultats obtinguts són força diferents segons es tracti de sectors de la cavitat amb un grau de ventilació relativament important –com són, per exemple, les galeries terrestres de la Cova dets Ases– o cambres d'aire aïllades dins de l'entramat de galeries subaquàtiques de la cova (Figura 3). Aquest fet resulta també evident en els mostrejos portats a terme a la Cova de ses Figueres i a la *cambra de ses Figueres* de la Cova dets Ases, on els resultats analítics són bastant propers als de l'atmosfera exterior en tractar-se d'ambients subterranis força ventilats.

Les concentracions de CO_2

Tal com s'ha esmentat abans, la Cova de ses Figueres és una petita cavitat amb una àmplia comunicació amb la superfície, motiu pel qual les concentracions de CO_2 són molt properes a les de l'atmosfera exterior, amb uns valors màxims registrats de 586 ppm (Taula 2). L'existència d'aquesta cova té una clara repercussió en els baixos valors que es donen a la *cambra de ses Figueres* de la Cova dets Ases (Figures 3, 4 i 6), on s'assoleixen concentracions que no arriben als 900 ppm per mor de l'eficient ventilació que sens dubte existeix en aquest sector del sistema subterrani.

En línies generals les sales i galeries terrestres de la Cova dets Ases presenten una atmosfera amb un caràcter més clarament subterrani i restringit, atès que les concentracions de CO_2 se situen en valors màxims de 1.593 ppm en la *sala Final* del sector antic de la cova, arribant fins a 5.722 ppm en la sala principal del que es coneix com a *sector d'en Ramon* (Figura 3; Taula 2); es tracta, com ja s'ha esmentat, de mesures corresponents a l'hivern de 2019-2020. Dins de les galeries terrestres, els valors més baixos enregistrats (985 ppm) corresponen a la gatera que comunica la zona d'entrada amb les sales del *sector d'en Ramon*; els intercanvis d'aire en aquesta zona de trànsit pròxima a l'entrada de la cova justificarien el baix contingut de CO_2 mesurat en aquest punt.

Per altra banda, les cambres d'aire o sales terrestres que es troben intercalades dins l'extensa xarxa de passatges subaquàtics (Figures 3 i 4) mostren un contingut atmosfèric força diferenciat. En aquest sentit, en les tres cambres d'aire mostrejades (*sala dels Bogamarins*, *sala Joan Montfort* i *sala de na Malen*) les concentracions de CO_2 corresponents a les mostres recol·lectades l'hivern de 2019-2020 assoliren valors molt elevats que se situen entre 51.514 ppm a la *sala Joan Montfort* i el màxim de 83.151 ppm registrat a la *sala de na Malen* (Taula 2). Amb la intenció d'avaluar el possible caràcter estacional del contingut de CO_2, s'efectuà un mostreig addicional l'agost de 2020 que donà concentracions una

mica més elevades a la *sala Joan Montfort* (52.742 ppm), però lleugerament més baixes a la *sala de na Malen* (79.995 ppm). En qualsevol cas, amb les dades disponibles, es pot descartar un patró estacional en la concentració de CO_2 de les cambres d'aire dels sectors submergits de la Cova dets Ases.

A tall de conclusió es pot afirmar que aquestes concentracions es poden qualificar d'extraordinàries, superant, fins i tot, els registres de localitats com la Cova de sa Font, de l'illa de Sa Dragonera (GINÉS et al., 2017, 2022a, 2022b). Els valors tan elevats en aquestes cambres d'aire s'explicarien pel seu aïllament respecte de la influència exterior, el qual dona lloc a un ambient gairebé totalment restringit: hi ha una absència gairebé total de ventilació fins i tot en els mesos d'hivern, quan els intercanvis amb l'exterior són més afavorits en aquest tipus de cavitats per mor de la major temperatura de l'atmosfera subterrània. Aquesta dinàmica atmosfèrica hivernal afectaria tan sols a les sales i galeries terrestres ben connectades amb les entrades de la cavitat o relacionades amb grans sales que tenen connexions eficients amb l'exterior; per altra banda, determinades cambres d'aire dels sectors subaquàtics romandrien com ambients confinats aliens a una possible renovació atmosfèrica durant l'hivern.

Finalment, es mesurà el contingut de CO_2 de l'atmosfera exterior, que donà concentracions entre 429 i 478 ppm, així com els valors corresponents al migrat horitzó edàfic existent a la zona (Taula 2).

Localització		Anàlisis bosses						Dades de camp			
		Data mostreig	Nom mostra	CO_2 (ppm)	$\delta^{13}C$-CO_2 (‰)	CH_4 (ppm)	$\delta^{13}C$-CH_4 (‰)	CO_2 (ppm)	O_2 (%)	Temp. (ºC)	HR (%)
Cova de ses Figueres (fons)		18/01/2020	FG 2/C	586	-13,15	1,45	-57,53	580	-	17,7	74,3
Cova de ses Figueres (fons)		18/01/2020	FG 2/D	567	-13,28	1,47	-54,97				
Cova dets Ases	cambra de ses Figueres	14/12/2019	-	-	-	-	-	890	-	-	-
	cambra de ses Figueres	15/02/2020	AS 4/F	761	-15,94	0,92	-52,08	-	-	-	-
	cambra de ses Figueres	15/02/2020	AS 4/L	785	-16,14	0,92	-57,94				
	gatera porta	01/02/2020	AS 3/A	985	-17,18	1,54	-56,58	960	-	20,4	81,2
	sala Final	18/01/2020	AS 2/A	1.504	-15,67	0,09	-	1.550	-	20,6	77,6
	sala Final	18/01/2020	AS 2/B	1.593	-16,27	0,09	-				
	sector d'en Ramon (N)	01/02/2020	AS 3/D	5.533	-20,47	0,21	-	6.350	-	22,7	91,0
	sector d'en Ramon (S)	01/02/2020	AS 3/E	5.722	-20,53	0,22	-	6.100	-	22,8	96,0
	sala dels Bogamarins	01/02/2020	AS 3/B	57.625	-22,15	0,12	-	> 50.000	-	20,0	90,0
	sala dels Bogamarins	01/02/2020	AS 3/C	57.210	-22,04	0,11	-				
	sala Joan Montfort	14/12/2019	AS 1/1	51.514	-20,20	0,20	-	-	-	-	-
	sala Joan Montfort	22/08/2020	AS 5/1	52.387	-20,61	0,11	-	-	16,2	-	-
	sala Joan Montfort	22/08/2020	AS 5/2	52.742	-20,51	0,10	-				
	sala de na Malen	14/12/2019	AS 1/2	83.151	-21,39	0,12	-	-	-	-	-
	sala de na Malen	22/08/2020	AS 5/3	79.995	-21,84	0,10	-	-	13,2	-	-
	sala de na Malen	22/08/2020	AS 5/4	79.212	-21,88	0,12	-				
Exterior	Exterior	18/01/2020	AS 2/E	429	-9,96	2,00	-55,36	460	-	18,0	60,6
	Exterior (sobre sala dels Bogamarins)	15/02/2020	AS 4/1	449	-10,60	1,95	-49,65	-	-	-	-
	Exterior (sobre sala de na Malen)	15/02/2020	AS 4/2	478	-11,44	1,95	-48,81	-	-	-	-
	Exterior (sobre sala Joan Montfort)	15/02/2020	AS 4/3	469	-10,12	1,94	-48,63	-	-	-	-
Sòl	Sòl - 14 cm (sobre sala dels Bogamarins)	15/02/2020	AS 4/G	1.822	-20,07	1,60	-50,81	-	-	-	-
	Sòl - 14 cm (sobre sala dels Bogamarins)	15/02/2020	AS 4/H	1.763	-19,96	1,61	-51,95				
	Sòl - 14 cm (sobre sala de na Malen)	15/02/2020	AS 4/I	3.579	-21,87	1,13	-53,35	-	-	-	-
	Sòl - 14 cm (sobre sala de na Malen)	15/02/2020	AS 4/J	3.520	-21,73	1,11	-50,44				
	Sòl - 31 cm (sobre sala Joan Montfort)	15/02/2020	AS 4/K	15.998	-23,96	0,49	-51,92	-	-	-	-

Taula 2: Resultats analítics i dades de camp de les mostres d'aire recol·lectades dins la Cova dets Ases (fons blau clar) i el seu entorn exterior, incloent també la veïna Cova de ses Figueres. La majoria de les mostres corresponen a l'hivern 2019-2020, mentre que unes poques –assenyalades amb fons marró clar– foren recollides durant l'estació estival (agost de 2020).
Table 2: Analytical results and field data of the air samples collected inside Cova dets Ases (light blue color) and its external environment, including also the neighboring Cova de ses Figueres. Most of the samples correspond to the winter season of 2019-2020, while a few of them –marked with a light brown background– were collected during the summer season (August 2020).

Així, es prengueren mostres de l'aire del sòl recol·lectades en la vertical de les principals cambres d'aire; els valors obtinguts oscil·laren des de 1.763 ppm per sobre de la *sala dels Bogamarins*, fins a 3.579 ppm en el cas de l'observació sobre la *sala de na Malen*, però amb un màxim (15.998 ppm) registrat per damunt de la *sala Joan Montfort* on l'horitzó edàfic tenia major potència.

La signatura isotòpica del CO_2

Aquest paràmetre presenta valors que difereixen bastant en funció del grau de ventilació que es dona a les distintes estacions de mostreig. A les sales més ventilades de la Cova dets Ases els valors de $\delta^{13}C$-CO_2 se situen entre -15,67 i -17,18 ‰, com a resultat de la mescla amb l'aire de l'exterior que presenta una signatura isotòpica de -9,96 a -11,44 ‰ (Taula 2); aquest fet és fins i tot més patent en la Cova de ses Figueres, en la qual aquest paràmetre dona valors de -13,15 i -13,28 ‰ encara més propers a la signatura del CO_2 de l'aire exterior.

A les sales terrestres més internes de la Cova dets Ases (*sector d'en Ramon*; Figura 3), on les concentracions de CO_2 són superiors a 5.000 ppm, els valors de $\delta^{13}C$-CO_2 obtinguts se situen entre -20,47 i -20,53 ‰. Una signatura isotòpica del tot semblant és la que s'ha calculat en el cas de les cambres d'aire del sector subaquàtic (Taula 2); en tots tres casos (*sala dels Bogamarins*, *sala Joan Montfort* i *sala de na Malen*) els valors de $\delta^{13}C$-CO_2 estan compresos entre -20,20 i -21,88 ‰, el que representaria la signatura isotòpica característica d'aquests ambients subterranis aïllats i intercalats entre els passatges submergits del sistema (Figura 7).

Per altra banda, cal fer referència al $\delta^{13}C$-CO_2 de l'aire contingut en l'horitzó edàfic que se situa entre -19,96 i -21,87 ‰ a una profunditat de 14 cm, amb un valor extrem de -23,96 ‰ corresponent a la vertical de la *sala Joan Montfort* indret on el sòl presenta major potència (mostra obtinguda a 31 cm de profunditat) així com una concentració de CO_2 més elevada (Taula 2). Presumiblement aquest darrer valor seria el més representatiu de l'horitzó edàfic en el context climàtic i ecològic de l'àrea estudiada, donat que està més proper als valors de referència per a fonts edàfiques d'aquest gas associades a la degradació de matèria orgànica i la respiració d'arrels en un sòl amb vegetació C3 (aproximadament -27 ‰; AMUNDSON et al., 1998), com la que predomina a l'entorn. Els valors de $\delta^{13}C$-CO_2 registrats en el sòl són superiors a aquest valor de referència, indicant que el CO_2 present en el sòl és un gas residual, resultat de la difusió gasosa cap a l'atmosfera externa, fet que afavoreix un fraccionament isotòpic degut al major moviment del $^{12}CO_2$ respecte del $^{13}CO_2$. Les condicions més seques i càlides afavoreixen aquest intercanvi de CO_2 sòl-exterior per difusió gasosa, reduint la concentració de CO_2 i augmentant el $\delta^{13}C$-CO_2 de l'aire del sòl (GARCIA-ANTÓN et al., 2017), particularment en els sols de poc espessor com els que predominen a la zona d'estudi.

Observacions sobre el CH_4

Les concentracions de CH_4 són un bon indicador del grau de confinament i presenten una relació inversa amb aquest factor, de tal manera que els continguts són molt més baixos en els ambients subterranis escassament ventilats, on la renovació amb CH_4 atmosfèric està limitada (FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2015; GINÉS et al., 2022b) i, en canvi, preval el consum del gas per l'acció oxidativa de microorganismes metanòtrofs (MARTÍN-POZAS et al., 2022). D'aquesta manera, a les sales més ben ventilades de les dues cavitats s'han mesurat

Figura 6: A la *cambra de ses Figueres* de la Cova dets Ases s'accedeix mitjançant galeries subaquàtiques que arriben sota la vertical de la veïna Cova de ses Figueres, situada devers 15 m més a dalt (veure situació en la Figura 2) (Foto: J. Pérez).
Figure 6: The chamber known as *Cambra de ses Figueres*, in Cova dets Ases cave system, is accessed through underwater galleries that reach below the vertical of the neighboring Cova de ses Figueres, located 15 m above (see location in Figure 2) (Photo: J. Pérez).

Figura 7: L'espectacular *sala de na Malen* de la Cova dets Ases es troba connectada amb el *sector d'en Ramon*, i les galeries terrestres de la cavitat, per mitjà de passatges totalment submergits. Presenta unes concentracions de CO_2 extraordinàries que poden superar els 83.000 ppm (Foto: M.A. Perelló).
Figure 7: The spectacular chamber named *Sala de na Malen*, within Cova dets Ases, is connected to the *Sector d'en Ramon* and the terrestrial galleries of the cave system by means of fully submerged passages. It has extraordinarily high CO_2 concentrations that can exceed 83,000 ppm (Photo: M.A. Perelló).

concentracions de CH_4 que van de 0,92 a 1,54 ppm, influenciades evidentment per les aportacions d'aire exterior amb continguts que oscil·len entre 1,94 i 2,00 ppm (Taula 2); aquestes aportacions tenen lloc a través de la Cova de ses Figueres i de les entrades terrestres de la Cova dets Ases. És convenient destacar la concentració relativament elevada de CH_4 en la *cambra de ses Figueres* (0,92 ppm), que evidencia l'intercanvi de gasos entre aquesta sala i altres volums d'aire ben ventilats situats a cota més elevada (Cova de ses Figueres), tal i com ja s'ha descrit anteriorment en fer referència al CO_2.

Dins els ambients de caràcter clarament subterrani de la Cova dets Ases el contingut de CH_4 de l'aire disminueix de forma dràstica, situant-se entre 0,09 i 0,22 ppm en la major part de les sales més interiors i en les cambres d'aire del sector subaquàtic (Taula 2). Els valors més baixos (0,09 ppm) es registren a la *sala Final* del sector antic de la cova (Figura 8), la qual es troba aïllada mitjançant dues galeries subaquàtiques que la connecten amb la resta de la cavitat i amb l'entrada marina que s'obre a la línea de la costa. Aquests valors tan baixos de la *sala Final* resulten difícils d'explicar des del moment que no ens trobem en un ambient força restringit, amb valors de CO_2 de tan sols 1.500 ppm; caldria valorar la intervenció de microorganismes metanòtrofs lligats a la proximitat de la línia de costa i a la presència de la boca submarina de la cavitat.

També s'han mesurat les concentracions de CH_4 en l'aire de l'horitzó edàfic, obtenint en general valors subatmosfèrics, entre 1,11 i 1,61 ppm, com a conseqüència de l'oxidació del gas relacionada amb l'activitat de la biota metanòtrofa del sòl, però amb un mínim molt evident de 0,49 ppm que correspon a la localització situada per damunt la *sala Joan Montfort*, on el sòl té més potència.

La signatura isotòpica del CH_4 exterior està entre -48,63 i -55,36 ‰ de tal manera que pràcticament se solapa amb els valors corresponents al sòl (entre -50,44 i -53,35 ‰), fet que és indicatiu d'un alt grau de ventilació de l'horitzó edàfic malgrat el consum actiu de CH_4 en el sòl, descrit anteriorment. Les dades que s'han pogut reunir sobre la signatura isotòpica del CH_4 en les sales i galeries subterrànies són molt escasses, i donen valors de $\delta^{13}C$-CH_4 situats entre -52,08 i -57,94 ‰ en el cas de les mostres obtingudes

Figura 8: El que es coneix com la *sala Final* és una voluminosa sala aèria aïllada per passatges submergits, que se situa entre els sectors terrestres de la Cova dets Ases i l'entrada submarina de la cavitat (veure situació en la Figura 2) (Foto: M.A. Perelló).
Figure 8: The *Sala Final* is a huge air-filled chamber, isolated by submerged passages, which is located between the terrestrial sectors of the Cova dets Ases and the submarine sea-entrance to the cave (see situation in Figure 2) (Photo: M.A. Perelló).

a zones ben ventilades de les dues cavitats (Taula 2); no es disposa de dades sobre aquest paràmetre en les sales i cambres d'aire més aïllades de l'exterior. Això és degut a que l'analitzador CRDS baixa la seva precisió i exactitud en les mesures de $\delta^{13}C$-CH_4 per a concentracions sub-atmosfèriques del CH_4 (<0,5 ppm); per aquest motiu, les dades isotòpiques a tan baixes concentracions del gas no s'han tingut en compte a l'hora d'identificar algun patró espacial en els processos de producció i de consum de CH_4 en les cambres d'aire intercalades entre les galeries subaquàtiques. No obstant això, cal destacar les mostres d'aire amb un CH_4 superior a 0,9 ppm i signatures isotòpiques $\delta^{13}C$-CH_4 tan sols lleugerament inferiors a les del CH_4 atmosfèric (-50,6 ± -3,2 ‰), registrades tant a la *cambra de ses Figueres* (de -58,0 a -52,0 ‰) com als sectors terrestres més externs, amb evidències d'intercanvi de gasos entre aquesta cambra d'aire i la Cova de ses Figueres (-57,5 a -55,0 ‰). Aquests valors mínims de $\delta^{13}C$-CH_4 són indicatius de la presència d'un metà residual empobrit en ^{13}C respecte al CH_4 atmosfèric, el que suggereix la coexistència de comunitats microbianes amb activitat metanogènica i metanotròfica. Els indicis d'aquest tipus de metà residual també han estat registrats, de forma més nítida, en cambres d'aire confinat de la zona epifreàtica en entorns hipogènics (LLAMUSÍ et al., 2022).

Sobre l'origen del CO_2 de la Cova dets Ases

Pel que fa a la discussió sobre la procedència del CO_2 en les cavitats investigades, tal vegada sigui convenient començar-la comentant algunes possibles fonts que resulten descartables de manera inequívoca. Per una banda, es pot descartar un origen geogènic relacionat amb aportacions endògenes profundes, com succeeix en àrees d'elevada activitat sísmica. En aquest sentit, la signatura isotòpica del CO_2 en casos com la Sima del Vapor (Alhama de Murcia), situada en una regió d'elevada sismicitat, mostra valors de $\delta^{13}C$-CO_2 situats entre -4,5 a -7,5 ‰ (FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2018a, 2018b), ben allunyats dels -20 a -22 ‰ que caracteritza la composició isotòpica de les cambres d'aire de la Cova dets Ases; a més a més, cal recordar que l'activitat sísmica a Mallorca es pot qualificar de molt baixa.

Una altra font que es podria argumentar seria la desgasificació del CO_2 des de les aigües freàtiques de l'aqüífer litoral. Aquesta possibilitat també cal descartar-la tenint en compte les molt elevades concentracions de CO_2 observades, així com els estudis geoquímics disponibles sobre els llacs freàtics de les coves litorals de l'illa. Per exemple, BOOP et al. (2014) posen en evidència l'existència de febles processos de desgasificació, sobretot en cavitats ben ventilades, que poden provocar la sobresaturació de les capes superiors de la columna d'aigua i la conseqüent precipitació de carbonats; no obstant això, el contingut de CO_2 dissolt a les aigües freàtiques és baix (entre 1.000 i 4.400 ppm) segons les dades aportades pels citats autors. Aquestes concentracions no podrien ser en cap cas responsables de continguts de CO_2 en l'atmosfera de la cova que superen valors de 50.000 ppm. El que està clar és que en aquestes sales terrestres, amb atmosferes força restringides, no té lloc la precipitació de carbonats a

la superfície de les aigües (calcita flotant, espeleotemes freàtics subactuals) des del moment que no es dona la desgasificació de CO_2 des de la superfície hídrica cap a l'atmosfera de la cavitat.

La font del CO_2 de la Cova dets Ases cal cercar-la en la zona vadosa de la plataforma calcària on s'ubica la cavitat. Per una banda, cal tenir present les elevades concentracions d'aquest gas que es donen a la part més superficial de la zona vadosa, és a dir a l'*epicarst*, on l'horitzó edàfic és normalment invocat com a responsable dels continguts elevats de CO_2 i, per tant, de l'agressivitat de les aigües que s'infiltren cap a l'interior dels massissos calcaris. En el cas específic de les cavitats balears, els valors de CO_2 mesurats a l'aire de l'horitzó edàfic assoleixen en general valors entorn de 10.000 ppm (Cova de sa Font, Sa Dragonera; dades inèdites); més concretament, a les mostres d'aire recol·lectades en els migrats sòls existents per sobre de la Cova dets Ases, les concentracions se situen entre 1.800 i 3.600 ppm amb un valor màxim de 16.000 ppm (Taula 2), aproximadament en la vertical de la *sala Joan Montfort*, on l'horitzó edàfic presenta una major potència. En qualsevol cas, les molt elevades concentracions de CO_2 observades no poden ser atribuïdes de forma exclusiva a un origen edàfic relacionat amb l'activitat biològica que té lloc dins l'epicarst.

Les dades que es presenten en aquest treball, ben igual que altres informacions disponibles sobre cavitats de les Balears (ENCINAS & HELBLING, 2011; GINÉS et al., 1987, 2017, 2022b; GRÀCIA et al., 2018, 2019), posen de manifest l'existència de concentracions molt elevades de CO_2 –superiors a 50.000 ppm– amb relativa freqüència. Més concretament, els valors que s'han mesurat a la *sala de na Malen* (Figures 3, 4 i 7), de la Cova dets Ases, són del tot excepcionals superant fins i tot la xifra de 83.000 ppm. Totes aquestes dades donen suport a l'idea de que el contingut de CO_2 a l'atmosfera de la zona vadosa pot ser molt superior al de l'horitzó edàfic (epicarst), en línia amb el concepte de *ground air* (ATKINSON, 1977; MATTEY et al., 2016), que traduiríem com *aire de la zona vadosa* per diferenciar-ho de l'aire existent en els intersticis de l'horitzó edàfic. D'aquesta manera, es pot argumentar que la degradació de matèria orgànica, a les escletxes i buits de la zona vadosa, és responsable d'una molt important producció de CO_2 que es fa patent, sobretot, a les cavitats penetrables que estan desproveïdes de mecanismes eficients de ventilació. En aquest sentit, les molt altes concentracions de CO_2 observades a les cambres d'aire de les cavitats subaquàtiques, podrien ser del tot representatives del *ground air* que caracteritza a la zona vadosa del nostre carst litoral. La signatura isotòpica del CO_2 de les cambres d'aire de la Cova dets Ases també apunta en aquesta direcció, ja que presenta valors de $\delta^{13}C$-CO_2 de l'ordre de -20,5 ‰, menys negatius que els corresponents al CO_2 de l'horitzó edàfic suprajacent on gairebé s'arriba al -23 ‰. Cal tenir present que els sectors terrestres intercalats dins les xarxes de cavitats subaquàtiques representen un mitjà d'accés molt valuós, encara que força dificultós, a l'atmosfera de la zona vadosa dels massissos càrstics.

Un cop analitzades les evidències que determinen quines són les masses d'aire implicades en l'aportació de CO_2 a l'atmosfera de la cova, es pot obtenir mitjançant balanços de masses la signatura isotòpica de la contribució relativa de cada font hipotètica (o fonts) d'aquest gas a la Cova dets Ases, així com la prevalença de l'aportació d'una font de CO_2 o altra en cada compartiment de la cavitat. Per mitjà d'un anàlisi de les dades basat en gràfics *Keeling* (Figura 9), en els que es representen els parells de valors $1/CO_2$ (ppm^{-1})—$\delta^{13}C$-CO_2 (‰) de cada mostra d'aire, s'estableix que el CO_2 present a l'atmosfera subterrània és el resultat de la mescla proporcional d'un CO_2 atmosfèric (fons atmosfèric), que augmenta degut a l'aportació d'una component-font d'aquest gas; tenint en compte la discussió anterior, aquesta font pot estar radicada en l'horitzó edàfic (epicarst), o bé estar lligada a l'atmosfera de la zona vadosa (*ground air*). L'ordenada en l'origen de la regressió lineal (funció *Keeling*) dels valors $1/CO_2$ i $\delta^{13}C$-CO_2 corresponents a mostres d'aire resultants d'aqueixes dues mescles, indica el valor $\delta^{13}C$-CO_2 de cada font de CO_2 (edàfica o zona vadosa), independentment de les particularitats del procés de mescla gasosa.

La Figura 9 recull el gràfic *Keeling* per a la Cova dets Ases i la Cova de ses Figueres, en el qual es distingeixen mostres d'aire exterior, aire del sòl i aire subterrani, tant de les cambres d'aire aïllades com de les galeries terrestres. En aquesta figura s'inclouen les dues funcions lineals per a la mescla de CO_2 edàfic—CO_2 exterior i per a la mescla CO_2 *ground air*—CO_2 exterior, així com el valor hipotètic $\delta^{13}C$-CO_2 de la font edàfica (-23,63 ‰) i del *ground air* de la zona vadosa (-21,16 ‰); aquest darrer valor es troba dins del rang de $\delta^{13}C$-CO_2 definit per MATTEY et al. (2016) per al CO_2 de la zona vadosa en el carst costaner de Gibraltar (entre -18,3 ‰ a -24,3 ‰).

Una anàlisi detallada dels parells de valors $1/CO_2$—$\delta^{13}C$-CO_2 per a cada zona de les cavitats (Figura 9) permet identificar les següents particularitats espacials en la dinàmica del gas:

- L'aportació de CO_2 en la *cambra de ses Figueres* de la Cova dets Ases té principalment una component edàfica, i no de CO_2 de la zona vadosa (*ground air*) com en la resta de cambres d'aire

estudiades. A més a més, es constata un intercanvi de CO_2 entre la Cova de ses Figures i la *cambra de ses Figueres*, des del moment que els parells de valors $1/CO_2$—$\delta^{13}C$-CO_2 d'ambdós espais subterranis s'alineen perfectament en la funció de mescla definida per les mostres d'aire del sòl i les mostres de l'atmosfera exterior. Aquest procés de mescla gasosa també es constata amb els valors de CH_4, relativament elevats en la *cambra de ses Figueres* en comparació amb els nivells gairebé nuls d'aquest gas a les altres cambres d'aire aïllades. En definitiva, la dinàmica d'ambdós gasos en la *cambra de ses Figueres* està controlada per la connexió, en forma de col·lapse (esfondrament), entre aquesta sala i la cavitat suprajacent (Cova de ses Figueres), en contacte directe aquesta darrera amb l'atmosfera exterior i el sòl de la superfície.

• Dins d'un context totalment diferenciat, es troben les cambres d'aire intercalades entre les galeries subaquàtiques (*sala dels Bogamarins*, *sala Joan Montfort* i *sala de na Malen*). En aquests casos, els valors $1/CO_2$—$\delta^{13}C$-CO_2 apunten cap a una component majoritària relacionada amb el *ground air* produït a la zona vadosa (Figura 9).

• A les galeries terrestres del *sector d'en Ramon* s'acumula CO_2 procedent de la zona vadosa (*ground air*), és a dir no generat directament en l'horitzó edàfic i l'epicarst. Aquest fet es constata en els parells de valors $1/CO_2$—$\delta^{13}C$-CO_2 d'aquestes galeries que queden alineades en la funció de mescla definida pel CO_2 de l'atmosfera exterior i el CO_2 generat a la zona vadosa (*ground air*), essent les característiques d'aquest darrer (en termes de concentració i $\delta^{13}C$-CO_2) molt properes a les del CO_2 analitzat a les cambres d'aire aïllades per les galeries subaquàtiques: *sala de na Malen*, *sala Joan Montfort* i *sala dels Bogamarins*. Aquest CO_2 generat a la zona vadosa, amb un $\delta^{13}C$-CO_2 distintiu, es mobilitza per difusió a través de les discontinuïtats de la calcarenita encaixant, acumulant-se en la part occidental del *sector d'en Ramon* en trobar-se aquestes sales bastant aïllades de l'exterior i amb una ventilació molt restringida.

• Els valors de $\delta^{13}C$-CO_2 obtinguts a la *sala Final* són distintius i més aviat anòmals respecte de la resta de cambres d'aire i galeries terrestres de la Cova dets Ases, ja que s'allunyen dels ajustaments *Keeling* que simulen l'aportació de CO_2, tant de la zona vadosa com del sòl superficial, i la seva mescla amb el CO_2 exterior. Aquesta zona de la cova es localitza molt propera a la línia de costa, el que suposa una sèrie de condicionants específics, com són: una aportació important d'esprai salí que pot influir en la interacció amb l'aigua d'infiltració; una fracturació relativament oberta –per distensió– degut a la proximitat del penya-segat costaner; així com una gairebé absència de cobertura edàfica. Per altra banda, la *sala Final* no es correspon estrictament amb una cambra d'aire intercalada entre sectors subaquàtics, sinó que es tracta d'un conjunt de grans sales aïllades, mitjançant sifons curts, tant de la part ben ventilada de la cova (galeries terrestres cap a l'oest) com de la línia de costa i l'entrada submarina de la cavitat, cap a l'est. Tot això determina que a la *sala Final* es registrin concentracions de CO_2 relativament baixes (1.500-1.600 ppm) en comparació amb les cambres d'aire aïllades i més llunyanes de la línia de costa. Aquest conjunt de factors propicia que els valors de

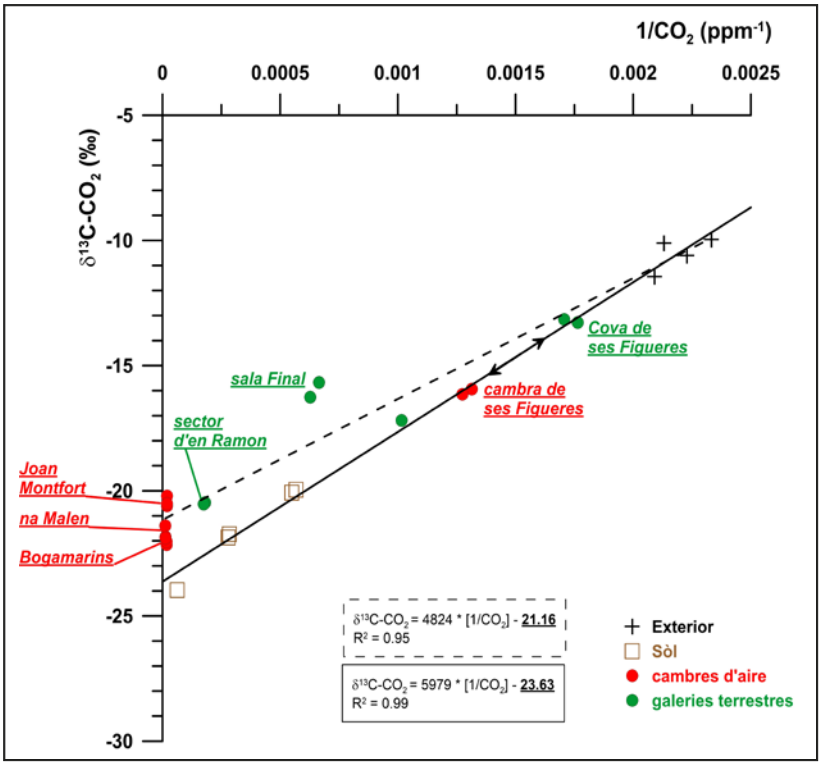


Figura 9: *Keeling-plots* obtinguts per a la Cova dets Ases i la Cova de ses Figueres a partir dels valors de CO_2 i $\delta^{13}C$-CO_2 de les mostres d'aire recollides a l'exterior, al sòl i a l'interior de les cavitats. S'inclouen les dues funcions *Keeling* ajustades que defineixen la mescla de CO_2 edàfic—CO_2 exterior (línia contínua) i la mescla de CO_2 de la zona vadosa—CO_2 exterior (línia discontínua), així com els valors estimats de $\delta^{13}C$-CO_2 de les fonts de CO_2 d'origen edàfic (-23,63 ‰) i de CO_2 de la zona vadosa o ground air (-21,16 ‰).

Figure 9: *Keeling-plots* for Cova dets Ases and Cova de ses Figueres obtained from CO_2 and $\delta^{13}C$-CO_2 values of the air samples collected outside, in the soil horizon, and inside the caves. The two adjusted *Keeling* functions that define the edaphic CO_2—exterior CO_2 mixture (solid line) and the vadose zone CO_2—exterior CO_2 mixture (dashed line) are included, as well as the estimated $\delta^{13}C$-CO_2 values from well-differentiated sources: edaphic origin CO_2 (-23,63 ‰) and vadose zone CO_2 or *ground air* (-21,16 ‰).

$\delta^{13}C$-CO_2 anòmalament elevats registrats en aquesta sala, puguin deure's a la desgasificació lenta del CO_2 que està dissolt en l'aigua d'infiltració en contacte amb la calcarenita encaixant. En conseqüència, es pot argumentar que la major interacció aigua-roca en aquesta zona tal vegada tingui un reflex en la signatura isotòpica del CO_2 desgasificat, que s'acumula en aquest compartiment subterrani.

Deixant de banda les disquisicions sobre l'origen del CO_2, i admetent la seva procedència de la zona vadosa del carst, és necessari fer referència a les repercussions geoquímiques de les observacions realitzades. D'una banda, queda ben patent que les molt elevades concentracions de CO_2 actuaran com a inhibidors de la precipitació de $CaCO_3$ a la superfície de les aigües freàtiques, tal i com assenyalen altres autors (BOOP et al., 2014; ENTRENA et al., 2020). Convé recordar que al *sector d'en Ramon* de la Cova dets Ases, amb continguts més baixos de CO_2 però que superen lleugerament valors de 5.000 ppm, la deposició de calcita flotant és un fenomen cridaner per la seva abundància (ENTRENA, 2023).

En un sentit del tot diferent, les elevades concentracions de CO_2 poden tenir una important repercussió espeleogenètica, contribuint a elevar l'agressivitat de les aigües freàtiques en la línia del que sustenten les investigacions geoquímiques desenvolupades per GULLEY et al. (2014, 2016) a Florida i Yucatán. Aquests autors suggereixen que l'oxidació de carboni orgànic té un paper espeleogenètic rellevant, fins i tot superior a l'agressivitat derivada de la mescla d'aigua dolça i marina que es dona als aqüífers litorals.

Conclusions

Els continguts de CO_2 de l'aire de la Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca) són molt variables depenent del grau de ventilació o confinament de les seves distintes sales. Aquests valors varien entre concentracions molt properes a les de l'atmosfera exterior, fins a valors extremadament elevats (més de 83.000 ppm) en ambients molt restringits, sense intercanvis de gasos amb la superfície.

Les concentracions de CH_4 també presenten una ampla variabilitat i es mostren, en general, com un bon indicador del confinament de les atmosferes subterrànies, amb un comportament inversament proporcional al del contingut de CO_2: 0,10 a 0,12 ppm de CH_4 en ambients molt restringits, en front de l'aire exterior amb valors de 2,00 ppm.

La signatura isotòpica del CO_2 en les sales més confinades de la cova dona valors de l'ordre de -20,5 ‰ ($\delta^{13}C$-CO_2), els quals són menys negatius que els corresponents al CO_2 del migrat sòl desenvolupat a l'epicarst de la plataforma calcària, on la signatura isotòpica se situa devers el -23 ‰.

Les sales terrestres i cambres d'aire, que es troben intercalades en els sistemes subaquàtics del Migjorn de Mallorca, suposen un accés molt vàlid –encara que dificultós– al que presumiblement deu ser el contingut gasós representatiu de la xarxa de fissures i buits de la zona vadosa del carst. En aquests ambients molt confinats, i amb una ventilació del tot restringida, s'assoleixen concentracions de CO_2 molt més elevades que les mesurades habitualment en els sòls desenvolupats a la superfície de les nostres regions càrstiques costaneres. Ens trobem, doncs, davant un cas clar del que podríem qualificar de *ground air* (*aire de la zona vadosa*) en el sentit que va plantejar primerencament ATKINSON (1977) o, amb posterioritat, MATTEY et al. (2016); es tractaria d'aire molt enriquit en CO_2 per la degradació de matèria orgànica als buits i escletxes de la zona vadosa i, per tant, amb un origen relativament desvinculat dels processos que es donen a l'horitzó edàfic.

El contingut gasós d'aquestes sales confinades no està exempt de determinades implicacions morfogenètiques. Per una part, la precipitació de carbonats (làmines de carbonats flotants, espeleotemes freàtics...) es veu dificultada pels elevats continguts de CO_2 de l'atmosfera subterrània; per altra banda, aquestes elevades concentracions poden contribuir a l'agressivitat de les aigües freàtiques i al seu paper en els processos espeleogenètics.

Agraïments

Cal expressar la nostra gratitud a tots els companys de la *Societat Espeleològica Balear*, que han col·laborat en els mostrejos efectuats. Esmentarem, en particular, a Ana Entrena i Gabriel Santandreu, així com als espeleobussejadors Miquel Àngel Perelló, Joan Pérez i Miquel Àngel Vives, que han contribuït a la documentació fotogràfica dels sectors subaquàtics de la cova.

El nostre agraïment al *Laboratorio de Isótopos Estables* de la *Universidad de Almería* pels anàlisis de les mostres d'aire de les diferents cavitats (*Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental* i *Centro Andaluz del Seguimiento del Cambio Global*).

La present contribució s'emmarca dins dels projectes PID2020-112720GB-I00/AEI/10.13039 /501100011033 i PID2023-146299OB-C21 (GASBIOSUB), finançats per *l'Agencia Estatal de Investigación* (AEI).

Bibliografia

AMUNDSON, R.; STERN, L.; BAISDEN, T. & WANG, Y. (1998): The isotopic composition of soil and soil-respired CO_2. *Geoderma*, 82: 83-114.

ASTIER, L. & VILÁ, E. (1967): Serra Nord-5. Campaña espeleológica en Mallorca. *Geo y Bio Karst*, 10: 18-20. Barcelona.

ATKINSON, T.C. (1977): CO_2 in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestones. *Journal of Hydrology*, 35: 111-123.

BERMEJO, J.; PARDO, J.V.; VILLAR, A. & MATEU, T. (2020): Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca). Nuevas galerías. *Gota a Gota*, 19: 88-92. Villacarrillo, Jaén.

BOOP, L.M.; ONAC, B.P.; WYNN, J.G.; FORNÓS, J.J.; RODRÍGUEZ-HOMAR, M. & MERINO, A. (2014): Groundwater geochemistry observations in littoral caves of Mallorca (western Mediterranean): implications for deposition of phreatic overgrowths on speleothems. *International Journal of Speleology*, 43 (2): 193-203. Tampa, USA.

BOVER, J.M. (1839): Descripción de la milagrosa Gruta de Son Lluis en la isla de Mallorca. *El Museo de Familias*, 2: 484-485. Barcelona.

CROSSON, E.R. (2008): A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide and water vapour. *Applied Physics B*, 92: 403-408.

ENCINAS, J.A. (2014): *Corpus Cavernario Mayoricense*. El Gall Editor. 1355 pàgs. Pollença, Mallorca.

ENCINAS, J.A. & HELBLING, J. (2011): El aumento estival de CO_2 en un centenar de cavidades mallorquinas. *Subterránea*, 33: 26-28. Madrid.

ENTRENA, A. (2023): *Depósitos detríticos y espeleotémicos (POS y rafts) en cuevas costeras de Mallorca: indicadores paleoambientales y relaciones con las variaciones del nivel del mar Mediterráneo*. Tesi doctoral. Universitat de les Illes Balears - Universidad de Zaragoza. 388 pàgs. Palma.

ENTRENA, A.; FORNÓS, J.J.; GÓMEZ-PUJOL, L. & AUQUÉ, L.F. (2020): Sobrecrecimientos freáticos en espeleotemas (POS): una experimentación con placas de vidrio (datos preliminares). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 65-81. Palma.

ENTRENA, A.; FORNÓS, J.J.; AUQUÉ, L.F.; GRÀCIA, F. & LAITA, E. (2022): Mineralogical and sedimentological characterization of the clay-rich sediments from Ases Cave (Cova dets Ases, Mallorca, Spain): origin and classification. *Minerals*, 12: article 1473. 22 pàgs. Basilea, Suïssa.

ESCOLÀ, O. (1970): Resultats de la campanya 1970 a Mallorca. *Espeleòleg*, 13: 624-634. Barcelona.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CUEZVA, S.; ÁLVAREZ-GALLEGO, M.; GARCIA-ANTÓN, E.; PLA, C.; BENAVENTE, D.; JURADO, V.; SÁIZ-JIMÉNEZ, C.; SÀNCHEZ-MORAL, S. (2015): Subterranean atmospheres may act as daily methane sinks. *Nature Communications,* 6: article 7003.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; CUEZVA, S.; CALAFORRA, J.M.; CAÑAVERAS, J.C. & SÁNCHEZ-MORAL, S. (2018a): Seguimiento y caracterización físico-química de gases de efecto invernadero en ambientes subterráneos hipogénicos activos: caso de la Sima del Vapor (Alhama de Murcia). *Boletin SEDECK*, 12: 22-30. Madrid.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; CUEZVA, S.; CALAFORRA, J.M.; CAÑAVERAS, J.C. & SÁNCHEZ-MORAL, S., (2018b): Geochemical fingerprinting of rising deep endogenous gases in an active hypogenic karst system. *Geofluids*, 2018: article 4934520. 19 págs.

GARCIA-ANTÓN, E; CUEZVA, S.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; ÁLVAREZ-GALLEGO, M.; PLA, C.; BENAVENTE, D.; CAÑAVERAS, JC. & SÁNCHEZ-MORAL, S. (2017): Abiotic and seasonal control of soil-produced CO_2 efflux in karstic ecosystems located in Oceanic and Mediterranean climates. *Atmospheric Environment*, 164: 31-49.

GINÉS, A.; HERNÁNDEZ, J.; GINÉS, J. & POL, A. (1987): Observaciones sobre la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de la Cova de les Rodes (Pollença, Mallorca). *Endins*, 13: 27-38. Palma.

GINÉS, A.; MULET, A.; RODRÍGUEZ-HOMAR, M.; VADELL, M.; SÁNCHEZ-CAÑETE, E.P. & GINÉS, J. (2017): Extreme seasonal fluctuations of carbon dioxide in the cave atmosphere of Cova de sa Font (Sa Dragonera islet, Balearic Islands, Spain). In: MOORE, K. & WHITE, S. (eds.) *Proc. 17th Int. Congress Speleol. (Edition 2)*, 1: 230-233. Sydney, Austràlia.

GINÉS, A.; SENDRA, A.; FORNÓS, J.J.; CALAFORRA, J.M.; GINÉS, J.; DUMITRU, O.A. & FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2022a): Terrestrial cave-fauna enduring extreme CO_2 seasonal changes in the vadose environment: lessons from Dragonera Islet, Balearic Islands. *Proc. 18th Int. Congress Speleol. Vol. I - Karstologia Mémoires*, 21: 281-284. Savoie Mont Blanc, França.

GINÉS, A.; SENDRA, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; CALAFORRA, J.M.;; DUMITRU, O.A. & FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2022b): Tolerància de la fauna cavernícola terrestre de la Cova de sa Font (Sa Dragonera, Illes Balears) envers altes concentracions de diòxid de carboni. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 5: 87-99. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1989): El karst en las islas Baleares. In: DURÁN, J.J. & LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (eds.) *El karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía nº 4: 163-174. Madrid.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2006): La Cova Nova de Son Lluís (Porreres, Mallorca). Notes sobre aspectes històrics i geoespeleològics. *Endins*, 29: 5-24. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009): Proposta d'una nova classificació morfogenètica de les cavitats càrstiques de l'illa de Mallorca. *Endins*, 33: 5-18. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2022): L'obra espeleològica de Joaquim Maria Bover de Rosselló (1810-1865). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 5: 1-43. Palma.

GRÀCIA, F.; WATKINSON, P.; MONSERRAT, T.; CLARKE, O. & LANDRETH, R. (1997): Les coves de la zona de ses Partions - Portocolom (Felanitx, Mallorca). *Endins*, 21: 5-36. Palma.

GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; GAMUNDÍ, P.; FORNÓS, J.J. & WATKINSON, P. (2011): Les cavitats subaquàtiques de la franja litoral de Mallorca. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 103-132. Palma.

GRÀCIA, F.; MASCARÓ, G.; PÉREZ, J.; FERNÁNDEZ, J.F.; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; ANSALDI, D.; CLAMOR, B.; PERELLÓ, M.À.; VIVES, M.À.; GAMUNDÍ, P.; GRANELL, Á.; BETTON, N.; BORNEMANN, D. & FRANGLEN, N. (2018): El Drac subaquàtic (Coves del Drac, Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 117-139. Palma.

GRÀCIA, F.; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; FERNÁNDEZ, J.F.; CLAMOR, B.; MASCARÓ, G.; ENSEÑAT, J.J.; FORNÓS, J.J. & PÉREZ, J. (2019): Sistema Pirata-Pont-Piqueta (Manacor, Mallorca): estat de la qüestió. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 2: 69-101. Palma.

GRÀCIA, F.; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; FERNÁNDEZ, J.F.; CLAMOR, B.; MASCARÓ, G.; PÉREZ, J.; FORNÓS, J.J.; ANSALDI, D.; BORNEMANN, D.; FRANGLEN, N.; GRANELL, Á.; GAMUNDÍ, P. & ENSEÑAT, J.J. (2020): Sistema Gleda-Camp des Pou (Manacor, Mallorca): estat de la qüestió. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 1-32. Palma.

GULLEY, J.D.; MARTIN, J.B. & MOORE, P. (2014): Vadose CO_2 gas drives dissolution at water tables in eogenetic karst aquifers more than mixing dissolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 1833-1846.

GULLEY, J.D.; MARTIN, J.B. & BROWN, A. (2016): Organic carbon inputs, common ions and degassing: rethinking mixing dissolution in coastal eogenetic carbonate aquifers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41: 2098-2110.

JOLY, R. de (1929): Explorations spéléologiques à Majorque 1929. *Rev. Geog. Phys. et Géol. Dyn.*, 2 (3): 233-245. París.

LLAMUSÍ, J.L.; ROS, A.; SOTO, J.A.; GÁZQUEZ, F.; CALAFORRA, J.M.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2022): Caracterización ambiental de la zona epifreática en entornos hipogénicos: un ejemplo de Cueva del Agua (Cartagena, SE España). *Proc. 18th Int. Congress Speleol. Vol. III - Karstologia Mémoires*, 23: 223-226. Savoie Mont Blanc, França.

MARTEL, É.A. (1903): Les cavernes de Majorque (Iles Baléares). *Spelunca, Bull. et Mém. Soc. Spéléol.*, 5 (32): 1-32 + 8 làms. fotos + 1 plànol. París.

MARTÍN-POZAS, T.; CUEZVA, S.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CAÑAVERAS, J.C.; BENAVENTE, D.; JURADO, V.; SÁIZ-JIMÉNEZ, C.; JANSSENS, I.; SEIJAS, N. & SÁNCHEZ-MORAL, S. (2022): Role of subterranean microbiota in the carbon cycle and greenhouse gas dynamics. *Sci. Total Environ.*, 83: article 154921.

MATTEY, D.P.; ATKINSON, T.C.; BARKER, J.A.; FISHER, R.; LATIN, J.P.; DURRELL, R. & AINSWORTH, M. (2016): Carbon dioxide, ground air and carbon cycling in Gibraltar karst. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 184: 88-113.

MESTRE, G. (1980): *La incógnita del mundo subterráneo mallorquín*. Antigua Imprenta Soler. 101 pàgs. Palma.

MULET, G. & RODRÍGUEZ-HOMAR, M. (2014): *Aplicación de la Directiva Hábitats. Actividades en las Cavidades Subterráneas LIC de la Red Natura 2000 de Baleares.* Informe final. Federació Balear d'Espeleologia. 297 pàgs. Inèdit.

PUIG y LARRAZ, G. (1896): *Cavernas y simas de España*. Est. Tip. de la viuda e hijos de M. Tello. 440 pàgs. Madrid.

SERVERA, J. (1995): Distribució geogràfica del carst a Mallorca / The geographical distribution of karst in Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 7-16. Palma.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Els col·lapses paleocàrstics del miocè superior de Mallorca: estructura, origen i reconeixement als perfils sísmics

Joan J. FORNÓS [1, 2], Bernadí GELABERT [1], Francesc X. ROIG-MUNAR [1] i Jordi GIMÉNEZ [1, 3]

[1] Grup de Recerca Ciències de la Terra. Facultat de Ciències. Universitat de les Illes Balears. Palma (Illes Balears). Email: joan.fornos@uib.cat
[2] Societat Espeleològica Balear. Palma (Illes Balears)
[3] Direcció General de Recursos Hídrics. Conselleria de la Mar i del Cicle de l'Aigua. Palma (Illes Balears)

Abstract

Based on the geometry and the stratigraphic relationships between the two Upper Miocene units of the SE of Mallorca (from base to top, the Reefal Unit and the Santanyí Limestone Unit) a series of sinsedimentary karst paleocollapse formation models are presented. The karstic paleocollapses of the study area are formed when a void is created due to the dissolution of the limestone levels of the Reefal Unit, when some layers of the Santanyí Limestone Unit had already been deposited. The void causes synclinal bending of the upper limestones, which may or may not be accompanied by breccia formation in the central part of the fold and also filling the solution void. Karst collapses have been studied both in the cliffs of the coast of Santanyí and in seismic reflection profiles carried out in 1998 during an oceanographic campaign in the coastal area of Santanyí. The results show that the karst collapses are also below the seabed and have the same dimensions and morphologies as those observed in the coastal cliffs of SE Mallorca. Finally, the sedimentological and geomorphological evolution of this area of SE Mallorca, from the Upper Miocene to the present day, is shown.

Resum

A partir de la geometria i de les relacions estratigràfiques entre les dues unitats del miocè superior del Llevant de Mallorca (de base a sostre, Unitat d'Esculls i Unitat Calcàries de Santanyí) es presenten una sèrie de models de formació de paleocol·lapses càrstics sinsedimentaris. Els paleocol·lapses càrstics de la zona d'estudi es formen quan es produeix un buit per dissolució dels nivells de calcàries de la Unitat d'Esculls, quan ja s'havien dipositat algunes capes de la Unitat Calcàries de Santanyí. El buit provoca la flexió sinclinal de les calcàries superiors, la qual pot anar acompanyada, o no, de bretxes a la part central del plec o també reomplint el buit generat per la dissolució. Els paleocol·lapses càrstics s'han estudiat tant als penya-segats del litoral de Santanyí com a uns perfils de sísmica de reflexió realitzats l'any 1998 a una campanya oceanogràfica de la zona costanera de Santanyí. Els resultats mostren que els paleocol·lapses càrstics també es troben per sota del fons de la mar i tenen les mateixes dimensions i morfologies que els observats als penya-segats litorals del SE de Mallorca. Finalment, es mostra l'evolució sedimentològica i geomorfològica d'aquesta zona del SE mallorquí, des del miocè superior fins a l'actualitat.

Fornós, J.J.; Gelabert, B.; Roig-Munar, F.X. i Giménez, J. (2024): Els col·lapses paleocàrstics del miocè superior de Mallorca: estructura, origen i reconeixement als perfils sísmics.
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 151-163. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 9 octubre 2024; **Revisat:** 19 octubre 2024; **Acceptat:** 22 octubre 2024.
Publicat online: 12 novembre 2024.

Introducció

L'aspecte més pràctic dels estudis relacionats amb el carst està associat amb la porositat que es produeix durant el procés de carstificació (o dissolució), la qual pot ser emplenada d'aigua (FORD & WILLIAMS, 2007; KLIMCHOUK et al., 2000) o bé de petroli (POPENHOE et al., 1984; DANIELS et al., 2020). La recerca d'aquesta porositat, o dit d'altra manera, d'aquests reservoris de petroli o d'aigua, és l'objectiu principal de la indústria petrolera i de les companyies d'explotació dels recursos hídrics.

Els perfils de sísmica de reflexió permeten interpretar el subsòl d'una manera acurada i són, per tant, una eina primordial en la investigació geològica. FORD & WILLIAMS (2007) constataren que hi ha una notable absència d'interpretacions del relleu càrstic als perfils sísmics. Si bé els grans relleus càrstics són mals d'interpretar en els perfils sísmics, especialment les típiques torres càrstiques o els pinacles (ja que poden ser erosionades en zones aixecades), algunes morfologies puntuals i negatives en quant a relleu associades al carst, com ara els col·lapses càrstics, poden ser identificades amb facilitat (STEEPLES et al., 1984; POPENOE et al., 1984; SNYDER et al., 1989; CHEN & BECK, 1989; BERTONI & CARTWRIGHT, 2005; BROUGHTON, 2017; DANIELS et al., 2020).

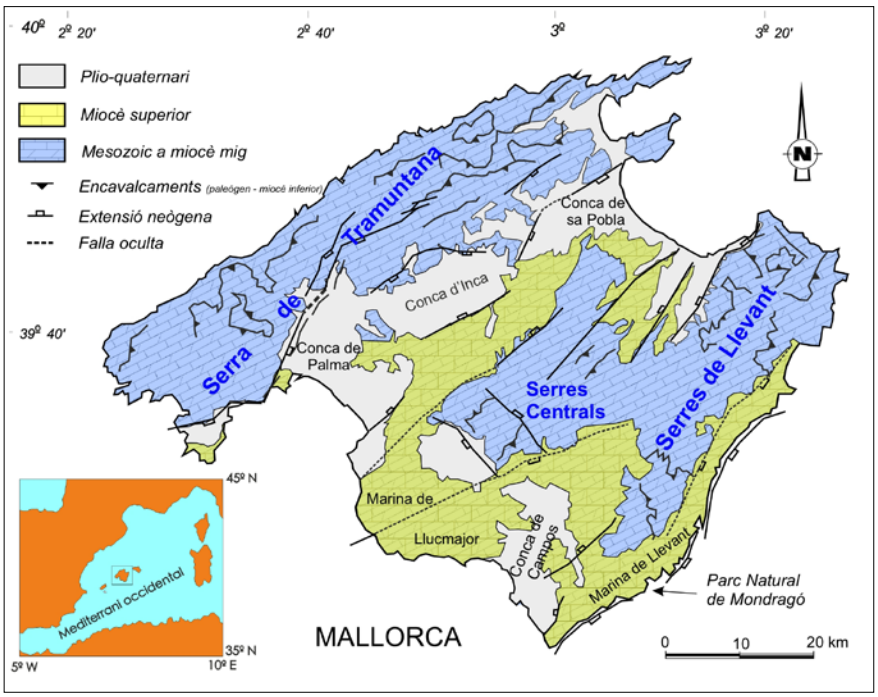


Figura 1: Mapa geològic simplificat de l'illa de Mallorca (modificat de GINÉS et al., 2014).
Figure 1: Simplified geological map of the island of Mallorca (modified from GINÉS et al., 2014).

Els dipòsits carbonatats, disposats horitzontalment, del miocè superior que formen part de l'illa de Mallorca (Figura 1) són una magnífica base sobre la qual es poden observar fenòmens paleocàrstics. Així, els processos geològics que afectaren la Mediterrània occidental durant els darrers episodis del miocè superior provocaren esdeveniments d'emersió d'aquestes zones carbonatades, tot donant pas al desenvolupament d'importants fenòmens càrstics i coincidint amb la sedimentació dels nivells superiors de miocè. Entre aquests, la presència de morfologies de col·lapse càrstic és un dels trets a destacar.

En el present article es presenten per primera vegada imatges de paleocol·lapses càrstics a partir de la interpretació dels perfils sísmics realitzats al litoral marí de la zona del Parc Natural de Mondragó a Santanyí, al SE de l'illa de Mallorca (Figura 1), així com també imatges (juntament amb l'explicació del seu desenvolupament) dels paleocol·lapses càrstics que apareixen als penya-segats litorals de la costa de Santanyí descrits anteriorment per altres autors (FORNÓS et al., 1989; FORNÓS, 1999; GINÉS, 2000; ROBLEDO & POMAR, 2000; entre d'altres).

Context geològic

Des d'un punt de vista morfoestructural, l'illa de Mallorca està formada per tres serres (Tramuntana, Centrals i Llevant, de NO a SE - Figura 1-) que es formaren durant el miocè inferior i mig, formant un cinturó de plecs i encavalcaments. A les serres hi trobem roques d'un rang d'edat comprés entre el paleozoic superior i el miocè mig, totes elles involucrades en la compressió.

Una vegada formades les serres, durant el miocè superior es produeix un període d'estabilitat tectònica dominat per la sedimentació al voltant del cinturó de plecs i encavalcaments. Aquesta sedimentació pren forma en una plataforma escullosa, la qual té, a gran escala, una disposició horitzontal. De fet, aquesta plataforma escullosa és la que conforma unes zones topogràficament planes i que corresponen, des d'un punt de vista topogràfic, als planells de Llucmajor (Marina de Llucmajor al Sud de l'illa), Llevant (Marina de Llevant a l'Est de l'illa) i o Llubí-Muro (la Marineta al N de l'illa). És en aquestes zones on es troben els col·lapses càrstics que es presenten a continuació. Simultàniament a la sedimentació de la plataforma escullosa, i també amb posterioritat, l'illa restà sotmesa a extensió, la qual donà lloc a les principals conques de l'illa: de SO a NE, la conca de Palma, la conca d'Inca i la conca de Sa Pobla (Figura 1).

La columna estratigràfica del miocè superior (Figura 2) consisteix en calcarenites i calcisiltites que alternen a la base, evolucionant cap a calcàries i calcarenites d'escull massives (Unitat d'Esculls) que

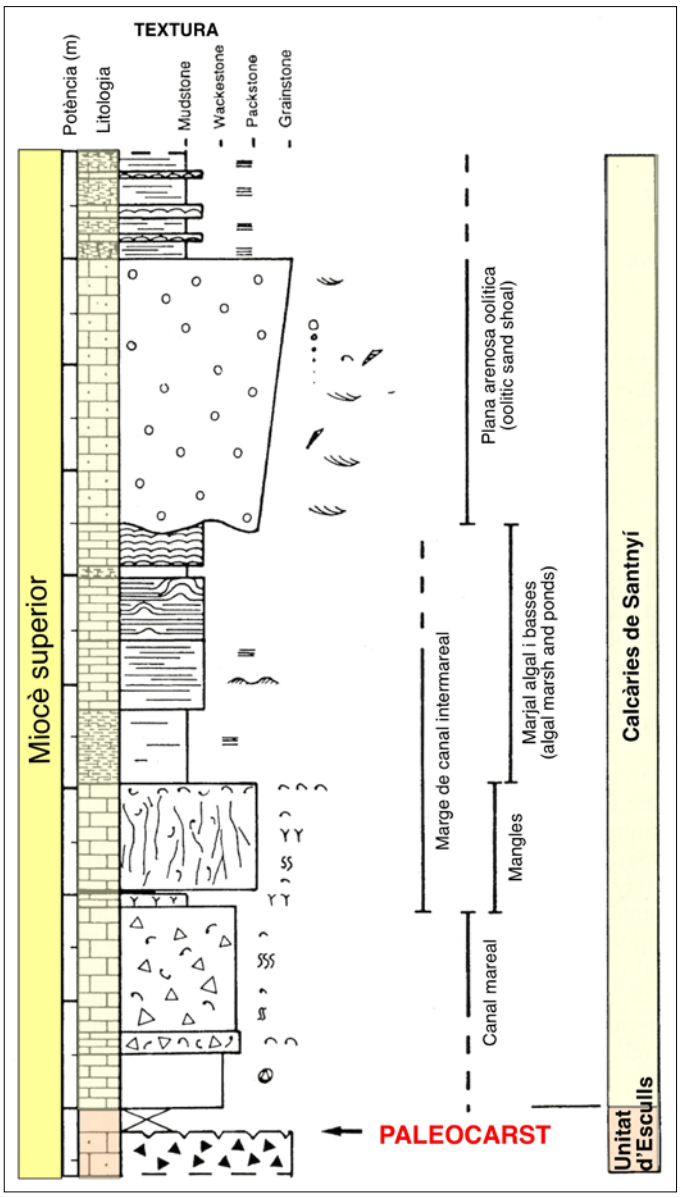


Figura 2: Columna estratigràfica del miocè superior de Mallorca (modificat de FORNÓS, 1999).
Figure 2: Stratigraphic column of the Upper Miocene of Mallorca (modified from FORNÓS, 1999).

acaben amb calcàries oolitiques i estromatolítiques (la Unitat Calcàries de Santanyí de POMAR et al., 1983). El ben desenvolupat episodi dels esculls del miocè superior de Mallorca, amb equivalents i seqüències molt semblants a moltes d'altres zones de la Mediterrània, fou descrit per primera vegada per ESTEBAN (1979/80). Està compost per calcarenites bioclàstiques i esculls de corall i correspon al desenvolupament d'un escull de corall de tipus barrera amb àmplies llacunes de rere-escull. Una superfície erosiva és visible a la part superior de la unitat on s'observa clarament la carstificació amb fenòmens de col·lapse.

A les zones sud i est de Mallorca aquesta formació d'esculls està coberta per la "Unitat Calcàries de Santanyí" –l'anomenat Complex Terminal– (FORNÓS & POMAR, 1984). Aquest està format per dipòsits carbonatats de tipus litoral que impliquen una gran varietat de fàcies, com ara fàcies de manglars, calcàries oolítiques i calcàries estromatolítiques als nivells superiors (Figura 2). La part superior de la unitat sembla truncada per una marcada superfície d'erosió coberta per dipòsits d'edat pliocènica que amb prou feines afloren a les "marines", i per dipòsits del plio-quaternari i quaternari, bàsicament formats per eolianites, corresponents als episodis dunars que se relacionen amb els esdeveniments de signe fred del pleistocè (BUTZER & CUERDA, 1962; CUERDA, 1975; FORNÓS et al., 2012).

Aquests afloraments tabulars dels sediments del miocè superior es presenten al llarg dels penya-segats de la costa sud i est. Els penya-segats tenen una acusada continuïtat lateral i la seva façana pot arribar a superar els 30 m d'alçada. Els planells que componen aquests dipòsits postorogènics estan solcats per torrents que condicionats en el seu traçat per la fracturació, en arribar a la línia de costa tenen el caixer inundat per la mar, tot bastint les clàssiques macroformes del modelat de les costes rocoses que es coneixen com a cales en un sentit geomòrfic estricte (ROSSELLÓ, 2005; GÓMEZ-PUJOL et al., 2013). La continuïtat i la mida dels afloraments costaners permeten estudis sedimentològics i paleocàrstics acurats.

Mètodes

L'octubre de 1998, en el marc d'una campanya de geofísica marina a bord del vaixell Walkyria, es realitzaren 21 línies de sísmica de reflexió perpendiculars a la costa de Santanyí, entre Cala Figuera i la punta des Pont a Portopetre, i una línia de sísmica de reflexió de forma paral·lela a la mateixa costa (Figura 3). Les línies sísmiques suposen talls d'informació geològica submarina amb una longitud total d'aproximadament 50 kilòmetres i representen un recurs important per conèixer quina és l'estructura geològica de la zona. Els perfils sísmics perpendiculars a la costa (de direcció NO-SE) estan separats entre si una distància de 200 m i tots comencen a la menor distància possible de la costa, a partir dels 3 m de profunditat i fins als 50 m de fondària. El perfil longitudinal, de direcció NE-SO, té una longitud de 4,2 km i va paral·lel a la costa, seguint aproximadament la isòbata dels 35 m.

Les dades digitals batimètriques s'obtingueren mitjançant una ecosonda Echotrac DF-3200 bi-freqüència amb funcionament simultani (24 i 200 kHz) i una resolució de 5 cm. Les dades

batimètriques es corregiren mitjançant les sèries temporals del mareògraf del Centre Oceanogràfic de Balears (IEO). Les dades es referien al nivell mitjà del mar al port de Palma on resta instal·lat el mareògraf.

Totes les dades s'emmagatzemaren digitalment mitjançant un sistema de navegació i adquisició de dades Hypack (Coastal Oceanographics) amb posicionament de latitud i longitud obtingut per un GPS diferencial Trimble AgGPS 132 amb l'estació de ràdio de referència via satèl·lit Racal-LandStar. Finalment, els perfils sísmics s'escanejaren digitalment i després es processaren per a la seva interpretació.

Els paleocol·lapses càrstics: geometria i model genètic

A la zona d'estudi, els paleocol·lapses càrstics afecten a les fàcies carbonatades del miocè superior i engloben tant la Unitat d'Esculls basal com la Unitat Calcàries de Santanyí superior (FORNÓS et al., 1989, 1995; GINÉS, 2000; GINÉS et al., 2011). Es veuen especialment bé a la part de la Marina de Llevant que pertany al terme municipal de Santanyí i, en concret, als penya-segats litorals que es troben entre

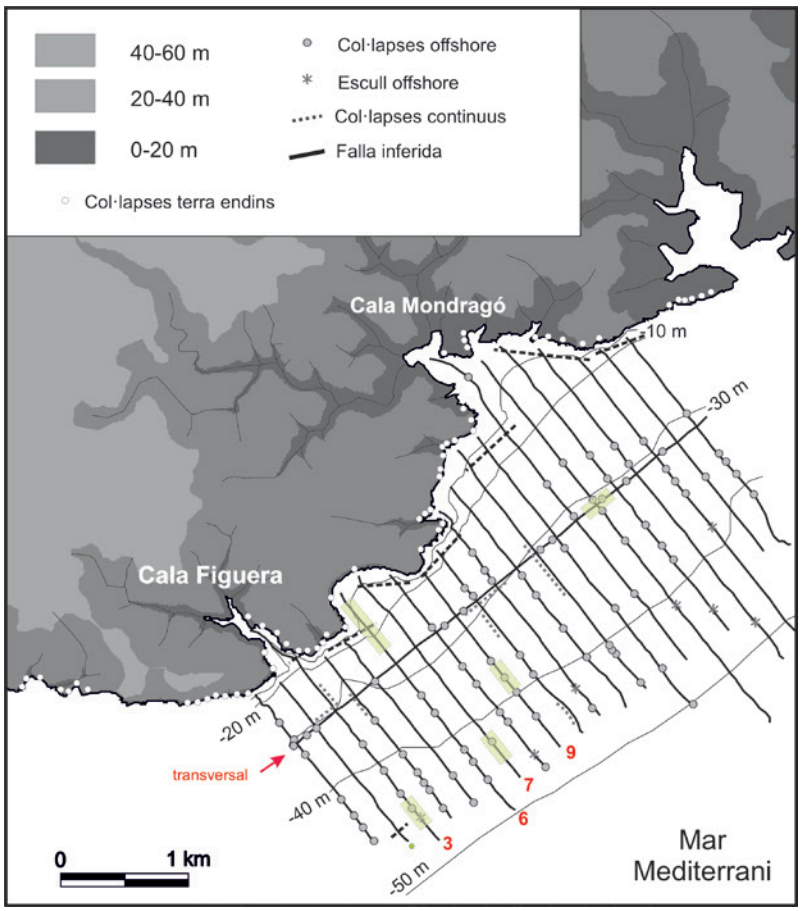


Figura 3: Localització de la zona d'estudi i situació dels perfils sísmics.
Figure 3: Location of the study area and location of the seismic profiles.

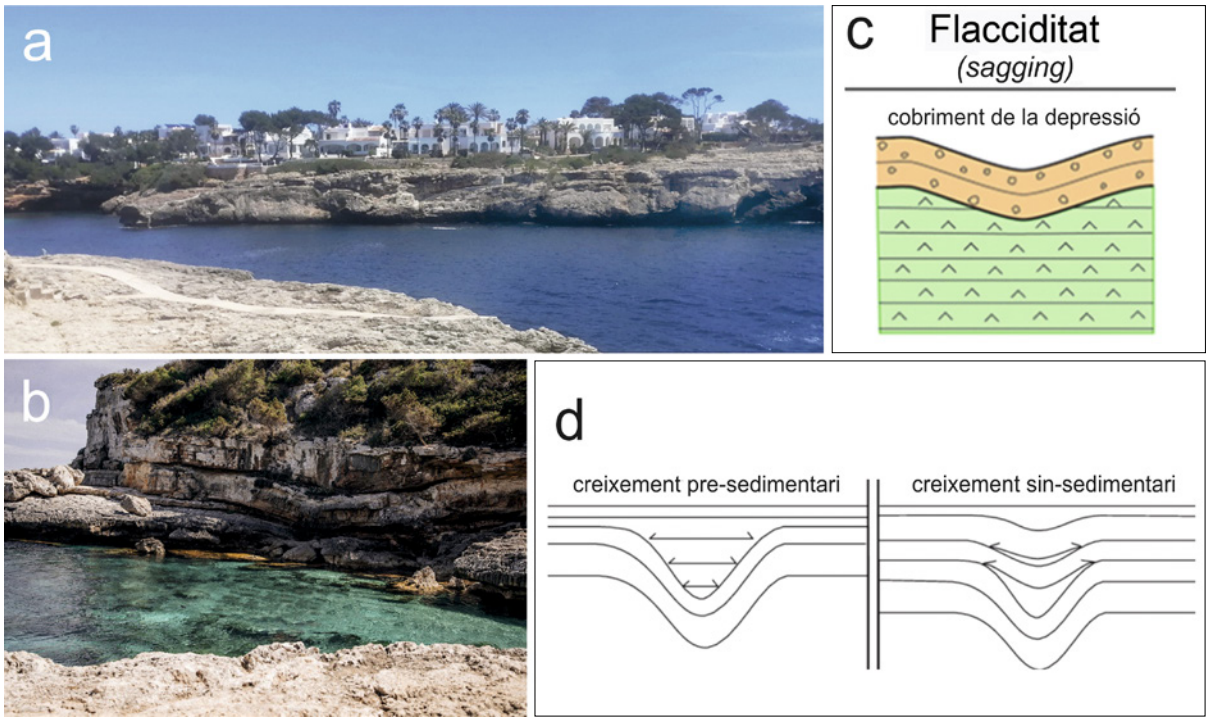


Figura 4. Col·lapses càrstics a Caló de Ses Egos (a) i Caló des Macs (b). A la dreta, esquemes d'un "*cover sagging sinkhole*".
Figure 4: Karst collapses in Caló de Ses Egos (a) and Caló des Macs (b). On the right, diagrams of a "cover sagging sinkhole".

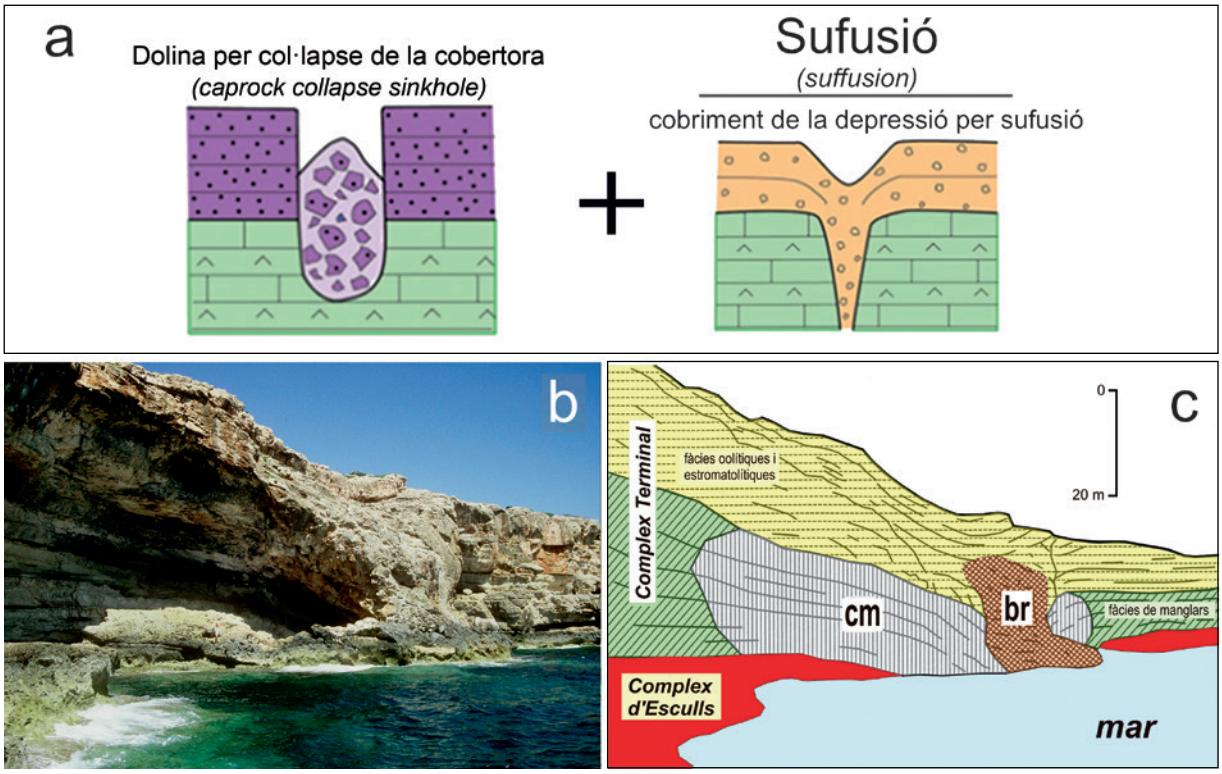


Figura 5: a) Una estructura pot ser el resultat d'un col·lapse amb formació de bretxes (*caprock collapse*) i una deformació en sinclinal (*cover suffusion*). b) Col·lapse càrstic al Niu de s'Àguila. c) A la dreta hi ha l'esquema de la fotografia (GINÉS, 2000).
Figure 5: a) A structure can be the result of a collapse with the formation of breccias (caprock collapse) and a syncline deformation (cover suffusion). b) Karst collapse in Niu de s'Àguila. c) On the right is the outline of the photograph (GINÉS, 2000).

Cala Llombards i Cala Santanyí. Si es ressegueix el contacte entre les dues unitats esmentades, és possible identificar a les parets dels penya-segats unes inflexions en forma còncava laxa que afecten a la geometria horitzontal dels estrats dels materials del Complex Terminal, i d'altres vegades, estructures més complexes en què la concavitat laxa adquireix una forma d'embut o rellotge d'arena, on els elements inferiors de l'accident l'integren materials bretxoides.

Des d'un punt de vista genètic, els paleocol·lapses càrstics de la zona d'estudi es formen quan es produeix un buit per dissolució dels nivells de les calcàries de la Unitat d'Esculls. En el moment en què es generà aquest buit, la Unitat Calcàries de Santanyí ja s'havia dipositat atès que les calcàries estan plegades degut al buit, tot i que encara els nivells no devien estar del tot cimentats, ja que presentaren certa plasticitat. El buit o zona de dissolució, pot manifestar-se en un espectre molt ampli de formes en funció de diferents factors producte de la fracturació, la geometria dels cossos sedimentaris així com de la naturalesa dels materials. Tanmateix, a grans trets, es poden simplificar les tipologies de buit en dues categories bàsiques: aquells que tenen una disposició bàsicament horitzontal i els que tenen una disposició vertical. Si el buit a la Unitat d'Esculls té una disposició horitzontal, els nivells superiors de la Unitat Calcàries de Santanyí es pleguen formant un sinclinal lax (*Cover sagging sinkhole*, d'acord amb GUTIÉRREZ, 2016) just per sobre del buit (Figura 4). Si el buit a la Unitat d'Esculls té una disposició vertical es poden donar dos fenòmens, tant per separat com a la vegada: 1) un enfonsament i caiguda dels materials superiors (i també de les parets adjacents) que reomplen parcialment el buit en forma de bretxes (*cover collapse sinkhole* i *caprock collapse sinkhole* de GUTIÉRREZ, 2016 –Figura 5–), i 2) un plegament, en forma de sinclinal, dels nivells que estan per sobre del buit (Figures 6 i 7). En aquest últim cas, es tracta dels nivells superiors que pertanyen a la Unitat Calcàries de Santanyí i que tenen continuïtat amb les bretxes que reomplen part del buit (*cover suffusion sinkhole* –GUTIÉRREZ, 2016–). Cal remarcar que aquests dos fenòmens es poden donar a la vegada, com succeeix al col·lapse del Niu de s'Àguila (Figura 5) o bé per separat, com per exemple es pot apreciar als col·lapses d'es Savinar i al caló d'es Savinar (Figura 6).

Si els buits creats per dissolució a la Unitat d'Esculls no queden buits, la porositat secundària o l'espai generat s'omple amb bretxes compostes per fragments angulosos i subangulosos de rocam tant de la Unitat d'Esculls, com de la unitat Calcàries de Santanyí. També és freqüent la participació de llims vermellosos reomplint els espais que deixa la carcassa de la bretxa. Aquests llims procedeixen

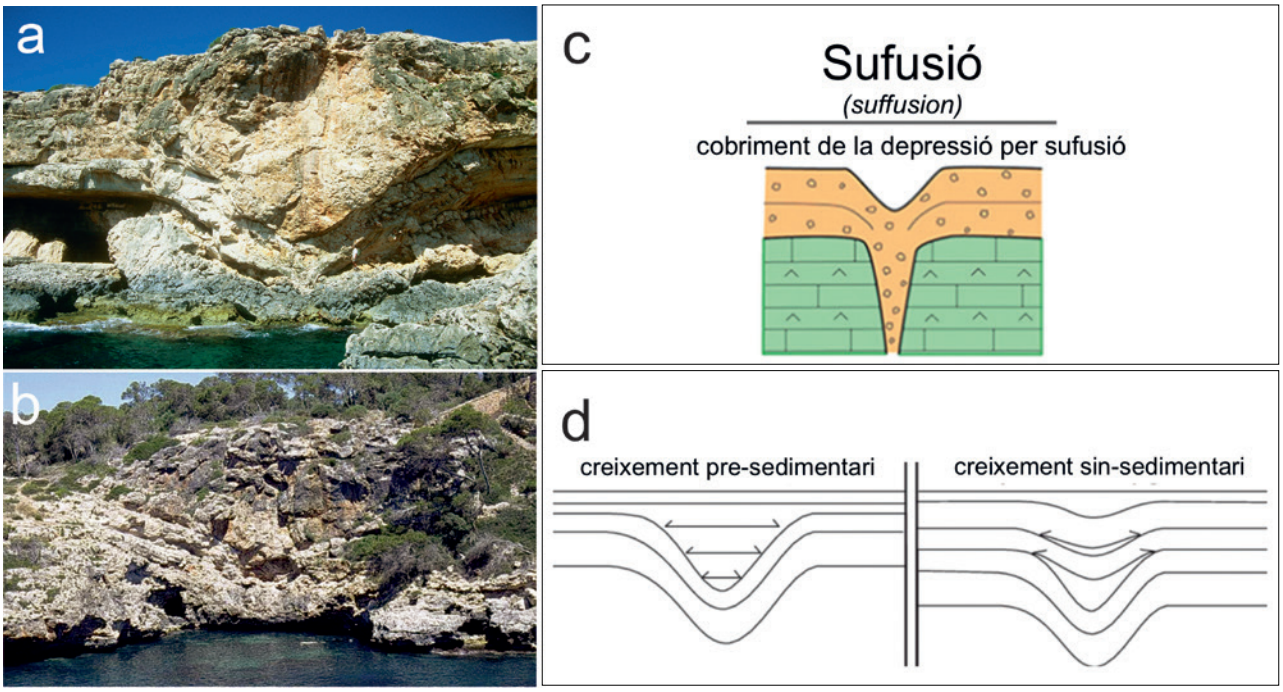


Figura 6: a) Col·lapse càrstic a n'Es Savinar. b) Col·lapse càrstic al Caló des Savinar. c) L'estructura superior és un sinclinal on els flancs tenen un cabussament alt. d) Dues formes distintes de rebliment del sinclinal.
Figure 6: a) Karst collapse in Es Savinar. b) Karst collapse in Caló des Savinar. c) The upper structure is a syncline where the limbs have a high dip. d) Two different forms of filling the syncline.

de diferents rebliments que no estan relacionats amb el fenomen del col·lapse (Figura 8) i que corresponen a l'última etapa dels rebliments dels buits (porositat intraclast).

En els casos en què el buit creat per dissolució és vertical, connectant la part inferior amb la superior del col·lapse, hi ha un estret conducte en forma de xemeneia les parets del qual són rectilínies i gairebé verticals (FORNÓS, 1999). Aquest conducte sol estar reblert per bretxes i blocs caiguts provinents tant de la Unitat d'Esculls com de la Unitat Calcàries de Santanyí. Les bretxes es fusionen cap a la part superior de la xemeneia amb la depressió sinclinal que es formà per deformació plàstica dels nivells inferiors de la calcària de Santanyí.

Figura 7: Àngel Ginés al peu del col·lapse càrstic de la Figura 6a.
Figure 7: Àngel Ginés at the foot of the karst collapse of Figure 6a.

Els tipus de bretxes més evidents són les generades pel col·lapse del sostre i les parets laterals del rocam on s'ha format el buit, així com pel rebliment de roques i clasts procedents de la Unitat Calcàries de Santanyí. La porositat entre bretxes s'emplena amb ciment carbonatat de diversos tipus, freàtic i/o vadós depenent de la situació diagenètica i temporal. En els casos en què les bretxes impliquen els nivells inferiors de la Unitat Calcàries de Santanyí (fàcies de manglar), les bretxes suportades amb matriu contenen clasts de subangulosos a subarrodonits, de mida menor (centimètrica) i una matriu composta per calcarenites i calcisiltites. Quan també es veuen implicats en l'enfonsament els nivells superiors de les Calcàries de Santanyí –formats per grans oolítics–, els dipòsits de bretxes resultants són oligomíctics i contenen clasts angulosos, de mides que van des d'uns pocs centímetres, fins a més d'un metre, sense matriu. En alguns casos els clasts mostren deformació plàstica.

Les dades morfomètriques d'aquestes estructures de col·lapse són variables. Tanmateix, a partir de la població de col·lapses identificats a la zona d'estudi (18 paleocol·lapses) (Figura 3), en termes estadístics el diàmetre màxim de la forma de l'embut (sinclinal) superior oscil·la entre 25 i 90 m, encara que també es poden trobar xemeneies molt reduïdes (<5 m de diàmetre). La seva profunditat màxima oscil·la entre 3,5 i 14 m; l'angle de les parets de les depressions és d'entre 20° i 30°. L'angle pot superar els 45° a la xemeneia on també s'hi observen parets verticals. El diàmetre de la xemeneia, en els escassos casos en que s'ha pogut observar, pot oscil·lar entre un i uns pocs metres.

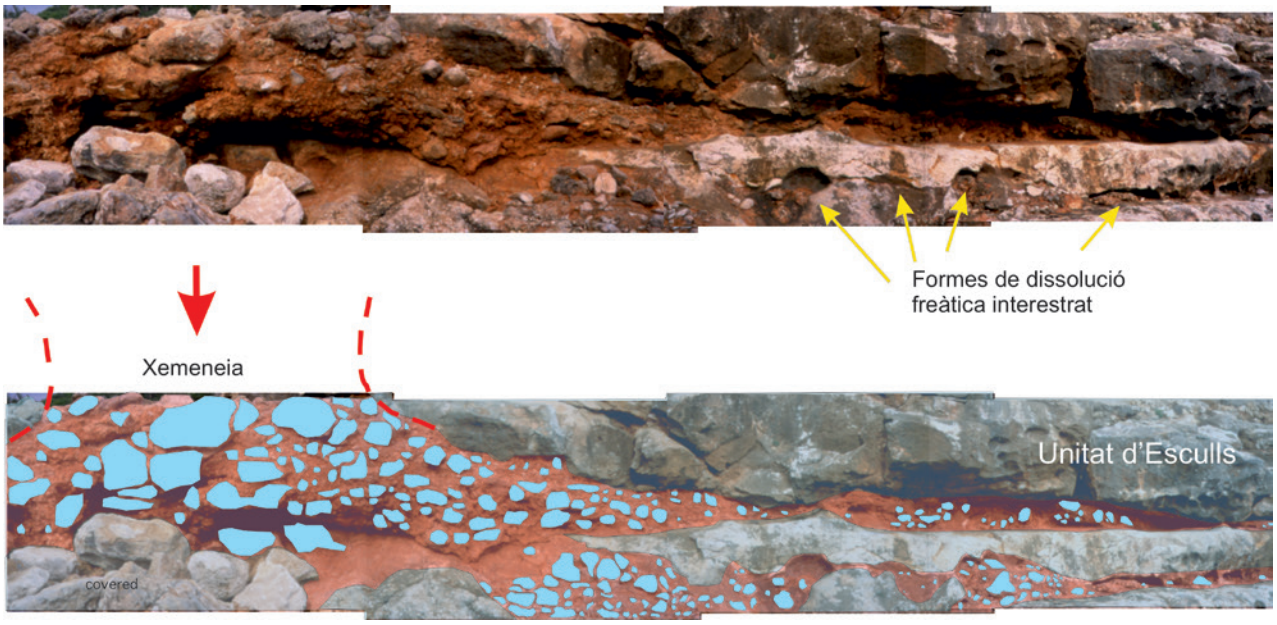


Figura 8: Rebliment de bretxes i llims vermellosos.
Figure 8: Filling of breccias and reddish silts.

Caracterització sísmica dels paleocol·lapses càrstics

Tot i que no és habitual en la bibliografia geològica, diversos autors han identificat estructures de col·lapse a perfils de sísmica de reflexió (DE BATIST & VERSTEEG, 1999; BERTONI & CARTWRIGHT, 2005; BROUGHTON, 2017; DANIELS et al., 2020; entre d'altres), bé siguin col·lapses d'origen càrstic –principalment relacionats amb plataformes carbonatades– o col·lapses d'origen evaporític –relacionats amb guixos o doms salins–, normalment associats a grans llacs.

Els mètodes de reflexió sísmica són, així, capaços de delinear l'estructura geològica dels col·lapses a algunes localitats. Als perfils sísmics de la nostra zona d'estudi, és a dir, la plataforma carbonatada del miocè superior dels voltants de Cala Mondragó (Figura 3) s'han pogut identificar alguns casos de col·lapse a partir dels reflectors. L'èxit d'aquestes tècniques depèn de l'existència de contrastos de velocitat i/o densitat en els materials geològics dins i al voltant dels col·lapses. En el cas estudiat, la variació litològica i textural entre les unitats és escassa, però encara que les dues unitats involucrades en els col·lapses són de naturalesa calcària, les calcàries de la Unitat Calcàries de Santanyí són més margoses i amb una marcada estratificació, mentre que la Unitat d'Esculls es caracteritza per la seva alta porositat i estratificació massiva.

Malgrat la uniformitat litològica, als perfils sísmics són fàcils de definir uns reflectors superiors molt continus, d'alta amplitud i baixa freqüència, amb un pendent molt suau cap a l'est, sense deformacions, que es corresponen amb els materials del plio-quaternari. Per sota d'aquesta unitat, els reflectors perden continuïtat, l'amplitud és un poc més baixa encara que la freqüència es manté respecte a la unitat superior. No obstant això, la diferència més notable és que aquests reflectors inferiors estan plegats. S'interpreten aquests reflectors com corresponents als materials del miocè superior, degut al caràcter sísmic discontinu propi dels bancs carbonatats d'alta velocitat que emmascaren els reflectors subjacents. Observats en detall, alguns reflectors presenten una flexió i/o plegament que caracteritzen la proximitat del col·lapse.

Els trets que defineixen més clarament un col·lapse als perfils sísmics són: 1) la interrupció de la continuïtat dels reflectors d'amplitud més baixa i alta freqüència (corresponent a la Unitat Calcàries de Santanyí); 2) la flexió dels reflectors en les proximitats de les interrupcions, equivalent, respecte dels col·lapses que es poden veure a les façanes dels penya-segats per sobre del nivell marí, a la flexió de les capes de la Unitat Calcàries de Santanyí, i 3) el canvi de fàcies sísmica a l'altre costat de la flexió, on els reflectors tenen una estructura completament desordenada, els quals correspondrien a la zona de bretxes central del col·lapse, les xemeneies abans descrites. Les Figures 9, 10, 11 i 12 mostren exemples de col·lapses interpretats als perfils sísmics, els quals presenten les 3 característiques anteriors.

Així, a la Figura 9 es mostra un fragment del perfil sísmic 3 (Figura 3). S'hi observen, per sota d'uns reflectors superiors molt continus de baixa freqüència i alta amplitud, uns reflectors, no tan

continus però també de baixa freqüència i alta amplitud, plegats en forma sinclinal. Al centre del sinclinal els reflectors perden continuïtat i tenen un aspecte desordenat. L'amplitud del sinclinal és de l'ordre de 90 m, mentre que l'amplada de la zona central, interpretada com a zona de bretxes, és aproximadament de 10 m.

El col·lapse càrstic de la Figura 10 presenta la mateixa geometria que el de la Figura 9, però l'amplada de la zona de bretxes central és més gran (30 m). El col·lapse es formà en el lapse de temps que va des de la capa que correspon al reflector blau superior i a la capa corresponent al reflector inferior horitzontal groc. Les Figures 11 i 12 també mostren la interpretació que s'ha fet dels paleocol·lapses càrstics als perfils sísmics. La morfologia general és la mateixa; la diferència és l'amplada de la zona de bretxes, la qual és de 25 m a la Figura 11 i de 15 m a la Figura 12.

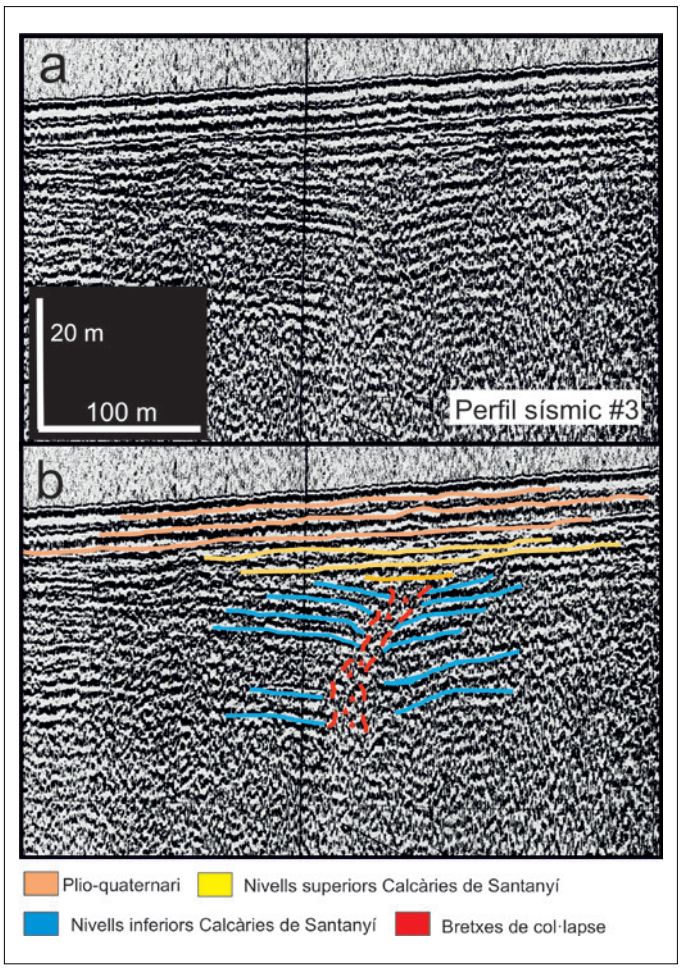


Figura 9: Col·lapse càrstic interpretat al perfil sísmic 3 (situació a la Figura 3).
Figure 9: Karst collapse interpreted in seismic profile 3 (situation in Figure 3).

Discussió

Els paleocol·lapses càrstics de la zona d'estudi es formaren principalment en condicions submarines, encara que a molt poca profunditat, tal com s'intueix pels nivells sinsedimentaris observats durant la deposició de la Unitat Calcàries de Santanyí. Efectivament, la creació dels buits degut a la dissolució de la calcària provoca una flexió dels nivells superiors formant una estructura sinclinal. Si els materials que reomplen els sinclinals es dipositen horitzontals, vol dir que el rebliment és posterior al col·lapse (Figura 4d). En canvi, si les capes del rebliment es disposen formant un sinclinal progressivament més lax cap al sostre, indiquen que els materials del rebliment són sincrònics amb el col·lapse (Figura 4d). En el camp s'observa com les capes del rebliment solen formar un sinclinal progressivament més lax cap al sostre, com succeeix, per exemple, al Caló de Ses Egos (Figura 4a), al Caló des Macs (Figura 4b) i al Savinar (Figura 6). En canvi, als perfils sísmics el rebliment dels col·lapses interpretats sembla disposar-se de manera horitzontal a les Figures 9 i 10, indicant que el col·lapse és anterior al rebliment, mentre que als col·lapses de les Figures 11 i 12 sembla un rebliment formant un sinclinal progressivament més lax cap al sostre. En qualsevol cas no es pot descartar que hi hagi col·lapses que s'han desenvolupat sincrònicament amb el rebliment,

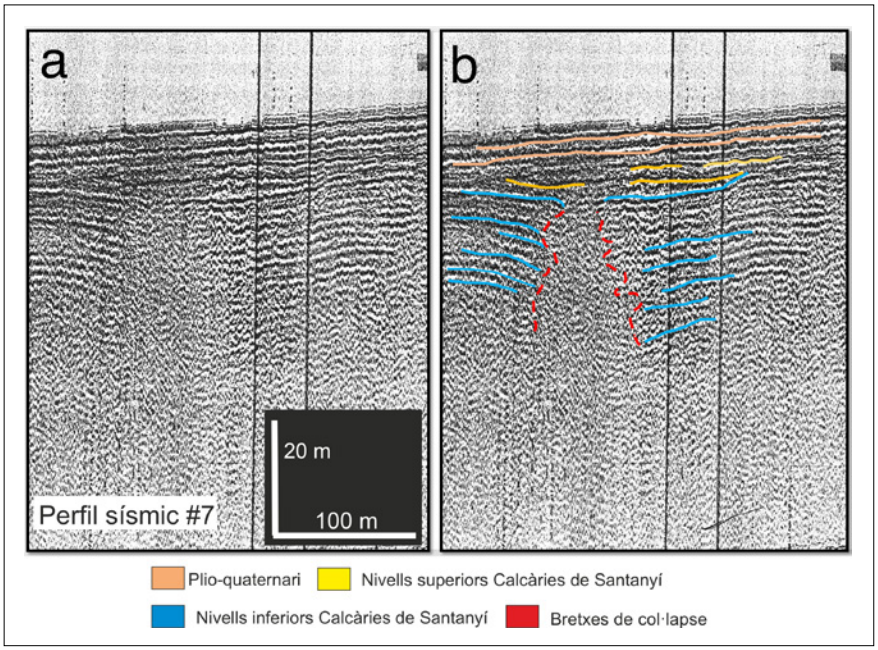


Figura 10: Col·lapse càrstic interpretat al perfil sísmic 7 (situació a la Figura 3).
Figure 10: Karst collapse interpreted in seismic profile 7 (situation in Figure 3).

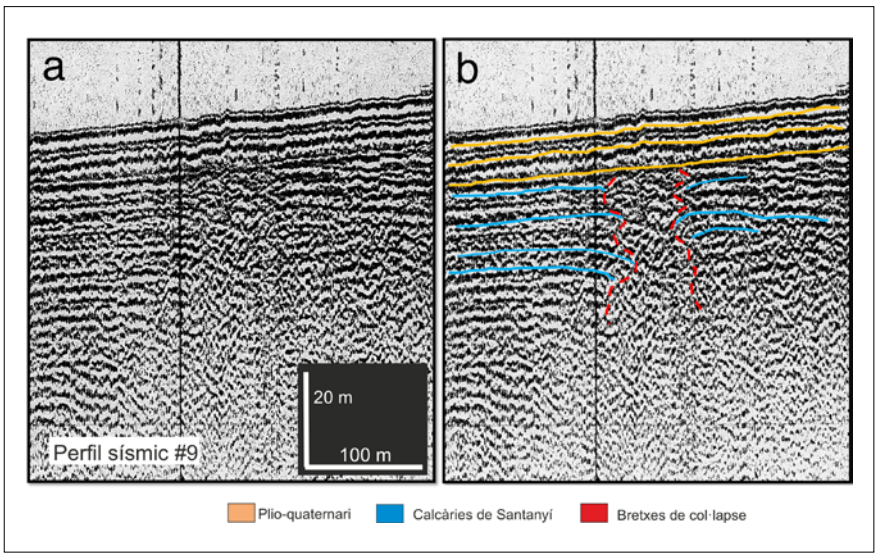


Figura 11: Col·lapse càrstic interpretat al perfil sísmic 9 (situació a la Figura 3).
Figure 11: Karst collapse interpreted in seismic profile 9 (situation in Figure 3).

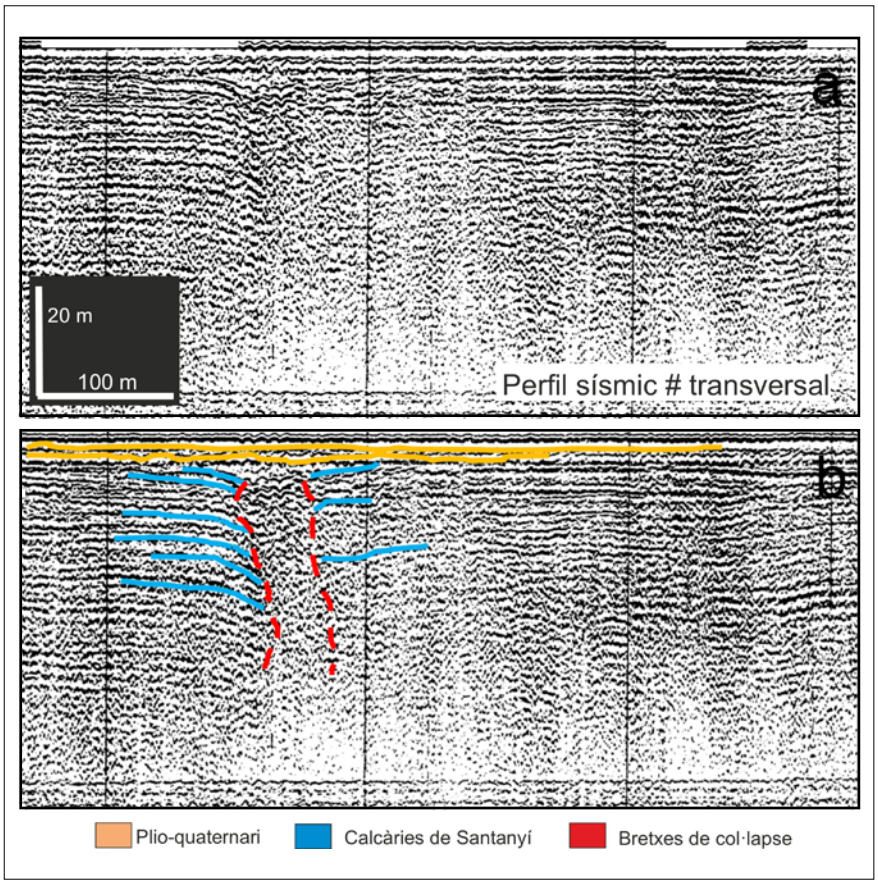


Figura 12: Col·lapse càrstic interpretat al perfil sísmic transversal (situació a la Figura 3).
Figure 12: Karst collapse interpreted in the transversal seismic profile (situation in Figure 3).

és a dir, durant la sedimentació de la Unitat Calcàries de Santanyí i col·lapses que s'hagin format abans del rebliment horitzontal, és a dir, abans de la deposició dels nivells més alts de la Unitat Calcàries de Santanyí.

Tots els col·lapses càrstics observats semblen ser el producte de la dissolució de les calcàries de la Unitat d'Esculls a través del flux subterrani dins de l'aqüífer del miocè superior en condicions freàtiques (Figura 8). A causa de les condicions costaneres durant la deposició de la Unitat d'Esculls i la Unitat Calcàries de Santanyí, el flux subterrani des de les Serres de Llevant adjacents cap a l'aqüífer del miocè superior pot haver tingut un paper important. Els carbonats de la Unitat d'Esculls no estaven coberts per una capa impermeable i haurien estat sotmesos al moviment descendent de l'aigua de pluja per percolació. Aquest fet pot haver dissolt els carbonats menys resistents (FORNÓS, 1999; ROBLEDO & POMAR, 2000) o bé zones on hi hagués fracturació. En altres paraules, és fàcil pensar que la dissolució i la formació de cavitats més pronunciades poden haver tingut lloc, inicialment, durant el nivell del mar baix del miocè superior (HARDENBOL et al., 1998) quan la plataforma calcària de l'escull restà exposada aèriament. Així doncs, les evidències donades per l'estratigrafia, el rebliment i la morfologia dels col·lapses, suggereixen que la dissolució major inicial es produí en condicions subaèries relacionada en gran part amb la denominada crisi de salinitat miocena durant l'època messiniana (MAS-GORNALS, 2018) i segurament, la dissolució menor i el col·lapse es produïren en condicions submarines però de poca profunditat. No s'ha d'obviar tampoc el paper que pugui haver tingut la zona de mescla d'aigües meteòriques i marines tenint en compte les característiques paleoambientals litorals dels tipus de dipòsits carbonatats presents, així com el pes de la càrrega dels materials que es superposen a la Unitat d'Esculls.

La variabilitat dimensional és una de les característiques d'aquest tipus de col·lapse. Les obertures molt petites a la superfície de la roca calcària poden crear depressions, desenes de vegades més grans, si hi ha prou espai buit dins de la roca calcària per acceptar el sediment subsident (CHEN & BECK, 1989). No hi ha una relació directa entre les dimensions de la secció de l'eix i el col·lapse de la superfície. Així,

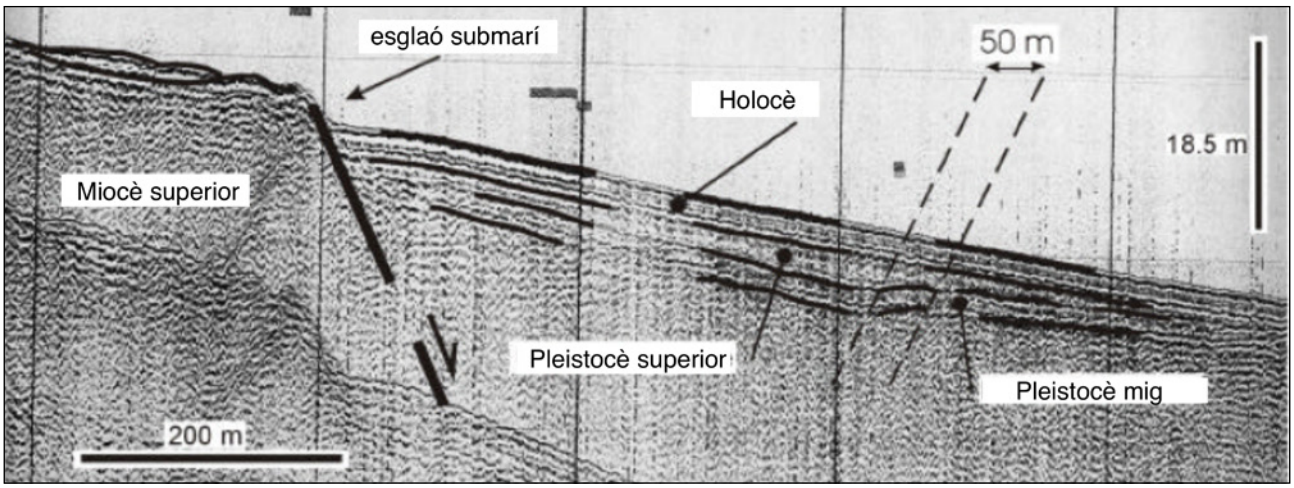


Figura 13: Falla normal, origen del penya-segat costaner de la zona d'estudi, interpretada al perfil sísmic 6 (situació a la Figura 3).
Figure 13: Normal fault, origin of the coastal cliff of the study area, interpreted in seismic profile 6 (situation in Figure 3).

com demostraren CHEN & BECK (1989) en el modelatge de dolines, el col·lapse superficial es produeix més ràpidament i és més gran si l'obertura a la roca calcària és més gran. La depressió superficial pot ser moltes vegades més gran que l'obertura a la roca calcària. Les dimensions dels col·lapses estudiats en superfície són molt semblants a les dimensions dels col·lapses submarins interpretats als perfils sísmics i oscil·len entre els 25 i els 90 m de diàmetre.

Seguint una secció perpendicular a la línia de costa de terra a mar, el pas dels col·lapses observables al penya-segat als col·lapses submarins es fa mitjançant una falla normal (FORNÓS et al., 2006) que enfonsa el bloc marí respecte el bloc terrestre (Figura 13). El perfil sísmic de la Figura 13 és una part del perfil sísmic 6 de la Figura 3. Aquest perfil sísmic mostra un esglaó clar al fons del mar. Aquest esglaó delimita dues àrees amb diferents atributs de reflexió. Al nord-oest de l'esglaó, els reflectors inferiors tenen una geometria desordenada, els reflectors superiors són paral·lels i tenen una baixa freqüència i una amplitud elevada, i els reflectors més superficials (també de baixa freqüència i alta amplitud) se sobreposen als reflectors que tenen a sota. Al sud-est de l'esglaó es poden diferenciar quatre unitats diferents, de la base a la part superior: 1) la unitat més baixa té uns reflectors desordenats; 2) la segona unitat consta de reflectors molt continus, d'alta amplitud i baixa freqüència; aquesta unitat s'enfonsa cap al SE i es plega suaument; 3) la tercera unitat té una fàcies sísmica transparent i, 4) la unitat superior consta d'uns reflectors de gran amplitud i baixa freqüència cabussant suaument cap al SE mostrant una gran continuïtat.

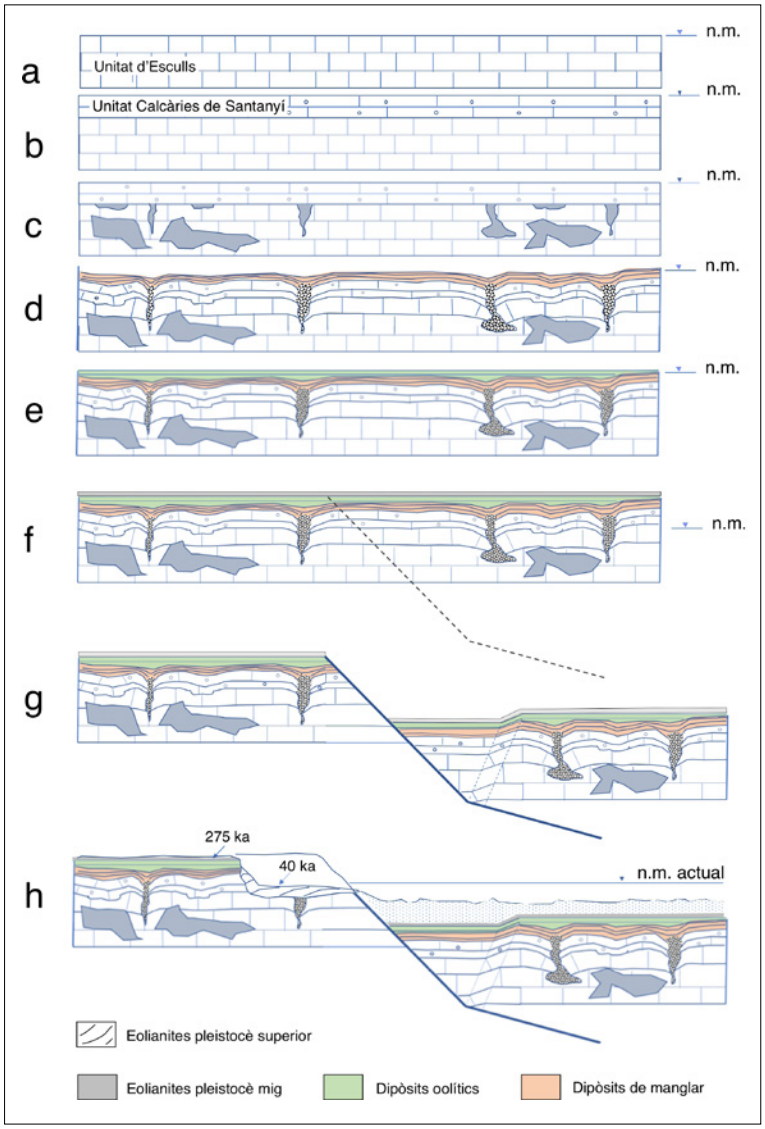


Figura 14: Evolució geodinàmica del litoral de Santanyí.
Figure 14: Geodynamic evolution of the coast of Santanyí.

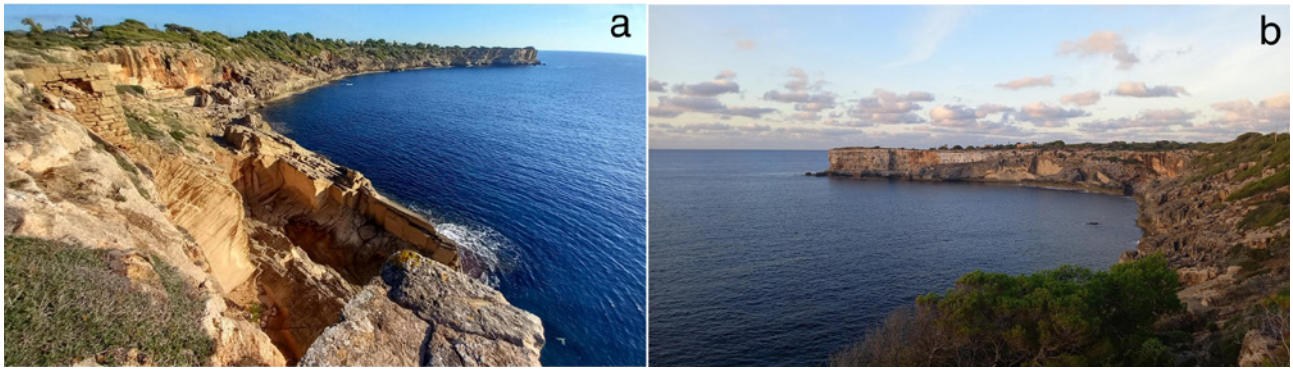


Figura 15: Dunes adossades al penya-segat format per la Unitat Calcàries de Santanyí a s'Estret del Temps.
Figure 15: Dunes attached to the cliff formed by the Calcàries de Santanyí Unit in s'Estret del Temps.

Interpretem l'esglaó al fons del mar com una falla extensional que cabussa cap al SE i que esdevé més horitzontal en fondària. S'aplica el model de XIAO & SUPPE (1992) per interpretar l'estructura de la falla observada al perfil sísmic. L'enfonsament del bloc SE produeix un espai d'acomodació que s'omple amb les unitats transparents i superiors. Els reflectors de la unitat plegada corresponen a materials anteriors al moviment de la falla. L'amplada del planell plegat (50 m) ens dóna el salt de la falla, la qual es considera com l'origen del penya-segat que delimita la part subaèria de la part submarina.

Per tal de datar de forma relativa la formació i desplaçament de la falla, així com per tal de justificar el motiu pel qual apareixen els paleocol·lapses càrstics als reflectors de la zona submergida, es presenta la Figura 14 que mostra l'evolució geodinàmica del litoral de Santanyí, tant de la part subaèria com de la part submarina. La història geològica comença amb la sedimentació de la Unitat d'Esculls del miocè superior (Figura 14a). Posteriorment, es dipositen els nivells inferiors de la Unitat Calcàries de Santanyí (Figura 14b) la qual és seguida per un procés de carstificació de les calcàries esculloses que dona lloc a buits que deixen "penjats" els nivells inferiors de la Unitat Calcàries de Santanyí (Figura 14c). Tant els buits verticals com els horitzontals provoquen una flexió sinclinal dels nivells inferiors d'aquesta unitat (Figura 14d). Els nivells entremitjos d'aquesta unitat poden tenir dues disposicions: 1) es dipositen horitzontals, fossilitzant el col·lapse, o bé 2) poden tenir una disposició en sinclinal més laxa cap al nucli del sinclinal indicant que el col·lapse se segueix formant durant la deposició d'aquests nivells entremitjos (Figura 14e). Els buits verticals solen dur associats, a més de la flexió sinclinal, una zona central de bretxes (Figura 14d). La següent seqüència (Figura 14e) és el dipòsit dels nivells superiors de la Unitat Calcàries de Santanyí, horitzontals segellant tots els col·lapses. A sobre d'aquesta unitat (Figura 14f) es troba una seqüència d'eolianites del pleistocè mig (275 ka, segons NIELSEN et al., 2004). Amb posterioritat a la deposició de les eolianites es mou la falla deixant un bloc enfonsat (el bloc de la part del mar) i un bloc aixecat (el bloc de la part de terra) creant un penya-segat (Figura 14g), el qual ha anat retrocedint fins que unes dunes adossades al penya-segat (Figures 14h i 15), amb una antiguitat de 40 ka (CLEMMENSEN et al., 2001), l'han fossilitzat.

Conclusions

Dues unitats deposicionals del miocè superior de Mallorca estan involucrades en les estructures de col·lapse càrstic que s'observen en els penya-segats costaners del terme municipal de Santanyí. De la base a la part superior: la Unitat d'Esculls i la Unitat de Calcàries de Santanyí. La Unitat de Calcàries de Santanyí està formada per fàcies d'estromatòlits i oolites i es troba sobre una àmplia plataforma d'esculls coral·lins del tortonià tardà-messinià. Es formà en una plataforma carbonatada marina poc profunda dominada per les barres d'arena, els estromatòlits i els manglars.

Els col·lapses paleocàrstics es formaren a partir de la dissolució de nivells de la Unitat d'Esculls en el moment en que ja s'havien dipositat nivells inferiors de la Unitat Calcàries de Santanyí, els quals actuen com una cobertora plàstica. Una vegada creat el buit a la Unitat d'Esculls, els nivells inferiors de la Unitat de Calcàries de Santanyí col·lapsaren deformant-se en forma de sinclinal, vist en dues dimensions, i en forma d'embut, vist en tres dimensions. En el mateix buit, o en les seves proximitats, s'hi dipositaren bretxes formades a partir del col·lapse de nivells superiors parcialment consolidats. Els buits entre bretxes estan recoberts de ciment carbonatat amb diversos episodis de creixement. En alguns casos, llims i argiles vermelles constitueixen el rebliment final de la cavitat, que no és necessàriament contemporani amb la formació de bretxes.

Els col·lapses paleocàrstics identificats al litoral de Santanyí també s'han interpretat als perfils sísmics realitzats a la part marina de la costa de Santanyí. La geometria d'aquests col·lapses (ara submarins) és la d'uns reflectors inferiors plegats en forma de sinclinal, separats per una zona central de reflectors desordenats que corresponen a la zona de bretxes. Els reflectors superiors tenen una disposició horitzontal, fossilitzant el col·lapse. Fins ara no s'ha trobat cap evidència clara de connexió directa entre els col·lapses càrstics del miocè superior i les dolines actuals en sentit estricte encara que en alguns casos excepcionals els buits poden arribar a la superfície degut al col·lapse de les formes endocàrstiques subjacents. L'absència de morfologies d'exposició subaèria notables apunta a un model genètic estretament relacionat amb el concepte de subsidència càrstica subjacent.

Agraïments

Volem dedicar el present treball al nostre estimat amic Àngel Ginés, que ens va deixar a principis d'enguany amb qui vam tenir diversos intercanvis d'opinió sobre la formació dels paleocol·lapses càrstics. Gràcies també al Dr. Jorge Rey per la col·laboració en les campanyes oceanogràfiques i a la feina dels revisors de la Societat Espeleològica Balear que segur han fet millorar la redacció del treball.

La present contribució s'emmarca dins del projecte PID2020-112720GB-I00/ finançat per l'Agencia Estatal de Investigación (MCINN).

Bibliografia

BERTONI, C.; CARTWRIGT, J. (2005): 3D seismic analysis of circular evaporite dissolution structures, Eastern Mediterranean. *Journal of the Geological Society*, 162 (6): 909-926.

BROUGTHON, P.L. (2017): Breccia pipe and sinkhole linked fluidized beds and debris flows in the Athabasca Oil Sands: dynamics of evaporite karst collapse-induced fault block col·lisions. *Bulletin of Canadian Petroleum*, 65(1): 200-234.

BUTZER, K.W. & CUERDA, J.(1962): Nuevos yacimientos marinos cuaternarios de las Baleares. *Notas y Comunicaciones del IGME*, 67: 25-70.

CHEN, J. & BECK, B.F. (1989): Qualitative modelling of the cover-collapse process. *3rd Multidisciplinary Conference On Sinkholes*, St. Petersburg Beach, Florida, pp. 89-95.

CLEMMENSEN, L.B.; LISBORG, T.; FORNÓS, J.J. & BROMLEY, R.G. (2001): Cliff-front aeolian and colluvial deposits, Mallorca, Western Mediterranean: a record of climatic and environmental change during the last glacial period. *Bulletin of the Geological Society of Denmark,* 48: 217-232.

CUERDA, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Institut d'Estudis Baleàrics. Diputació Provincial de Balears. Palma (Mallorca), 304 pp.

DANIELS, S.E.; TUCKER, M.E.; MAWSON, J.; HOLDSWORTH, R.E.; LONG, J.J.; GLUYAS, J.G. & JONES, R.R. (2020): Nature and origin of collapse breccias in the Zechstein of NE England: local observations with cross-border petroleum exploration and production significance, across the North Sea. *Geological Society, London. Special Publications*, 494: 269-299.

DE BATIST M. & VERSTEEG W.H. (1999): Seismic stratigraphy of the Mesozoic and Cenozoic in northern Belgium: main results of a high-resolution reflection seismic survey along rivers and canals. *Geologie en Mijnbouw*, 77: 17-37.

ESTEBAN, M. (1979/80): Significance of the Upper Miocene reefs of the Western Mediterranean. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 29: 169-188.

FORD, D. & WILLIAMS, P. (2007): *Karst Hydrologeology and Geomorphology*. Wiley, 562 pp.

FORNÓS, J.J. (1999): Karst collapse phenomena in the Upper Miocene of Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). *Acta Geologica Hungarica*, 42(2): 237-250.

FORNÓS, J.J.; BALAGUER, P.; GELABERT, B. & GÓMEZ-PUJOL, LL. (2006): Pleistocene formation, evolution and retreat rates of a carbonate coastal cliff (Mallorca Island, Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research (Special Issue),* 49: 15-21.

FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (1995): Lithology and tectonics of the Majorcan karst. *Endins*, 20. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 27-43.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS J. (1989): Paleokarst collapse features in the Uppermost Miocene of Mallorca Island (Spain). *Proceedings of the 10th International Congress of Speleology*, Budapest, 1: 46-48.

FORNÓS, J.J.; CLEMMENSEN, L.B.; GÓMEZ-PUJOL, L.; GINÉS, À. & GINÉS J. (2012): Pleistocene eolianites and low sea levels. In: GINÉS, A., GINÉS, J., GÓMEZ-PUJOL, L., ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.). *Mallorca: A Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 85-110.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, À.; GINÉS J. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1989): El paleocarst a Mallorca. *Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears,* 3: 113-124.

FORNÓS, J.J. & POMAR, L. (1984): Facies, ambientes y secuencias de plataforma carbonatada somera (Formación Calizas de Santanyí) en el Mioceno Terminal de Mallorca (Islas Baleares). *Publicaciones de Geología (Homenaje a Luis Sánchez de la Torre)*, 20: 319-330.

GINÉS, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesi Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 595 pp + 29 làms. Inèdita.

GINÉS, J.; GINÉS, À. & FORNÓS, J.J. (2011): Dades sobre paleocarst i espeleocronologia de les Illes Balears. *Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears,* 17: 213-226.

GINÉS J.; FORNÓS J.J.; GINÉS A.; MERINO A. & GRÀCIA F. (2014): Geologic constraints and speleogenesis of Cova des Pas de Vallgornera, a complex coastal cave from Mallorca Island (Western Mediterranean). *International Journal of Speleology*, 43 (2):105-124.

GÓMEZ-PUJOL, L.; GELABERT, B.; FORNÓS, J.J.; PARDO-PASCUAL, J.E.; ROSSELLÓ, V.M.; SEGURA, F. & ONAC, B.P. (2013): Structural control on the presence and character of calas: Observations from Balearic Islands limestone rock coast macroforms. *Geomorphology*, 194: 1-15.

GUTIÉRREZ, F. (2016): Sinkhole hazards. In: GUTIÉRREZ F. (ed.): *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. Oxford University Press.

HARDENBOL, J.; THIERRY, J.; FARLEY, M.B.; JACQUIN, T.; DE GRACIANSKY, P.CH. & VAIL, P.R. (1998): Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European basins. *SEPM Special Publication*, 6: 3-13.

KLIMCHOUK, A.B.; FORD, D.C.; PALMER, A.N. & DREYBRODT, W. (2000): *Speleogenesis. Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society, Huntsville, Alabama. 527 pp.

MAS-GORNALS, G. (2018): *Quan la Mediterrània es va evaporar: Evidències de la Crisi de Salinitat Messiniana a l'Illa de Mallorca*. Edicions UIB. Palma. 86 pp.

NIELSEN, K.A.; CLEMMENSEN, L.B. & FORNÓS, J.J. (2004): Middle Pleistocene magnetostratigraphy and susceptibility stratigraphy: data from a carbonate aeolian system, Mallorca, Western Mediterranean. Q*uaternary Science Reviews*, 23: 1733-1756.

POMAR, L.; ESTEBAN, M.; CALVET, F. & BARÓN, A. (1983): La Unidad Arrecifal del Mioceno Superior de Mallorca. In: *El Terciario de las Baleares*. *Libro Guía de las Excursiones del X Congreso Nacional de Sedimentología, Menorca*, pp. 139-179.

POPENOE, P.; KOHOUT, F.A. & MANHEIM, F.T. (1984): Seismic-reflection studies of sinkholes and limestone dissolution features on the north-eastern Florida shelf. *Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes*, Orlando, Florida, pp. 43-57.

PURDY, E.G. & WALTHAM, D. (1999): Reservoir implications of modern karst topography. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83 (11): 1774-1794.

ROBLEDO, P. & POMAR, L. (2000): Upper Miocene karst collapse structures of the east coast, Mallorca, Spain. *Acta Carsologica*, 29 (2): 78-184.

ROSSELLÓ, V.M. (2005): Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica. *Cuadernos de Geografía*, 77: 1-18.

SNYDER, S.W.; EVANS, M.W.; HINE, A.C. & COMPTON, J.S. (1989): Seismic expression of solution collapse features from the Florida Platform. *Proceedings of the 3rd Multidisciplinary Conference On Sinkholes, St. Petersburg Beach, Florida*, pp. 281-298.

STEEPLES, D.W.; KNAPP, R.W. & MILLER, R.D. (1984): Examination of sinkholes by seismic reflection. *Proceedings of the First Multidisciplinary Conference On Sinkholes, Orlando, Florida,* pp. 217-223.

XIAO, H. & SUPPE, J. (1992): Origin of rollover. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76 (4): 509-529.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Algunas reflexiones sobre el proceso de incorporación de $CaCO_3$ en los enterramientos en cal de la Edad del Hierro en las cuevas de las Islas Baleares

Mark VAN STRYDONCK [1] y Damià RAMIS [2]

[1] Royal Institute for Cultural Heritage. Bruselas, Bélgica. Email: marbolleke@telenet.be
[2] Investigador independiente.

Abstract

Lime burials are the archaeological remains of one of the most enigmatic burial rites in the Mediterranean Iron Age. They can be found in caves and rock shelters. Unlike other types of sites, they present unique challenges both in their appearance and in their methodology of excavation and analysis, which has made their study difficult. While early studies offered limited insight, recent advances in radiocarbon dating and petrographic analysis have begun to reveal important details about their chronology and ritual structure.

As a result of this, different theories are launched about the processes that are on the origin of these large packages of lime and bones. Most of these theories are no more than speculations and are in no way based on natural science research. Especially about the origin of the lime, there is a lot of speculation. Using the available data this article has tried to test the likelihood of the various theories. The way energy is transferred between the pyre, the body of the deceased and the limestone is one of the most crucial parameters in this study. The evaluation of this has shown that only the addition of finely ground limestone rock to the pyre can provide the observed effect.

Resumen

Los enterramientos en cal constituyen los restos arqueológicos de uno de los ritos funerarios más enigmáticos del Mediterráneo durante la Edad del Hierro. Pueden encontrarse en cuevas y abrigos rocosos. A diferencia de otros tipos de yacimientos, presentan desafíos únicos tanto en su aspecto como en su metodología de excavación y análisis, lo que ha dificultado su estudio. Si bien los primeros estudios ofrecieron una visión limitada, los avances recientes en la datación por radiocarbono y el análisis petrográfico han comenzado a revelar detalles importantes sobre su cronología y su estructura ritual.

Si bien se han formulado diferentes teorías sobre los procesos que han dado origen a estos grandes paquetes de cal y huesos, la mayoría de estas teorías no son más que especulaciones sin ninguna base en la investigación de las ciencias naturales. Especialmente, existe mucha especulación sobre el origen de la cal. Utilizando los datos disponibles, este artículo ha tratado de comprobar la verosimilitud de las diversas teorías. La forma en la que la energía se transfiere entre la pira, el cuerpo de los difuntos y la piedra caliza es uno de los parámetros más cruciales en este estudio. Su evaluación demuestra que solamente la incorporación de roca caliza finamente triturada puede proporcionar el efecto observado.

Van Strydonck, M. y Ramis, D. (2024): Algunas reflexiones sobre el proceso de incorporación de $CaCO_3$ a los enterramientos en cal de la Edad del Hierro en las cuevas de las Islas Baleares.
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 165-174. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 23 octubre 2024; **Revisat:** 7 novembre 2024; **Acceptat:** 12 novembre 2024.
Publicat online: 19 novembre 2024.

Introducció

Los llamados 'enterramientos en cal' de las islas de Mallorca y Menorca (archipiélago de las Islas Baleares) son los restos materiales de uno de los ritos funerarios más enigmáticos de la Edad del Hierro en el Mediterráneo. Prácticamente todos los yacimientos de estas características se encuentran en cuevas o en abrigos rocosos. Aunque los estudios recientes han revelado que este ritual de enterramiento era esencialmente una incineración (VAN STRYDONCK, 2020, y referencias incluidas), se ha prestado poca atención al origen de la cal, la forma de deposición y los procesos tafonómicos asociados. A pesar de ello, se han planteado toda una serie de hipótesis sobre la formación de estos enterramientos y los rituales involucrados. La mayoría de estas teorías son especulaciones que no se encuentran fundamentadas sobre la evidencia científica. Las diferentes hipótesis pueden reducirse a las siguientes diferencias esenciales que enumeramos a continuación. Algunos trabajos defienden que

los cuerpos humanos fueron cubiertos con cal viva elaborada expresamente con dicho propósito (en una especie de horno). Otros sugieren que los cuerpos fueron incinerados antes de que la cal viva fuera añadida. También se ha planteado que la cal cayó de la pared de la cueva debido al calor liberado por la pira o que la acción prolongada del calor puede haber provocado, en determinados casos, el ennegrecimiento, agrietamiento y exfoliación del techo de las cuevas. Existe además otra teoría que asume que se trata de una incineración ritual a la que se añadiría caliza en polvo. En cambio, según una variante de esta última, se colocarían bloques calcáreos sobre la pira y los cuerpos antes de prenderles fuego. Una de las teorías asume que la cal y el 'nivel negro' o *black layer*, presente de manera habitual inmediatamente bajo el nivel de cal, deben considerarse como una unidad (sincrónica) y son el resultado del mismo proceso de incineración (DEYÀ 2017, 2020a, y referencias incluidas). Uno de los problemas principales relativos a estas teorías es que son citadas, a menudo unas junto a otras, sin ninguna evaluación crítica, siendo consideradas con el mismo grado de credibilidad (e.g., COLL & CARBONELL, 2021).

Objetivo del estudio

Este estudio trata de evaluar la factibilidad de todas estas asunciones:

- ¿Se añadió la cal a la pira antes de ser encendida, en bloques o en polvo, y la transformación en cal viva se produjo durante la cremación?
- ¿Se preparó la cal viva con anterioridad y fue después añadida al enterramiento?
- ¿Es la cal viva en los enterramientos el resultado de la descomposición de la caliza de las paredes y el techo de la cueva durante el proceso de incineración (siendo una adición no intencionada)?
- ¿Existe una relación entre el denominado 'nivel negro' o *black layer* y el nivel de cal?

Para afrontar estos problemas, el presente trabajo explorará diferentes opciones y evaluará los cambios físicos de los materiales durante la cremación, así como la distribución y transferencia de la energía (calor) y el intercambio de carbono entre los diferentes componentes. Por desgracia, apenas existe información (pruebas de laboratorio o datos analíticos de los yacimientos arqueológicos) y deberemos trabajar con evidencias circunstanciales como son la transferencia de energía y carbono, las dataciones radiocarbónicas disponibles y la descripción de la localización de los yacimientos.

Transferencia de energía

Uno de los temas más importantes que deben ser tenidos en cuenta es el de la transferencia del calor (energía) desde la madera ardiendo en la pira a la atmósfera de la pira, la caliza ($CaCO_3$) y los objetos depositados.

Entre la pira, los cuerpos y los ajuares funerarios

El calor de la pira funeraria ardiendo se transmite a la atmósfera situada a su alrededor. El grado de alteración de los restos humanos y de los artefactos es un indicador de la energía (temperatura y duración) que se libera durante el ritual de cremación. Así que esta alteración nos informa del total de energía liberada durante la incineración.

En las circunstancias adecuadas, los fuegos de leña y carbón pueden liberar energía suficiente como para fundir el hierro (>1.000°C). No obstante, es necesaria una estructura especial (un horno) para provocar un aporte suplementario de oxígeno que permita alcanzar y mantener esta temperatura. La situación es diferente en una pira, tal como se discutirá más abajo.

La mayoría de los huesos que aparecen en los enterramientos en cal son de color blanco pálido. No se conserva ningún componente orgánico y

Figura 1: El hueso de la izquierda es blanco en el exterior, pero su interior es negro. El hueso de la derecha es completamente blanco. Ambos huesos proceden del mismo contexto arqueológico de Son Matge (Valldemossa, Mallorca) (escala 1 cm).
Figure 1: The bone left is white on the outside but black on the inside. The bone on the right is completely white. Both bones come from the same archaeological unit at Son Matge (Valldemossa, Mallorca) (scale 1 cm).

Muestra	Código de laboratorio	Edad-^{14}C (BP)	SF	Δ Edad-^{14}C	$C_{apatita}$/peso total del hueso (‰)
Exterior del muro talayótico					
Valor de consenso de la datación de la cal		2.095 ± 25			
Marrón	KIA-44831	2.650 ± 25	3,8 ± 0,5	555 ± 35	7,8
Negro	KIA-44832	2.710 ± 25	4,1 ± 0,4	615 ± 35	7,1
Blanco	KIA-44830	3.155 ± 25	8,1 ± 1,4	1.060 ± 35	1,4
Localización 2200-2204					
Valor de consenso de la datación de la cal		2.525 ± 25			
Blanco	KIA-44322	2.995 ± 30	5,7 ± 1,5	470 ± 39	2,4
Negro/marrón	KIA-45045	2.490 ± 25	3,0 ± 0,9	-35 ± 35	7,2

Tabla 1: Relación entre la diferencia de la Edad-^{14}C del hueso y el valor de consenso de la cal (Δ Edad-^{14}C), la cantidad de carbono conservada en la apatita ($C_{apatita}$/peso total del hueso) y el factor SF. Las muestras proceden de dos áreas del abrigo de Son Matge.
Table 1: Relation between the difference in ^{14}C age between the bone and the consensus value of the lime (Δ ^{14}C-age), the amount of carbon left in the apatite ($C_{apatite}$/total weight bone) and the SF factor. Samples from two areas within the Son Matge rock shelter.

los huesos presentan distorsiones irregulares debido al calor (VAN STRYDONCK, 2020). Todo ello indica que la temperatura de la cremación debe situarse alrededor de 750-800ºC. Sin embargo, ninguno de los huesos muestra signos de vitrificación (HOEFKENS, 2004), así que puede descartarse una temperatura muy superior. De hecho, el interior de algunos de los huesos no es completamente blanco (Figura 1), indicando que la transmisión de energía fue limitada, que dicha transmisión ocurrió solamente durante un breve período o bien que su distribución fue irregular. Esta suposición queda corroborada por los valores SF de los huesos (Tabla 1, Figura 2).

El factor de recristalización (SF) obtenido mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) es una herramienta para medir el grado de recristalización (WRIGHT & SCHWARCZ, 1996; OLSEN et al., 2008). Los valores SF entre 2 y 2,9 representan un hueso no quemado, valores entre 3 y 4 un hueso quemado a baja temperatura y valores superiores a 4 una recristalización parcial. Los valores superiores a 7 indican una recristalización completa del hueso.

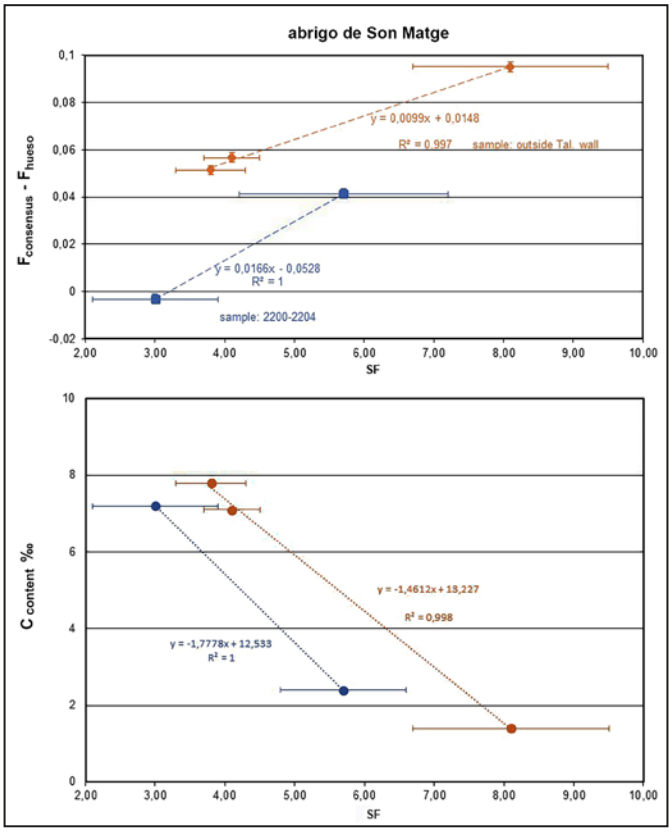


Figura 2: Relación entre la diferencia de la Edad-^{14}C del hueso y el valor de consenso de la cal (Δ Edad-^{14}C o $F_{consenso}$-F_{hueso}), la cantidad de carbono conservada en la bioapatita se expresa como la relación $C_{apatita}$/hueso (‰ por peso). Las muestras proceden de dos áreas del abrigo de Son Matge.
Figure 2: Relation between the difference in ^{14}C age between the bone and the consensus value of the lime (Δ ^{14}C-age or $F_{consensus}$-F_{bone}), the amount of carbon left in the bioapatite expressed as the ratio $C_{apatite}$/bone (‰ by weight). Samples from two areas within the Son Matge rock shelter.

Estos resultados de la Tabla 1 (columna 4, SF) muestran la existencia de amplias diferencias en el grado de incineración. Esto implica que el calor de la atmósfera de la pira no se distribuye uniformemente. Este fenómeno se discutirá más adelante.

Este grado relativamente bajo de incineración de la mayoría de los huesos es corroborado por el grado de intensidad de la destrucción de los objetos del ajuar funerario por su exposición al fuego. Todos los elementos orgánicos que pudieran haber formado parte del ajuar se han consumido. Los objetos de hierro, sin embargo, se conservan intactos a pesar de la corrosión (Figura 3a). Es algo esperado, ya que la pira no podría haber alcanzado los 1.538ºC del punto de fusión del hierro sin provocar la vitrificación de los huesos.

Los objetos de bronce también aparecen intactos en los enterramientos en cal (Figura 3b), aunque pueden observarse algunos cambios microscópicos (DEYÀ et al., 2024). El bronce funde a una temperatura de entre 900 y 950ºC, dependiendo del tipo de aleación. Así pues, la temperatura de la pira debe haber sido inferior a los 900ºC.

Pero, además, las cuentas de pasta vítrea también aparecen prácticamente intactas en los enterramientos en cal. Algunas se encuentran rotas o dañadas, pero ninguna ha sido derretida. El vidrio común comienza a ablandarse generalmente por encima de 570ºC,

dependiendo del tiempo que se mantenga a una cierta temperatura. Para fundir y deformar una cuenta de pasta de vidrio la temperatura necesaria es, al menos, de 650 a 700ºC. Esta deformación puede observarse a menudo en cremaciones o incendios (Figura 4a), pero no en el caso de enterramientos en cal (Figura 4b).

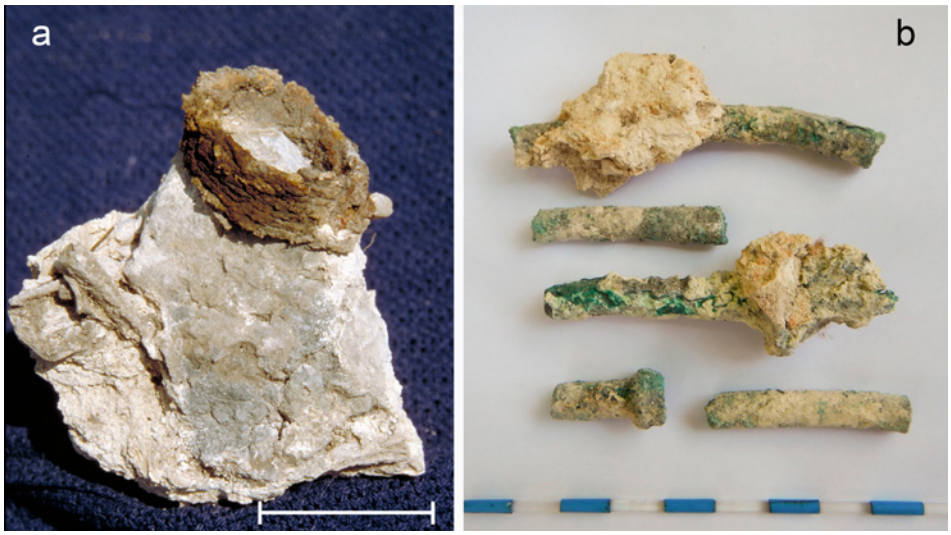


Figura 3: Fragmentos de cal con un objeto de hierro (escala 10 cm) (a) y otros de bronce (escala 1 cm) (b), procedentes del abrigo de Son Matge (VAN STRYDONCK, 2020).
Figure 3: Fragments of the lime with an iron object (scale 10 cm) (a) and a bronze object (scale 1 cm) (b) from the Son Matge rock shelter (VAN STRYDONCK, 2020).

No obstante, el estado físico de los materiales y sus condiciones de conservación deben interpretarse con precaución. En los enterramientos en cal aparecen objetos de fundición de plomo (Figura 5). El hecho de que estos elementos del ajuar funerario se hayan recuperado intactos demuestran que nunca estuvieron en contacto con la pira porque el plomo funde a 327,5ºC, muy por debajo de la temperatura alcanzada por la incineración. De hecho, aparecen a menudo lejos de los contextos de cal (WALDREN, 1982). Sin embargo, también hay ejemplos de placas de plomo parcial o completamente deformadas por el calor, formando amasijos de plomo (DEYÀ, 2020b). Así que las conclusiones sobre la transferencia de calor/energía solamente pueden basarse en aquellos objetos procedentes indudablemente del nivel de cal (Figura 6).

De este apartado puede concluirse que la energía liberada por la cremación no era muy elevada y que no se distribuía uniformemente, lo cual significa que la aportación de oxígeno era limitada o que el calor era absorbido preferentemente por otra substancia, *in casu* la caliza. Este efecto difícilmente puede ser provocado por unos bloques de gran tamaño sobre la pira, porque la zona de contacto entre los cuerpos humanos situados sobre la pira y las rocas sería pequeña.

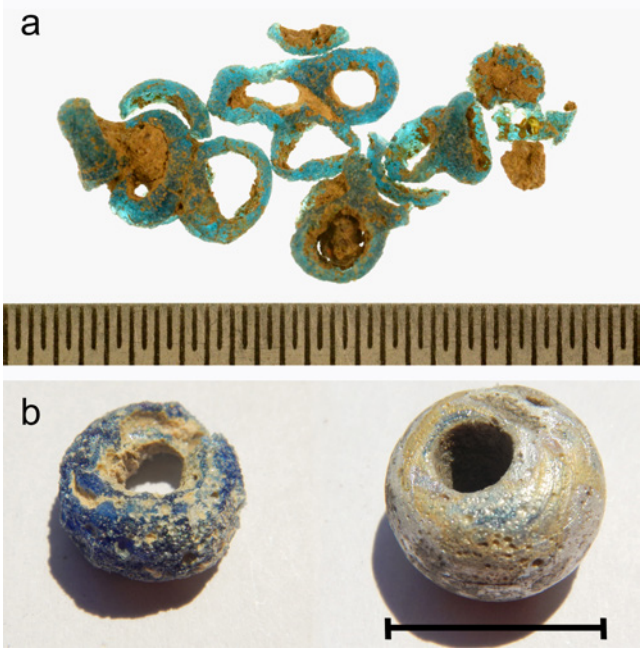


Figura 4: a) Cuentas de vidrio derretido del yacimiento de cremaciones del Bronce Final de Sierentz (Haut Rhin, France) (foto B. Gratuze) (PLOUIN et al., 2012; GRATUZE, com. pers.) (escala 0,1 cm). b) Las cuentas del enterramiento en cal de Son Matge (Valldemossa, Mallorca) se encuentran más corroídas que deformadas o derretidas. El calor de una pira puede provocar corrosión mediante la alteración de la estructura del vidrio y haciéndolo más susceptible a la corrosión. Algunos cristales tienden a ser químicamente muy frágiles y a menudo presentan síntomas de una corrosión muy acusada dependiendo del tipo de suelo en el que han sido enterrados. Estos dos factores, calor fragilizante y composición química, pueden explicar el estado de conservación de la cuenta. Las cuentas representadas en la imagen no se encuentran realmente deformadas, así que no estuvieron sometidas a una alta temperatura (escala 1 cm).

Figure 4: a) Melted glass pearls from the Final Bronze Age cremation site at Sierentz (Haut Rhin, France) (photo B. Gratuze) (PLOUIN et al. 2012; GRATUZE, pers. comm.) (escala 0,1 cm). b) The pearls from the Son Matge lime burial (Valldemossa, Mallorca) are more corroded than distorted or melted. The heat of a pyre can promote corrosion by altering the structure of the glass and making it more susceptible to corrosion. Certain glasses tend to be very fragile chemically and often exhibit very pronounced corrosion symptoms depending on the soil they are buried in. These two factors, embrittling heat and chemical composition could be at the origin of the state of the pearl. The depicted pearls do not appear really deformed, so they were not subjected to a high temperature (scale 1 cm).

Figura 5: Objetos de plomo intactos (Son Matge, Valldemossa, Mallorca) (escala aprox. 10 cm) (a) y objetos de bronce fundidos (escala 1 cm), según DEYÀ (2020b) (b).
Figure 5: Intact lead objects (Son Matge, Valldemossa, Mallorca) (scale aprox. 10 cm) (a) and melted lead objects after DEYÀ (2020b) (b).

Entre la pira y la caliza

La roca caliza se descompone en cal viva a alta temperatura de acuerdo con la reacción química: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$. Se trata de un fenómeno conocido por los habitantes de las Islas Baleares durante la Edad del Hierro, según KOPPER & ROSSELLÓ-BORDOY (1974). Se considera que la temperatura a la cual la caliza produce óxido de calcio es de 825ºC, aunque la descomposición de la caliza depende de muchos factores como la densidad de la roca o el tamaño de los bloques. Esta temperatura es, de acuerdo con la discusión del apartado anterior, la máxima posible que se obtendría en la atmósfera de la pira.

Existe un ejemplo en Mallorca donde la pared de un edificio de fines de la Edad del Bronce se transformó en cal viva a causa de un incendio. Se trata del talayot de Son Oms, utilizado como granero, que sufrió un incendio que convirtió parte de la roca caliza en cal viva (VAN STRYDONCK, 2020). La forma de un talayot circular se asemeja a la de un horno primitivo (Figura 7). El diámetro exterior en la base es algo mayor que en la parte superior y presenta una única abertura, un portal a nivel de suelo. Un incendio en el interior de un edificio de estas características crea un vacío parcial que provoca a su vez la entrada de aire (oxígeno) exterior, favoreciendo la combustión y la entrada de más oxígeno que permite alcanzar una temperatura muy alta. Al igual que en un horno, la temperatura alcanzada podría llegar a ser muy superior a la de un sistema al aire libre como una pira. Sin embargo, la caliza de una muestra tomada de este talayot todavía contenía un 19,2% de carbono mineral, una cantidad muy superior a la de la caliza de los enterramientos en cal. Esta última contiene entre <10% y 0% de carbono mineral (VAN STRYDONCK et al., 2020), evidenciando que la transferencia de calor (energía) de la pira a la roca caliza tiene que haber sido mucho más alta o más eficiente que en el caso de Son Oms. Es prácticamente imposible que haya sido mucho más alta porque un fuego al aire libre nunca genera la cantidad de calor que una estructura tipo horno.

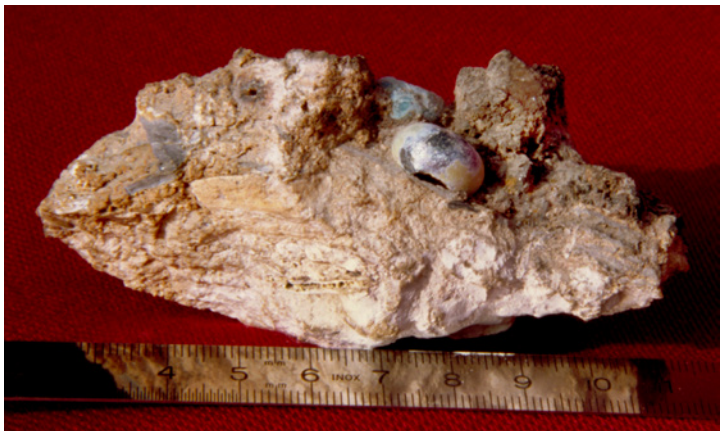


Figura 6: Cuentas de vidrio incrustadas en la cal (Son Matge, Valldemossa, Mallorca) (escala 1 cm).
Figure 6: Glass pearls embedded in the lime (Son Matge, Valldemossa, Mallorca) (scale 1 cm).

Pero si la roca caliza se tritura en pequeños fragmentos, el contacto de las superficies se incrementa exponencialmente, dando lugar a una transferencia de energía más eficiente, aunque por otra parte, disminuye la transferencia de energía entre la pira y los huesos y objetos del ajuar funerario. Ello explica también las amplias diferencias tanto en el factor SF como en los grados de incineración (Tabla 1). La gran variabilidad en la transferencia de energía (temperatura y tiempo de exposición) entre la pira ardiendo y los objetos situados sobre ella, tal como se ha tratado en el apartado anterior, solamente puede explicarse si el calor es bloqueado por algún nivel de material distribuido irregularmente en el interior o en la parte superior de la pira. Las pruebas de laboratorio han mostrado que el polvo de

caliza protege del calor a los cuerpos situados sobre la pira (VAN STRYDONCK, 2020, y referencias incluidas). Así pues, el grado de incineración depende, en parte, del grado de cobertura mediante el polvo de caliza. Este tipo de contacto tan intenso no puede alcanzarse con bloques calizos de tamaño relativamente grande situados sobre la pira.

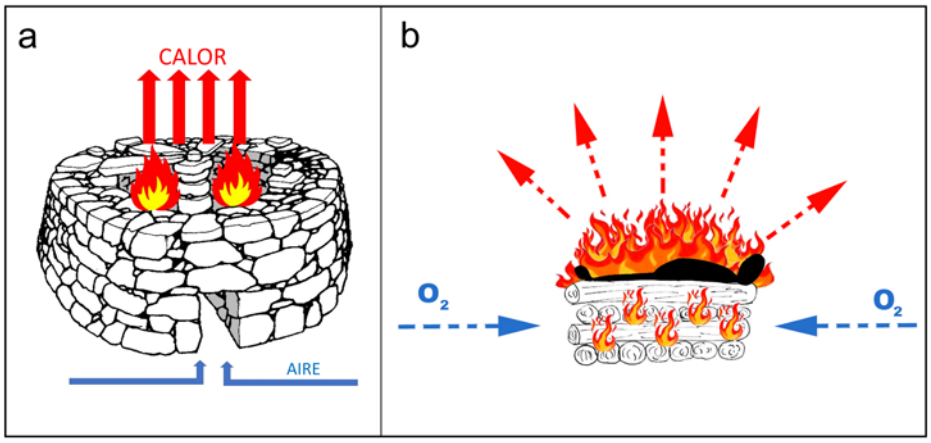


Figura 7: La forma de un talayot se asemeja a la de un horno primitivo (a). Una pira es una estructura mucho más abierta (b).
Figure 7: The shape of a talayot resembles a primitive kiln (a). A pyre is a much more open structure (b).

La alta temperatura necesaria para descomponer el carbonato de la roca hace improbable que el calor de la pira, si ésta estuviera situada en el interior de una cueva (tal como se discutirá más adelante), pueda descomponer la caliza del techo y las paredes de la cavidad. El techo de la mayoría de cuevas y abrigos se encuentra a varios metros sobre el nivel de suelo. Ello implica que los gases emitidos por la pira se habrían enfriado a una temperatura por debajo de 825ºC antes de alcanzar el techo, imposibilitando que pudieran afectarlo. Incluso asumiendo que la temperatura cerca del techo de la cueva fuera los suficientemente alta como para descomponer la cal, la suposición de que grandes bloques pudieran desprenderse del techo se contradice con la observación de la degradación de las paredes de los hornos de cal (Figura 8). La superficie de los bloques calizos de la pared de los hornos de cal es blanda y polvorienta, pero no se desprenden piedras (véase el horno de cal de Trebalúger, en VAN STRYDONCK, 2020).

Esto no impide, asumiendo que la ceremonia de cremación hubiera tenido lugar en el interior de la cueva, que el fuego pudiera haber dejado algunas marcas en sus techos y paredes. Pero el recubrimiento negro presente en los techos de algunas cuevas (DEYÀ et al., 2024), si no fue provocado por una actividad posterior en la cavidad, como depósito de contrabando o establo, demuestra que la temperatura ha descendido por debajo de los 400°C, la temperatura a la que todo el carbono se transforma en CO_2.

A causa del modo de transferencia del calor, la idea de que el 'nivel negro' inferior o *black layer* (VAN STRYDONCK, 2020) y el enterramiento en cal forman una única unidad (DEYÀ, 2017) presenta algunos defectos importantes. Si se trata de un único nivel, debe considerarse que no está alterado y que la incineración se llevó a cabo in situ. Sin embargo, el 'nivel negro' subyacente es el resultado de un incendio breve y apresurado (temperatura <400ºC) (Figura 9).

La energía liberada no fue suficiente para eliminar el carbono orgánico de los huesos de ese estrato ni para provocar la aparición de los rasgos característicos de la cremación como el

Figura 8: Horno de cal de Trebalúger (Menorca) (a) y un detalle de la cara interior del muro (b).
Figure 8: A lime kiln at Trebalúger (Menorca) (a) and a detail of the inner wall (b).

Figura 9: Hueso negro en el nivel oscuro situado bajo la capa de enterramientos en cal (a) (escala 1 cm), y detalle (b) (Cova de na Prior, Barranc de Binigaus, Menorca).
Figure 9: Black bone in the dark layer under the lime burial (a) (scale 1 cm) and a detail (b) (Cova de Na Prior, Barranc de Binigaus, Menorca).

agrietamiento de los huesos (los huesos están quemados, pero no incinerados). Por tanto, no es posible que los huesos completamente incinerados aparezcan solamente en el nivel superior de cal, y no en la parte inferior donde habría tenido lugar la combustión. Además, en algunas partes del nivel de enterramientos en cal de Son Matge, probablemente en enterramientos tardíos, el 'nivel negro' no existe (WALDREN, 1982). Por último, es necesario mencionar que las dataciones radiocarbónicas han puesto de manifiesto que existe una diferencia cronológica significativa entre el 'nivel negro' y las muestras de cal y, a su vez, que el nivel de cal cubre un período de varios siglos –véase el ejemplo de Cova de na Prior (VAN STRYDONCK, 2020).

De este apartado puede concluirse que la energía liberada por la incineración no era suficiente para transformar grandes bloques de caliza o la pared de la cueva (si se asume que la pira funeraria se situó en su interior) en cal viva porque la energía disponible era muy baja. También es altamente improbable que el 'nivel negro' y el nivel de cal formen una misma unidad porque la temperatura alcanzada en el 'nivel negro' fue varios cientos de grados centígrados inferior a la del nivel de cal situado sobre el anterior.

Transferencia de carbono

Por un lado, los huesos pierden carbono (en forma de CO_2) con el medio ambiente durante la incineración. Por otro, los huesos absorben CO_2 de la atmósfera de la pira durante este proceso (véase HÜLS et al., 2010; VAN STRYDONCK, 2020, y referencias incluidas). De todas maneras, el balance de masa favorece la pérdida de carbono por encima de su absorción, dando lugar a una situación en la que habrá menos carbono en la apatita del hueso, pero relativamente más carbono de la atmósfera de la pira que el carbono original. Así que la cantidad de carbono conservado en un hueso quemado es un indicador del grado de incineración. La Figura 2b y la Tabla 1 muestran la relación entre los valores SF y la cantidad restante de carbono en la apatita del hueso de dos localizaciones diferentes en el yacimiento de Son Matge. Estos datos muestran claramente la relación inversa entre el factor SF y la cantidad conservada de carbono en los huesos.

Debido a que una parte importante del carbono de los huesos procede de la atmósfera de la pira, la edad aparente de los huesos incinerados depende no su propia cronología, sino también de manera importante del contenido radiocarbónico de la atmósfera de la pira. La Figura 2a y la Tabla 1 indican la relación entre el factor SF y la diferencia de edad entre el valor de consenso de la muestra basado en las fechas proporcionadas por la cal y por los huesos. Los resultados muestran claramente que, cuanto mejor incinerada está la muestra (mayor valor SF), más se desvía el resultado del valor de consenso. Esto implica que la apatita de los huesos absorbe carbono 'antiguo' de la atmósfera de la pira.

Se podría argumentar que la media del contenido de ^{14}C del CO_2 en la atmósfera de la pira es más antigua que los huesos a causa de la combustión de madera vieja o de grandes árboles, el denominado *old wood effect* o efecto madera vieja (OLSEN et al., 2013). No obstante, este planteamiento debe ser descartado porque las diferencias de edad son demasiado importantes en muchos casos. Por

ejemplo, los huesos de Sant Joan de Missa (Menorca), Son Gallard (Mallorca) y Son Matge (Mallorca) proporcionan edades anteriores en más de 1.000 años radiocarbónicos. Esto implica que la media de edad del ^{14}C del CO_2 de la atmósfera de la pira tendría una antigüedad superior a 1.000 años radiocarbónicos respecto a su edad real (VAN STRYDONCK, 2020), lo cual supondría que los árboles utilizados en la pira tendrían que ser mucho más antiguos; una situación irreal puesto que en un árbol predomina la madera de formación reciente sobre la madera antigua.

Dado que no hay otra fuente de carbono presente además del cadáver, la madera y la caliza, tan solo esta última es la única fuente posible de carbono muy antiguo. La caliza tenía que estar en estrecho contacto con los cuerpos (huesos) sobre la pira, porque de lo contrario el carbono (de la caliza) no podría haber formado parte de la atmósfera de la pira. Incluso omitiendo las limitaciones del apartado 'Transferencia de energía entre la pira y la caliza', y aceptando que la pira estaba situada en el interior de la cueva (ver más abajo) y que el calor era suficientemente intenso para descomponer la caliza de las paredes o el techo de la cavidad, tampoco así el CO_2 antiguo podría incorporarse a la biopatita debido a la circulación de gases alrededor de la pira, tal como se representa en la Figura 10.

De este apartado puede concluirse que existe un intercambio de carbono fósil entre los huesos y la atmósfera de la pira. En dicha atmósfera, el carbono fósil solamente puede proceder de la caliza en contacto intenso con el cuerpo situado sobre la pira y no de la pared o el techo de la cueva ya que, en ese caso, la edad del ^{14}C del hueso reflejaría la edad del ^{14}C de la madera de la pira. Además, es imposible que la cal viva fuera elaborada en un horno, separadamente de la cremación, y añadido posteriormente como CaO porque sería imposible la incorporación de carbono antiguo (de la caliza) a la apatita del hueso.

Información deducida de las características del yacimiento

En ningún caso se han podido documentar con seguridad los restos de una pira. No es algo tan extraño como pueda parecer si se consideran los enterramientos en cal como un fenómeno derivado de los rituales de cremación propios de la Edad del Bronce y la Edad del Hierro. En las incineraciones fenicias de Eivissa no aparece carbón y prácticamente no se han podido documentar restos de las piras de cremación en los yacimientos funerarios de la Europa continental (DE MULDER, 2020). La ausencia prácticamente absoluta de carbón (excepto algunos fragmentos y las lentes de cenizas de Son Matge) en la cal hace poco probable que las ubicaciones de la pira y del enterramiento en cal estuvieran situadas en el mismo punto. Esta afirmación concuerda con la tradición de la Europa continental de la Edad del Bronce y la Edad del Hierro, donde los huesos incinerados (a veces con carbones y otras veces sin ellos) eran depositados en urnas y en paquetes de huesos en los yacimientos

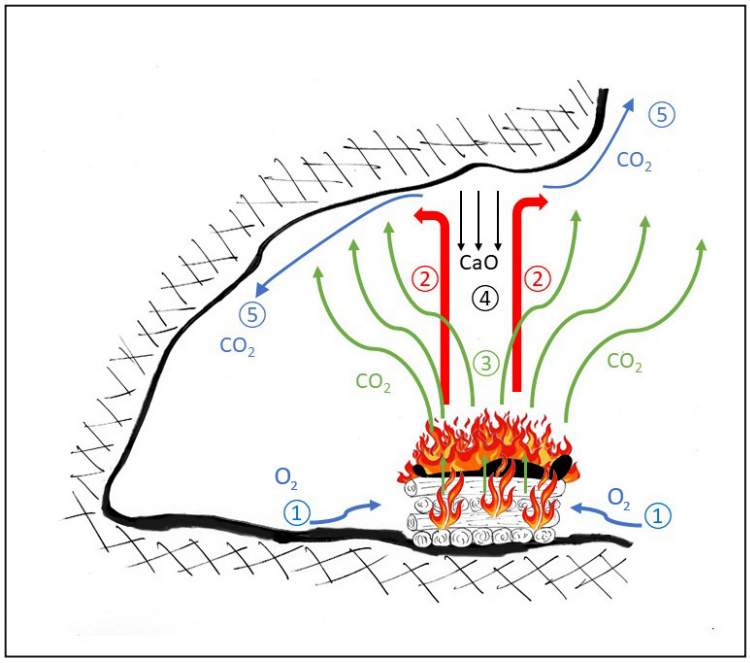


Figura 10: Si se asume –contra todo pronóstico– que el fuego de la pira es suficientemente intenso para descomponer la roca caliza, la cal viva (CaO) caería sobre la pira, pero el CO_2 sería arrastrado debido a la circulación de los gases alrededor de la pira, imposibilitando la incorporación de carbono antiguo a la apatita del hueso. Leyenda: (1) la pira absorbe aire fresco a causa del calor; (2) el calor de la combustión se eleva con la corriente de gas; (3) el CO_2 de la corriente de gas procede de la combustión del cuerpo pero, sobre todo, de la madera de la pira; (4) el calor provoca la descomposición del $CaCO_3$ de la cueva en CaO que cae sobre la pira liberando CO_2; (5) debido a la circulación ascendente de los gases de la combustión, el CO_2 fósil procedente de la descomposición de la roca no puede entrar en contacto con los huesos situados sobre la pira.

Figure 10: If it is assumed – against all odds – that the heat of the pyre is intense enough to decompose the limestone, quicklime (CaO) would fall on the pyre but the CO_2 is blown away due to the circulation of the gasses around the pyre, making it impossible for old carbon to become incorporated in the bone apatite. Legend: 1) due to the heat fresh air is sucked in; 2) heat from the combustion goes up with the gas stream; 3) in the gas stream CO_2 is present from the combustion of the body but mostly from the wood of the pyre; 4) due to the heat the $CaCO_3$ from the cave is decomposed into CaO that falls on the pyre and CO_2 is released; 5) due to the forced flow of the combustion gases the fossil CO_2 from the decomposing rock cannot come into contact with the bones on the pyre.

funerarios (DE MULDER et al., 2009). De acuerdo con esta analogía, es teóricamente posible que la cal y los huesos (que no pesarían más de unos pocos kg conjuntamente) fueran empaquetados en un contenedor de material perecedero, como una tela, y transportados al lugar de enterramiento.

A pesar de que, en el caso de grandes abrigos rocosos, como Son Matge, sería muy factible que la pira estuviera situada en este punto, en otros casos sería imposible, como en la Cova de sa Cometa des Morts I, una cueva que no llega a 1 m de amplitud durante gran parte de su recorrido (VENY, 1968). Esta cavidad es tan pequeña que las personas encargadas del rito de cremación se habrían ahogado por el humo de la pira.

La mayoría de los enterramientos en cal viva se encuentran en cuevas y abrigos, pero también aparecen ocasionalmente en lugares inesperados. Con toda probabilidad, de acuerdo con PIGA et al. (2010), la cámara A de s'Illot des Porros (Santa Margalida, Mallorca) contenía enterramientos en cal (Figura 11). Aunque no se identificó como tal durante su excavación, la descripción se ajusta perfectamente a la de un enterramiento en cal (HERNÁNDEZ-GASCH & SANMARTÍ, 1998; PIGA et al., 2010). Existe un conjunto de dataciones radiocarbónicas de este yacimiento, pero ninguna de ellas corresponde a los enterramientos en cal (HERNÁNDEZ-GASCH & SANMARTÍ, 2020). S'Illot des Porros supone una complicación de la situación. Pueden considerarse dos opciones principales: (1) la cremación se realizó en tierra firme y los restos fueron trasladados al islote o (2) los cadáveres, la madera para la pira y, probablemente, también la caliza, tuvieron que ser transportados al islote. La segunda opción supone un proceso mucho más complicado.

Figura 11: Hueso con cal de S'Illot des Porros (escala 1 cm) (Santa Margalida, Mallorca).
Figure 11: Bone with lime from S'Illot des Porros (scale 1 cm) (Santa Margalida, Mallorca).

Conclusiones

Existen muy pocos datos analíticos disponibles en relación al ritual funerario que originó el fenómeno de los enterramientos en cal. Como consecuencia, las interpretaciones solamente pueden ser extraídas a partir de las evidencias circunstanciales proporcionadas por los restos arqueológicos, manteniendo un amplio grado de incertidumbre en las conclusiones.

No obstante, los restos arqueológicos procedentes de la cal demuestran perfectamente que la transferencia de energía entre la pira y su entorno fue limitada; tan sólo lo necesario para incinerar los huesos y transformar el carbonato de calcio en cal viva, a menudo de manera incompleta (tanto en la incineración de los huesos como en la descomposición de la caliza). Esta limitada transferencia de energía hace improbable que la transformación en cal viva se realizara a partir de grandes bloques de caliza (de varios cm^3) o incluso de las paredes o el suelo de la cueva. Ello no excluye la posibilidad de una degradación puntual de la roca cercana a la pira, si se asume que la pira estaba situada en el interior de la cueva.

La circulación de los gases en la atmósfera de la pira hace que la transferencia de carbono fósil a los huesos solamente fuera posible con un contacto intenso entre los cadáveres y la caliza de la pira.

Las fechas radiocarbónicas, así como el grado de combustión de los huesos, en el 'nivel negro' permiten descartar que este estrato forme una única unidad con el nivel de cal situado sobre él.

No queda claro dónde tuvo lugar el ritual de incineración. En algunos casos es posible que se celebrara muy cerca del lugar de enterramiento, pero esto es improbable en otros yacimientos.

Bibliografia

COLL, M. & CARBONELL, S. (2021): Where are the Postalaiotic children? Una aproximación a los enterramientos infantiles en Mallorca y Menorca durante la segundad edad del hierro. *Sardinia, Corsica et Baleares Antiqvae,* 19: 69-93. Roma.

DE MULDER, G.; VAN STRYDONCK, M. & BOUDIN, M. (2009): The impact of cremated bone dating on the archaeological chronology of the Low Countries. *Radiocarbon*, 51 (2): 579–600. Tucson.

DEYÀ, J. (2017): Coves forn? Noves reflexions entorn al ritu de la calç a Mallorca. In: ANGLADA, M.; RIERA, M. & MARTÍNEZ, A. (coord.) *VII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (Maó, 30 de setembre i 1 i 2 d'octubre de 2016)*. Consell Insular de Menorca: 411- 420. Maó.

DEYÀ, J. (2020a): Resultats preliminars de la intervenció en enterraments en calç a la Cova de S'Alova (Sóller). In: HERNÁNDEZ-GASCH, J.; RIVAS ANTEQUERA, M.J. & RIVAS LLOMPART, M. (coord.) *VIII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (Alcúdia, 11,12 i 13 d'octubre de 2018)*. Departament de Cultura, Patrimoni i Esports del Consell Insular de Mallorca: 175-186. Palma.

DEYÀ, J. (2020b): Relació i dispersió de les plaquetes de plom mallorquines del Postalaiòtic. In: HERNÁNDEZ-GASCH, J.; RIVAS ANTEQUERA, M.J. & RIVAS LLOMPART, M. (coord.): *VIII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (Alcúdia, 11,12 i 13 d'octubre de 2018)*. Departament de Cultura, Patrimoni i Esports del Consell Insular de Mallorca: 213-222. Palma.

DEYÀ, J.; ARAMBURU, J. & DE MULDER, G. (2024): La necrópolis talayótica de la Cova des Robiols (Puigpunyent) y el origen de los enterramientos en cal en Mallorca. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 7: 67-82. Palma.

GRATUZE, B.; KOENIG, M.-P.; PLOUIN, S. & TREFFORT, J.-M. (2013): Les perles en faïence et en verre de l'âge du Bronze: contexte archéologiques et analyses pour l'Alsace et la Lorraine. *Cahiers alsaciens d'Archéologie d'art et d'Histoire*, 56: 21-52. Estrasburgo.

HERNÁNDEZ-GASCH, J. & SANMARTÍ, J. (1998): La necròpoli Talaiòtica de s' illot des Porros. *Pyrenae,* 29: 69-95. Barcelona.

HERNÁNDEZ-GASCH, J. & SANMARTÍ, J. (2020): Contextualització de datacions radiocarbòniques, estratigrafia i fases cronològiques del jaciment de les edats del bronze i del ferro de s'Illa des Porros (Santa Margalida, Mallorca). *Materialidades,* 6: 61-97. Palma.

HOEFKENS, M. (2004): *Onderzoek naar de dateerbaarheid van gecremeerde botten met ^{14}C.* Tesis para el grado y diploma de Ingeniero Industrial. Instituto De Nayer. Sint-Katelijne-Waver.

HÜLS, C.M.; ERLENKEUSER, H.; NADEAU, M.-J.; GROOTES, P.M. & ANDRESEN, N. (2010): Experimental Study on the Origin of Cremated Bone Apatite Carbon. *Radiocarbon,* 52(2): 587-599. Cambridge.

KOPPER, J.S. & ROSSELLO-BORDOY, G. (1974). Megalithic quarrying techniques and limestone technology in Eastern Spain. *Journal of Field Archaeology,* 1: 161-170. Boston.

OLSEN, J.; HEINEMEIER, J.; BENNIKE, P.; KRAUSE, C.; HORNSTRUP, K.M. & THRANE, H. (2008): Characterisation and blind testing of radiocarbon dating of cremated bone. *Journal of Archaeological Science,* 35(3): 791-800. Amsterdam.

OLSEN, J.; HEINEMEIER, J.; HORNSTRUP, K.M.; BENNIKE, P. & THRANE, H. (2013): 'Old wood' effect in radiocarbon dating of prehistoric cremated bones? *Journal of Archaeological Science,* 40: 30-34. Amsterdam.

PIGA, G.; HERNÁNDEZ-GASCH, J.; MALGOSA, A.; GANADU, M.L. & ENZO, S. (2010): Cremation practices coexisting at the S'Illot des Porros Necropolis during the Second Iron Age in the Balearic Islands (Spain). *HOMO - Journal of Comparative Human Biology,* 61: 440-452. Amsterdam.

PLOUIN, S.; KOENIG, M.-P. & GRATUZE, B. (2012): Les perles en verre de l'âge du Bronze d'Alsace et de Lorraine. In: CABART, H. (dir.) *Le Verre en Lorraine et dans les régions voisines.* Actes du colloque de l'AFAV, Metz, 18 et 19 novembre 2011. Monographies Instrumentum, 42: 11-36. Montagnac.

VAN STRYDONCK, M. (2020): *45 años de investigación físico-química sobre los enterramientos en cal de Menorca y Mallorca 1975-2020.* Consell Insular de Menorca / Royal Institute for Cultural Heritage. Lovaina.

VENY, C. (1968): *Las cuevas sepulcrales del Bronce Antiguo de Mallorca*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Bibliotheca Praehistorica Hispana, 9. Madrid.

WALDREN, W.H. (1982): *Balearic Prehistoric Ecology and Culture. The Excavation and Study of Certain Caves, Rock Shelters and Settlements*. Archaeopress. British Archaeological Reports, International Series, 149(1). Oxford.

WRIGHT, L.E. & SCHWARCZ, H.P. (1996): Infrared and isotopic evidence for diagenesis of bone apatite at Dos Pilas, Guatemala: palaeodietary implications. *Journal of archaeological Science,* 23: 933-944. Amsterdam.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Primeres dades sobre la presència de copròlits d'ectoparàsits de ratapinyades a la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca)

Antoni MERINO [1, 2], Joan J. FORNÓS [1, 2], Antoni MULET [3] i Joaquín GINÉS [1, 2]

[1] Grup de Recerca Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca. Email: tonymerinoj@gmail.com
[2] Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca.
[3] Federació Balear d'Espeleologia. Palma, Mallorca.

Abstract

While photo-documenting mineral microcrystals in Cova des Pas de Vallgornera, uniform micro-morphologies, cylindrical in shape, were discovered. Their dimensions range up to 528 microns in length and 171 microns in diameter. Located on top of rock boulders surfaces that contain phosphates and clay-related minerals, their internal structure shows an aggregate of calcite particles, occasionally covered by a thin recrystallized layer of calcite. Their morphological characteristics suggest that they correspond to coprolites of bat ectoparasites; these bloodsucking flies would have infested the bat colony established in the cave in the Lower Pleistocene, prior to the entrances collapse sealing the cave.

Identical morphologies have been observed in Cova de sa Guitarreta, that currently hosts an important bat colony. Apart from the similar dimensional characteristics of these cylindrical forms, they are composed of organic detritus among which the presence of cells remains is remarkable, which could correspond to red blood cells. These facts have allowed us to interpret the cylinders from Cova des Pas de Vallgornera as coprolites left by ectoparasites of bats inhabiting that cave during the Lower Pleistocene.

Resum

A la Cova des Pas de Vallgornera es trobaren, per casualitat, mentre es feien tasques de fotografia de microcristalls, uns micrograns de formes cilíndriques molt uniformes, que presentaven unes mides que arribaven fins a les 528 micres de longitud i un diàmetre de fins les 171 micres. Es troben damunt de dipòsits argilosos que contenen fosfats i que recobreixen la superfície del rocam. La seva composició interna està formada per un agregat de grans de calcita, puntualment recoberts per una fina capa recristal·litzada, també, de calcita. Les seves característiques morfològiques coincideixen amb els copròlits dels ectoparàsits de ratapinyades, i per tant constitueixen una evidència de l'existència d' importants colònies de quiròpters a la cavitat durant el pleistocè inferior, abans del col·lapse de les entrades naturals de la cova i del seu segellament.

Morfologies similars s'han observat a la Cova de sa Guitarreta, la qual hostatja actualment una nombrosa colònia de ratapinyades. Entre els trets distintius d'aquests dipòsits en destaca la similitud pel que fa a les dimensions, la geometria cilíndrica i que estan composts per detritus orgànics, entre els quals destaquen estructures que probablement són cèl·lules corresponents a glòbuls vermells. Per analogia, tots aquests atributs han permès interpretar els cilindres de la Cova des Pas de Vallgornera com a copròlits d'ectoparàsits de les ratapinyades que habitaven la cova el pleistocè inferior.

Merino, A.; Fornós, J.J.; Mulet, A. i Ginés, J. (2024): Primeres dades sobre la presència de copròlits d'ectoparàsits de ratapinyades a la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca).
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 175-183. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 11 setembre 2024; **Revisat:** 2 octubre 2024; **Acceptat:** 4 octubre 2024.
Publicat online: 26 novembre 2024.

Introducció

La Cova des Pas de Vallgornera, situada al municipi de Llucmajor a la zona del Migjorn de Mallorca, és una cova sense accés natural a la que s'accedeix per una entrada artificial que es troba tancada, la qual cosa implica que actualment no hi habita cap colònia de quiròpters. Investigacions recents, però, han evidenciat que en temps pretèrits, la cavitat havia presentat diverses obertures (MERINO et al., 2019) que no tan sols permeteren l'entrada de ratapinyades sinó també d'algun vertebrat terrestre com *Myotragus* sp. Aquestes entrades restaren obertes fins al col·lapse natural de les mateixes, ocorregut durant els inicis del pleistocè inferior (BOVER et al., 2014). Les principals evidències de la presència passada de colònies de ratapinyades corresponen a la troballa de minerals associats als dipòsits de guano, principalment fosfats, així com tot un seguit de formes presents a les parets de la cova la gènesi

de les quals està lligada a l'etologia d'aquests mamífers (MERINO et al., 2019); o també a la troballa de restes paleontològiques (BOVER et al., 2014; GALÁN et al., 2024).

En aquest sentit, mentre es documentaven de forma fotogràfica una sèrie de microcristalls de celestina presents a la superfície d'uns blocs encaixats en el trespol d'una galeria, s'observaren unes acumulacions de cilindres quasi perfectes d'ordre sub-mil·limètric, disposats de forma aleatòria sobre l'esmentada superfície.

L'objectiu principal del present treball es fer una descripció preliminar de les característiques morfològiques, mineralògiques i composicionals d'aquests cilindres, així com establir una primera hipòtesi sobre la seva gènesi. En aquest sentit, es va fer una visita a la Cova de sa Guitarreta (Llucmajor, Mallorca) on es coneix, des de fa temps, la presència d'una important colònia de quiròpters (BALCELLS, 1968; ALCOVER & MUNTANER, 1986); aquesta cavitat també presenta importants acumulacions de guano i minerals relacionats (MERINO et al., 2022), i fou explorada per tal de trobar un exemple actual que permeti una interpretació comparativa de la gènesi d'aquestes microformes cilíndriques.

Metodologia

Tant a la Cova des Pas de Vallgornera (CPV) com a la Cova de sa Guitarreta (CSG) es localitzaren diferents indrets amb la presència d'aquests petits cilindres (Figura 1). Degut a les seves reduïdes dimensions, la seva detecció i observació va necessitar la utilització de macrofotografies realitzades amb una càmera NIKON-D-90 equipada amb un objectiu Sigma de 105 mm DG MACRO, així

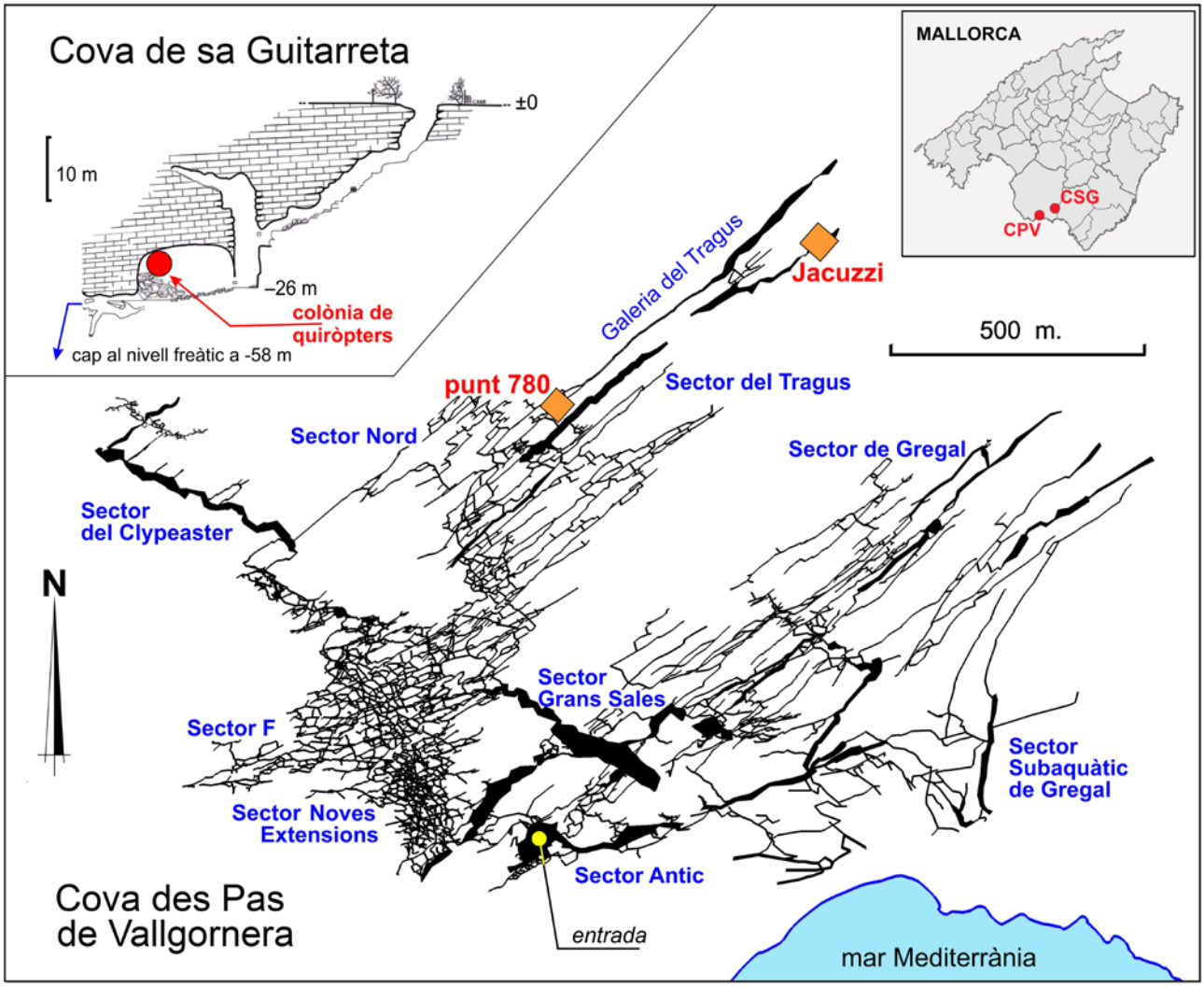


Figura 1: Localització de l'àrea d'estudi amb indicació dels punts de mostreig (CPV: Cova des Pas de Vallgornera; CSG: Cova de sa Guitarreta).
Figure 1: Location of the study area with indication of the sampling sites (CPV: Cova des Pas de Vallgornera; CSG: Cova de sa Guitarreta).

Figura 2: Zona del *Jacuzzi* a la Cova des Pas de Vallgornera. Grans blocs amb les superfícies cobertes de dipòsits marronosos (fletxa vermella) que contenen fosfats i abundants microcilindres. La paret situada damunt dels blocs mostra nombroses esgarrapades i altres marques deixades pels quiròpters en subjectar-se al sostre. La part inferior de la foto mostra una banda groga formada per calcita produïda per l'acumulació d'aigües vadoses (fletxa groga).
Figure 2: *Jacuzzi* site, in Cova des Pas de Vallgornera. Boulders whose surfaces are covered in a brownish deposit (red arrow) containing phosphates and abundant microcylinders. The wall situated over the boulders exhibit numerous bat claws and bat thumbs marks left by chiropters when trying to cling on. The lower third of the photo shows a clear yellowish calcite band produced by the accumulation of vadose waters (yellow arrow).

com una càmera petita PENTAX Option WP en mode macro. Es realitzaren un total de 53 fotografies entre ambdues coves que un cop examinades permeteren la recol·lecció de mostres (9 a CPV i 4 a CSG) per a la seva anàlisi. Per a la recol·lecció de les mostres es van fer servir diferents espàtules i petits cisells que van ajudar a arrencar fraccions de la superfície rocosa que contenia, tant els cilindres, el dipòsit argilós, i una part de la pròpia roca. Les mostres es van protegir amb bosses de plàstic i van ser dipositades dins de contenidors de plàstic estancs per al seu transport fins al laboratori. Les 13 mostres foren observades i fotografiades a la lupa binocular a diversos augments i amb un microscopi electrònic de rastreig (Hitacchi S-3400N) equipat amb un sistema de microanàlisis (Bruker EDS-X-Flash Detector 4020). La mineralogia es determinà per difracció de raigs-X (Bruker D8-Advance) utilitzant el software Diffrac EVA ver.7.0 per discriminar les diverses fases i fer una valoració semi-quantitativa.

Les microformes cilíndriques a la Cova des Pas de Vallgornera (CPV)

La Cova des Pas de Vallgornera és la cova més extensa topografiada fins a l'actualitat a les Illes Balears (MERINO, 2023). Accessible en l'actualitat mitjançant una perforació artificial, se suposa que la cavitat ha restat tancada des del pleistocè inferior (BOVER et al., 2014) moment en què quedaren segellades possiblement cinc entrades (MERINO et al., 2019), una de les quals estaria a la punta més oriental de la denominada *galeria del Tragus,* a prop d'on es localitzaria un dels punts de mostreig.

Desenvolupada a les calcàries i calcarenites esculloses del miocè superior, presenta un traçat directament condicionat per les característiques sedimentològiques del substrat en què es desenvolupa (GINÉS et al., 2014), caracteritzant-se el seu sector més septentrional per un seguit de galeries amb traçats rectilinis (entre elles la *galeria del Tragus*) que segueixen el diaclasament preferent de direcció NE-SW.

Atès que la cova restà tancada des de l'inici del pleistocè, actualment no conté cap colònia de ratapinyades i tampoc hi són visibles acumulacions de guano. És en aquest context general en què, amb motiu d'exploracions a la recerca de nous minerals, es descobriren, en dues localitats, petites acumulacions d'uns microcilindres a la superfície dels blocs que configuren el sòl de la cova, concretament al punt conegut com a *Jacuzzi* i al punt 780, situat a l'extrem SW de la *galeria del Tragus*.

En el cas del punt conegut com a *Jacuzzi* (Figura 2) l'acumulació de microcilindres era ben evident, localitzant-se a la part superior d'alguns grans blocs amb les superfícies planes. Aquesta superfície, a més a més, presentava una pàtina marronosa de la qual l'anàlisi mineralògica indicà la presencia de fosfats.

El microcilindres presenten una forma tubular (Figura 3) quasi perfecta en la majoria dels casos, amb una secció totalment circular i de color blanc i/o marronós (Figura 4a). Les dimensions, que són d'ordre micromètric, varien entre 250 i 500 µm pel que fa a la longitud i entre 70 i 170 µm de diàmetre. La composició mineralògica dels cilindres està predominantment formada per grans de calcita que

tenen una forma subarrodonida de dimensions variables, encara que presenten uns valors mitjans al voltant de les 3 µm; puntualment podem observar-se grans de majors dimensions que presenten un grau d'arrodoniment subangular (>30 µm). En l'observació, tant amb la lupa binocular com amb el microscopi electrònic, no es pogué observar cap tipus de ciment que donés consistència ni cohesió als grans, que es caracteritzaven per una aparença aglomerada.

Al mateix sector de la cova, dins de la *galeria del Tragus* (punt 780) i relativament amagat entre uns blocs caiguts de grans dimensions, es trobà una altra acumulació d'aquests microcilindres envoltats de cristalls de celestina (sulfat d'estronci) (Figura 5). En aquest cas, la coloració dels cilindres era marronosa i en general presentaven unes dimensions lleugerament superiors. Així, la mida dels microcilindres oscil·lava entre 450 i 800 µm de longitud i entre 140 i 240 µm de diàmetre. En aquest cas l'observació detallada mostrà que els cilindres estaven formats per cristalls micrítics.

Les microformes cilíndriques anàlogues a la Cova de sa Guitarreta (CSG)

La Cova de sa Guitarreta és una cavitat relativament modesta amb uns escadussers 300 m de recorregut que es troba a la Marina de Llucmajor, excavada dins dels dipòsits carbonatats del miocè superior i que arriba, seguint una estreta encletxa, a una profunditat de 58 m on s'assoleix el nivell freàtic (BERMEJO et al., 2021). Des de l'entrada, que fa d'engolidor, se segueix per una galeria fortament descendent que dona accés a la sala principal, formada per col·lapse com és fàcilment observable gràcies als grans blocs que recobreixen el trespol, que es troba a una profunditat de 26 m.

Dins de la sala principal hi ha una important acumulació de guano de ratapinyada que ha estat objecte d'estudi per part d'ONAC et al. (2005) i MERINO et al. (2022) a la recerca dels minerals associats. Aquestes acumulacions donen a la cova un interès especial, al què s'ha d'afegir la possible espeleogènesi induïda per aigües hipogèniques (termals) (GINÉS et al., 2017).

És en aquest context, coneguda la presència d'una important colònia de ratapinyades, que es feu una exploració per trobar les microformes cilíndriques que servissin d'exemple i poder interpretar per analogia les trobades a la Cova des Pas de Vallgornera. Així, es descriviren diverses

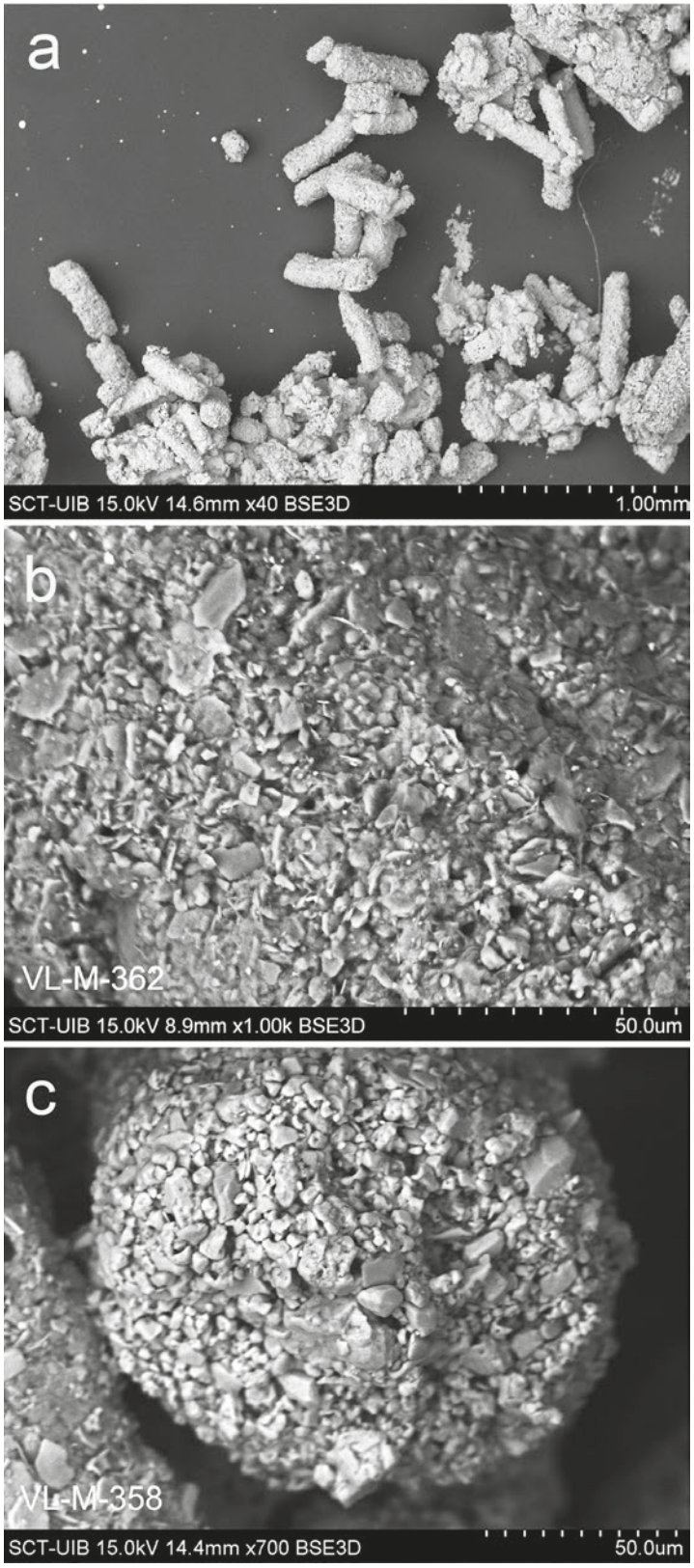


Figura 3: Zona del *Jacuzzi*, a la Cova des Pas de Vallgornera. Aspecte dels microcilindres observats al SEM (a), formats per un agregat de partícules micromètriques (b), i que es caracteritzen per una forma cilíndrica quasi perfecta amb una secció circular (c).
Figure 3: *Jacuzzi* site, in Cova des Pas de Vallgornera. SEM image showing the microcylinders shape (a), formed by an aggregate of micrometric particles (b), with its characteristic perfect cylindrical appearance and circular section (c).

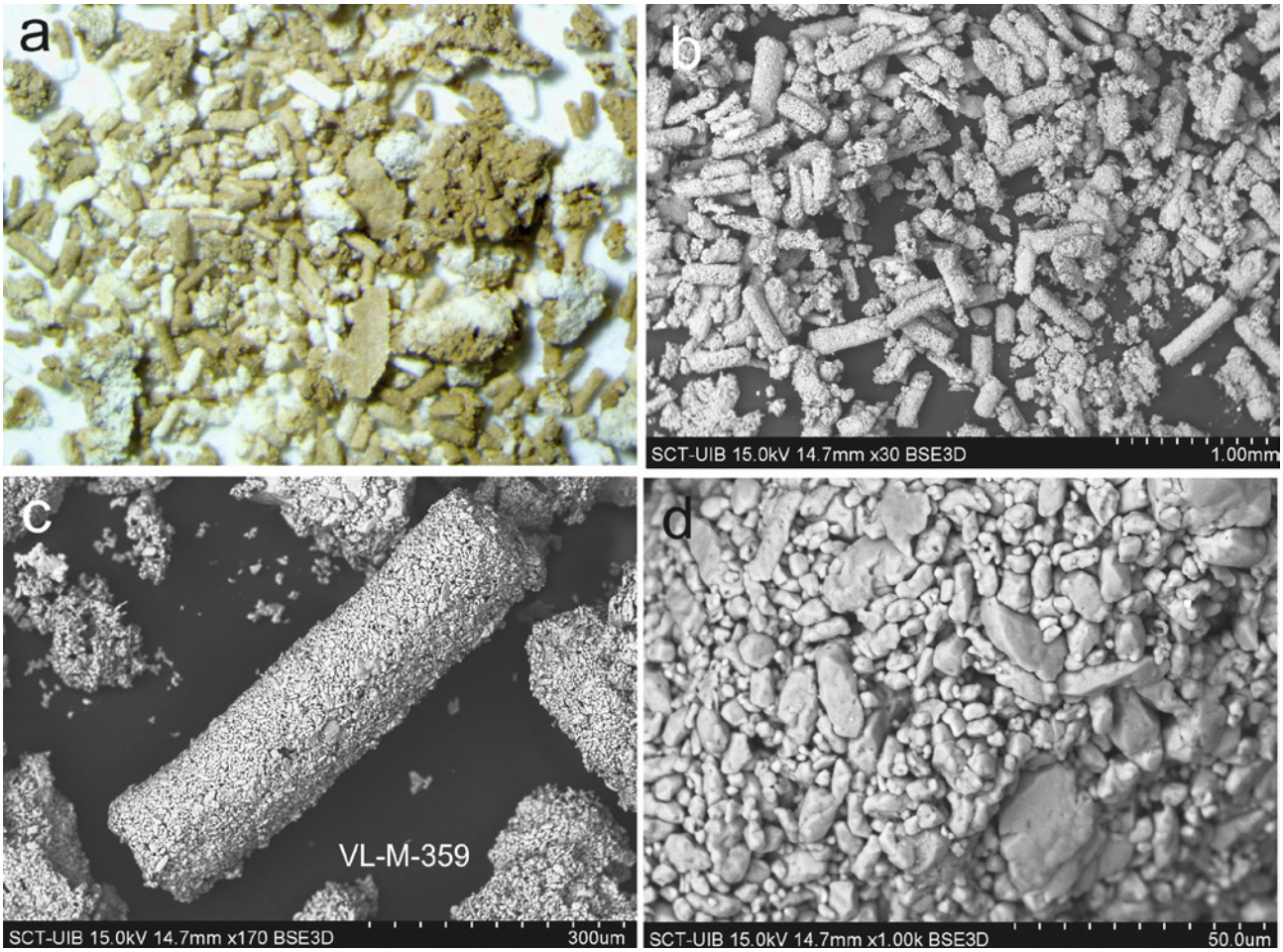


Figura 4: Microcilindres a la zona del *Jacuzzi*, de la Cova del Pas de Vallgornera. Observats a la lupa binocular es distingeixen dos tipus diferents, blancs i marrons (a), i observats amb el SEM (b) es veu clarament la seva perfecta forma cilíndrica (c). Un detall de l'anterior imatge permet observar l'aglomeració de partícules de composició carbonatada que els composen (d).
Figure 4: *Jacuzzi* site, in Cova des Pas de Vallgornera. Binocular loupe image displaying white and brown microcylinders (a), SEM image (b) where its perfect cylindrical shape is clearly seen (c). Detail of the previous image exhibiting the agglomeration of carbonate particles (d).

acumulacions de microcilindres, en taques relativament disperses i associades amb altres aspectes relacionats amb l'activitat de les ratapinyades. A part de l'acumulació de guano, s'observaren formes de bioerosió (esgarrapades a les roques) així com formes de criptocorrossió relacionades amb l'activitat metabòlica que té lloc al guano i també als minerals fosfatats associats (MERINO et al., 2022).

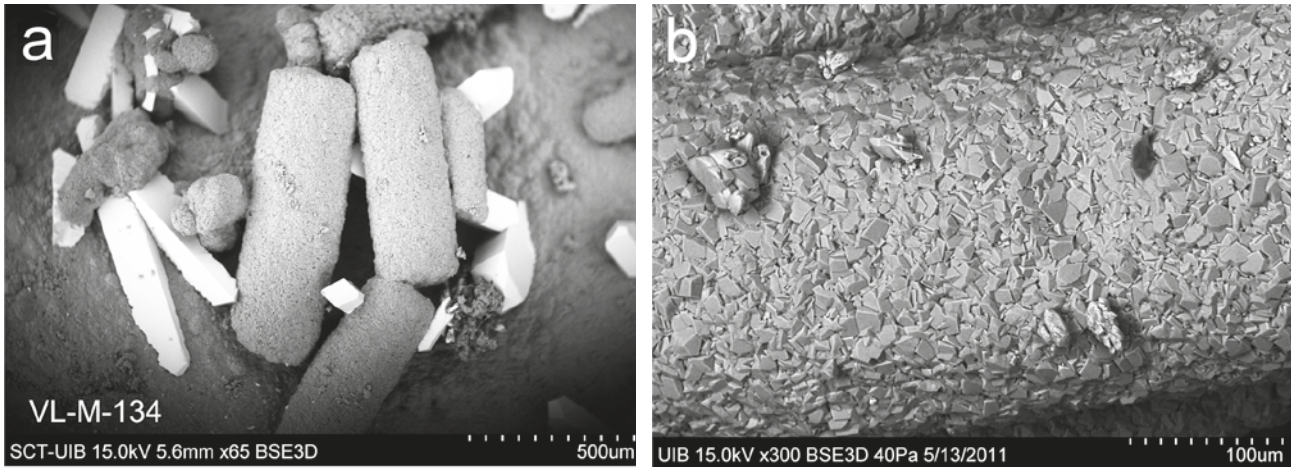


Figura 5: Cova des Pas de Vallgornera. Microcilindres presents a la *galeria del Tragus* (punt 780). (a) Observi's la coexistència dels microcilindres amb cristalls de celestina (color blanc), i la composició dels microcilindres formats per cristalls micrítics de calcita (b).
Figure 5: Cova des Pas de Vallgornera. Microcylinders located at site 780, in *Galeria del Tragus*. (a) The coexistence of microcylinders along with celestine crystals (white color) is clearly seen, as well as microcylinders formed by micritic crystals of calcite (b).

L'acumulació de microcilindres presentava en algun punt densitats de més de 100 unitats/cm^2. Amb una forma clarament allargada i de secció circular, les dimensions oscil·laven entre 170 i 290 µm de longitud i 55 a 85 µm de diàmetre. La composició interna dels microcilindres estava constituïda en la seva major part per detritus de matèria orgànica i alguns grans carbonatats, o bé d'altres compostos autigènics com sulfats, fosfats així com minerals de les argiles, les dimensions dels quals oscil·len entre els 2 i els 19 µm (Figura 6). En altres bandes la densitat era menor i presentaven un major grau de calcificació, per la qual cosa es suposà que es tractava de microcilindres més antics.

Discussió

A la literatura espeleològica no hi ha descrites formes similars que permetin una interpretació de les trobades a la Cova des Pas de Vallgornera. En el cas d'aquesta cavitat, i especialment a la zona del *Jacuzzi* on s'han observat les majors acumulacions de microcilindres, també s'han identificat abundants marques a les parets atribuïdes a l'activitat de ratapinyades (MERINO et al., 2019), així com minerals relacionats amb les seves deposicions, com és la fluorapatita. La composició d'aquests microcilindres estava constituïda per una amalgama de cristalls micrítics de calcita i contenien, en menor proporció, alguns minerals del grup de les argiles.

A la mateixa cavitat, a la *galeria del Tragus* (punt 780), la presència de cilindres era inferior, però en aquest cas es presentaven associats a microcristalls de celestina ($SrSO_4$); en una zona propera també

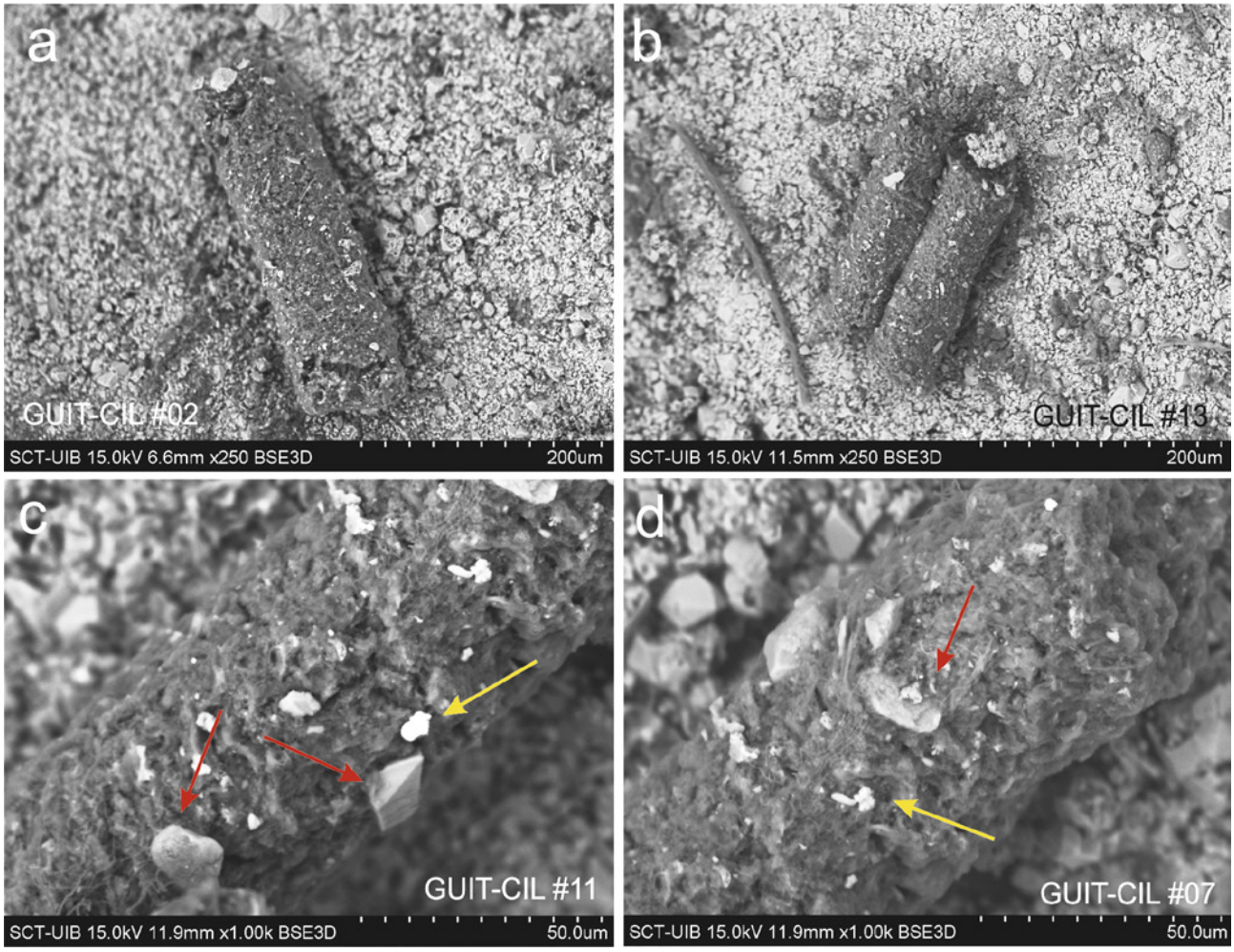


Figura 6: Cova de sa Guitarreta. Microcilindres observats al SEM (a, b). (c) La seva composició està formada principalment per detritus de matèria orgànica i alguns fragments minerals de calcita (fletxes vermelles) i sulfats (fletxa groga); estan presents altres components (d) com fosfats (fletxa groga) i argiles (fletxa vermella).

Figure 6: Cova de sa Guitarreta. SEM image of microcylinders (a, b). (c) They are mainly composed of organic matter detritus and some mineral fragments of calcite (red arrows), sulfates (yellow arrow); other components are present (d) such as phosphates (yellow arrow) and related-clay minerals (red arrow).

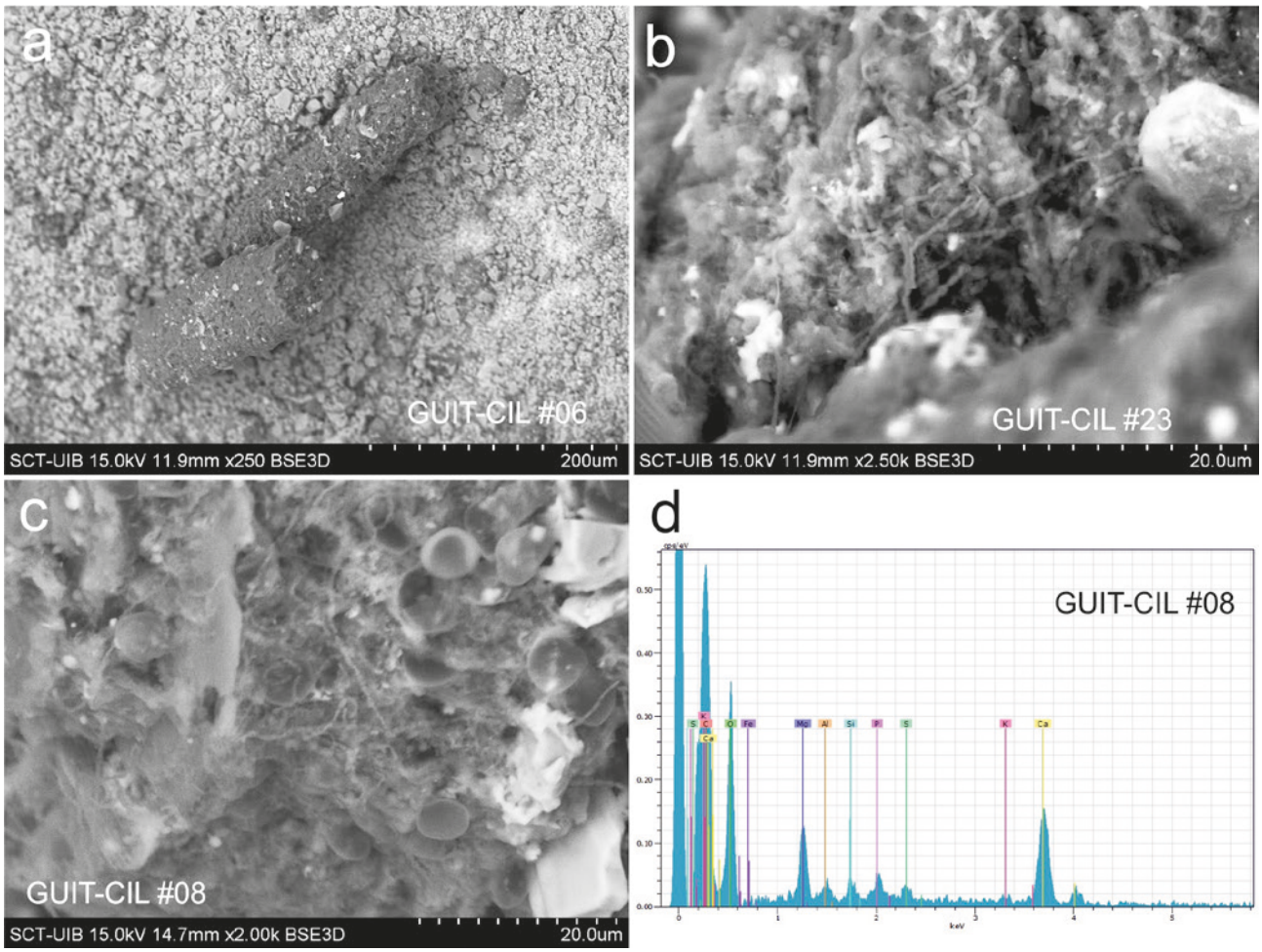


Figura 7: Cova de sa Guitarreta. SEM imatges. Observació dels microcilindres (a), formats per un aglomerat de matèria orgànica amb restes bacterianes i fúngiques (b), així com probables cèl·lules de glòbuls vermells (c). (d) EDX on s'observa la composició elemental que inclou partícules minerals formades per carbonats, fosfats, sulfats i argiles, juntament amb la matèria orgànica.
Figure 7: Cova de sa Guitarreta. SEM images. Microcylinders (a), formed by an agglomeration of organic matter with bacterial and fungal remains (b), as well as presumably intact red blood cells (c). (d) EDX showing the elemental composition which includes mineral particles formed by carbonates, phosphates, sulfates and related-clay minerals, together with the organic matter.

s'hi trobaren restes fòssils de quiròpters. La composició, en aquest cas, estava constituïda per cristalls microscòpics de calcita associats amb dolomita, quars i minerals del grup de les argiles.

A la Cova de sa Guitarreta, les formes cilíndriques foren observades en diferents punts de la sala principal, la qual mostrà importants acumulacions de guano i formes de criptocorrossió; també hi eren ben visibles les rapinyades de ratapinyades que sovint estaven recobertes d'una fina capa marronosa causada per la projecció de la seva orina. A la superfície on es trobaven els microcilindres es pogué constatar la presència d'una varietat de minerals fosfatats (MERINO et al., 2022). La composició dels microcilindres, a diferència dels descrits a la Cova des Pas de Vallgornera, estava constituïda en la seva major part per matèria orgànica en forma de detritus. Entre aquests detritus hi destacaven formes circulars similars a les cèl·lules sanguínies (probablement glòbuls vermells), i també s'observava una important presència bacteriana i fúngica (Figura 7). A prop de la zona on es trobaren les acumulacions de microcilindres, MERINO et al. (2022) observaren la presència d'una sèrie de pupes (crisàlides), possiblement pertanyents a ectoparàsits dels gèneres *Nycteribiidae* o *Streblidea*.

És conegut que les ratapinyades estan afectades per diversos tipus d'ectoparàsits. De fet, a les coves de Mallorca han estat descrites varies espècies per diversos autors (BALCELLS, 1968; KOCK & QUETGLAS, 2003) corresponents als gèneres de mosques abans citats. Després de la seva alimentació per ingestió de sang, aquestes mosques defecarien i els seus excrements, de les dimensions dels microcilindres observats, conservarien –de més a més de restes orgàniques– abundants cèl·lules de glòbuls vermells intactes degut a la seva dificultat per digerir-les (FRITZ, 1983).

A partir d'aquestes observacions no es fa estrany inferir que les formes de microcilindres observades a la Cova des Pas de Vallgornera puguin correspondre a les deposicions fecals deixades per una antiga comunitat d'ectoparàsits hematòfags de ratapinyades. Així es pot classificar els microcilindres com a copròlits d'invertebrats.

El punt més punyent respon al procés de fossilització de les defecacions que corresponen als microcilindres trobats a la Cova des Pas de Vallgornera. En aquest sentit falten aclarir els aspectes diagenètics que duen a la formació dels copròlits, tota la sèrie de processos biogeoquímics implicats així com la seva dinàmica. És molt probable que l'activitat dels processos metabòlics dels microorganismes hagi estat condicionada per la gran estabilitat i restricció dels paràmetres físics de la cova, des del seu tancament al pleistocè inferior (BOVER et al., 2014); la manca de moviments d'aire i de circulació d'aigua, donaria lloc a unes condicions microclimàtiques molt constants d'humitat, temperatura, concentració de CO_2, etc., que afavoririen probablement la preservació de la forma original de les defecacions i la seva posterior fossilització. La variable temporal en el procés de fossilització és possiblement també la causa de la variabilitat observada en la coloració d'algunes acumulacions de microcilindres, que es fa evident en la seva variada composició elemental i mineralògica (Figura 8).

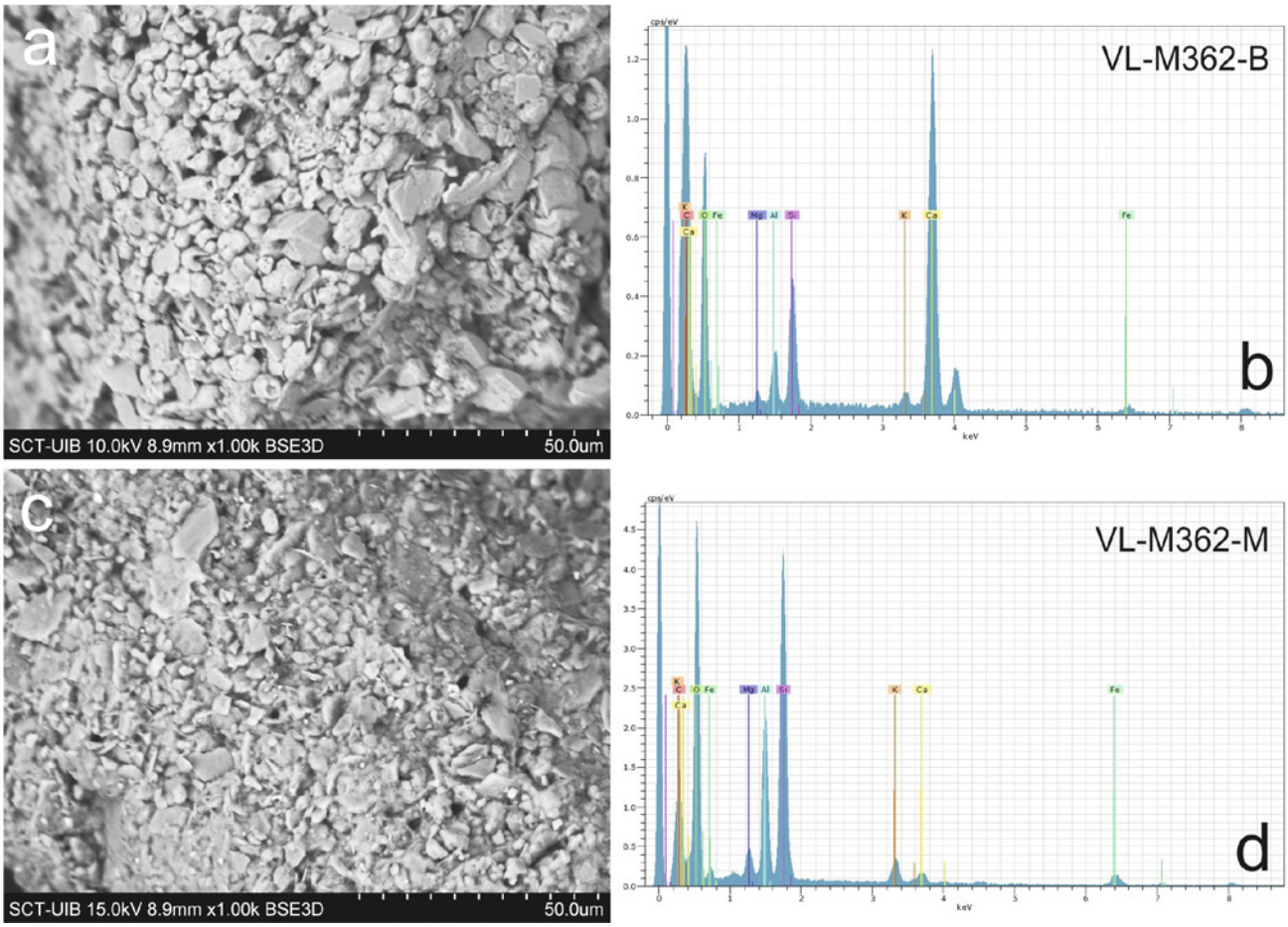


Figura 8: Anàlisi comparatiu entre les característiques texturals observades al SEM i anàlisi elemental (EDX) dels microcilindres presents a la Cova des Pas de Vallgornera. Hi predominen quasi en exclusiva els aglomerats format per grans de calcita (a, b) i els que contenen una elevada proporció de minerals de les argiles (c, d).

Figure 8: Comparative analysis of SEM images showing the textural characteristics and elemental analysis (EDX) of the microcylinders present in Cova des Pas de Vallgornera. Agglomerates formed by large calcite grains are almost exclusively predominant (a, b) and those containing a high proportion of clay-related minerals (c, d).

Conclusions

S'han descrit per primera vegada, a la Cova des Pas de Vallgornera, una sèrie de microestructures en forma de cilindres de dimensions micromètriques formades per l'aglomeració de partícules carbonatades amb presència de fosfats i, puntualment, recristal·litzades. La comparació amb estructures similars

observades a la Cova de sa Guitarreta, ha permès interpretar-les com a copròlits originats per l'activitat metabòlica d'ectoparàsits que afectarien a les colònies de ratapinyades. En aquest sentit, s'aportaria una prova més de la presència d'alguna colònia de ratapinyades a la Cova des Pas de Vallgornera, abans del moment del seu tancament pel col·lapse de les seves entrades naturals durant el pleistocè inferior.

Agraïments

Volem agrair a la Direcció General d'Espais Naturals i Biodiversitat del Govern de les Illes Balears els permisos per accedir a la Cova de sa Guitarreta i a la Cova des Pas de Vallgornera.

També volem expressar el nostre agraïment als companys de la Societat Espeleològica Balear, especialment a Juan J. Enseñat per la col·laboració prestada, així com a Ferran Hierro, Antoni Busquets i Joan Cifre dels Serveis Científic-Tècnics de la Universitat de les Illes Balears per el seu suport en l'anàlisi de les mostres. També als revisors dels Papers de la SEB pels seus suggeriments i comentaris que de bon segur han fet millorar el text final.

El present treball forma part del projecte finançat per la Agencia Estatal de Investigación (AEI), amb el número PID2020-112720GB-I00/.

Aquest treball està dedicat al nostre estimat i enyorat company Àngel Ginés.

Bibliografia

ALCOVER, J.A. & MUNTANER J. (1986): Els quiròpters de les Balears i Pitiüses: una revisió. *Endins*, 12: 51-63.

BALCELLS, E. (1968): Interesantes datos faunísticos y biológicos de la Cueva "Sa Guitarreta" de Llucmajor. *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears,* 14: 3-4.

BERMEJO, J.; PARDO, J.V.; MULET, G. & MATEU, T. (2021): Cova de sa Guitarreta (Llucmajor, Mallorca). *Gota a Gota*, 25: 20-27.

BOVER, P.; VALENZUELA, A.; GUERRA, C.; ROFES, J.; ALCOVER, J.A.; GINÉS. J.; FORNÓS, J.J.; CUENCA-BESCÓS, G. & MERINO, A. (2014): The Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca): a singular deposit bearing an exceptional well-preserved Early Pleistocene vertebrate fauna. *International Journal of Speleology*, 43 (2): 174-192.

FRITZ, G.N. (1983): Biology and ecology of bat flies (Diptera: Streblidae) on bats in the genus *Carollia*. *Journal of Medical Entomology*, 20 (1): 1-10.

GALÁN, J.; LÓPEZ-GARCÍA, J.M.; CUENCA-BESCÓS, G. & SEVILLA, P. (2024): The Quaternary record of fossil bat in the Iberian Peninsula and the Balearic Islands: Palaeobiogeographical changes and palaeoenvironmental implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 646: 1-14.

GINÉS J.; FORNÓS J.J.; GINÉS A.; MERINO A. & GRÀCIA F. (2014): Geologic constraints and speleogenesis of Cova des Pas de Vallgornera, a complex coastal cave from Mallorca Island (Western Mediterranean). *International Journal of Speleology*, 43 (2): 105-124.

GINÉS J.; FORNÓS J.J.; GRÀCIA F.; MERINO A.; ONAC B.P. & GINÉS A. (2017): Hypogene imprints in coastal karst caves from Mallorca Island (Western Mediterranean): Morphological Features and Speleogenetic Approach. In: KLIMCHOUK, A. et al. (eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Cave and Karst Systems of the World*, 5: 99-112.

KOCK, D. & QUETGLAS, J. (2003): The bat flies of the Balearic Islands. *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 46: 79-83.

MERINO, A. (2023): *La natura amagada. La Cova des Pas de Vallgornera*. Editat per l'autor - Societat Espeleològica Balear. 160 pàgs. Palma.

MERINO, A.; FORNÓS, J.J.; MULET A. & GINÉS, J. (2019): Morphological and mineralogical evidence for ancient bat presence in Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca, Western Mediterranean). *International Journal of Speleology*, 48 (2): 115-131.

MERINO, A.; FORNÓS, J.J.; MULET A. & GINÉS, J. (2022): Guano-derived morphologies and associated minerals in Cova de sa Guitarreta, Llucmajor, Balearic Islands. *International Journal of Speleology,* 51 (1): 43-58.

ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2005): Mineralogical reconnaissance of caves from Mallorca Island. *Endins*, 27: 131-140.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Ús i modificació antròpica del micromodelat exocàrstic costaner: l'explotació salinera a les costes rocoses de Menorca

Francesc X. ROIG-MUNAR [1,2], Lluís GÓMEZ-PUJOL [2], Bernadí GELABERT [2] i Vicenç FORTEZA [1]

[1] Investigador independent i Consultor Ambiental. C/ Carritxaret, 18. N.6. 07749 es Migjorn Gran (Menorca, Illes Balears).
[2] Grup de Recerca de Ciències de la Terra, Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7,5, 07122 Palma (Mallorca, Illes Balears). E-mail: lgomez-pujol@uib.cat

Abstract

The coastal karren formations along the low to moderate cliffs of southern Menorca display clear evidence of historical human modifications for salt production, with origins tracing back at least to the 14th century. This study investigates the range of factors that influenced the siting of these saltworks, examining the physiographic and morphological characteristics that made these locations suitable for such activity. Additionally, we analyse the techniques used for fragmenting and managing the basin pools, as well as the methods employed for salt extraction. Historical sources are also reviewed to underscore the significance of this salt production along Menorca's rocky coastlines, extending the timeline of its relevance through to the late 19th century.

Resum

Els conjunts de formes d'exocarst costaner (*karren* litoral) que apareixen al llarg dels penya-segats baixos i mitjans del sud de Menorca revelen evidències de modificacions humanes per a la producció de sal, que es remunten almenys al segle XIV. Aquest estudi explora els diferents factors que influeixen en la localització d'aquestes salines, així com els trets fisiogràfics i morfològics que facilitaren la seva implantació. A més, s'hi examinen les pràctiques implicades en la fragmentació i la regulació dels cocons, juntament amb els mètodes utilitzats per produir i recollir la sal de cocó. També es repassen les fonts històriques que posen de manifest la importància d'aquesta activitat d'explotació salinera a les costes rocoses, que es dugué a terme d'una forma regular i intensa fins a finals del segle XIX.

Roig-Munar, F.X.; Gómez-Pujol, L.; Gelabert, B. i Forteza, V. (2024): Ús i modificació antròpica del micromodelat exocàrstic costaner: l'explotació salinera a les costes rocoses de Menorca. Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 185-200. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 26 novembre 2024; **Revisat:** 10 desembre 2024; **Acceptat:** 17 desembre 2024.
Publicat online: 20 desembre 2024.

Introducció

Hom engloba sota l'epígraf de micromodelat exocàrstic el conjunt de formes de dimensions d'ordre mètric o inferiors (d'escassos mil·límetres) resultat, principalment, de l'acció de la dissolució del rocam carbonàtic en superfície. La bibliografia més especialitzada empra el terme *karren* per referir-se en aquest conjunt de formes de dissolució, així com per al conjunt de paisatges que acaben generant –*Karrenfelder*, *karren*, *lapiaz*, *lapiés*, camps de *lapiaz*– i que des del segle XIX són objecte d'estudi dels carstòlegs (GINÉS, 2009). Tot i que inicialment, el terme *karren* s'utilitzà per descriure un tipus particular de canals i canalicles de dissolució que solquen la superfície de les roques calcàries, avui per avui, el concepte abasta un espectre molt ample de formes de diferents dimensions (SWEETING, 1972; GINÉS et al., 2009). En aquest sentit, els agents i els processos que intervenen en la seva formació també són molt variats, des de l'acció directa de les gotes de pluja, l'escolament superficial laminar i el canalitzat, els fluxos de percolació i subsuperficials que circulen per la interfase sòl-roca mare, la fusió de la neu, les pel·lícules de rosada o la dissolució bioinduïda per organismes (GINÉS, 2004). Tanmateix el paper de l'home, com un agent més –de forma directa o indirecta– en la formació

i evolució d'aquestes expressions del modelat no ha passat desapercebut. GINÉS (1998, 1999) per tal d'explicar l'evolució i l'abast espacial i temporal dels camps de lapiaz (*karrenfields*) de la Serra de Tramuntana a Mallorca, posà en valor un desenvolupament previ de les formes de subsòl, de marcat caràcter arrodonit i aparença suau (*subcutaneous karren*), que, amb posterioritat, quedarien exhumades i sobre el perfil de les quals es llavorarien les formes més rugoses i esmolades, típiques de l'exocarst, arran de l'acció directament sobre el rocam dels processos subaeris i la colonització biològica. Entre els diferents mecanismes que propiciaren l'exhumació del *criptolapiaz*, GINÉS (1995) i GINÉS & GINÉS (2009) proposen la pèrdua de la cobertura edàfica associada al propi desenvolupament càrstic i l'aprofundiment de les formes de dissolució; als canvis ambientals i climàtics del plio-quaternari i la successió de períodes càlids i humits amb els freds i àrids; i, finalment, a l'impacte dels incendis forestals –tant naturals com d'origen antròpic– o els usos agrícoles. Comptat i debatut, a la clàssica llista d'agents i processos que afecten les formes del modelat cal afegir-hi l'home. En l'àmbit estrictament més terrestre, no és estrany trobar formes d'ús o aprofitament del modelat exocàrstic de majors dimensions (p.e. petites dolines i balmes), des d'antuvi, com a sestadors o, fins i tot, després de lleugers retocs com a habitació (vid. ALCOVER et al., 2001). En els ambients costaners, en canvi, no ha estat fins a les dues darreres dècades que han començat a aparèixer treballs relatius a l'ús i la modificació antròpica de les formes exocàrstiques del rocam carbonàtic, i com a mínim en el marc de la Mediterrània i arran del particular cas de l'illa de Malta i la seva configuració geomòrfica, es té constància de la pràctica de l'explotació de sal, a partir de la seva precipitació dins els cocons (*kamenitzas*, *basin pools*) que es troben als replans dels penya-segats costaners (GAUCI et al., 2017).

A les Illes Balears, el micromodelat de les costes rocoses carbonàtiques –molt abundant a les costes baixes i els penya-segats mitjans de perfil complex, i amb relleixos– resulta de la interacció entre diferents processos i agents, motiu pel qual les formes que s'hi observen no sempre tenen una naturalesa estrictament càrstica en l'accepció clàssica d'aquest mot (JENNINGS, 1985). Així doncs, sota l'epígraf de *karren* litoral, *karren* costaner o, a tot estirar, *karren* marí, s'acostuma a agrupar el conjunt de microformes d'alteració (de l'ordre mil·limètric al mètric) que apareixen de la zona interlitoral a la supralitoral de les costes rocoses, i que es perllonguen fins a l'àrea de declivi dels processos marins enfront dels pròpiament terrestres i en les quals la dissolució juga un paper important. Queden, doncs, fora d'aquesta definició, entre d'altres, formes com les marmites, les plataformes litorals o les construccions organògenes, tan estretament lligades als ambients que es consideren (GÓMEZ-PUJOL et al., 2001). Inspirats pels treballs de GINÉS (1995) a propòsit de l'exhumació de les formes de *criptolapiaz* a la Serra de Tramuntana, GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS (2004a i b), també han descrit a partir de la intercalació de conductes de subsòl (*subsoil tubes*, *subsoil shafts*) amb els cocons, la contribució de la erosió del sòl i l'exhumació de formes de *criptolapiaz* en el *karren* litoral. Tanmateix, si aquest fenomen està relacionat amb la pèrdua de la cobertura edàfica per causes naturals o antròpiques, el fet és que malgrat l'extensa recerca desenvolupada a propòsit del modelat exocàrstic costaner (vid. GÓMEZ-PUJOL, 2006; GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS, 2009; POMAR et al., 2017), no s'ha descrit, ni apuntat, cap evidència de l'ús o l'explotació antròpica d'aquest conjunt de microformes del relleu.

Així les coses, en el marc de les campanyes de camp associades a la tesi de ROIG-MUNAR (2016), a propòsit dels dipòsits de tempesta i de tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears, l'esmentat autor s'adonà de l'existència de cocons regulats o el perímetre dels quals havia estat modificat artificialment, i a partir d'aquí s'inicià un extens conjunts d'activitats per tal de descriure i contextualitzar des d'un punt de vista geomorfològic, històric i etnològic l'ús i explotació antròpica del micromodelat exocàrstic costaner. Aquestes exploracions afloraren o tornaren a posar en valor l'ús secular d'alguns coconars com a explotacions salineres. Encara que les primeres observacions es realitzaren a l'illa de Menorca (vid. ROIG-MUNAR et al., 2022), el cert és que s'han trobat exemples d'explotacions semblants a l'illa de Mallorca. Així doncs, els objectius del present treball són: (a) donar a conèixer els factors de localització d'aquests coconars explotats a mode de salines, (b) descriure les pràctiques d'artificialització i el seu resultat sobre el modelat, (c) intentar datar el moment en què es produeix aquesta explotació i contextualitzar els aspectes socio-econòmics-culturals associats a aquestes salines, (d) il·lustrar el procés i els aspectes etnològics relacionats amb la producció de sal de cocó a partir de les fonts orals i (e) catalogar i descriure tot aquell conjunt de formes antròpiques que s'afegeixen i intercalen amb el *karren* litoral. Per tal de dotar de contingut aquests objectius, el present treball se centrarà al sud de l'illa de Menorca, atès que és l'àrea on s'han desenvolupat les tasques de recerca de forma més intensa i on han aflorat el major nombre d'evidències que permeten tenir una visió transversal i multidisciplinària del fenomen.

Àrea d'estudi

L'illa de Menorca es localitza al centre de la Mediterrània occidental i és l'illa més septentrional i oriental de l'arxipèlag de les Illes Balears (Figura 1). Compta amb una superfície de 695 km^2 i és la segona en extensió de les Illes Balears, com també ho és en termes de perímetre litoral, tot sumant 433 km de línia de costa. La configuració d'aquest litoral resta condicionada per les característiques morfoestructurals i fisiogràfiques de les dues meitats en què es divideix l'illa, Tramuntana al nord i Migjorn al sud (BALAGUER et al., 2017). Una de les principals diferències entre ambdues unitats és que Tramuntana està formada per materials deformats, afectats per estructures compressives associades a les orogènies herciniana i alpina, mentre que el sud està format per materials postorogènics, només afectats per la tectònica de distensió i reajustament (FORNÓS & OBRADOR, 2003; GELABERT et al., 2005). Pel que fa als materials, mentre a la Tramuntana hi dominen materials del carbonífer, del triàsic –principalment silícics– i del juràssic –aquests per contra de naturalesa carbonàtica–, el Migjorn està constituït per materials postorogènics carbonàtics, en la seva majoria calcarenites i calcilutites del miocè superior, acompanyades puntualment d'eolianites plio-quaternàries (FORNÓS & OBRADOR, 2003; OBRADOR & POMAR, 2004). Aquesta combinació d'estructura i naturalesa litològica justifica que la línia de costa de Tramuntana sigui més articulada que la del Migjorn, que és més rectilínia i, en proporció, amb una major presència de penya-segats que en el seu sector central es caracteritzen per penya-segats verticals mitjans (10 a 25 m) i baixos (< 10 m), mentre que en els sectors septentrional i oriental del Migjorn l'alçària de les timbes costaneres és més modesta, fins al punt de predominar la costa en graó (FORNÓS et al., 2017). Sobre el perfil dels penya-segats i els seus diferents replans s'acostuma a instal·lar un complex micromodelat exocàrstic en què participen tant formes de planta circular (cocons) com formes lineals (canals, *rillenstein*, *microrills*) o elements ruïniformes (pinacles). GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS (2004a) caracteritzaren la successió de les formes esmentades al llarg del perfil de costa en funció del gradient hidrodinàmic i la zonació biològica. Presentant-se rere de la

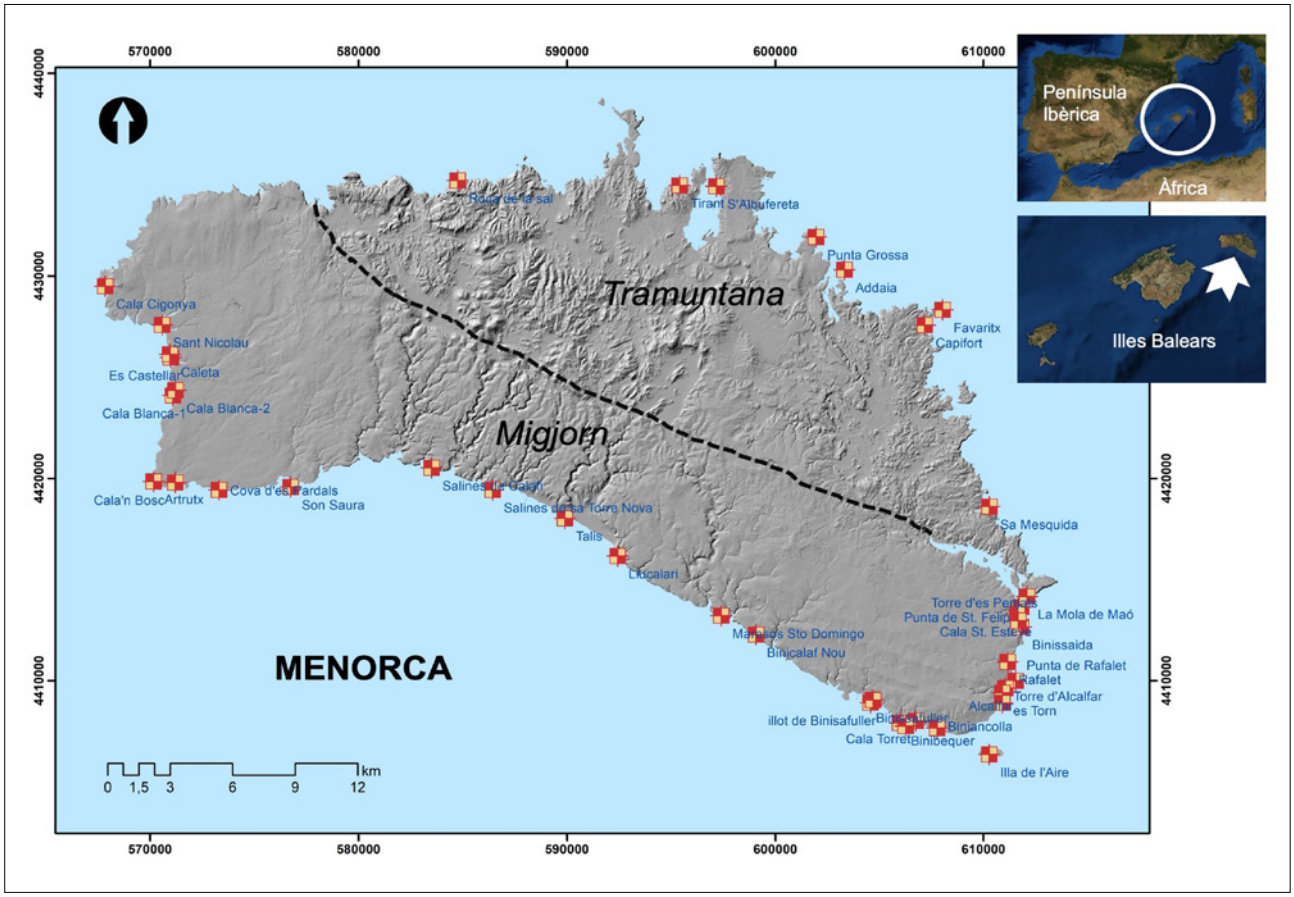


Figura 1: Localització dels conjunts de *karren* litoral de l'illa de Menorca on s'han trobat evidències de cocons modificats i adaptats per a l'explotació salinera.
Figure 1: Location of the coastal *karren* assemblages around the island of Menorca with evidence of modified and adapted basin pools for salt exploitation.

plataforma litoral i el *notch* una zona de pinacles, a la qual segueix un sector de cocons connectats que tendeixen a individualitzar-se així com el perfil avança cap a terra. En aquest darrer sector característic de la zonació del modelatge exocàrstic costaner, s'han detectat evidències d'ús de les formes del *karren* litoral a manera de salines a 32 localitats de la costa meridional de l'illa (Figura 1 i 2). Val a dir que a la costa nord també s'han localitzat algunes localitats amb cocons adaptats per a l'obtenció de sal, sempre sobre pegats d'eolianita plio-quaternària i, tant en nombre, com en magnitud, d'un caràcter més marginal que els del sud. Per aquest motiu, malgrat que s'han inventariat un total de 41 localitats amb cocons saliners, el present estudi només abordarà les 32 localitats del domini meridional de l'illa.

Figura 2: Exemples de diferents formacions de *karren* litoral i la disposició dels cocons connectats i aïllats en el perfil de la costa rocosa del Migjorn de Menorca. (a) Alcalfar; (b) Sant Esteve-Binissaida; (c) Biniancolla; (d) Punta des Rafalet.
Figure 2: Examples of different coastal *karren* assemblages and at the disposal of the connected and isolated basin pools along the profile of the rocky coasts of the Migjorn of Menorca. (a) Alcalfar; (b) Sant Esteve-Binissaida; (c) Biniancolla; (d) Punta des Rafalet.

Materials i mètode

Factors de localització dels coconars explotats com a salines i morfometria dels cocons

Per tal de determinar si existeix un patró que condicioni l'explotació dels coconars com a salines, en aquelles localitats del Migjorn de Menorca on es detectà la presència de divisions artificials de cocons, l'ampliació d'aquests o bé la connexió de forma artificial entre cocons, s'ha determinat l'alçària mitjana dels coconars explotats i la distància a la línia de costa sobre el model digital d'elevacions obtingut a partir del LIDAR del Pla Nacional d'Ortofotografia Aèria (PNOA) de 2019 amb una cobertura de malla d'1m x 1m,. En els casos en què els camps de lapiaz es desenvolupen sobre un planell, també se n'ha quantificat l'amplària del planell sobre el model digital d'elevacions. El mateix perfil topogràfic ha servit per classificar el tipus de penya-segat, tot separant-ne tres tipus: vertical, còncau, convex i especificant una subtipologia, si el penya-segat era precedit, o no, per un planell/relleix sobre el qual es desenvolupa el camp de *karren* litoral (Figura 3).

Caracterització de les estratègies de modificació dels cocons per a l'explotació salinera

Per tal de descriure i caracteritzar les pràctiques d'explotació es procedí a la compilació d'un catàleg d'estratègies de modificació del *karren* litoral per a la producció de sal (i.e. connexió o divisió de cocons, retall de límits), així com s'hi identificaren diferents elements constructius associats a l'explotació

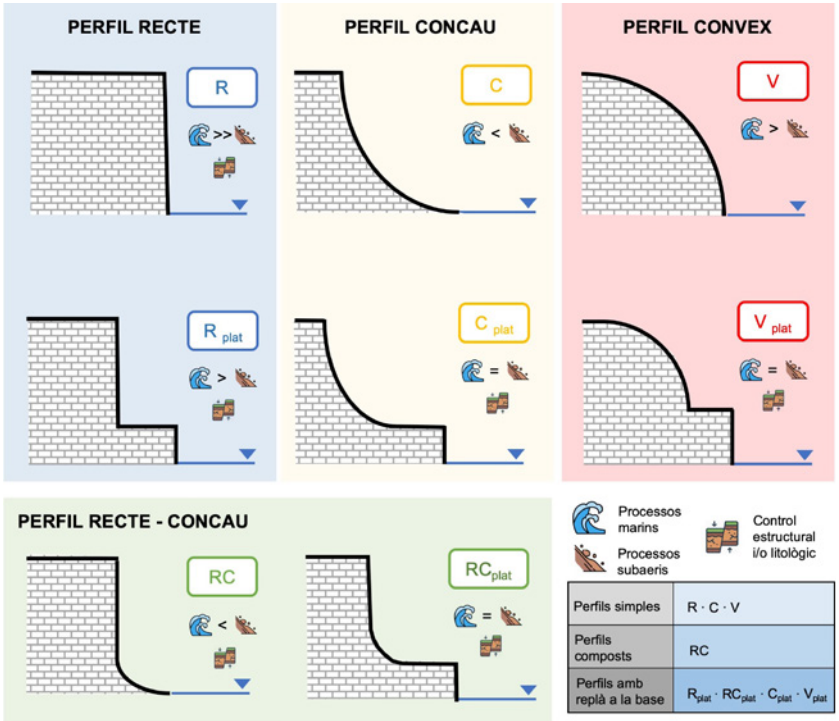


Figura 3: Criteris per a la classificació del perfil del penya-segat en funció de la seva geometria.
Figure 3: Criteria for the classification of the cliff profile based on its geometry.

de les salines. Addicionalment, al SE de l'Illa de Menorca, a la zona compresa entre Cala Sant Esteve i Alcalfar (Figura 1), s'ha caracteritzat la morfometria dels cocons explotats a mode de cubeta salinera i se n'ha mesurat la llargària i amplada màxima, així com la profunditat mitjana. En els casos en què apareixen estructures artificials dins dels cocons, també se n'ha determinat amb una cinta mètrica l'alçada i amplària. Es caracteritzà mitjançant difracció de RX i SEM, la mineralogia de les parets artificials de les salines, així com les salmorres acumulades. La difracció de raigs X (XDR) es realitzà amb un aparell Bruker-D8-Advance dels Serveis Cientificotècnics de la Universitat de les Illes Balears. Els paràmetres emprats en la difracció foren un voltatge de 40 kV i corrent de 40 mA, amb radiació CuKα. L'adquisició es feu dels 3 als 70° 2θ, amb passos o intervals de 0,020°, i el temps per pas de 96 segons. Posteriorment, per tal de donar un valor percentual de la composició mineralògica de les mostres, els difractogrames foren analitzats mitjançant el programari Diffrac Suite EVA v. 4.4. Les mostres foren observades i fotografiades a la lupa binocular i amb un microscopi electrònic de rastreig (Hitacchi S-3400N), SEM, equipat amb un sistema de microanàlisi (Bruker EDS-X-Flash Detector 4020), també dels Serveis Cientificotècnics de la Universitat de les Illes Balears.

Fonts històriques i història oral

S'han consultat els arxius històrics de l'Arxiu Històric de Menorca (AHMe), corresponents a Reial Patrimoni, compresos entre els anys 1761 i 1870, els de la Cúria de la Reial Governació compresos entre 1760 i 1781, i els de l'arxiu del Museu Militar de Menorca, per tal de detectar l'existència de contractes o permisos per a l'explotació de la costa –domini Reial a l'època–, la naturalesa de l'explotació i la importància en termes econòmics. També s'han revisat els mapes històrics de Menorca realitzats entre els anys 1585 i 1915 per identificar tant la representació de salines com l'existència de topònims específics relatius a la pràctica salinera sobre els penya-segats.

Finalment, entre d'altres testimonis parcials, s'ha localitzat una persona d'edat avançada, que a la seva infantesa i en el seu àmbit familiar encara participà de l'explotació d'una d'aquestes salines, i que encara practica la recol·lecció de sal de cocó. S'entrevistà Joan Torres, Salpruig, el juny de 2023 en un marc informal i sense enregistrament, en relació a la pràctica, les eines i altres aspectes de caràcter etnogràfic. S'optà per aquest tipus d'entrevista per tal de no coaccionar l'entrevistat, garantir l'espontaneïtat i facilitar el màxim d'informació.

Resultats

Estratègies de modificació dels coconars explotats com a salines

L'exploració del sectors de costa amb conjunts de *karren* litoral ha permès identificar i agrupar un conjunt d'estratègies de modificació del micromodelat exocàrstic per a l'obtenció de sal, popularment coneguda com a sal de cocó. Els cocons constitueixen depressions naturals per a l'obtenció de sal marina, en què s'aprofita el volum d'aigua procedent de les tempestes marines, o bé per ompliment artificial, especialment a l'estiu, quan l'elevada evaporació afavoreix l'acumulació de salmorres. Per afavorir el procés d'evaporació, s'ha observat a diferents localitats, que es modifiquen els cocons mitjançant les següents tècniques, o bé hi ha evidències d'estructures auxiliars per a la producció de sal:

a) <u>Ampliació dels límits o regularització de la geometria dels cocons</u>. En condicions naturals les formes i la geometria dels cocons (Vid. GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS, 2009 i 2010) estan condicionades per la naturalesa del rocam i el control de la densitat i direcció de les diàclasis. De més a més de la proximitat a la línia de costa i la quantitat d'aportació d'aigua marina en forma d'agrenat (*swash*), esquits (*splash*) i ruixim (*spray*). El resultat sol ser un aspecte ruïniforme, molt característic dels conjunts de *karren* litoral, però que a efectes d'explotació o simplement de trànsit, arran de l'evelada rugositat, és molt incòmode. Així doncs, no resulta estrany trobar exemples de cocons sinuosos, que han estat regularitzats, que el seu perímetre s'ha cisellat per obtenir plantes més regulars (Figura 4a), o bé que s'han ampliat per tal de treure un major rendiment en terme de producció de salmorres (Figura 4b). Hi ha casos en què s'ha apreciat el rebaixament del fons del cocó perquè sigui més profund i d'altres en què el fons del cocó ha estat allisat per reduir-ne la rugositat i facilitar l'homogeneïtat en la deposició de les sals (Figura 4c).

b) <u>Comunicació de diferents cocons per tal d'afavorir el reompliment i drenatge.</u> En els sistemes naturals de *karren* litoral hi ha una zona entre el sector més proper a la línia de costa on dominen microformes de caràcter positiu i punxegut com són els pinacles i la zona més terrestre on apareixen cocons

clarament aïllats i individualitzats (vid. GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS, 2009 i 2010). Aquesta zona intermèdia se sol caracteritzar per la coalescència de cocons, afavorida normalment per la direcció de diàclasis dominants. La comunicació de cocons es genera per coalescència, pel trencament de les parets, o perquè la dissolució aprofita un punt de debilitat i s'esfondra generant arcs o conductes de connexió. En l'exploració de les localitats sota estudi, amb relativa freqüència, s'han identificat casos en què la connexió entre cocons es produeix per una canal rectilínia picada a la roca, en alguns casos aprofitant una diàclasi o fractura pre-existent; en d'altres realitzada directament, sense aprofitar cap element natural (Figura 4d). En tots els casos aquestes canals persegueixen afavorir el reompliment de cocons amb aigua marina, ja que els cocons més baixos per la pròpia dinàmica del trencament de l'onatge sobre el replà o la plataforma litoral, són agranats i per gravetat experimenten fluxos de sortida de l'aigua, mentre que els més alts i aïllats retenen l'aigua aportada per les onades i els esquits. Així, es garanteix que en el cas que se superi la columna d'aigua òptima per a la producció de sal en els cocons superiors, el sobrant passi a omplir una altra depressió per un simple mecanisme de gravetat i així garantir que hi ha un major nombre de depressions que retenen aigua marina i que experimentaran l'evaporació i produiran salmorres.

c) <u>Compartimentació de cocons per la construcció de parets/discs.</u> Una de les altres evidències de l'antropització dels sistemes de *karren* litoral es pot apreciar en els cocons de majors dimensions. Aquests apareixen subdividits per parets o dics rectilinis d'escassa altura i gruixa fetes de morter –amb un característic color ocre-blanquinós– o bé repicats al rocam (Figura 5a i b). Aquesta pràctica afavoriria l'evaporació, ja que controlaria el volum d'aigua retinguda i que, al llarg dels cocons

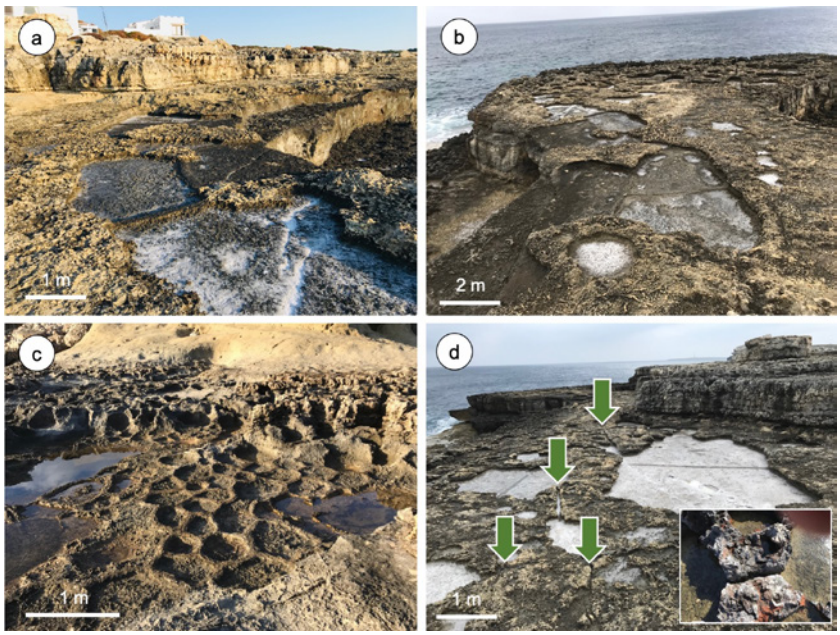


Figura 4: Estratègies d'ampliació dels límits o regularització de la geometria dels cocons. a) Repicat dels límits sinuosos dels cocons a formes poligonals a la localitat d'Alcalfar; b) regularització dels límits dels cocons, ampliació de les dimensions i suavitzat de la rugositat dels fons als penya-segats d'Alcalfar; c) picat de depressions de petites dimensions per a forçar una evapotranspiració més ràpida i una major producció de salmorres a Binissaida; d) connexió mitjançant canals cisellades a la roca aprofitant diàclasis o bé picant directament sobre el rocam (fletxes verdes), Alcalfar.

Figure 4: Strategies for enhancing or regularising the geometry of basin pools: (a) transformation of sinuous basin boundaries into polygonal shapes at Alcalfar; (b) regularisation of basin boundaries, expansion of dimensions, and smoothing of bottom roughness along the cliffs of Alcalfar; (c) excavation of small depressions to accelerate evapotranspiration and increase brine production in Binissaida; (d) creation of inter-basin connections via channels carved into the rock (green arrows), utilising joints or direct rock cutting in Alcalfar.

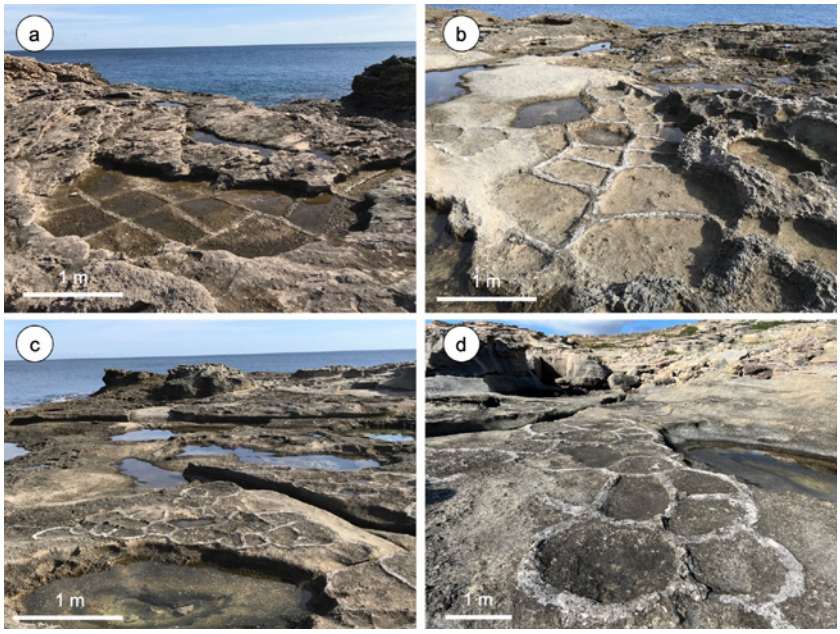


Figura 5: Estratègies de compartimentació de cocons i construcció de cocons *ex-novo* per a la producció de sal a Binissaida. Divisió dels cocons de grans dimensions en unitats de producció més petites a partir de parets artificials de morter, sovint de geometria poligonal, per afavorir la producció de salmorra (a) i (b). En els rocams més tous on s'afavoreix la destrucció dels cocons, aquests es creen de forma artificial aprofitant tant els espais que resten entre els cocons esventrats (c), així com dins les antigues depressions naturals que l'onatge hauria inutilitzat (d).

Figure 5: Strategies for the compartmentalisation of basin pools and the construction of new basin pools for salt production at Binissaida: (a) and (b) division of large basin pools into smaller production units using artificial mortar walls, often with polygonal geometries, to enhance brine production; (c) artificial creation of basin pools in softer rock formations, taking advantage of spaces left between eroded basin pools; (d) utilisation of old natural depressions rendered otherwise unusable by wave action.

de dimensions superiors als 2 m, les característiques de les salmorres fossin més homogènies, ja que limitarien el gradient i la diferent concentració de sals entre els extrems del cocó i el seu centre i reduirien les possibilitats d'una precipitació zonal dels diferents tipus de minerals salins (EUGSTER & HARDIE, 1978).

d) Construcció *ex-novo* de cocons per a l'obtenció de sal. A les localitats on la naturalesa del rocam és més lutítica, les formes del modelat exocàrstic són menys rugoses i de menors dimensions. De més a més, la cimentació de la roca és menor i elements com les parets dels cocons són menys resistents i l'onatge és capaç de desmantellar-les. Motiu pel qual solen presentar un aspecte aplanat i si els cocons resisteixen solen estar desventrats i no permeten la retenció d'aigua. Quan es donen aquestes circumstàncies no és gens estrany, tot aprofitant la dimensió de les superfícies horitzontals escassament rugoses, la construcció de cocons de dimensions mitjanes i planta rodona-ovalada a partir de parets de morter (Figura 5c). En els casos d'explotació més intensa, tot i l'existència de cocons naturals on es pot realitzar l'activitat salinera, s'aprofiten les superfícies planes que els separen per a construir mitjançant parets de morter cocons artificials i així, tot optimitzant la superfície explotable, incrementar la producció de sal (Figura 5d).

e) Estructures auxiliars per a la producció de sal o associades a les localitats d'explotació. Una de les altres evidències de l'explotació dels sistemes de *karren* litoral per a la producció de sal, és l'existència d'elements relacionats amb les activitats extractives. No són de les evidències més abundants i en alguns casos es troben en un estat de degradació avançat, però així mateix cal esmentar l'existència de restes de murs d'habitacions-porxos destinats a emmagatzemar temporalment la sal (Figura 6a, b i c) o assecadors de planta rectangular (Figura 6d); així com agrupacions de tres depressions cilíndriques de 5 a 10 cm de diàmetre picades a la roca, que mantenen una distància relativa entre elles i que la seva disposició guarda al voltant de 60 graus entre depressió i depressió (Figura 6e). El fet que aquesta terna de depressions es trobi sempre sobre el cantell de les parets verticals més properes a la mar, feu sospitar que es podia tractar de la base d'un ternal per pujar aigua marina i reomplir els cocons de forma artificial. Aquest terme fou confirmat amb posterioritat a partir de les entrevistes a persones descendents dels antics explotadors de les salines. De forma indirecta, també hi ha alguns elements relacionats amb l'explotació, com són aquells cocons que a mode de gaveta foren emprats per preparar el morter amb què construir les parets de subdivisió o de nova planta esmentades anteriorment (Figura 6f), o bé cocons adaptats o picats de bell nou per a la preparació de grumeig per a la pesca, o bé un cop reomplerts d'aigua per a mantenir temporalment les captures (Figura 6g i 6h) (ROIG-MUNAR et al. 2024).

Figura 6: Estructures auxiliars per a la producció de sal: (a) i (c) porxo per al refugi i emmagatzament temporal de la sal a Biniancolla; (b) porxo a Cala Sant Esteve; (d) assecador de planta circular a Biniancolla; (e) perforacions per a la base del ternal que permetia pujar aigua de la mar per reomplir els cocons a Cala Sant Esteve; (f) depressió utilitzada per generar el morter de calç amb què es fan les subdivisions artificials dels cocons a la localitat de Cala Sant Esteve; (g) depressions utilitzades per a generar la pasta de grumeig per a la pesca de roquer a Binissaida; (h) depressió picada a la roca per estotjar temporalment les captures de la pesca a Cala Sant Esteve.
Figure 6: Auxiliary structures related to salt production: (a, c) a porch providing shelter and temporary storage for salt in Binissaida; (b) a porch in Cala Sant Esteve; (d) a circular drying structure in Biniancolla; (e) perforations at the base of the stern enabling seawater to rise and refill the basin pools in Cala Sant Esteve; (f) a depression used for producing lime mortar, which was employed in constructing the artificial subdivisions of the basin pools in Cala Sant Esteve; (g) depressions used for preparing bait paste for rock fishing in Biniancolla; (h) a rock-cut depression for the temporary storage of fishing catches in Cala Sant Esteve.

Factors de localització dels coconars explotats com a salines

S'han identificat indicis d'explotació de conjunts de *karren* litoral a mode de cocó saliner a 32 localitats del Migjorn de Menorca (Taula 1). Tot i que com es pot comprovar a la Figura 1 aquestes localitats es distribueixen al llarg de tot el perímetre de la unitat morfoestructural meridional de l'illa, el cert és que són més abundants en els flancs oriental i occidental del Migjorn, coincidint amb els penya-segats més

Localitat	Tipus de penya-segat	Distància Isòbata -10 m (m)	Altura penya-segat (m)	Distància a la línia de costa (m)	Amplada replà (m)	Pendent penya-segat (%)	Litologia
Punta de Sant Felip	Cplat	52,4	3,5	17,5	19	20	Calcarenites miocè superior
Cala Sant Esteve	Cplat	39,7	2,5	5	75	50	Calcarenites miocè superior
Torre des Penjat	Cplat	26,5	6,7	7	12	96	Calcarenites miocè superior
Binissaida	Vplat	50	2,1	7	15	30	Calcarenites miocè superior
Cala de Rafalet	Cplat	157	15	11	17	136	Calcarenites miocè superior
Punta de Rafalet	Cplat	50,4	2,5	10	9	25	Calcarenites miocè superior
Alcalfar	Rplat	81,7	7,5	8	25	94	Calcarenites miocè superior
Illa des Torn	Rplat	47,7	7	5	6	140	Calcarenites miocè superior
Torre d'Alcalfar	RCplat	75,2	5,5	14	15	39	Calcarenites miocè superior
Illa de l'Aire	Rplat	35	10	2	50	500	Calcarenites miocè superior
Biniancolla	Rplat	139,8	1	3	13	33	Calcarenites miocè superior
Cala Torret	Rplat	118,1	6	2,5	11	240	Calcarenites miocè superior
Punta de Binibèquer	Rplat	27,5	3,5	3	27	117	Calcarenites miocè superior
Binibèquer	Rplat	0	9	6	34	150	Calcarenites miocè superior
Illot de Binisafúller	RCplat	301,8	1,9	12	15	16	Calcarenites miocè superior
Binisafúller	RCplat	488,7	1	10	13	10	Calcarenites miocè superior
Binicalaf Nou	C	112,5	0,5	5	5	10	Eolianita quaternària
Maressos de Sant Domingo	C	65,4	0,5	30	30	2	Eolianita quaternària
Cala Llucalari	RC	37,1	9	1	7	90	Calcarenites miocè superior
Talis	RCplat	224,9	4	17	11	24	Calcarenites miocè superior
Salines de sa Torre Nova	Rcplat	166,11	4,2	18	12	24	Calcarenites miocè superior
Salines de Calafi	C	131,4	0,5	11	12	5	Eolianita quaternària
Son Saura	Rcplat	0	9	17	38	53	Calcarenites miocè superior
Cova des Pardals	Cplat	62	5	12	28	42	Calcarenites miocè superior
Barraca d'en Capó	Cplat	129,1	2,5	7	12	36	Calcarenites miocè superior
Artrutx	Rplat	82,2	5,7	4	21	143	Calcarenites miocè superior
Cala Blanca 1	Rplat	126,2	3	2	18	150	Calcarenites miocè superior
Cala Blanca 2	Rplat	131,4	4	6	14	67	Calcarenites miocè superior
Torreta des Castellar	Rplat	0	2	2	12	100	Calcarenites miocè superior
sa Caleta	Rplat	30,2	5	5	15	100	Calcarenites miocè superior
Sant Nicolau	Rplat	67,5	5	4,5	12	111	Calcarenites miocè superior
Cala Cigonya	Rplat	139,3	2,9	1	14	290	Calcarenites miocè superior

Taula 1: Morfometria i tipologia de rocam de les localitats amb conjunts de *karren* litoral explotats a mode de salina al Migjorn de Menorca. Per a la tipologia de penya-segats, consulteu els codis de la Figura 3.
Table 1: Morphometric attributes and rock type of the study sites with saline-exploited coastal *karren* assemblages in the South of Menorca. For the typology of cliffs, see the codes in Figure 3.

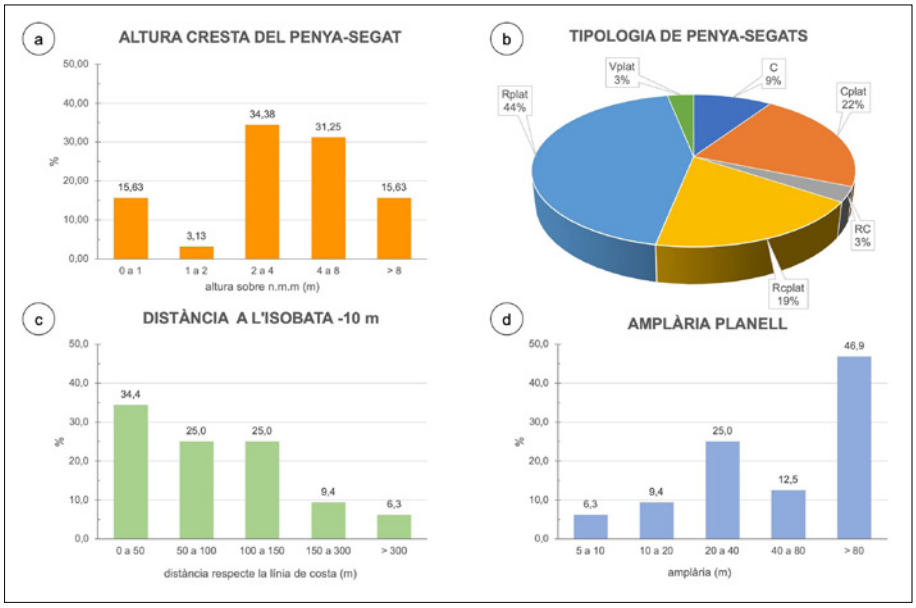


Figura 7: Característiques morfològiques dels penya-segats on apareixen conjunts de *karren* litoral amb indicis d'haver estat explotats com a salines al Migjorn de Menorca.
Figure 7: Morphological characteristics of the cliffs where sets of littoral *karren* appear with signs of having been exploited as salt pans in southern Menorca.

baixos i de perfil més complex. Així el 31,3 % de les localitats amb coconars amb indicis d'explotació es localitzen als marges occidentals del Migjorn de Menorca, el 18,8 % al sector central de la costa meridional, entre l'arenal de Son Saura i Binisafúller– i el 50 % al sector oriental de Migjorn. Excepte en tres casos, tots localitzats al sector central de la costa de Migjorn, que afecten a conjunts de *karren* litoral desenvolupats sobre eolianites quaternàries, la resta de localitats es corresponen amb afloraments de calcarenites-calcilutites del miocè superior.

El més habitual és que els conjunts de *karren* litoral explotats com a salines apareguin a la cresta de penya-segats amb una altura entre 2 i 4 m (34,4 %) i entre 4 i 8 m (31,3 %) (Figura 7a). La tipologia dels penya-segats és majoritàriament vertical (66 %), tot i que dins d'aquesta categoria es pot diferenciar un 44 % de casos on apareix un penya-segat vertical amb un relleix o planell horitzontal (44 %), o un perfil complex de penya-segat vertical amb trams concaus, però també amb el desenvolupament de relleixos o planells (19 %) (Figura 7b). Li segueixen en importància els penya-segats concaus precedits per un planell (22 %), o els netament de perfil concau (9 %), que estan associats als afloraments d'eolianites quaternàries. La resta de tipologia de penya-segats, amb prou comptes, representen el 3 % de les localitats (Taula 1). En qualsevol cas, en un 84,4 % dels casos de les localitats estudiades, la isòbata de 10 m es troba a menys de 150 m de la línia de costa (Figura 7c), el que denota que les parets verticals dels penya-segats tenen un caràcter aplomat i condicionen el tipus d'humectació i freqüència d'arribada dels esquits o l'agranat de l'onatge a esdeveniments relativament energètics. També és important destacar que els replans o planells esmentats aprofiten la naturalesa tabular dels dipòsits del miocè superior i solen coincidir amb canvis texturals o el contacte entre estrats, tot arribant a assolir amplades entre 5 i 75 m, essent el més habitual trobar els cocons explotats com a salines a planells de 20 a 40 m (25 %) o de més de 80 m (46,9 %) (Figura 7d).

Morfometria dels cocons

Al sector de costa amb les explotacions més intensives de conjunts de *karren* litoral com a salines, localitzades entre Punta des Rafelet i Binissaida, al sector sud-oriental de l'illa (Figura 1), s'ha caracteritzat la morfometria de 77 cocons utilitzats per a la producció de sal. D'aquests 77, 48 són cocons construïts *ex-professo* mitjançant parets d'argamassa i els altres 29 són cocons d'origen natural, dels que se n'han regularitzat els límits o el fons. La llargària d'aquests cocons oscil·la entre els 25 i els 270 cm, mentre que l'amplària ho fa entre els 31 i els 180 cm i la profunditat assoleix mínims d'1,60 cm i màxims de 3,50 cm. La planta d'aquestes cubetes tendeix a ser isomètrica, encara que així com augmenta la llargària dels cocons, aquests evolucionen cap a formes més rectangulars, allargades (Figura 8a), i es tracta de depressions més llargues o amples que fondes i que, amb independència de la seva llargada, mai superen els 5 cm de profunditat (Figura 8b). De fet, tot i que hi ha casos puntuals en què se superen els 2,5 m de llargària, els cocons explotats per a produir sal, solen tenir dimensions entre 50 cm i 1 m, o fins i tot menors, rang que aglutina prop del 77 % dels cocons caracteritzats (Figura 8c). El mateix que passa amb l'amplària, que en un 88 % dels casos ni supera el metre d'eix menor dels cocons (Figura 8d). La fondària presenta una variabilitat molt restringida, els 61 % dels casos just assoleixen profunditats entre 2 i 3 cm (Figura 8e), de manera que la relació llargària/profunditat és majoritàriament un eix major del cocó de 20 a 30 vegades la profunditat (Figura 8f). Com es pot apreciar a les Figures 8a i 8g, tot i que els cocons construïts assoleixen dimensions en planta majors que els cocons d'origen natural que han estat modificats, el cert és que no hi ha una diferència significativa entre les ràtios llargària/profunditat i

el tipus de cocó. En unes altres paraules, en la morfometria dels cocons explotats a mode de salina hi ha una preponderància pels cocons aplanats on prima l'exposició en superfície de la làmina d'aigua retinguda, en lloc de la retenció de grans volums d'aigua. Fet i fet, tot per afavorir l'evaporació de l'aigua i la precipitació de la sal.

La subdivisió i la creació de cocons saliners amb morter

En el mateix sector de costa on s'ha caracteritzar la morfometria dels cocons emprats com a salina, s'ha prospectat rocam de les parets dels cocons picats i també s'ha mostrejat les parets dels cocons construïts o de les subdivisions a l'interior dels cocons naturals de majors dimensions.

A la Taula 2 es recullen els resultats de l'estudi de la mineralogia d'aquests elements mitjançant difracció de raigs X (XRD), de manera que la mostra procedent del rocam del miocè superior on es desenvolupen els conjunts de *karren* litoral, estan formats principalment per calcita (85,4 %) i percentatges menors de sals i guix que es poden haver depositat sobre la roca (14,6 %). En canvi, les parets amb què s'han elaborat els cocons *ex-novo* o s'han subdividit els cocons naturals de grans dimensions presenten una mineralogia diferent de la del rocam. Així, s'observa que aquestes subdivisions són principalment d'aragonita (9 a 22 %) i dolomita (17 a 77 %), així com una presència de quars (entre un 2,9 % i un 8,5 %) que en cap cas apareixen a la mostra del rocam del miocè superior (Taula 2). Encara que de forma puntual i amb diferències entre observacions, també es detecta a les mostres procedents de les parets artificials la presència d'halita (1 a 9 %) i de minerals d'argila (6 %).

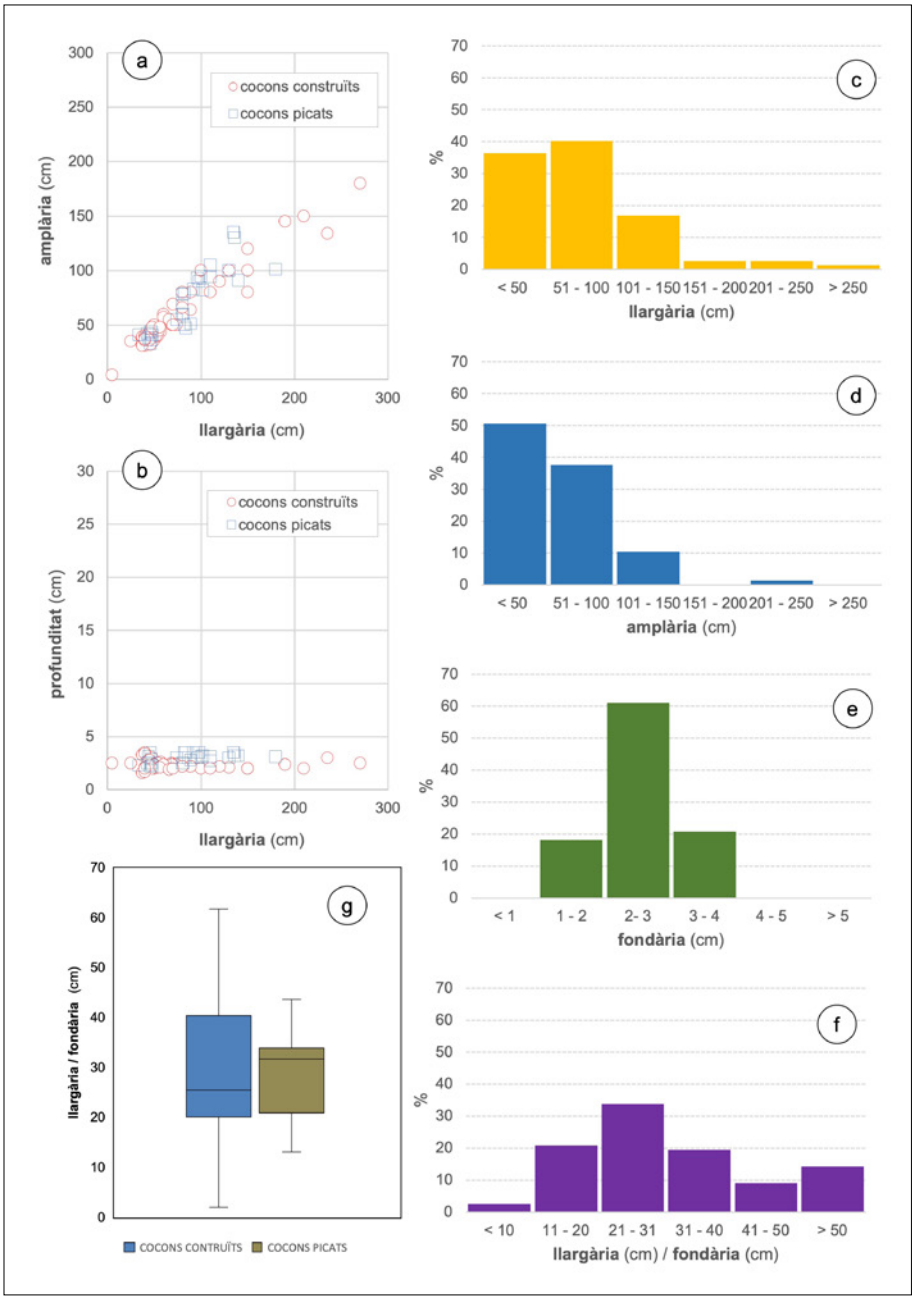


Figura 8: Característiques morfomètriques dels cocons construïts o picats explotats com a salines al sector sud-oriental de la costa de Menorca.
Figure 8: Morphometric characteristics of built or chiseled basin pools exploited as salt pans in the southeastern sector of the coast of Menorca.

Així doncs, les anàlisis mineralògiques acusen una notable diferència entre el rocam sobre el que es desenvolupa el conjunt del *karren* litoral i les parets artificials. De fet, la roca està formada bàsicament per calcita i segurament els guixos són el producte de les acumulacions persistents en forma de ruixim marí (*spray*), o bé que el cocó era saliner i es produí la precipitació de sals i guixos a la porositat de la roca. Pel que fa a les parets artificials hi ha dos elements de la seva composició que podrien donar pistes de la naturalesa del morter emprat per a la seva construcció: d'una banda, l'aragonita és un element típic del marès i de les roques molt riques en bioclasts, en canvi la dolomita hauria de venir de roques més consolidades i antigues (juràssic?). Tot plegat apuntaria que per a les parets artificials dels cocons saliners haurien fet servir una mescla de picadís (marès aragonític), calç (dolomia i calcita)

i argiles de descalcificació, probablement *terra rossa* (quars, caolinita), sòls de call vermell, propers a la zona d'estudi i aigua de la mar (halita). Les diferències d'una a altra mostra variarien en funció de les proporcions amb què es varen fer les mescles.

L'explotació de les salines a les costes rocoses a les fonts històriques

La importància de l'explotació de les salines a les costes rocoses queda constatada a diferents fonts documentals, bé en forma de llicència administrativa, privilegis a pobladors o de forma gràfica a la cartografia històrica del segle XVIII i XIX.

En el cas de l'illa de Menorca una de les primeres referències a l'explotació de les salines a la costa rocosa apareix al *Llibre Vermell de Menorca*, també conegut com de Ciutadella. El *Llibre Vermell* és un cartulari compilat a les acaballes del segle XVI i que conté més de 500 documents de diferent naturalesa –privilegis, franquícies i disposicions reials– que abasten des del segle XIII fins a la Guerra de Successió (1716). No es tracta de documents originals, sinó de còpies autoritzades pels notaris de la Universitat (ARAGÓ & CONDE, 1977). En el *Llibre Vermell,* a la secció relativa a l'agricultura, caça, pesca i activitats extractives, s'hi troba un document de 1303 en què el cavaller i lloctinent del Regne de Mallorques, Dalmau Sagarriga, declarà per via interposada del Batle de Menorca, Pere Llivià, que la recol·lecció de sal era lliure i que qualsevol poblador de Menorca en podia disposar: "*que la sal de cocons no pugui taxarse, perquè de la gracia que Nostre Senyor done bó es que tot en hajem sur parts*". En la mateixa línia en el *Llibre de franqueses o privilegis del Regne de Mallorca*, també conegut com a *Llibre dels Reis*, un cartulari que compila les artorgacions del Rei Conquistador, Jaume I, i els monarques privatius de la Casa de Mallorca, que afavoriria els pobladors de Menorca i la seva colonització (SASTRE, 1998) i ratificaria el permís de la recollida de sal de cocó.

Mostra	Me#01	Me#02	Me#03	Me#04
Descripció	Paret roca (miocè)	Paret mixta, roca i morter	Paret morter	Restes pasta morter a interior gavetes
Calcita	85,4 %	47,6 %	3,3 %	6,3 %
Aragonita	0 %	22,1 %	16,0 %	9,1 %
Dolomita	0 %	17,7 %	76,8 %	69,5 %
Quars	0 %	3,4 %	2,9 %	8,5 %
Halita	0 %	9,2 %	1 %	0,6 %
Guix	14,6 %	0 %	0 %	0 %
Argiles	0 %	0 %	0 %	6 %

Taula 2: Composició mineralògica del rocam i de les parets artificials dels cocons saliners.
Table 2: Mineralogical composition of the rock and artificial walls of the salt pans.

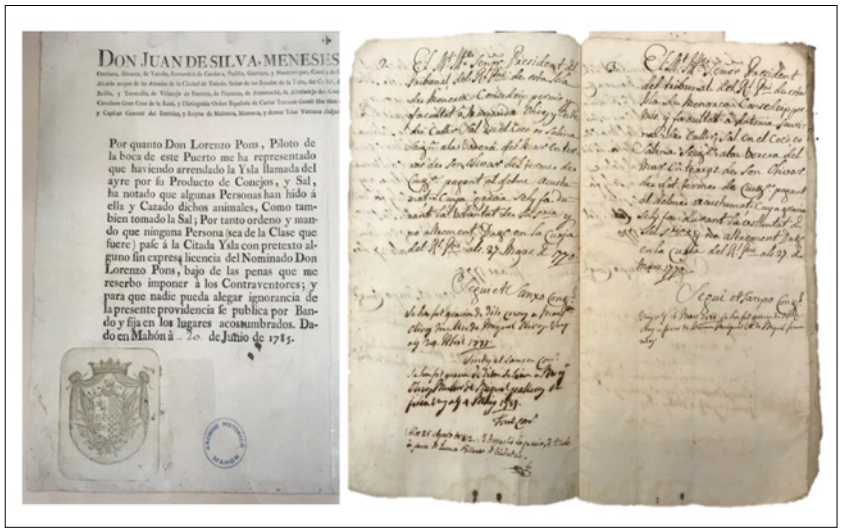


Figura 9: Fonts històriques relatives a l'explotació de sal a les costes rocoses. A l'esquerra de la figura el decret de 1785 del Capità General de Balears relatiu a l'extracció furtiva de sal a l'illa de l'Aire; i a la dreta de la figura, un detall de la concessió de permisos d'explotació de coconars al terme de Ciutadella de 1770 (AHMe, RP_Adm; C5; L8).
Figure 9: Historical sources concerning the exploitation of salt along rocky coasts are presented as follows: on the left side of the figure, the 1785 decree issued by the Captain General of the Balearic Islands addressing the illicit extraction of salt on Illa de l'Aire; and on the right side, details regarding the issuance of permits for the exploitation of saltpans on rocky coasts in the municipality of Ciutadella in 1770 (AHMe, RP_Adm; C5; L8).

No han aflorat gaires més referències prèvies al segle XVII, fins que RAMIS (1826) recull l'entrada a l'erari públic, el 1559, de 15 sous en concepte de l'alou, pagats amb espècies amb 4 barcelles de sal per la venda del cens que Pere Díez i Elionor Boscana feren a Antoni Carbonell als Illots dels Tomassos del sud de Menorca. Deu anys més tard, l'any 1569, per la venda de les salines de cala Corralet, a tocar del Cap d'en Font, s'incorporaven 10 lliures. SINTES (1999), a partir d'un establiment i l'emfiteusi associada de l'illa de l'Aire de 1606, detallava les condicions d'explotació de les pastures i la sal de l'illot. No debades, el recurs de l'explotació salinera de cocons fou tan important que el 7 de juny de 1704 el batle de Maó ordenà que ningú pogués recollir sal a la costa des Rafalet perquè el seu aprofitament s'havia concedit al Prev. Joan Sintes i a la seva neboda, Llúcia, esposa que fou de Bartomeu Vidal, atenent a una Reial Provisió de 12 de juny de 1503. Així mateix, el juny de 1785 el Capità General de Balears, D. Joan de Silva, signava un edicte on ordenava que ningú que no fos l'arrendador de l'illa de l'Aire, hi accedís per tal de caçar o prendre sal (Figura 9). El 1628 es gravava la venda de la sal de cocó i el seu benefici s'invertia en la compra

Data	Localitat	#	Concessionària	Signatura AHM
27.03.1770	Son Olivar (Ciutadella)	1	Àgueda Mesquida	RP_Adm; C5; L8; p. 1
14.01.1786	Son Olivar (Ciutadella)	1	Margarita Saura, Vidua	RP_Adm; C5; L8; p. 1
05.08.1799	Son Olivar (Ciutadella)	1	Juan Carratelo, marit d'Antònia.	RP_Adm; C5; L8; p. 1
27.03.1770	Son Olivar (Ciutadella)	2	Margarita Olives i Costa	RP_Adm; C5; L8; p. 2
29.04.1777	Son Olivar (Ciutadella)	2	Margarita Olives, muller de Miquel Olives	RP_Adm; C5; L8; p. 2
04.05.1789	Son Olivar (Ciutadella)	2	Margarita Olives, muller de Miquel Palleras	RP_Adm; C5; L8; p. 2
26.08.1812	Son Olivar (Ciutadella)	2	Juana Palleras	RP_Adm; C5; L8; p. 2
27.03.1770	Son Olivar (Ciutadella)	3	Antonia Saurina	RP_Adm; C5; L8; p. 3
16.03.1785	Son Olivar (Ciutadella)	3	Joana Marquès, Vidua de Miquel Femenies	RP_Adm; C5; L8; p. 3
27.03.1770	Son Xoriguer (Ciutadella)	1	Bartomeva Vadell	RP_Adm; C5; L8; p. 16
28.08.1800	Son Xoriguer (Ciutadella)	1	Margarita Seguí	RP_Adm; C5; L8; p. 16
27.03.1770	Son Olivar (Ciutadella)	4	Maria Supenya i Riera	RP_Adm; C5; L8; p. 17
29.10.1792	Son Olivar (Ciutadella)	4	Esperança Lluch i Sintes	RP_Adm; C5; L8; p. 17

Taula 3: Concessions d'explotació de cocons saliners a l'Arxiu Històric de Menorca, AHN. 1770-1812.
Table 3: Concessions for the exploitation of rocky coast salt pans in the Historical Archive of Menorca, AHN. 1770-1812.

de pólvora per a la defensa de l'illa. A la Universitat de Maó, aquesta entrada, li suposà un ingrés de 47 lliures, 2 sous i 10 diners.

Les vicissituds dels arxius històrics menorquins fan que part d'aquesta documentació s'hagi extraviat o desaparegut. No obstant això, a les *Noticias relativa á la Isla de Menorca* de RAMIS (1826) s'indica que el 1693 el Reial Patrimoni es reservà la propietat de la costa i l'explotació de la sal de cocó restà afectada per un delme, que atorgà el 10 % dels beneficis de l'explotació a l'administració (Cúria de la Real Governació), així com també atorgà la propietat d'altres cocons saliners a l'Exèrcit, "*cucons* (sic) del Castell". El mateix Ramis refereix que el 1693 es comptava amb uns 50 coconars per a l'explotació de sal al terme de Ciutadella, amb una producció de 380 a 400 quarteres de sal, 2 explotacions a Mercadal i 1 a Alaior, amb una contribució de 60 a 70 quarteres cada un d'ells i finalment 70 coconars saliners a Maó, sense comptar els del Castell de competència militar, que eren llogats a raó de 18 lliures. Precisament aquest canvi en la titularitat dels cocons saliners costaners és el que justifica que existeixen als fons documentals del Reial Patrimoni (AHMe_RP_Administració_Capsa 5_Lligall 8), a l'Arxiu Històric de Menorca (AHM), apunts relatius a la concessió de permisos per a la recollida de sal. Concretament s'han identificat cinc registres que indiquen l'inici de l'explotació l'any 1770 i que es renovaran en alguns casos fins a l'any 1812 (Taula 3; Figura 9), tots ells a la costa sud-occidental de Menorca, al terme de Ciutadella. Entre d'altres aspectes, es repeteix, a tots els expedients, que les concessions es fan a dones, sense especificar-ne el cost, més que en la forma del "delme habitual" i que tot sovint, les dones a qui es fa la concessió són vídues. El fet que es facin concessions a una mateixa localitat i amb el mateix descriptor, indueix a pensar que es dividia un mateix sector de costa en diferents lots, i que cada un d'ells era atorgat a una concessionària. Un dels registres enumerats a la Taula 3 deixa entreveure que l'explotació mantenia un caràcter familiar, ja que en el cas descrit al RP_Adm; C5; L8; p. 2, és evident que la darrera de les concessionàries consignada –Joana Palleras– és filla de l'anterior –Margarita Olives, muller de Miquel Palleras–. Val a dir que la referència a l'explotació és de "cocó de sal" o "salina a vorera de mar". CAMPS (2023) cita que a les costes de ponent, el 1824 el Reial Patrimoni havia fet concessions a la punta d'es Rafalet (3 lots de 20 cocons i 1 de 50 cocons), a Binibèquer (1 lot de 20 cocons), a Alcalfar (1 lot de 35 cocons) i a Cala Torret (100 cocons). En total, en el sector oriental de l'illa, s'estima que s'explotaven uns 250 cocons útils i que produïen entorn de 13 quarteres de sal.

El clàssic de la història menorquina del XVIII, *The history of the Island of Minorca* (1756) de John Armstrong ja es fa ressò de la pràctica d'obtenció de sal als cocons costaners, tot fent especial esment del paper femení i la participació dels infants en les tasques de pouar i recollir sal, així com l'ús d'un "achicador" per emplenar les depressions del micromodelat costaner (VIDAL & SAPIÑA. 1978).

Ja dins el segle XIX les obres naturalístiques o descriptives dels viatgers romàntics també deixen constància de la importància d'aquesta activitat. André Grasset de Saint-Sauveur, diplomàtic francès

i l'ensems espia de l'aparell napoleònic, publica el 1807, una memòria de geografia descriptiva, amb especial referència a l'explotació econòmica i els aspectes estratègics de les Balears, sota el títol "*Voyage dans les Iles Baléares et Pithiuses*". Aquesta obra, que revisa tots els aspectes productius de l'illa, no passa per alt la producció de sal als conjunts de *karren* litoral (GRASSET DE SAINT-SAUVEUR, 1807; pp. 323-324):

> *Dans plusieurs endroits, sur la côte de l'île, le rocher est plat et un peu plus élevé que la surface de la mer ; lorsque le vent est fort, les vagues le couvrent d'un bout à l'autre, de manière qu'avec le temps, les sels ont rongé peu-à-peu la partie la plus tendre, et formé une infinité de petites cavités séparées entr'elles par les veines qui ont résisté à leur impression. On remplit ces cavités d'eau de la mer, et un jour de soleil suffit pour faire évaporer l'eau et former le sel. Les femmes et les enfants sont employés à le ramasser le soir, et à remplir de nouveau ces cavités.*

Per la seva banda, l'Arxiduc Lluís Salvador d'Àustria a l'enciclopèdic *Die Balearen in Wort und Bild Geschildert* (1869-1891) descriu com la pràctica de recol·lectar sal als coconars està molt estesa arreu de l'illa, i que no sols s'explota la sal que depositen les onades dins dels cocons, sinó que també és habitual que els cocons es modifiquin per tal de millorar i facilitar l'explotació. (HABSBURG-LOTHRINGEN, 2003; Vol.6 pp. 529-530):

> *"A tota la costa s'extreu sal marina, i l'anomenen sal de cocó perquè es recull la sal que es forma en els clots de les roques calcàries per l'ardor del sol, i no es limiten l'aigua que llancen a les roques les ones naturals, sinó que sobretot a la costa sud es poden veure a l'estiu moltes dones dedicades a treure aigua salada que col·loquen en cocons en part naturals i en part artificials.]...[també hi ha grans cocons naturals, i en part artificials, que des de fa molts d'anys, potser segles, es consideren propietat del Reial Patrimoni, al qual moltes persones, entre les quals a vegades hi ha també dones, paguen una certa renda; aquesta gent engrandia per compte seu els cocons o els feien més regulars".*

De més a més, també feu esment d'altres localitats del sector sud-oriental de Menorca i de la costa nord on observà la pràctica de l'extracció de sal de cocó (HABSBURG-LOTHRINGEN, 2003; Vol.6 p. 530).

La intensitat de l'ús i la rellevància de les salines a les costes rocoses no ha passat tampoc desapercebuda a la cartografia històrica de l'illa de Menorca, especialment durant el període que VIDAL-BENDITO (2002) batejà com el prodigiós segle XVIII, arran de la quantitat de productes cartogràfics associats al desenvolupament de la tecnologia naval i la dinàmica geopolítica de l'època. Si abans no s'havia identificat cap indici en la cartografia anterior al XVIII relativa a les salines de les costes rocoses, a partir del mapa del neerlandès Gerard Van Keulen (ca. 1708), els mapes posteriors incorporen quasi bé sistemàticament el topònim "Salinas" a la costa rocosa del SE de Menorca, o bé reprodueixen una icona específica per a la localització de les salines (Figura 10). Mapes posteriors (vid. VIDAL-BENDITO, 2002), com el d'Ottens de 1740, també indicaran la importància de les salines del SE de Menorca, que també seran recollides al mapa de Nolin de 1756 encara que localitzades més al sud, o al mapa del prestigiós Tomás López, de 1780 que seguirà mantenint el petit reticulat per representar els cocons saliners i l'acompanyarà de l'etiqueta "salinas" (Figura 10). Val a dir que VIDAL-BENDITO (2002) apunta que Van Keulen, forçosament, s'hagué d'inspirar en algun mapa previ i treball de camp del referent cartogràfic balear del XVII Joan B. Binimelis (1539-1616) (vid. ROSSELLÓ & BÄR, 2015) – qui a les seves memòries detalla el treball a Menorca i la confecció d'un original– que, amb posterioritat, reciclaria i recomposaria en castellà, el 1756, Antoni Vich de Superna (MOLL-DE LA TÍA, 2014), i en el qual apareixen alguns topònims relacionats amb la sal de cocó: "la Roca de la Sal" o "la Cigoña".

Les fonts orals

Sense valor antropològic, però amb interès etnogràfic són els testimonis que de forma informal i sense enregistrar s'han obtingut de diferents persones, d'edat avançada, que contribueixen amb informacions a propòsit de l'obtenció i dels usos de la sal de cocó. Així Xavier Cardona, esmentà que el seu avi anava a cercar sal als coconars propers a Ciutadella per procedir a la neteja i manteniment dels rentadors. Miquel Riera, també de Ciutadella, informà que els carnissers de Ciutadella acostumaven a recollir sal als coconars de Son Saura de Ciutadella (costa sud de l'Illa) per salar carn i ossos. A Sant Esteve, es recollí el testimoni de Benjamí Reviriego, que explicava que secularment s'utilitzava la sal de cocó per adobar les sardinetes que després eren emprades com a esca de pesca. També, Abelardo Trepiana, de Sant Lluís, recordava haver vist d'infant, particulars fent sal a la zona d'Alcalfar; així com tenia present que a l'illa de l'Aire, una dona, Asunción, de malnom Sucre, feia sal i venia carregada de llenya i de tot allò que trobava per l'illa. Emprava el terme "fer vorera" per descriure aquesta pràctica.

Un dels testimonis orals més significatius, perquè està lligat a la memòria d'una família d'explotadors de salines a costes rocoses, fou el de Joan Torres, Salpruig. Considereu que a Menorca "salpruig" és el terme que s'empra per designar el ruixim (*spray*), l'aerosol carregat de sal que arriba de la mar. Joan Salpruig era nét dels darrers saliners de cocó de Menorca, que el 1880 encara feien sal a les salines o coconar de Sant Esteve. Pocs anys abans de l'entrevista, Joan es desprengué dels estris que havia rebut dels seus avis, ternals, canaletes i suports per pouar aigua de la mar i omplir els cocons. Recordava vagament els processos per a l'obtenció de la sal i la separació de la flor de sal mitjançant una eina semblant a una escumadora. Sí que tenia ben present el testimoni de la marginalitat i l'escàs benefici de la pràctica –motiu pel qual s'acabà abandonant– ja que els sous dels seus avis eren molt baixos i molt sovint es pagaven amb bescanvis. En una visita de camp, confirmà la localització dels ternals per a pouar i que aquests es corresponien amb les formes descrites amb anterioritat com perforacions auxiliars, així com recordava les pràctiques de regularització de les parets dels cocons i l'obertura dels cocons més profunds, per evitar l'embassament excessiu i facilitar l'evaporació, així com el manteniment de les parets de morter. Tot i que coneixia de l'existència d'alguna mena d'autorització pública per a l'explotació, no fou capaç d'aportar-ne més detalls, i quant a la distribució de la sal, explicà que la venda es feia a particulars de Maó i que, a causa del baix rendiment econòmic i la feina que implicava l'explotació, abandonaren l'activitat. Les salines industrials de zones humides de l'illa i la sal importada, malgrat no ser de tan bona qualitat, resultava en termes de producció i comercialització més barata.

Figura 10: Cartografia Històrica de Menorca, segle XVIII, amb referències a les salines de costa rocosa.
Figure 10: Menorcan Historical Cartography, 18th century, with references to the rocky coasts salt pans.

Epíleg

L'exploració dels conjunts de *karren* litoral de la costa de Menorca ha posat de manifest l'existència de conjunts de micromodelat de la costa rocosa explotats a mode de salina i constitueixen un exemple ben significatiu de la interferència antròpica en el modelat càrstic. Aquesta explotació salinera fou més intensa a la costa del Migjorn de Menorca, on preferentment sobre els penya-segats de perfil vertical i esglaonat, s'hi troben el major nombre de localitats explotades com a salines. Des d'un punt de

vista hidrodinàmic, no hi ha una preferència clara per localitats on el gradient de la costa submergida afavoreixi el trencament de l'onatge sobre el coconar, ni tampoc per rocams més durs. Tant es troben explotacions a rocams calcarenítics i més cimentats, com a rocams més lutítics i que es degraden per l'onatge i l'alteració química amb més facilitat. En aquest darrer cas és on es troben depressions tancades artificialment amb parets de morter. Hi ha una preferència pels sectors de cocons aïllats i poc profunds perquè afavoreixen l'evaporació de l'aigua marina i la precipitació de la flor de sal. S'exploten cocons amb independència de la seva llargada, però que com a molt tenguin 5 cm de profunditat, essent el més habitual entre 2 i 3 cm de profunditat. S'observen pràctiques d'alteració de la forma en planta i de la rugositat dels cocons també per afavorir la precipitació de la sal i evitar que s'acumuli un volum d'aigua excessiu o que, si arriba onatge als cocons, aquest no els buidi. S'ha constatat mitjançant el testimoni històric i oral, que el procediment de producció de sal no descansava tant en el reompliment dels cocons per processos naturals, sinó que eren omplerts de forma artificial després de poalejar aigua ajudats d'un ternal just al límit del penya-segat o del trencament que cau sobre la línia de costa. Particularment il·lustrativa és la identificació en el camp i en el registre oral de la pràctica de construcció de depressions-cocons artificials amb morter, la subdivisió dels cocons de majors dimensions per fer-ne més eficient l'explotació, o la construcció de cocons artificials en els replans entre cocons per tal d'augmentar-ne la producció, especialment en aquelles localitats amb rocams més dèbils i fàcils d'erosionar. La documentació històrica i el testimoni oral evidencien que aquesta era una pràctica amb profundes arrels històriques, de les quals ja hi ha notícies al segle XIV, i que es perllongà fins als acabatalls del segle XIX. Es tractava d'una activitat desenvolupada principalment per mà d'obra femenina i infantil. Les dones eren habitualment les titulars de la concessió d'extracció de sal. Avui en dia, encara hi ha producció de sal de cocó, però té un caràcter marginal, d'activitat d'esbarjo i per al consum personal.

Agraïments i nota de recordança

El present treball és una contribució a PID2020-112720GB-I00/AEI/ de l'Agència Estatal d'Investigació i un tribut a la memòria del Dr. Àngel Ginés Gracia referent en l'estudi de l'exocarst a les Illes Balears. Volem agrair els suggeriments dels dos revisors anònims, així com la revisió del manuscrit a Maria Roig López.

Bibliografia

ALCOVER, J.A., RAMIS, D., COLL, J. & TRIAS, M. (2001): Bases per al coneixement del contacte entre els primers colonitzadors humans i la naturalesa de les Balears. Endins, 24: 5-57.

ARAGÓ, A.M. & CONDE, Rafael. (1977): *El Llibre Vermell de Ciutadella. Catàleg dels seus documents*. Banca Catalana. Barcelona.

BALAGUER, P., ROIG-MUNAR, F., MARTÍN-PRIETO, J.A. & CARRERAS, D. (2017): El litoral de Menorca: marco fisiográfico y tipos de costa. In: GÓMEZ-PUJOL, L. & PONS, G.X. (Eds.), *Geomorfología Litoral de Menorca: dinámica, evolución y prácticas de gestión*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 25: 13-28. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.

CAMPS, A. (2023): L'extracció salinera i la recol·lecció de sal de Cocó. In: A.A.V.V. Inventari del Patrimoni Cultural Immaterial de Menorca: IPCIME 1/016. Consell Insular de Menorca, Institut Menorquí d'Estudis i Agència Menorca Reserva de Biosfera, Maó.

EUGSTER, H.P. & HARDIE, L.A. (1978): Saline lakes. In: LERMAN, A. (Ed.), Lakes: Chemistry, Geology, Physics: 237-293. Springer-Verlag, New York.

FORNÓS, J.J. & OBRADOR, A. (2003): Geología de Menorca. In: ROSSELLÓ, V.M., FORNÓS, J.J. & GÓMEZ-PUJOL, L. (Eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 10: 31-38. AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.

FORNÓS, J.J., GÓMEZ-PUJOL, L., ROSSELLÓ, V.M., GELABERT, B., SEGURA, F. & PARDO-PASCUAL, E. (2017): Las costes rocoses del Migjorn de Menorca: acantilados y calas. In: GÓMEZ-PUJOL, L. & PONS, G.X. (Eds.), *Geomorfología Litoral de Menorca: dinámica, evolución y prácticas de gestión*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 25: 29-45. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.

GAUCI, R., SCHEMBRI, J.A. & INKPEN, R. (2017): Traditional Use of Shore Platforms: A Study of the Artisanal Management of Salinas on the Maltese Islands (Central Mediterranean). *SAGE Open*, 2017: 1-16.

GELABERT, B., FORNÓS, J.J., PARDO, J.E., ROSSELLÓ, V.M. & SEGURA, F.S. (2005): Structural controlled drainage basin development in the South of Menorca island (Spain). *Geomorphology*, 65 (1-2): 139-155.

GINÉS, A. (1995): Deforestation and karren development in Majorca, Spain. *Acta Universitas Szegediensis, Acta Geographica*, 34: 25-32.
GINÉS, A. (1998): L'exocarst de la Serra de Tramuntana de Mallorca. In: Fornós, J.J. (Ed.), *Aspectes geològics de les Balears*: 361-389. Universitat de les Illes Balears, Palma.
GINÉS, A. (1999): *Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica*. Tesi Doctoral, Departament de Biologia Ambiental, Universitat de les Illes Balears, Palma.
GINÉS, A. (2004): Karren. In: GUNN, J. (Ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*: 470-473. Fitzroy Dearborn, New York, London.
GINÉS, A. (2009): Karrenfield landscapes and karren landforms. In: GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T. & DREYBRODT, W. (Eds.), *Karst Rock Features, Karren Sculpturing*: 13-24. ZRC Publishing, Ljubljana.
GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T. & DREYBRODT, W. (2009): *Karst Rock Features, Karren Sculpturing*: 375-390. ZRC Publishing, Ljubljana. 561 pp.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009): Mid-mountain karrenfields at Serra de Tramuntana in Mallorca Island. In: GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T. & DREYBRODT, W. (Eds.), *Karst Rock Features, Karren Sculpturing*: 375-390. ZRC Publishing, Ljubljana.
GÓMEZ-PUJOL, L. (2006): *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears.
GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2001): Les microformes de meteorització del litoral calcari de Mallorca: Aproximació a la seva sitematització. *Endins*, 24: 169-185.
GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2004a): Forma, procesos y zonación en el lapiaz – *karren*– litoral del sur de Menorca, 1: aproximación morfométrica. In: BENITO, G. & DÍEZ HERRERO, A. (Eds.): *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 347-355. Sociedad Española de Geomorfología – Centro superior de Invesitgaciones Científicas. Madrid.
GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2004b): Forma, procesos y zonación en el lapiaz – *karren*– litoral del sur de Menorca, 2: observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). In: BENITO, G. & DÍEZ HERRERO, A. (Eds.): *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 357-364. Sociedad Española de Geomorfología – Centro superior de Invesitgaciones Científicas. Madrid.
GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2009): Coastal Karren in the Balearic Islands. In: GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T. & DREYBRODT, W. (Eds.), *Karst Rock Features, Karren Sculpturing*: 487-502. ZRC Publishing, Ljubljana.
GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2010): Coastal karren features in temperate microtidal settings: spatial organization and temporal evolution. *Studia Universitatis Babe!-Bolyai*, 55 (1): 37 – 44.
GÓMEZ-PUJOL, L., FORNÓS, J.J. & POMAR, F. (2009): El *karren* litoral a les Illes Balears. *Endins*, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 69-94.
GRASSET DE SAINT-SAUVEUR, A. (1807): *Voyage dans les Iles Baléares et Pithiuses; fait dans les annés 1801, 1802, 1803, 1804 et 1805*. Léopold Collin, Paris.
HABSBURG-LOTHRINGEN, L.S. (2003): *Les Balears descrites per la paraula i la imatge. Vol. 6. Menorca*. Grup Serra, Govern Balear, Sa Nostra, Fundació Bartomeu March Servera, Palma.
JENNINGS, J.N. (1985): *Karst geomorphology*. Basil Blackwell, Oxford.
MOLL-GOMEZ DE LA TÍA, J. (2014): *Joan Binimelis: Descripció particular de l'illa de Mallorca e viles*. Publicacions de la Universitat de València, Institut d'Estudis Catalans. València.
OBRADOR, A. & POMAR, L. (2004): El Miocè de Migjorn. In: FORNÓS, J.J., OBRADOR, A. & ROSSELLÓ, V.M. (Eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.
RAMIS, A. (1826): *Noticias relativas á la Isla de Menorca*. Imprenta de Serra, Mahón.
ROIG-MUNAR, F.X. (2016): *Blocs de tormenta i tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica*. Programa de Doctorat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. Barcelona.
ROIG-MUNAR, F.X., FORTEZA, V. & GÓMEZ-PUJOL, L. (2022): Salinas en costas rocosas: uso y modificación del karren litoral para la producción de sal en Menorca (Illes Balears). In: Blanco, R., Costa, M., Gómez-Pazo, A., Cajade, D., Fontán, A., González, R., Bernabeu, A., López, L. (Eds.), *Actas, XI Jornadas de Geomorfología Litoral*: 141-144. Galicia 2022. Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.
ROIG-MUNAR, F.X., FORTEZA, V. & FLORIT, J. (2024): Ús i aprofitament de la costa rocosa de Menorca, illes Balears: els cocons de fer brumer com a contribució etnogeològica. *Nemus*, 14: 30-43.
ROSSELLÓ, V.M. & BÄR, W.F. (2015): *Joan B. Binimelis, Vicenç Mut I els mapes murals de Mallorca (segles XVII-XVIII).* Publicacions de la Universitat de València, Institut d'Estudis Catalans, València.
SASTRE, J. (1998): L'organització de Menorca el 1301. *Mayurqa*, 24: 43-52
SINTES, G. (1999): *Breus notes sobre el sistema tradicional d'extracció de sal en el terme de Sant Lluís*. S'Auba. Sant Lluís. pp. 38-39.
SWEETING, M.M. (1972): *Karst Landforms*. MacMillan Press, London. 362 pp.
VIDAL-BENDITO, T. (2002): La imatge cartogràfica de l'Illa de Menorca. Des dels orígens al primer terç del segle XVIII. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 53: 227-273.
VIDAL, J. & SAPIÑA, S. (1978): *Armstrong, John. Historia de la isla de Menorca*. Editorial Nura, Maó.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Nou plànol topogràfic de les Coves de Campanet (Mallorca)

Juan J. ENSEÑAT [1], Gabriel SANTANDREU [1] i Joaquín GINÉS [1, 2]

[1] Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca. Email: juanjo.ensenyat@gmail.com
[2] Grup de Recerca Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca.

Abstract

Coves de Campanet is one of the 5 tourist caves in Mallorca that are currently being exploited. The cave, located in the Serra de Tramuntana, is developed in materials corresponding to the Upper Triassic, and is considered to be originated between the Upper Miocene and Pleistocene, by various successive processes of dissolution and collapse, followed by an important stage of formation of speleothems that give it its current appearance.

Discovered in 1945, the only existing topography dates back to 1946, so a new topography has been undertaken, with a degree of detail corresponding to current standards. It was concluded that the cave has a length of 450 m and extends over an area of 3,100 m². At the same time, this has given rise to a brief review of the history of the cavity and the most relevant studies carried out on it, which are cited in this article as a compilation.

Resumen

Las Coves de Campanet son una de las 5 cuevas turísticas de Mallorca que actualmente se encuentran en explotación. La cavidad, situada en la Serra de Tramuntana, se desarrolla en materiales correspondientes al Triásico superior, y se considera originada entre el Mioceno superior y el Pleistoceno, por diversos y sucesivos procesos de disolución y colapso, seguidos de una importante etapa de formación de espeleotemas que le confiere el aspecto actual.

Descubierta en 1945, la única topografía existente databa de 1946, por lo que se ha abordado el levantamiento de una nueva topografía, con un grado de detalle correspondiente a los estándares actuales. Se concluye que la cavidad tiene un recorrido de 450 m y se extiende sobre un área de 3.100 m². Al mismo tiempo, se repasa brevemente la historia de la cavidad y los estudios más relevantes realizados sobre ella, que se citan en el presente artículo a modo recopilatorio.

Enseñat, J.J.; Santandreu, G. i Ginés, J. (2024): Nou plànol topogràfic de les Coves de Campanet (Mallorca).
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 201-217. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 2 desembre 2024; **Revisat:** 11 desembre 2024; **Acceptat:** 17 desembre 2024.
Publicat online: 23 desembre 2024.

Introducció

De les cinc coves turístiques que es poden visitar a Mallorca en l'actualitat, les Coves de Campanet foren les darreres a descobrir-se (GINÉS, 1995). La cavitat agafa el nom del terme homònim, on se situa, als peus de la Serra de Tramuntana, utilitzant el plural «Coves», un fet habitual en l'àmbit espeleològic per destacar la seva importància. La seva troballa, el 1945, despertà l'atenció de la societat del moment. El turisme començava aleshores a postular-se com una seriosa opció de desenvolupament econòmic, però també la comunitat científica s'hi abocà de ple, conscient que es tractava d'un esdeveniment poc freqüent.

D'aleshores ençà, la cova ha consolidat el seu discret paper alternatiu al turisme de masses, rebent de forma moderada un nombre important de visites, entre les quals no falta la presència d'artistes, actors i actrius o personatges de renom, que han apuntalat el reconeixement de la cavitat. Amb tot, cal remarcar que, si es compara amb les grans coves turístiques de la zona de llevant de l'illa, comptabilitza una quantitat modesta de visitants per any, els quals s'identifiquen amb un perfil més decantat cap al turisme d'interior, amb matisos culturals. Fet, aquest, que s'ha vist fomentat des d'un principi per la propietat (GINÉS & GINÉS, 2011).

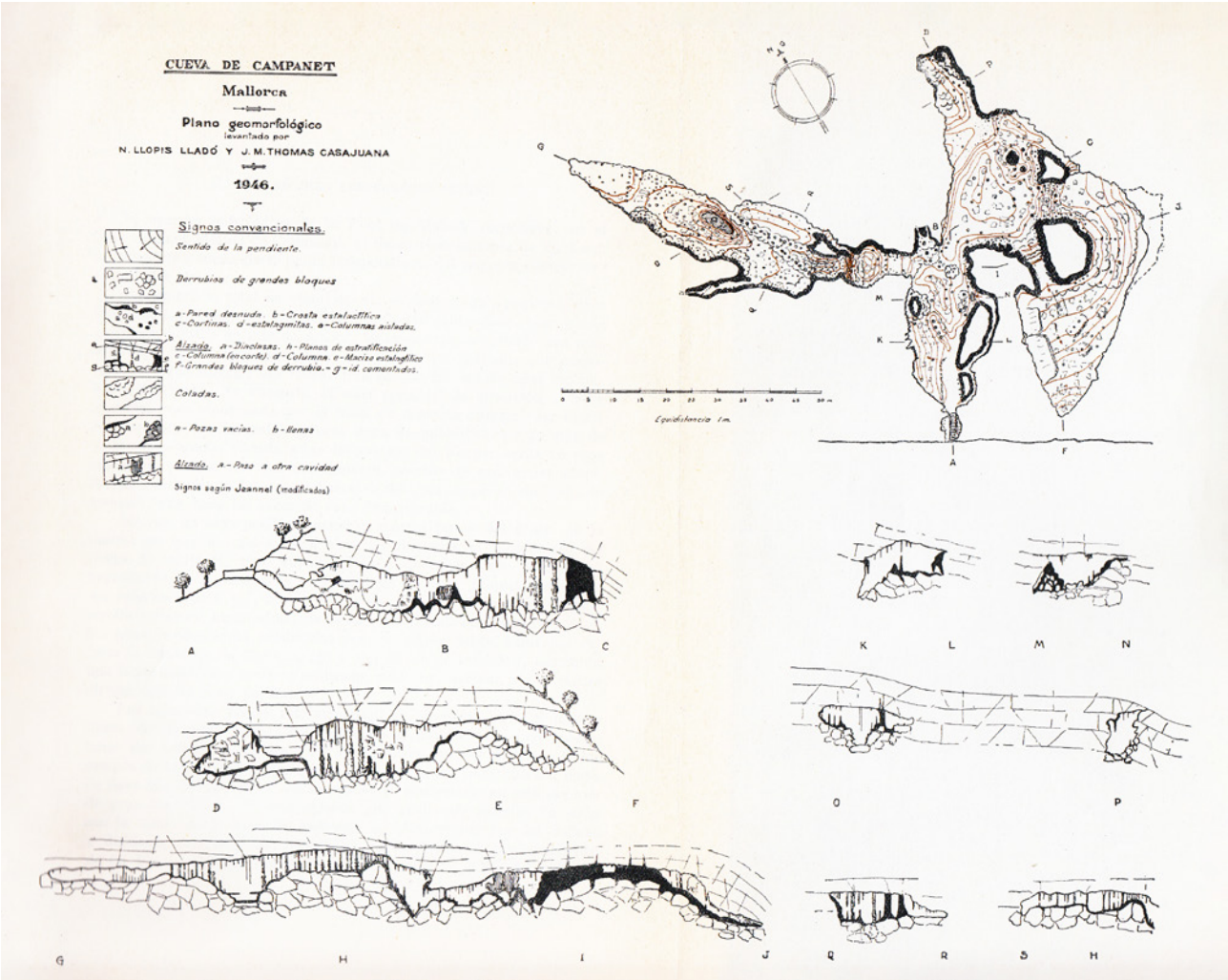


Figura 1: Aixecament topogràfic elaborat el 1946 (LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA, 1948).
Figure 1: Topographic survey elaborated in 1946 (LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA, 1948).

L'única topografia existent de la cavitat fou elaborada el 1946 i publicada dos anys després (LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA, 1948). Aquest aixecament topogràfic presenta un gran interès, ja que fou realitzat prèviament a la construcció dels camins, per on transita la visita turística, i sense més alteració de la cavitat que les desobstruccions pròpies de l'exploració. Essent fruit de la necessitat i de les circumstàncies del moment, es pot considerar excel·lent (Figura 1).

Amb aquests antecedents, transcorreguts setanta-set anys, amb la millora tecnològica evident, es considerà que seria de gran utilitat disposar d'un plànol topogràfic actualitzat de la cova, incorporant les modificacions antròpiques i augmentar el grau de detall, amb l'objectiu de poder ser usat per futurs estudis. Així mateix, també es cregué oportú fer una breu descripció i aplec del coneixement més rellevant adquirit sobre ella al llarg dels anys.

Descobriment i algunes dades de la seva exploració i estudi

El mes de juny de l'any 1945, dos treballadors de la finca de So na Pacs al municipi del raiguer mallorquí de Campanet, es veren empesos per la curiositat d'esbrinar quin era l'origen d'una intensa frescor provinent d'unes clivelles a unes penyes. Engrandits els forats, aconseguiren habilitar un precari passatge que els permeté accedir a l'interior d'una cavitat subterrània fins aleshores desconeguda. El marger Bartomeu Palou Bennàssar «Xineta» i el porquer Antoni «Tauler», en foren els protagonistes (FERRÀ-PONÇ, 1980; VIVES, 1996). Plasmada la notícia del descobriment a la premsa de l'època (BAUZÁ, 1945; COLOM-BENNASAR, 1945a, 1945b; COLOM-CASASNOVAS, 1945), l'esdeveniment, assolí de tot d'una un gran rebombori popular, transcendint les proporcions i l'encant de les seves belleses interiors. Aquestes qualitats propiciaren de manera gairebé immediata la

incorporació de la cavitat, amb el nom de les Coves de Campanet, al selecte grup de coves turístiques de l'illa de Mallorca.

Al cap de poc de la troballa, s'iniciaren de manera improvisada les tasques de condicionament del passatge original per possibilitar-ne un accés mínimament transitable i segur a les cada cop més concorregudes visites, tant de gent local com provinent d'altres indrets. Aleshores, el propietari de la finca, D. Guillem Torres Cladera, contactà amb l'empresari Antoni Salvà Torres, amb la intenció d'elaborar un projecte de concessió i explotació de la cavitat. Com era evident, aquest projecte necessitava una tasca d'habilitació de l'espai subterrani: el traçat de camins interiors, il·luminació elèctrica i altres obres i infraestructures exteriors. Per a tal fer, es va recórrer a l'arquitecte Josep Ferragut Pou i al delineant Jeroni Juan Tous. El 22 de novembre de 1945, poc més de mig any després del descobriment, se signava el contracte d'explotació de la cavitat, que entre altres aspectes establia el compromís de començar les obres del projecte dins els trenta dies següents, amb el terme d'un any per acabar-les. Sembla que les obres es perllongaren uns tres anys amb diverses quadrilles que treballaren tant als bastiments exteriors com a les obres del traçat dels camins interiors. Aquest esdevenir de les obres, que s'allargaren sobre el temps establert, ho testimonia una inscripció incisa sobre un pegat de ciment signada per Antonio Capellà amb data de 1947 (Figura 2a), a la *sala Romàntica*. Aquest personatge de malnom «Coix», a més de participar com a picapedrer, va ser el primer guia de la cova, responsable de les primeres visites guiades (VIVES, 1996). Així com passà amb les obres pioneres, altres intervencions més recents, quedaren igualment testimoniades per inscripcions esgrafiades a les noves infraestructures que s'han anat afegint a la cavitat; no molt lluny de l'anterior, l'autoria material i una data del mes d'octubre de 1996, n'és un exemple (Figura 2b). S'ha de posar èmfasi, no obstant això, que les inscripcions dins la cova són contades i alguna ben difícil de trobar.

Finalment, les Coves de Campanet foren inaugurades el 10 de novembre de 1948 (Anònim, 1948) i es convertiren, d'aquesta manera, en indret d'interès col·lectiu i objecte de visita popular. Així ho constaten posteriors notícies com la que informa de la romeria de Sant Miquel de Campanet, celebrada la tercera festa de Pasqua de l'any 1949, on a més d'una processó, ballades i berenars, s'incloïa per primera vegada com a activitat destacada, la visita gratuïta a la cova. Eventualitat que congregà gran nombre d'assistents i que obligà a realitzar nombrosos torns d'entrada (A.R., 1949).

Al marge de l'enrenou popular de la descoberta, diversos personatges de l'àmbit científic de l'època, s'acostaren a la cavitat deixant constància de les seves consideracions acadèmiques de caràcter geològic, biològic o paleontològic. Aquestes es documentaren a diverses publicacions de premsa periòdica o de caràcter divulgatiu, que contribuirien al coneixement de la cova fora de l'àmbit local (LLOPIS-LLADÓ, 1946; CAÑIGUERAL, 1949). Des del punt de vista geoespeleològic cal ressaltar la publicació de LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA (1948), que redactaren un extens treball fonamentat en la hidrologia càrstica dels voltants de Campanet, dedicant uns paràgrafs a la descripció de la cova i ocupant-se amb profunditat d'altres aspectes morfogènics i cronològics de la cavitat, a més d'incloure la primera topografia. Altres articles posaren en relleu diversos aspectes de la cova, destacant la presència de fauna terrestre troglòbia, com el coleòpter *Henrotius jordai* (ESPAÑOL, 1945) o el diplur *Homojapyx espanoli* (PAGÉS, 1950). La fauna fòssil del quaternari també es documentà des de les primerenques exploracions. Així, restes del rupicàprid *Myotragus balearicus* es recolliren i analitzaren donant peu a diverses publicacions signades per COLOM-CASASNOVAS (1945) i SAZ (1946).

Figura 2: Inscripcions a l'interior de la cova. a) Testimoni gravat al ciment referent a les obres de construcció dels camins originals el 1947. b) Manuscrit a llapis sota la passarel·la construïda el 1996. c) i d) Inscripcions a carbó d'origen desconegut.
Figure 2: Inscriptions in the interior of the cave. a) Engraved testimony on concrete about the construction of the original walkways in 1947. b) Text written in pencil under the boardwalk built in 1996. c) and d) Charcoal inscriptions of unknown origin.

Després del descobriment i l'habilitació de la cova, hagué de passar mig segle per produir-se noves aportacions bibliogràfiques sobre les Coves de Campanet, en forma de materials divulgatius relacionats en major o menor mesura amb l'explotació turística

de la cavitat (VIVES, 1996; GINÉS, 1997, 2016; GINÉS & FORNÓS, 2015). Amb el temps s'han continuat realitzant valuosos descobriments des del punt de vista bioespeleològic, com la descripció d'una nova espècie de pseudoescorpí: *Chthonius campaneti* (ZARAGOZA & VADELL, 2013). Durant el darrer decenni s'han portat a terme, a la cova, diferents investigacions de caràcter ambiental que són resumides més endavant en un apartat específic.

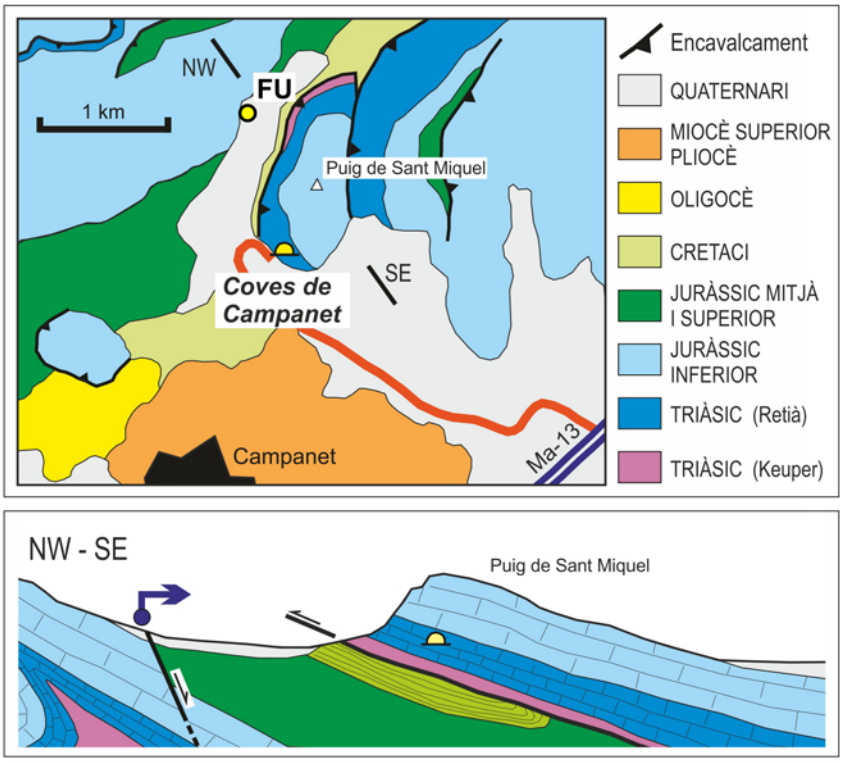


Figura 3: Mapa i tall geològics simplificats de la vall de Sant Miquel i les rodalies de Campanet, basats en LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA (1948) i GELABERT (1998). FU: Fonts Ufanes (Font: GINÉS & FORNÓS, 2015).
Figure 3: Map and simplified geological profile of the valley of Sant Miquel and surroundings of Campanet village, based on LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA (1948) i GELABERT (1998). FU: Fonts Ufanes spring (Source: GINÉS & FORNÓS, 2015).

Aspectes geològics

El Puig de Sant Miquel presenta les característiques lito-estructurals pròpies de les elevacions que conformen el vessant meridional de la Serra de Tramuntana, serralada que es va aixecar el miocè mitjà a conseqüència de l'orogènia alpina (GELABERT, 1998; FORNÓS & GELABERT, 2011). Aquest puig està constituït per les unitats superiors d'una làmina encavalcant –la làmina o escata tectònica de Fangar– que limita pel SE la vall longitudinal per on transcorre el traçat de l'antic camí de Campanet a Pollença.

Dins de l'esmentada escata tectònica, que s'estén en direcció SW-NE, es poden diferenciar diverses unitats estratigràfiques (GINÉS & FORNÓS, 2015). A la seva base hi trobem els materials plàstics del keuper (triàsic superior) que són els que afavoriren el lliscament de la làmina encavalcant. Per damunt d'aquests materials se situen les dolomies atribuïdes al retià, on es troben excavades les Coves de Campanet (Figura 3); es tracta d'un pis que correspon al trànsit del triàsic cap al juràssic. Cap a dalt, la sèrie estratigràfica es continua amb les calcàries massives del juràssic inferior, que formen les cotes superiors d'aquestes elevacions. Tot el conjunt presenta una estratificació ben evident, que mostra un cabussament general vers el SE.

La unitat estructural on es troben enclavades les Coves de Campanet es disposa per sobre dels materials margocalcaris de color blanquinós que formen el Pla de Tel, indret on se situa l'oratori de Sant Miquel. Es tracta dels dipòsits del juràssic mitjà i superior i del cretaci, sedimentats en un ambient oceànic profund; les seves característiques litològiques donen lloc a un relleu planer, ben diferenciat respecte de les calcàries i dolomies que propicien vessants més escarpats (GINÉS & FORNÓS, 2015). L'esmentat condicionament litològic possibilita la utilització d'aquests terrenys planers com a camps de conreu.

Per acabar de situar el context geològic i hidrogeològic de l'àrea cal esmentar la presència de les Fonts Ufanes (GELABERT, 2002), les quals es localitzen devers dos quilòmetres al nord de la cavitat. Aquesta important surgència temporal brolla a favor d'una important falla normal (Figura 3), que constitueix el límit meridional de les làmines calcàries que s'aixequen en direcció NE, cap al Puig Tomir.

L'aixecament del nou plànol topogràfic

Seguint les petjades dels treballs duits a terme a les Coves del Drac (ENSEÑAT et al., 2018) i les Coves d'Artà (ENSEÑAT et al., 2021), s'ha continuat fent servir el mateix mètode clàssic de topografia espeleològica, utilitzat anteriorment, amb la brúixola ocular portable (Suunto KB20; ±1°)

i el mesurador làser amb clinòmetre electrònic (Leica X310). S'han traçat poligonals i posicionat respecte a les estacions d'aquestes els límits, accidents i espeleotemes representatius, que s'han dibuixat *in-situ* sobre paper mil·limetrat a escala 1:200. Després de cada sessió, les dades s'han introduït en el programari Survex v1.4 i traslladat digitalment, juntament amb les imatges escanejades del paper mil·limetrat, al programari Inkscape v1.3 per fixar el dibuix digital definitiu.

S'ha de ressaltar que dins d'aquesta cavitat s'ha observat que la brúixola marcava valors incorrectes en alguns punts, un fet atribuïble a la presència de cablejat elèctric i al forjat de ferro d'alguns camins. Quan s'ha detectat aquest fet s'ha canviat la posició de l'estació, allunyant-se de les possibles fonts de distorsió, cercant minimitzar l'error calculat pel Survex, i mantenint-lo en tot cas per sota del 2 %. Aquest fet, que no és exclusiu d'aquesta cova turística, s'ha fet més evident en aquest cas, ja que les dimensions de la cavitat, i la seva gran decoració d'espeleotemes, limiten la línia visual, condicionant les opcions de traçat de la poligonal en alguns indrets. Pel que fa al mètode, també s'ha seguit amb l'ordre d'aixecar primer la planta i després realitzar les seccions, puix que s'ha constatat més eficient decidir així per on fer-les passar, sobretot quan els espais que conformen aquestes són inconnexos visualment.

Després d'un primer contacte amb la propietat, el 4 de febrer de 2023, s'hi han dut a terme 19 visites, en horari d'obertura al públic, només per la realització de la topografia entre el 18 de febrer de 2023 i el 25 de febrer de 2024, i altres 5 desplaçaments només per fer fotografies. En aquest sentit, es pot dir que no s'ha produït cap mena d'interferència amb la incursió dels petits grups de turistes, sovint de caràcter familiar, que sota el model de la visita autoguiada actual han coincidit amb el treball de camp.

El nou plànol es presenta en planta (Figura 4) i seccions (Figura 5). S'ha de fer notar que no s'han fet perfils, entesos com la successió de seccions al llarg d'un traçat d'orientació variable, per no desvirtuar la inclinació aparent dels sostres –que són reflex de l'estratificació de la roca– i la posició relativa dels diferents espais, separats per massissos estalagmítics i altres circumstàncies.

Aquest treball ha permès constatar que el plànol de 1946, publicat per LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA (1948), en línies generals és un plànol força acurat en el que es troben representades totes les zones significatives de la cavitat en una disposició essencialment correcta. A l'escala a la qual es representà, òbviament, passa per alt alguna raconada i alguns detalls, sense que això pugui ser qualificat de defecte. Si bé no assenyala passos i espais inferiors entre blocs, que són difícilment transitables, sí que reflecteix zones relativament amagades al públic, com la saleta de l'extrem nord de la *sala Romàntica*, indicant la presència dels *gours* que li són característics. No obstant això, es pot apreciar que l'orientació general de la *sala Romàntica* sembla variar un poc i que en el nou plànol la distància que la separa de la *sala de la Palmera* a través del rocam és menor. Un detall atribuïble al fet que el nou plànol, amb una resolució major, s'endinsa en raconades de menor entitat expandint així el que es considera el límit de la cavitat.

S'ha passat de disposar de 5 seccions i 3 perfils (en la topografia de 1946) a 9 seccions, que inclouen els principals espais inferiors transitables entre blocs, a fi d'il·lustrar de forma més acurada la morfologia.

La topografia realitzada mostra que la cova ocupa una superfície total projectada en planta de 3.100 m² i un recorregut total –segons el mètode descrit per GRÀCIA et al. (2009)– de 450 m, amb un desnivell màxim de 17 m, entre els punts transitables més alt i més baix de l'interior.

També és rellevant esmentar que la superposició de la planta amb la fotografia aèria revela que cap part de la cova es troba sota les edificacions dels voltants, excepte la caseta que protegeix el pou de la sortida d'emergència (Figura 6).

Descripció de la cavitat

Per establir un ordre en la següent descripció, la cova es dividirà en tres sectors que s'enunciaran com la *sala de la Palmera*, la *sala Romàntica* i la *sala del Llac*. Aquesta denominació prové de la utilitzada a l'obra de VIVES (1996) i GINÉS (1997), que s'ha repetit en pràcticament tots els treballs publicats posteriorment. No obstant això, hem de fer notar que existeixen a la literatura altres denominacions per les mateixes zones o per subdivisions d'aquestes. Així, per exemple, LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA (1948), anomenen *Vestíbul* a la *sala de la Palmera* i distingeixen la *sala dels Blocs* del *Gran Saló* com subdivisions del que s'anomenarà com la *sala Romàntica*. S'ha de tenir present també que aquests autors, per referir-se a la cavitat, feren ús indistintament dels termes «la cova de Campanet» i la «cova de Son Àpats» (probable alteració fonètica de So na Pacs); CAÑIGUERAL (1949) havia proposat anomenar-les «Coves de Sant Miquel», evidenciant que en el seu moment el nom encara no s'havia fixat en la forma comercial actual de Coves de Campanet. Actualment, la cartelleria interior de

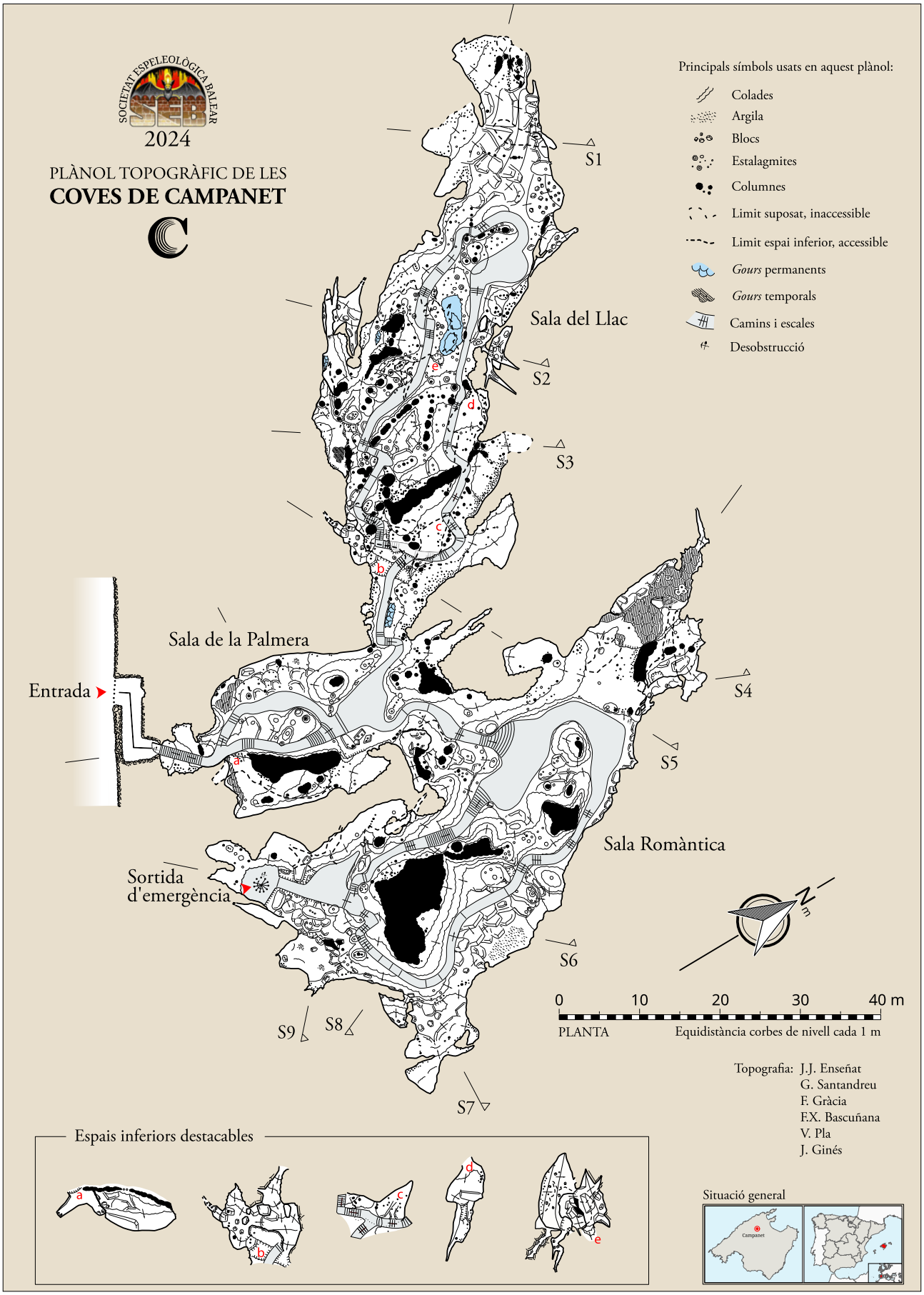


Figura 4: Plànol topogràfic de les Coves de Campanet (2024). Planta.
Figure 4: Topographic survey of the Coves de Campanet (2024). Plan view.

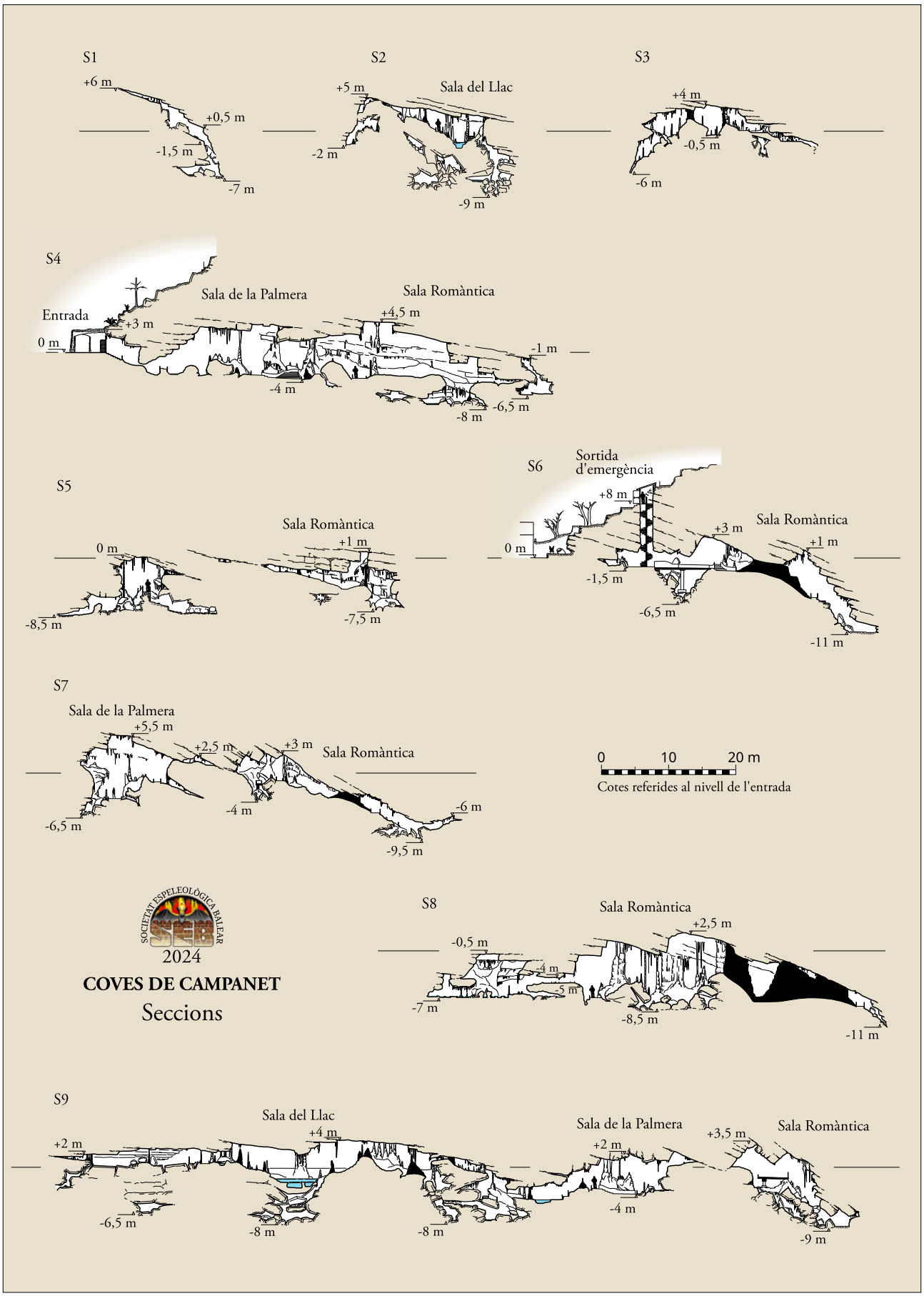


Figura 5: Plànol topogràfic de les Coves de Campanet (2024). Seccions.
Figure 5: Topographic survey of the Coves de Campanet (2024). Sections.

la visita turística introdueix també neotopònims com el de la *sala Roja* (o *saló Roig*), que forma part del que es descriurà més endavant com la *sala del Llac*. Per evitar confusions, es remet a les Figures 4 i 5, on únicament es presenten els tres sectors esmentats al principi d'aquest paràgraf, i a l'obra de VIVES (1996) per la microtoponímia.

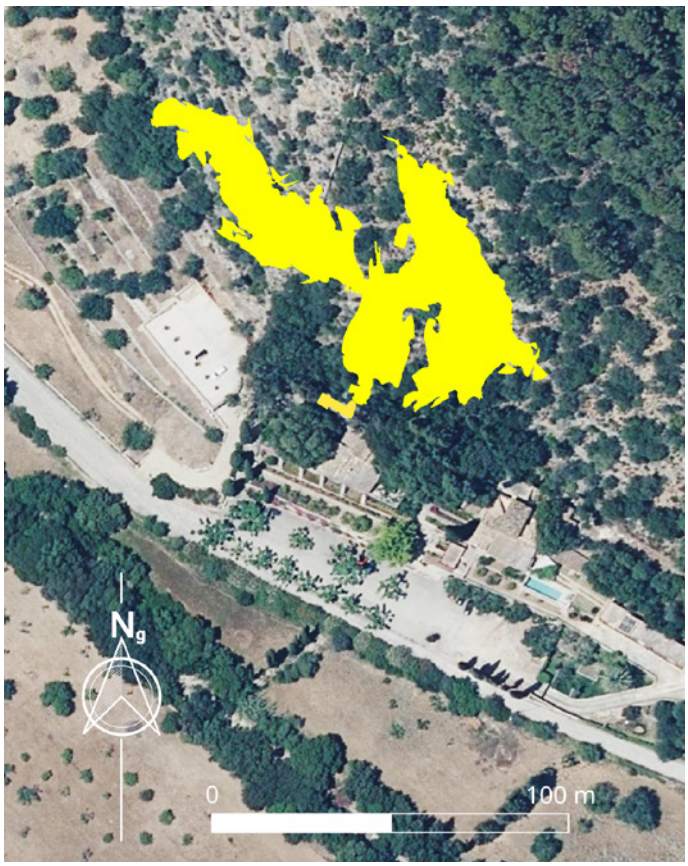


Figura 6: Fotografia aèria amb la superposició de la planta de les Coves de Campanet (Font: Base topogràfica SEB sobre imatges ortofotogràfiques IDEIB).
Figure 6: Aerial photography with the plan survey of the Coves de Campanet overlayed (Source: SEB topographic database over IDEIB ortophotographic images).

L'entrada i la sala de la Palmera

L'aspecte actual de l'accés a les Coves de Campanet, és el resultat de les diverses modificacions que des del seu descobriment s'hi han anat efectuant. Així, avui en dia l'entrada consisteix en una galeria, en part picada al rocam, d'uns 10 m de recorregut, coberta per una volta artificial d'arc lleugerament escarser amb els laterals folrats de pedra. El seu traçat descriu dos angles rectes amb l'objecte de preservar la cavitat de l'entrada directa de la llum solar. Un estret portell enreixat dona pas a la cova pròpiament dita. Un cop a l'interior, de tot d'una compareix un passatge descendent on es poden apreciar clarament les successives tasques de desobstrucció. Així i tot, encara es conserven redols on es veuen les gruixades colades pavimentàries, així com l'escassa alçada de la galeria, que fan una idea de l'estretor del pas original. És en aquesta zona on es degueren efectuar les troballes de fauna fòssil quaternària, dins del sediment retingut sota la colada. El desnivell d'aquest pas se salva per una escala bastida al trespol de 6 m de llargària i una direcció de 050º que desemboca finalment a la *sala de la Palmera*.

Es tracta de la primera estança de la cova i a la que òbviament accediren els primers exploradors subterranis quedant meravellats per les seves dimensions i ornamentació calcària. Tot i això, per copsar les vertaderes dimensions de l'espai encara és necessari superar, per un dels caminois que circumval·len la sala, una acumulació de blocs folrada d'espeleotemes. Es tracta d'una espècie de turonet coronat per una esvelta estalactita i la seva corresponent estalagmita que no s'arriben a tocar per pocs centímetres. És aquesta formació la que figurativament n'assignà popularment el topònim. El promontori és una acumulació de blocs rocosos totalment cimentats per colades pavimentàries sobre les que predominen les estalagmites de gruixa considerable, algunes de les quals es mostren basculades per efecte de la incoherència del trespol de blocs on s'assenten. En aquest punt es pot contemplar de manera gairebé íntegra la *sala de la Palmera*, la qual podem acotar des de la sortida del vestíbul fins al tram on perd volum per anar a connectar amb la *sala Romàntica*, punts que es troben separats uns 25 m seguint l'eix principal orientat a 025º. L'amplada és d'entorn de 12 m, tot i que diverses raconades pel costat nord de la sala es perllonguen fins a gairebé els 20 m. L'alçada de l'estança es mou entre els 4 i 8 m amb un sostre molt irregular d'aspecte caòtic, que en alguns punts arriba a assolir més altura per les fractures verticals del material. Des d'un principi destaca la decoració calcària no tant per la seva profusió de formes sinó per la immaculada blancor i textura, que sens dubte és un dels atractius principals de la cavitat. Tot plegat, la sala ocupa una àrea, projectada en planta, de 530 m^2.

Com s'ha avançat, al contorn de la sala s'hi localitzen espais residuals de menor volum i desenvolupament. Al costat de ponent, i no massa enfora del passatge d'entrada, la sala mostra un rost descendent. Uns 3 m per davall del trespol transitable presenta racons ben engalanats, però el que destaca és el trespol que està pavimentat per colades i intensament recobert d'acumulacions de *gours* de dimensions decimètriques els quals, de forma encadenada, el recobreixen totalment (Figura 7). Del sostre i parets pengen vistosos espeleotemes de degoteig formant gruixades banderes. Es pot observar que aquestes formacions mostren els efectes de processos de descalcificació, algunes amb una intensa corrosió que en desfigura els perfils. Al costat de ponent de la sala s'assoleix la màxima diferència de cota, amb un desnivell màxim fins a la part més alta del sòtil d'11 m.

Figura 7: *Gours* sobre colades al costat oest de la *sala de la Palmera* (Foto: G. Santandreu).
Figure 7: Gours on flowstones at the west side of the *Sala de la Palmera* (Photo: G. Santandreu).

El costat que tanca la sala per llevant, es mostra intensament decorat amb colades parietals, conegudes col·loquialment com a tubs d'orgue, originades pel trànsit vertical de les aigües d'infiltració. Aquests penjolls calcaris gairebé aïllen l'espai principal de la sala d'un nou reducte lateral, que s'obri per davall d'una gran acumulació de blocs rocosos difícils de distingir per l'intens recobriment carbonatat (veure Espais inferiors destacables «a» de la Figura 4 i la Secció 7 de la Figura 5). En aquest costat, abunden les colades pavimentàries que a redols presenten petits *gours*, sovint actius, d'escassa fondària. Igual que en altres indrets de la sala, destaquen vistosos conjunts d'estalagmites. En canvi, al sòtil d'aquest lateral de la sala predominen les clapes on es pot observar la roca mare i part dels estrats, els quals presenten un cabussament de 30º en direcció entre 085º i 090º. Se sospita la presència d'alguns espeleotemes de tipus disc, en una disposició horitzontal i adossats al sostre, dels quals pengen els típics precipitats en forma de paracaigudes, si bé l'absència de la cara inferior i el seu estat no permet assegurar aquesta classificació. El tram final de la sala coincideix amb la part més baixa d'aquesta, zona que podríem dir que actua d'enllaç cap a altres àmbits de la cavitat: a l'oest la *sala del Llac* i al nord-est la *sala Romàntica*. Presideix l'espai un gran massís estalagmític erigit damunt una elevació de blocs consolidats. Des de la base, la seva alçada màxima és de 8 m, valor que permet fer un idea del volum d'aquesta zona de la cavitat. Cap a l'extrem nord-est, es pot considerar que la sala deixa de definir-se amb claredat, malgrat que conserva unes dimensions apreciables. Un gran massís estalagmític limita a l'est, deixant un pas de 8 m d'amplada i uns 15 m de longitud, a través del qual el traçat del camí es torna sinuós entre esveltes estalagmites.

La sala Romàntica

Tot just deixar enrere la *sala de la Palmera*, ja s'entreveu un espai de grans dimensions. S'arriba així a un espai diàfan i voluminós. És remarcable l'alçada assolida pel buit, que supera els 10 m, mentre que la vista abasta un espai de prop de 50 m d'un costat a l'altre. Tot el sector de la *sala Romàntica* supera els 70 m en l'eix NW-SE. L'amplada és variable, així al cap septentrional no fa més que una dotzena de metres, mentre al meridional és mesura el valor màxim de 40 m. S'estima que aquest sector té una superfície total, projectada en planta, de 1.410 m^2.

En l'actualitat, la zona nord del sector es desenvolupa entorn d'una placeta bastida de forma artificial. Malgrat les modificacions i anivellaments efectuats per facilitar el pas i trànsit de visitants, la zona encara deixa intuir que es devia tractar en origen d'un espai en gran part obert, amb una lleugera depressió al terra, que apareix enregistrada a la topografia de LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA (1948). Aquesta àrea està dominada per la monumental presència d'uns grans massissos estalagmítics originats pels fenòmens de degoteig i flux laminar de les aigües infiltrades (Figura 8). El massís que ocupa la part nord-est de l'espai, ocupant una àrea de 12 m^2, exhibeix un atapeït recobriment de banderes, penjant del que sembla una formació en forma de disc en posició vertical, mentre la base cònica es troba totalment folrada de colades. Aquesta morfologia ha propiciat que dins el recorregut turístic sigui coneguda com els *mamuts blancs*. Així i tot, la profusió d'altres petits massissos i de columnes, també arriben a formar conjunts de notable aspecte. Destaquen precisament algunes columnes calcàries que assoleixen protagonisme per les seves proporcions, amidant entre 5 i 6 m d'alçada amb gruixos entre 0,15 i 0,25 m de diàmetre. Cal esmentar l'existència d'altres columnes de menor entitat que presenten la base trencada i separada, resultat dels moviments de reajustament i consolidació del trespol on s'assenten. Al sòtil, destaquen algunes estalactites fistuloses, d'un color blanc lluent, que arriben a amidar entre 2,5 i 2,8 m. És, per tant, la combinació del volum de l'estança, juntament amb la bellesa i varietat de la decoració d'espeleotemes, el que li confereix al lloc un especial

Figura 8: Vista panoràmica de la zona central de la *sala Romàntica*. La sala es caracteritza pel seu gran volum i les grans columnes (Foto: J.J. Enseñat).
Figure 8: Panoramic view of the central zone of the *Sala Romàntica*. The chamber is characterized by its great volume and the big stalagmitic columns (Photo: J.J. Enseñat).

atractiu. A ambdues bandes d'aquests massissos hi discorre el caminoi de l'itinerari turístic; amb el costat oriental, més angost, paral·lel a la roca mare, i l'occidental més obert amb millors panoràmiques i grandiositat.

Emperò, abans d'endinsar-se cap al sud del sector, seguint el volum principal de la sala, cal fer menció d'un recòndit paratge aïllat de l'àmbit principal, situat al nord. Es tracta d'un perllongament d'uns 25 m en la mateixa direcció dominant de la sala principal, entorn dels 320º, que ha quedat quasi aïllat per un muradal de 2,5 m d'alçada. Aquest obstacle natural no és altra cosa que una llosa despresa del sostre folrada de recobriments calcaris, que resulta transitable per la part superior. Si bé aquest accés és ample, també és força baix i localment decorat amb espeleotemes de degoteig (Figura 9). Existeix un accés alternatiu a través d'un pas picat que es localitza en la raconada nord-est del camí turístic de la *sala Romàntica* i s'obre just a ran de la paret de roca mare. Es tracta d'un passatge engrandit a cop de massa i barrobí. S'ha de transitar ajupit a través d'ell i creuar a una petita estança, caracteritzada per represes de *gours* al terra que puntualment arriben algunes als 0,6 m de fondària, engalanades amb abundants formes bulboses de típic creixement subaquàtic. No es veuen aquí signes d'inundació recents i és probable que l'acció desobstructiva hagi afectat la capacitat retentiva d'aquestes formacions. El sòtil apareix igualment decorat de banderes i sobretot d'estalactites

Figura 9: Pas de baixa alçada que permet accedir a l'extrem nord de la *sala Romàntica* (Foto: J.J. Enseñat).
Figure 9: Low ceiling passage allowing the access to the northern end of the *Sala Romàntica* (Photo: J.J. Enseñat).

Figura 10: La recòndita saleta al nord de la *sala Romàntica* està caracteritzada per la presència de *gours*. En episodis plujosos es poden omplir formant una massa d'aigua que s'estén per tota la sala, però el més habitual és trobar-los eixuts (Foto: G. Santandreu).
Figure 10: The small hidden room located to the north of the *Sala Romàntica* is characterized by the rimstone dams on its floor. In rainy episodes they can fill up forming a mass of water that extends throughout all the chamber, but it is more common to find them completely dry (Photo: G. Santandreu).

lluents i blanquinoses. S'observen també remodelacions antròpiques amb finalitat indeterminada, com són alguns puntals de fusta que servien de suport a un envà de peces primes de mares emblanquinades. Per arribar on es pretén, és necessari travessar una altra desobstrucció realitzada ben enmig d'una potent colada de forma còncava i recórrer uns metres més d'estret passatge. S'accedeix així, finalment, a una saleta d'alçada entre 5,5 i 6,5 m i pis totalment ocupat per *gours*, represes, estalagmites i les esmentades formes bulboses ben arrodonides (Figura 10). Els autors pogueren constatar, durant la primavera de 2023, que els *gours* eren plens d'aigua en vàries ocasions. Aquest fet revela que, almanco de manera estacional, l'aigua de pluja infiltrada encara és capaç d'omplir aquestes formacions, però no pareix un fenomen habitual avui dia, trobant-se la major part del temps totalment eixutes. Els dipòsits de calcita flotant també són força importants. Alguna estalagmita presenta el nucli buidat per algun procés de corrosió d'origen incert. En aquest espai s'han localitzat dues inscripcions: una amb el nom Pedro Buades, a l'espai principal (Figura 2c); i l'altra amb el que semblen les lletres N i JM, a l'extrem septentrional, on l'estretor dificulta notablement l'accés (Figura 2d).

De nou a la sala principal, seguint el costat est, per on transita el camí, es passa una estretor i el volum s'eixampla en forma d'una depressió oberta sobre grans blocs que, de fet, amb una mida mitjana entre 1 i 2 m, caracteritzen la base de tot el lateral oriental del sector. El desnivell fins al fons d'aquest indret és de 5 m. Destaca en primer terme un conjunt que presenta, al capdamunt, algunes estalagmites tortes, efecte evident del reajustament dels mateixos blocs i el substrat subjacent. Considerant el col·lapse del rocam del sostre, que dona lloc al buit actual que conforma el sector, aquesta zona correspon a un lateral on els blocs no han arribat a ser coberts per les colades, que sí són característiques de la zona central molt més activa. En aquestes cotes més baixes, així i tot, hi ha alguns indrets planers de certa longitud on s'hi han dipositat acumulacions d'argila i, a sobre, successives capes fines de colada que denoten un flux laminar posterior a la seva deposició. El gruix d'aquestes colades poques vegades supera 1 cm.

La paret est del sector exposa la roca mare amb escassa o nul·la decoració d'espeleotemes que, a poc a poc, va augmentant cap al sud. L'estratificació s'observa ben marcada en general, i presenta un cabussament d'entre de 20º i 25º en direcció 125º.

Deixant de banda les cotes inferiors descrites fins al moment, l'itinerari turístic coincideix amb les zones més transitables i vistoses de la cavitat, les quals es desenvolupen per les cotes altes de la sala. La zona sud del sector contrasta amb uns volums visualment més modestos, a causa de la presència de dos massissos estalagmítics, un d'ells de grans dimensions. El primer, de menor entitat, està orientat en un eix NE-SW i ocupa una superfície de 9 m². Està separat només per una breu escletxa del segon, molt més gran, que presenta una orientació NW-SE i que ocupa una àrea de 70 m². La seva base es perllonga en forma de colades pavimentàries d'aspecte llis i molt uniformes que folren bona part del recorregut.

Arribats al sud del sector es van reduint sensiblement les dimensions de l'espai mentre es voreja el massís gran, avançant cap a l'oest, en un recorregut ascendent. En aquesta zona el visitant transita per una passarel·la artificial bastida posteriorment a les obres inicials dels anys 40 del segle passat. Una inscripció a llapis en una de les bigues de ciment, data les obres entorn del mes d'octubre de 1996 (Figura 2b). Aquest pas elevat salva un desnivell de 5 m de fondària entre acumulacions de blocs, permetent accedir a una escala de caragol amb 53 esglaons. Es tracta d'una sortida d'emergència que ascendeix per una xemeneia picada a través de 8 m de roca que connecta amb la superfície. En aquest costat de ponent de la sala existeixen diverses prolongacions d'escàs recorregut que s'endinsen entre

blocs. És destacable el fet que a l'extrem sud-oest, el gruix de roca en direcció horitzontal que separa la cova de l'exterior és inferior a 10 m. Malgrat això, no s'han observat indicis de cap possible antiga entrada en aquesta zona (veure Secció 6 de la Figura 5).

En aquest punt, en direcció W, la *sala de la Palmera* se situa a tan sols uns 4 m darrere la paret de roca, que mostra uns estrats amb un cabussament compatible amb el mesurat allà (veure Secció 9 Figura 5). Això porta a pensar en un espai primigeni comú per ambdós sectors, que han quedat separats per successius col·lapses i rebliments calcaris.

Des d'aquest lloc, un pas baix amb el sostre rebaixat amb barrobins, permet el camí de retorn a l'espai diàfan inicial. Una escalinata salva un desnivell de 6,5 m, baixant pel costat de ponent dels grans massissos, tancant així un recorregut circular. És des d'aquest punt elevat des d'on la panoràmica permet apreciar clarament les dimensions del sector i l'extens farciment d'espeleotemes que constitueix probablement l'atractiu més gran de la cova.

La sala del Llac

L'accés a aquest sector se situa al nord-oest de la *sala de la Palmera* i de tot d'una es farà evident com, en aquesta direcció, els volums es redueixen considerablement. Una sèrie de passos baixos, clarament engrandits a costa de modificar les colades i el sostre rocós, en permeten el trànsit. Amb tot, el conjunt de la *sala del Llac* consisteix en una galeria que es desenvolupa en direcció NW-SE, de 75 m de llargària i una amplada màxima de 20 m, assolint una superfície total projectada en planta de 1.190 m^2. El llarg espai apareix compartimentat per l'existència de nombrosos massissos estalagmítics així com alineacions de columnes que principalment ocupen la part central. S'intueix un cert patró en les enfilacions de les columnes i estalactites, vinculat a la fracturació de la roca amb una orientació dominant N-S.

L'inici del recorregut és un pas descendent d'uns 4 m d'amplada, ran d'un indret molt decorat conegut com el *Teatret*. De tot d'una compareix un *gour* solitari que arreplega les aigües d'infiltració que flueixen per sobre les nombroses colades que recobreixen aquest tram. És un corredor d'uns 10 m de longitud que es va eixamplant progressivament, tot i mantenir un sostre baix que no sobrepassa els 2 m, el qual es veu obstaculitzat en el seu extrem per una paret de blocs i lloses despresos del sòtil. El camí turístic allà es bifurca, amb dos passos adaptats que permeten avançar fàcilment cap a la part alta. Just abans de la bifurcació el camí passa sobre un fondal d'uns 3 m de profunditat gràcies a un rebliment artificial de material aparentment extret de la mateixa cova. Aquesta clotada comunica, per la seva part inferior, amb una sèrie d'espais entre blocs que, mitjançant un trànsit molt incòmode i enrevessat, enllacen amb les cotes més altes del mateix sector (veure Espais inferiors destacables «b» de la Figura 4 i la Secció 9 de la Figura 5). Enfront de la mateixa bifurcació del camí es troba un espai singular, un buit que ha quedat entre un gran bloc, despullat de recobriments calcaris, i la part inferior d'una llosa enorme on s'ha desenvolupat un frondós racó de fines estalactites fistuloses. Aquesta raconada s'anomena al circuit turístic com a *Capella de la Mare de Déu,* i per la seva fragilitat es manté protegida dels visitants amb un enreixat.

El pas cap al sud-oest, consisteix en una escala que ziga-zaga tombant al nord-oest per avançar en la direcció de la galeria. És un accés molt vertical on

Figura 11: L'element distintiu de la *sala del Llac* és l'acumulació permanent d'aigua en uns *gours* que pot assolir unes dimensions de 7 m de longitud i 3 m d'ample. En episodis de sequera extrema els *gours* poden arribar a quedar com a dues basses aïllades, però als nivells alts d'inundació es forma un únic cos d'aigua i aquests nivells es poden observar a la imatge (Foto: J.J. Enseñat).

Figure 11: The distinctive element of the *Sala del Llac* is the permanent water accumulation inside a couple of rimstone dams which can reach 7 m long and 3 m wide. In extreme drought episodes the rimstone dams can be isolated, but at the high flood levels it performs a single body of water whose levels can be observed in the image (Photo: J.J. Enseñat).

es va modificar de manera substancial l'espai original. Tot i això, encara es pot intuir que, en el seu estat primigeni, es devia gairebé d'escalar per la mateixa colada, per travessar algun espai entre formacions. L'observació dels desperfectes en els materials en algun dels successius passos habilitats entre els blocs i la paret de roca suggereix un pas original d'entre 0,5 i 0,9 m d'amplada, i atenent a la fragmentació d'espeleotemes fins i tot mides més reduïdes en algun punt. Es pot afirmar que el recorregut s'enfila cercant el pas més assequible per entremig dels espais buits que deixaven grans formacions estalagmítiques o bé fregant la roca mare. Entre els espeleotemes d'aquest racó hi trobem les formes habituals, però es pot constatar el que podríem considerar, amb certes reserves pels recobriments de precipitat posteriors, com algun disc incipient que no pareix estar actiu. Aquest passatge, estret i vertical, guanya volum de forma progressiva fins arribar a una estança que es coneix amb el neotopònim de *sala Rotja* (*Saló Roig* a VIVES, 1996), en al·lusió a la impregnació de coloració argilenca sobre les columnes. Són característics d'aquest sector els massissos estalagmítics i alineacions de columnes de certa magnitud que actuen d'envans, compartimentant el buit, algun dels quals gairebé barra el pas completament de banda a banda de la galeria.

L'altra opció obliga a prendre cap al nord-est, deixant la *Capella de la Mare de Déu* a l'esquerra i seguint un itinerari ascendent, per tombar immediatament cap al nord-oest. També s'hi aprecia amb claredat el nivell del trespol original: una extensa colada pavimentària, a través de la qual s'obre el camí, folrada en alguns punts de petits *gours*. Aquest tram, en l'estat original, no devia tenir més de 0,8 m d'alçada. En aquest lateral de la galeria es veu com la cova es perllonga cap a parts més baixes on, com és la tònica d'aquest sector, espais entre blocs hi formen alguns reductes aïllats. En canvi, al nivell del camí, tot aquest costat està intensament recobert de decoració calcària. L'itinerari transita per diversos revolts de sòtil baix i picat en molts punts, amb una alçada màxima d'1,80 m.

Ambdós camins avancen de forma paral·lela pels laterals del sector i travessen un envà de columnes pels seus extrems entrant en la zona on es localitza un embassament d'aigua perenne referit com el *Llac*. En aquest punt la cavitat torna a assolir un volum notori, que no s'aprecia bé del tot per la densa decoració d'estalagmites i columnes en els laterals.

L'esmentat llac, que podríem dir que articula la zona central del sector, és en realitat el resultat de l'acumulació de les aigües d'infiltració originalment a l'interior de dos *gours*. Si bé la presència d'aigua és un fet permanent, el seu nivell varia en funció de l'aportació de l'aigua de pluja. Entre el febrer de 2023 i el novembre de 2024, una època caracteritzada per la sequera, s'ha observat una gran variabilitat del nivell passant d'una columna d'aigua d'1,2 m a prop de 0,9 m. Els nivells d'inundació més estables al llarg del temps han deixat marques clarament visibles en la Figura 11. En la seva màxima extensió, limitada per un desguàs lateral, pot ocupar una superfície d'uns 15 m². Cal assenyalar també que la base del llac és una gran llosa despresa del sostre, per sota de la qual és possible transitar, si bé és aquest buit inferior un laberíntic espai entre blocs, completament desproveït de formacions, que es desenvolupa en tres nivells fins a fer-se impracticable (veure Espais inferiors destacables «e» de la Figura 4 i Seccions 2 i 9 de la Figura 5).

Figura 12: Extrem nord-oest de la *sala del Llac*. Està caracteritzada pels grans blocs de col·lapse en forma d'un marcat pendent que descendeix en direcció NE. Es pot observar clarament l'estratificació de la roca (Foto: J.J. Enseñat).
Figura 12: Northwestern end of the *Sala del Llac*. It is characterized by big breakdown rocks forming a marked slope in north-east direction. The bedding of the rock can be clearly observed (Photo: J.J. Enseñat).

En termes generals, la galeria es desplega horitzontalment en el seu eix longitudinal, però amb una notòria inclinació transversal, trobant-se les cotes més altes al costat sud-oest i les més baixes al nord-est, un fet que pareix ser conseqüència del cabussament dels estrats de la roca, visible en els sostres plans. Això no impedeix l'existència, en el costat sud-oest, d'espais a cotes baixes transitables d'una certa entitat entre la roca i els blocs del col·lapse, confirmant que l'acumulació de blocs a la base

de la cova té una profunditat d'entorn dels 10 m o més. Així i tot, les cotes més baixes accessibles, es troben al costat nord-est, en un accés vertical molt dificultós. El desnivell màxim entre cotes accessibles, a la zona del llac és d'uns 14 m.

Avançant més enllà, un cop superat un darrer massís estalagmític que acaba de compartimentar la galeria, s'arriba a l'extrem del camí, on l'itinerari de les visites descriu un revolt que permet fer la circumval·lació del sector. Així i tot, l'espai continua en la mateixa direcció NW uns 22 m més, conservant-se una amplada similar a la resta de la galeria, però amb una decoració més minsa. S'hi pot apreciar el rost fortament inclinat, amb el costat sud-oest format per grans blocs amuntegats i lloses lleugerament recobertes per colades i algunes estalagmites, alternant-se amb sediments, i el nord-est amb pedregam més fi, probablement resultat de les obres dels camins propers, acumulat a la part baixa. Es pot intuir la proximitat a la superfície per les arrels que s'introdueixen pel sostre i per les notables acumulacions d'argiles, ben segur al·lòctones, fruit de la seva possible infiltració des de la superfície. Igualment, és digne d'esment l'estratificació del rocam, que en aquest indret es pot apreciar amb molta claredat a la paret nord-est (Figura 12). La galeria acaba en un cul-de-sac, sense cap punt que faci sospitar de continuacions. La incursió a través dels nivells baixos d'aquest extrem es veu impossibilitada per estretors impracticables entre les quals s'entreveuen alguns buits de poca entitat. Si bé s'indica en el dibuix l'extrem com un límit suposat, l'absència de corrent d'aire no permet sospitar cap continuació per aquests espais.

Espeleogènesi

Cal reconèixer que la morfologia general de les Coves de Campanet no aporta massa evidències sobre les condicions en les quals tingué lloc la formació de la cavitat. En aquest sentit, són del tot predominants les morfologies associades als esfondraments dels sòtils i parets, fet que impedeix copsar com eren els buits inicials que explicarien la seva gènesi. A més a més, la profusió d'espeleotemes convencionals (estalactites, estalagmites, colades, etc.) que ornamenten la cova contribueixen a emmascarar la seva història morfogenètica.

Encara que la gènesi de la cavitat no ha rebut massa atenció, una primera hipòtesi genètica fou proposada per LLOPIS-LLADÓ & THOMAS-CASAJUANA (1948), que relacionaven l'excavació de la cova amb una possible connexió hidrològica amb l'àmplia zona d'infiltració del Puig Tomir i d'Alcanella, connexió que tindria lloc per sota del plec sinclinal que constitueix l'àrea del Pla de Tel (Figura 3). Tot i això, els esmentats autors no relacionen la formació de la cova amb la important zona de surgències de les Fonts Ufanes. Un altre intent explicatiu fou formulat per CAÑIGUERAL (1949), qui plantejà que la dissolució de guixos –existents als materials margosos del keuper– seria el possible factor explicatiu d'uns buits inicials, que serien després desmantellats pels processos d'esfondrament posteriors. Cal dir que aquesta possibilitat, encara que plausible en el context lito-estratigràfic del Puig de Sant Miquel, no ha estat recolzada per indicis concloents.

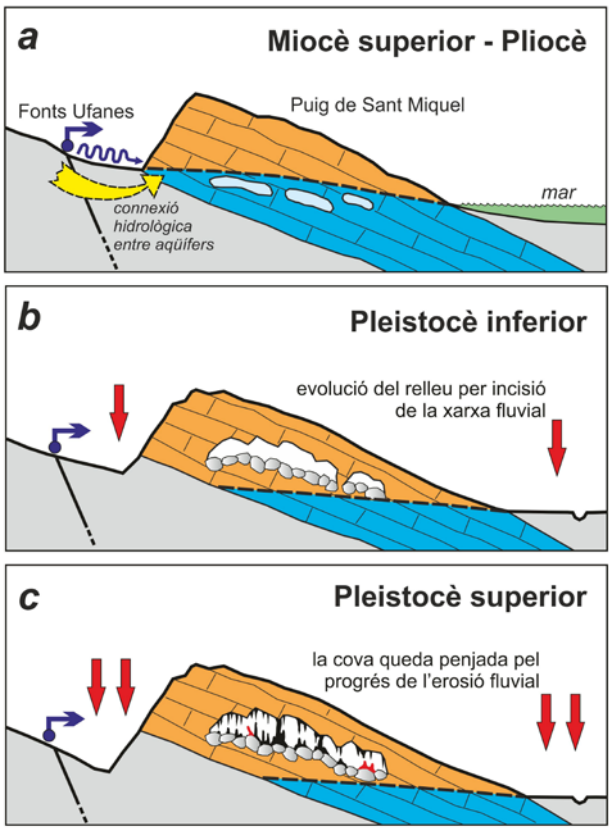


Figura 13: Esquema evolutiu de les Coves de Campanet. a) Excavació inicial de buits formats per dissolució, en règim freàtic, com a resultat de la connexió hidrogeològica amb l'aqüifer de les Fonts Ufanes. b) La progressiva incisió dels torrents, tendeix a situar la cova fora de la zona freàtica; els esfondraments generalitzats desorganitzen els buits inicials. c) La cova ha quedat totalment deslligada de les circulacions actives, i predomina la deposició d'espeleotemes per les aigües d'infiltració; alguns espeleotemes (representats en vermell) resulten fracturats i/o basculats pels reajustaments del substrat de blocs rocosos (Font: GINÉS & FORNÓS, 2015).

Figure 13: Evolutive sketch of the Coves de Campanet. a) Initial excavation by dissolution, in phreatic regime, as a consequence of the hydrological connection with the Fonts Ufanes aquifer. b) The progressive downcutting of fluvial system tends to place the cave above the phreatic zone; widespread breakdown processes destroy the initial phreatic voids. c) The cave is totally disconnected from the active underground flows and prevails the speleothems formation by infiltrated meteoric waters; many speleothems (in red color) become damaged or tilted by rearrangements of blocks substrate (Source: GINÉS & FORNÓS, 2015).

Segons plantegen GINÉS & FORNÓS (2015), l'indret on es localitzen les Coves de Campanet hauria estat –durant el miocè superior i el pliocè– una àrea preferent de descàrrega subterrània cap al litoral de les unitats hidrològiques d'aquest sector de la Serra de Tramuntana, que inclou les actuals Fonts Ufanes, amb la conseqüent formació de conductes i buits d'origen càrstic. Segons aquests autors, la morfogènesi de la cavitat abraçaria un ample marc temporal que aniria des del miocè superior fins al pleistocè. Dins d'aquest esquema evolutiu es pot observar com uns buits càrstics inicials (Figura 13a), formats a partir del miocè superior o del pliocè en condicions de total inundació per les aigües freàtiques, evolucionen al llarg del pleistocè –ja dins la zona vadosa del carst– degut al descens gradual del nivell freàtic associat a la incisió de la xarxa fluvial tributària del Torrent de Sant Miquel (Figura 13b). En els darrers estadis evolutius (pleistocè mitjà i superior), la infiltració de les aigües meteòriques participa en els processos d'esfondrament que afecten la cova alhora que és responsable de la deposició dels abundants espeleotemes que la decoren en l'actualitat (Figura 13c), alguns dels quals apareixen trencats o basculats a causa de fenòmens d'assentament del substrat de blocs rocosos. Cal fer esment que, en determinats punts de la cova, els espeleotemes es troben fortament degradats per la corrosió relacionada amb processos de condensació ulteriors a la seva precipitació.

Els darrers indicis disponibles sobre la història geomorfològica més recent de la cavitat, tenen a veure amb dos aspectes. D'una banda, es disposa de dades cronològiques absolutes d'una estalagmita, obtingudes mitjançant tècniques radiomètriques (concretament, el mètode U-Th). Aquestes edats abracen des de 121 a 5 ka BP, cronologia que situa la formació de l'estalagmita al llarg del pleistocè superior i l'holocè, amb tan sols un important hiatus que es produí entre 67 i 53 ka BP (DUMITRU et al., 2018); no obstant això, no es pot descartar que bona part dels espeleotemes presents a la cova fossin precipitats durant el pleistocè mitjà o fins i tot abans. Per altra part, les restes de *Myotragus balearicus* recol·lectades a la zona d'entrada (SAZ, 1946) també ens informen sobre el fet que al pleistocè superior la cova tenia una morfologia similar a l'actual, però estava millor comunicada amb l'exterior de tal manera que es pogueren dipositar les mencionades restes paleontològiques.

Algunes recerques ambientals recents

Les Coves de Campanet han estat objecte les darreres dècades de tot un seguit d'investigacions sobre els seus paràmetres ambientals, desenvolupades pel Grup de Recerca Ciències de la Terra de la UIB en col·laboració amb col·legues de la *University of South Florida* (Tampa, USA). Per una banda, s'han avaluat les concentracions de Radó (^{222}Rn) en l'atmosfera de la cova, les quals presenten un clar comportament estacional relacionat amb un major confinament de l'aire subterrani durant la temporada estival (DUMITRU et al., 2015a, 2015b, 2016). Les concentracions mesurades se situen entre els 515 i els 1.972 Bq/m^3, amb uns valors més elevats que corresponen a la s*ala del Llac*, la qual es troba molt menys eficientment ventilada que la s*ala Romàntica*.

A més de les investigacions geocronològiques esmentades anteriorment, el treball de DUMITRU et al. (2018), ha permès conèixer el registre paleoclimàtic dels darrers 120 ka que conté una estalagmita de la cavitat. El seu estudi posa de manifest canvis dràstics del clima durant el MIS-5 (el darrer interglacial), que propiciarien la precipitació alterna tant d'aragonita com de calcita, essent dominant aquesta darrera mineralogia durant els episodis més freds i àrids que inclouen la darrera glaciació i l'holocè.

Finalment, cal esmentar l'article de DUMITRU et al. (2017) que s'ocupa de la variabilitat isotòpica de les aigües de degoteig d'algunes coves mallorquines, entre les quals es conten les Coves de Campanet. Els resultats d'aquestes investigacions apunten cap a un origen principalment atlàntic de les precipitacions que alimenten els degoteigs de les cavitats situades al peu de la Serra de Tramuntana. En contraposició, les coves costaneres investigades per aquests autors presenten unes aigües de degoteig amb valors més elevats de δ^{18}O, circumstància que apuntaria a un origen mediterrani predominant pel que fa a la procedència de les masses d'aire causants de les precipitacions atmosfèriques a les zones litorals.

Conclusions

Les Coves de Campanet, malgrat les seves relativament modestes dimensions, és la cavitat turística més important de la Serra de Tramuntana. La seva rellevància es basa en diversos aspectes que van des de l'econòmic i social fins al de la recerca científica en àmbits com el biològic i el geològic.

S'ha elaborat una nova topografia amb un elevat grau de detall, que reflecteix l'estat actual, incorporant les modificacions antròpiques realitzades al llarg dels prop de 80 anys que han transcorregut des del seu descobriment.

La seva gènesi està lligada a fenòmens de dissolució per aigües subterrànies, iniciades en el miocè superior i el pliocè, seguits de successius fenòmens de col·lapse, i rebliments de dipòsits estalagmítics alguns d'ells datats en el pleistocè superior, que li confereixen l'aspecte actual.

Es pot estructurar en tres sectors: *sala de la Palmera*, *sala Romàntica* i *sala del Llac*. Els dos primers semblen formar conjuntament una gran unitat de col·lapse, caracteritzada pel gran volum, mentre que la tercera es presenta com una galeria atapeïda d'espeleotemes amb volums més continguts. Tot el paviment està format per una acumulació, d'uns 10 m de profunditat, de blocs recoberts en superfície per colades.

La cova té un recorregut de 450 m i la seva projecció en planta ocupa una àrea de 3.100 m², amb un desnivell de 17 m entre els punts més alt i el més baix del terra accessible.

Agraïments

S'ha d'agrair a la propietat de les Coves de Campanet, Maria Antònia Siquier i Maria Elionor Segura, i a tot el personal de gestió i atenció al públic, especialment a n'Iris Morales, les facilitats per accedir a la cova en les successives visites.

També als companys de la Societat Espeleològica Balear, Xisco Gràcia, Francesc Xavier Bascuñana i Vicenç Pla, que han col·laborat d'una manera o altra a realitzar la nova topografia i les fotografies que il·lustren aquest article.

Es vol dedicar aquest treball a la memòria d'Àngel Ginés, pels seus comentaris, consells i suport que, desinteressadament, al llarg dels anys ens ha proporcionat a tots els companys i amics de l'espeleologia.

Aquest article és una contribució al projecte PID2020-112720GB-I00/AEI/ de l'Agencia Estatal de Investigación.

Bibliografia

CAÑIGUERAL, J. (1949): Las Cuevas de Campanet (Mallorca). *Ibérica*, 156: 178-199.

DUMITRU, O.A.; FORRAY, F.L.; FORNÓS, J.J.; ERSEK, V. & ONAC, B.P. (2017): Water isotopic variability in Mallorca: a path to understanding past changes in hydroclimate. *Hydrological Processes*, 31 (1): 104-116.

DUMITRU, O.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J. & COSMA, C. (2015a): Radon concentration and effective dose assessment in Coves de Campanet (Mallorca Island, Spain). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303 (1): 885-890.

DUMITRU, O.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; COSMA, C.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & MERINO, A. (2015b): Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain. *Science of the Total Environment*, 526: 196-203.

DUMITRU, O.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; COSMA, C.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2016): Evaluación de las concentraciones de radón y su variabilidad estacional en cuevas turísticas de Mallorca. In: ANDREO, B. & DURÁN, J.J. (eds.) *Cuevatur 2016. El karst y el hombre: las cuevas como patrimonio mundial.* VI Congreso Español sobre Cuevas Turísticas, Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE): 157-167.

DUMITRU, O.A.; ONAC, B.P.; POLYAK, V.J.; WYNN, J.G.; ASMEROM, Y. & FORNÓS, J.J. (2018): Climate variability in the western Mediterranean between 121 and 67 ka derived from a Mallorcan speleothem record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 506: 128-138.

ENSEÑAT, J.J.; GRÀCIA, F.; GINARD, A.; MASCARÓ, G.; SANTANDREU, G.; FERNÁNDEZ, J.F.; TRIAS, M.; PÉREZ, J.; BOVER, P.; CIRER, A.; PLA, V.; LÁZARO, J.C.; VICENS, D.; ANSALDI, D.; BASCUÑANA, F.X.; CLAMOR, B.; LOZANO, A.; PERELLÓ, M.A.; GUAL, M.A.; VIVES, M.A.; GAVIÑO, B.; GAMUNDÍ, P.; BONNIN, M.; GRANELL, A.; BETTON, N.; FRANGLEN, N. & BORNEMANN, N. (2018): Nou plànol topogràfic de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 65-76.

ENSEÑAT, J.J.; PLA, V.; SANTANDREU, G.; VALERO, A.R.; BASCUÑANA, X.; GRÀCIA, F.; ENTRENA, A.; PILARES, A.; NAVARRO, N.; TRIAS, M.; ARANDA, C. & GUAL, M.A. (2021): Nou plànol topogràfic de les Coves d'Artà (Capdepera, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 4: 47-74.

ESPAÑOL, F. (1945): Nota sobre la captura del *Hypogeobium Jordai* Reitt., Pterostichidio endógeno de la fauna balear. *Graellsia*, 3 (6): 185-187.

FERRÀ-PONÇ, D. (1980): El descobriment de «Ses Coves». *Festes de Sant Victorià 1980.* Ajuntament de Campanet. Campanet.

FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (2011): Condicionants litològics i estructurals del carst a les Illes Balears. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 37-52.
GELABERT, B. (1998): *La estructura geológica de la mitad occidental de la isla de Mallorca*. Memorias del Instituto Tecnológico Geominero de España. 129 pàgs. Madrid.
GELABERT, B. (2002): Las Fonts Ufanes (Mallorca): funcionamiento hidráulico de una surgencia kárstica / Les fonts Ufanes (Mallorca): funcionament hidràulic d'una surgència càrstica. *Boletín SEDECK*, 3: 46-55.
GINÉS, J. (1995): Les coves turístiques de Mallorca. *Endins*, 20 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 191-203.
GINÉS, J. (1997): Coves de Campanet (Mallorca). *Tecno Ambiente*, 72: 73-80.
GINÉS, J. (2016): *Coves de Campanet. Mallorca*. Pixel Trade S.L. Coves de Campanet. 24 pàgs. Campanet, Mallorca. (versions en: anglès i alemany).
GINÉS, J. & FORNÓS, J.J. (2015): Les Coves de Campanet i la hidrogeologia càrstica de la vall de Sant Miquel. In: MIR-GUAL, M. (ed.) *Les fonts Ufanes i el pla de Tel*. Ajuntament de Campanet. Col. Pla de Tel, 11: 53-74.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (2011): Les coves turístiques de les Illes Balears: antecedents i estat de la qüestió. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 333-344.
GRÀCIA, F.; GINARD, A.; VICENS, D. & GINÉS, J. (2009): Recull de les cavitats de major recorregut i major fondària de les Balears. *Endins*, 33: 139-152.
LLOPIS-LLADÓ, N. (1946): La cueva de Son Apats (Campanet, Mallorca). *Club Montañés Barcelonés. Circular para los Socios*, 267-268.
LLOPIS-LLADÓ, N. & J.M. THOMAS-CASAJUANA (1948): La hidrología cárstica de los alrededores de Campanet (Inca-Mallorca). Miscelánea *Almera*, 2ª parte. *Publ. Inst. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 7: 39-60.
PAGÉS, J. (1950): Diploures cavernicoles d'Espagne. *Notes Biospéologiques*, 5: 71-77.
SAZ, E. (1946): Las nuevas cuevas de "Son Apats" y fósiles de Mallorca. *Ibérica*, 72/2ª época: 513-518.
VIVES, M. (1996): *Les coves de Campanet*. Ed. Pla de Tel, 6, 104 pàgs.
ZARAGOZA, J.A. & VADELL, M. (2013): Chthonius (Chthonius) campaneti, a new pseudoscorpion species from Coves de Campanet, Mallorca (Spain). *Revista Ibérica de Aracnología*, nº 23, 33-41. Grupo Ibérico de Aracnología (S.E.A).

Premsa

Anònim (1948): Las Cuevas de Campanet han quedado abiertas al público. *La Última Hora. Diario ilustrado de la noche de información, literario y artístico*. Año LVI, n.17162. Jueves 11 de Noviembre de 1948. Pàg. 3.
A.R. (1949): La romería de San Miguel de Campanet. *Baleares. Diario de la mañana*. Año XI, n. 2944. Viernes, 29 de abril de 1949. Pàg. 3.
BAUZÁ, J. (1945): Las cuevas de Campanet. *Sóller. Semanario de información local*. Año LXI (2ª época), n. 3057. Pàg. 2.
COLOM-BENNASAR, A. (1945a): Se han descubierto unas nuevas cuevas en Campanet. *Baleares. Organo de Falange Española Tradicionalista y de las J.O.N.S.* Año 7, n.1749. Domingo 24 de Junio de 1945. Pàg. 6.
COLOM-BENNASAR, A. (1945b): Las cuevas de San Miguel de Campanet. *Baleares. Organo de Falange Española Tradicionalista y de las J.O.N.S*. Año VII, n.1815. Domingo 7 de Septiembre de 1945. Pàg. 6.
COLOM-CASASNOVAS, G. (1945): Las cuevas de «Son Apats», en Campanet. *Correo de Mallorca. Diario Católico*. Año XXXVI, n. 10350. Lúnes 6/7 de agosto de 1945. Sense numerar.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

La paleogenòmica aplicada al registre paleontològic i arqueològic de les Illes Balears: el cas de la tortuga marina de Na Guardis (Ses Salines, Mallorca)

Pere BOVER [1, 2, 3], Alejandro VALENZUELA [4] i Joan PONS [3, 4]

[1] Fundación ARAID, Avenida de Ranillas, 1-D, planta 2ª, Oficina B, 50018 Zaragoza (Aragó).
[2] Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza (Aragó). Email: pbover@unizar.es
[3] Societat Espeleològica Balear, Palma, Mallorca (Illes Balears).
[4] Institut Mediterrani d'Estudis Avançats, IMEDEA (UIB-CSIC), C/ Miquel Marquès 21, 07190, Esporles, Mallorca (Illes Balears).

Abstract

Paleogenomics is a recent scientific discipline that analyzes DNA sequences obtained from samples ranging from several hundred to a few million years old. Its significant development in the last decade, both in laboratory protocols and bioinformatic methods, has been boosted by the continuously increasing amount of data from high-throughput sequencing platforms (NGS). The application of these methodologies to a sample of a sea turtle shell from the Punic deposit of Na Guardis (Mallorca) has allowed to confirm its identification as *Caretta caretta* through the recovery of a partial mitochondrial genome, which belongs to mitochondrial haplogroup II of the species. This sample contributes to the growing list of Balearic samples successfully analyzed from a paleogenetic perspective. The literature review included in this study highlights that the Balearic Islands should be considered a viable region for the recovery of ancient DNA, specially in fossiliferous/archaeological deposits in caves, encompassing various islands, species, and chronologies, as well as mitochondrial and nuclear genomes.

Resum

La paleogenòmica és una disciplina científica recent que analitza seqüències d'ADN obtingudes a partir de mostres de diversos centenars fins a pocs milions d'anys. El seu gran desenvolupament en la darrera dècada, tant pel que fa a protocols de laboratori i mètodes bioinformàtics s'ha vist estimulat per la cada vegada major quantitat de dades procedents de les plataformes de seqüenciació massiva (NGS). L'aplicació d'aquestes metodologies a una mostra de la closca d'una tortuga marina del jaciment púnic de Na Guardis (Mallorca) ha permès confirmar la seva identificació com a *Caretta caretta* gràcies a l'obtenció d'un genoma mitocondrial parcial que pertany a l'haplogrup mitocondrial II de l'espècie. Aquesta mostra contribueix al cada vegada major llistat de mostres balears que s'han analitzat de forma exitosa des d'un punt de vista paleogenètic. La revisió bibliogràfica que s'inclou en aquest treball posa de manifest que s'ha de considerar les Balears com a una regió viable per a l'obtenció d'ADN antic, especialment en jaciments fossilífers/arqueològics en coves, tant pel que fa a les diferents illes, espècies i cronologies i com pel que fa a genomes mitocondrials i nuclears.

Bover, P.; Valenzuela, A. i Pons, J. (2024): La paleogenòmica aplicada al registre paleontològic i arqueològic de les Illes Balears: el cas de la tortuga marina de Na Guardis (Ses Salines, Mallorca).
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 219-235. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 22 desembre 2024; **Revisat:** 24 desembre 2024; **Acceptat:** 27 desembre 2024.
Publicat online: 28 desembre 2024.

Introducció

La paleogenómica o l'estudi d'ADN antic és una disciplina científica relativament moderna i que ha suposat una gran revolució pel que fa a determinats aspectes de la paleontologia i l'arqueologia. El treball que es considera el primer estudi en base a restes d'una espècie extinta és el de l'obtenció de material genètic d'una quagga (*Equus quagga quagga*, HIGUCHI et al., 1984), un parent molt proper de les zebres actuals i de la que el darrer individu conegut en llibertat morí el 1878. Higuchi i col·laboradors aconseguiren aïllar un petit fragment del genoma mitocondrial (229 parells de bases, pb) de teixit muscular sec d'un individu d'aquest taxó extingit. Només un any després, es va publicar

un altre dels treballs primerencs i excepcionals de la disciplina. Svante Pääbo, el qual va rebre l'any 2022 el Premi Nobel de Fisiologia o Medicina pels seus treballs en paleogenòmica de neandertals, va obtenir 3.400 nucleòtids d'una mòmia egípcia de 2.400 anys d'antiguitat (PÄÄBO, 1985). Des d'aquells primers treballs, el recorregut de la disciplina ha avançat de forma considerable. Durant els primers anys no es coneixien les característiques peculiars de l'ADN antic, com per exemple la facilitat de contaminació per ADN modern, fet que va provocar que alguns treballs de principis de la dècada dels 90 afirmassin haver obtingut material genètic de mostres osteològiques i de restes d'ous de més de 60 milions d'anys (e.g., WOODWARD et al., 1994; AN et al., 1995) o inclús de plantes de més de 17 milions d'anys (e.g., GOLENBERG et al., 1990), fet que s'ha comprovat que és, a hores d'ara, inviable. S'ha de dir que s'han obtingut dades genètiques de mostres que van més enllà dels centenars de milers d'anys, com és el cas de mostres de mamuts de més d'un milió d'anys (VAN DER VALK et al., 2021) o de sediments de més de dos milions d'anys (KJÆR et al., 2022). Ara bé, sempre cal tenir en compte que aquestes mostres procedien de materials excavats en permagel (*permafrost* en anglès), és a dir, en condicions de congelació, un dels requisits primordials per a la bona conservació de l'ADN.

Els avenços en protocols de laboratori ha fet que cada vegada s'hagi d'emprar una menor quantitat de material, passant d'uns pocs grams (g) a unes poques desenes de mil·ligrams (mg) o inclús sense alterar l'os (ESSEL et al., 2023). A més, s'han elaborat protocols específics per al processament de mostres antigues que han augmentat l'eficàcia a l'hora d'obtenir ADN de restes amb una conservació compromesa, ja sigui per la seva cronologia o per les condicions en què han estat preservades (veure la revisió d'ORLANDO et al., 2021). Si bé els protocols de laboratori i la seva eficàcia han evolucionat de forma exponencial, especialment durant la segona dècada del segle XXI, l'arribada de les plataformes de seqüenciació massiva (NGS, de l'anglès *Next Generation Sequencing*) ha marcat un punt d'inflexió en la quantitat i qualitat de les dades genòmiques. Aquesta tecnologia, a més, ha fet que es requereixi un gran poder de computació per a processar les dades generades i el desenvolupament de programes informàtics específics i paquets estadístics cada vegada més complets i acurats. Gràcies a aquesta metodologia capdavantera, ara es poden dur a terme una gran varietat d'estudis que abans no haurien estat possibles.

Els avenços en la paleogenòmica no només han revolucionat l'estudi de grans icones de la prehistòria, com els mamuts o els neandertals, sinó que també han obert noves vies per explorar aspectes més específics de la història evolutiva i cultural d'espècies en contextos regionals. En aquest sentit, les Illes Balears representen un escenari singular per aplicar aquestes tècniques, especialment en l'estudi de restes arqueològiques que reflecteixen dinàmiques ecològiques i culturals. Entre aquestes, destaquen exemples poc comuns com la mostra de tortuga marina procedent del jaciment púnic de Na Guardis (Ses Salines, Mallorca), que exemplifica com les eines paleogenòmiques poden aportar noves perspectives, fins i tot amb mostres provinents de regions poc favorables per a la conservació de l'ADN.

En aquest treball volem presentar com exemple d'estudi paleogenòmic, la confirmació de la identificació taxonòmica d'una mostra de tortuga marina procedent de Na Guardis. A més, es presentarà breument un recull dels estudis d'ADN antic que han utilitzat mostres paleontològiques i arqueològiques procedents de jaciments, molts d'ells en coves, de les Illes Balears.

Materials i mètodes

El jaciment de Na Guardis es troba en un illot situat davant la costa sud de Mallorca, a prop de la Colònia de Sant Jordi (Ses Salines) (Figura 1a i b). Aquest enclavament, actiu entre els segles IV i II aC, destaca per ser una factoria comercial establerta pels púnics d'Eivissa (*Ebusus*), que fou un punt estratègic per als intercanvis econòmics i culturals amb les poblacions indígenes de Mallorca (GUERRERO, 1984, 1997). Les excavacions han revelat estructures com una edificació rectangular amb dues estances i una llar central, tallers metal·lúrgics amb forns per a la fosa de metalls i magatzems per a l'emmagatzematge de productes (Figura 1c). El jaciment es va abandonar a finals del segle II aC, coincidint amb la conquesta romana de les Illes Balears.

En aquest jaciment varen aparèixer les restes d'una tortuga marina en el context del "Hogar A-3 Exterior", associades a altres restes faunístiques, com animals domèstics, mol·luscs i peixos i inicialment identificada pel Dr. Luis Gállego (UIB) com a *Caretta caretta* (GUERRERO, 1997). Aquests materials es trobaven relacionats amb una olla d'origen ebusità, suggerint un context culinari on es van aprofitar recursos marins disponibles a la zona (IBORRA, 2005). La presència de marques clares de carnisseria en els ossos de la tortuga i la seva associació amb altres restes consumides indica que podria haver estat utilitzada com aliment. Aquest descobriment posa de manifest l'explotació diversificada dels

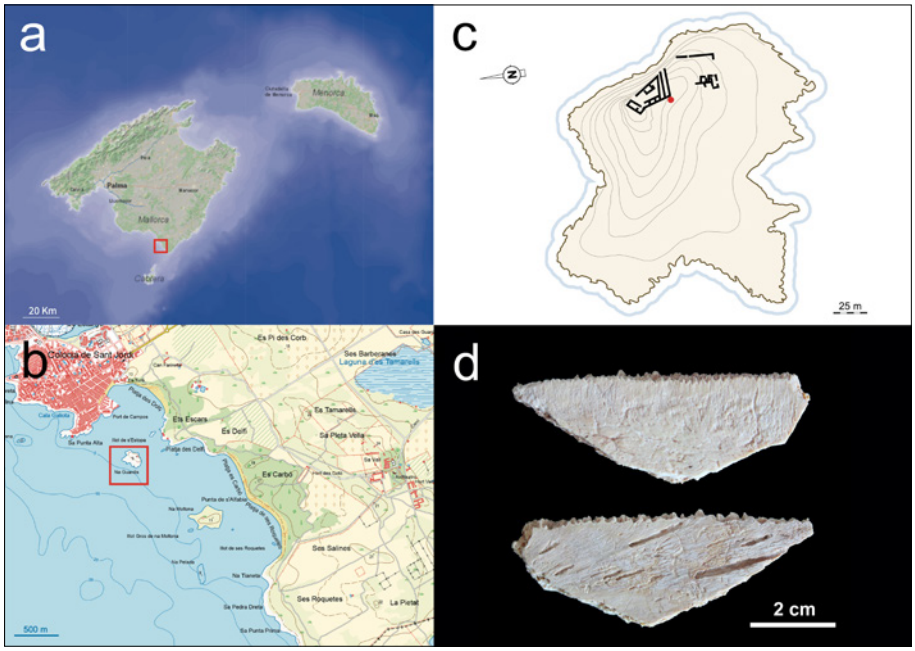


Figura 1: Mapa d'ubicació del jaciment arqueològic de Na Guardis (a-c) i foto de l'os de tortuga marina (*Caretta caretta*) (d) d'aquest jaciment utilitzat en aquest treball.
Figure 1: Location map of the archaeological deposit of Na Guardis (a-c) and photo of the sea turtle (*Caretta caretta*) bone (d) from this deposit used here.

recursos marins al jaciment, en consonància amb altres activitats econòmiques documentades, com la pesca i que fins aquell moment no s'havien encara documentat a les Gimnèsies.

Per tal de confirmar la identificació taxonòmica de la tortuga marina de Na Guardis es va decidir realitzar un estudi paleogenòmic de la mostra. Tots els treballs d'ADN antic es van realitzar en el laboratori específic de Paleogenòmica del Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA) de la Universidad de Zaragoza.

Un fragment de plastró d'una tortuga marina (nombre de laboratori 339, Figura 1d) va ser seleccionat per a l'estudi paleogenètic. Una petita zona d'aquest os va ser inicialment netejada mitjançant la retirada d'1 mm superficial amb un trepant amb un disc d'un sol ús i posteriorment es va tallar un fragment d'aquesta zona que es va moldre mitjançant un morter. La quantitat de pols d'os utilitzada per a l'extracció d'ADN va ser de 184 mg.

L'ADN de l'os es va extreure seguint el protocol de sílica en suspensió de BROTHERTON et al. (2013) i emprant un tampó PB (Qiagen) modificat (BOVER et al., 2019) basat en el protocol de DABNEY et al. (2013). Breument, es va realitzar una predigestió de la pols d'os emprant 1 ml d'EDTA (0,5 M; ph 8,0) en rotació constant durant una hora a temperatura ambient, seguit d'una digestió/descalcificació durant 20-24 hores emprant ~1 ml d'un tampó de digestió (900 µL d'EDTA 0,5 M; ph 8,0 i 20 µL de ProteinasaK 20 mg/mL) també en rotació constant a 55ºC. L'extracció es va realitzar emprant 13 mL d'un tampó PB modificat [13,6 mL tampó PB (Qiagen), 420 µL d'Acetat de Sodi 3M i 7 µL de Tween-20] i 100 µL de partícules de sílica en suspensió. Després de tres rentats (el primer emprant 900 µL del tampó PB modificat remanent i els dos següents amb 900 µL d'etanol al 80%), l'elució de l'ADN es va fer amb 100 µL de tampó TLE.

Es varen construir llibreries genòmiques de cadena doble seguint el protocol basat en MEYER & KIRCHER (2010) amb les modificacions descrites a LLAMAS et al. (2016) [i.e., lligat d'adaptadors curts P5 i P7 de 7 parells de bases (pb) a cada costat de les molècules d'ADN] i realitzant el tractament de reparació parcial uracil-DNA glicosilasa (ROHLAND et al., 2015). Una vegada purificada i quantificada, la llibreria va ser seqüenciada en una plataforma Illumina HiSeqX (2 x 150 pb).

La qualitat de les lectures obtingudes directament de la seqüenciació es va analitzar emprant fastQC v0.11.2 (http://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc). Les seqüències dels adaptadors es varen filtrar i retallar emprant AdapterRemoval v.2.3.0 (SCHUBERT et al., 2016) i aplicant els paràmetres habituals per a ADN antic [*mismatch rate* 0,1, *minimum Phred quality* 4, *quality base 33*, retallar bases ambigües (N) i bases amb qualitat igual o menor que la qualitat mínima especificada] i col·lapsant (unint en una sola lectura) els parells de lectures que solapaven en un mínim d'11 pb. Es varen descartar les lectures amb una longitud inferior a 30 pb. Al final del procés es varen retenir 13.407.885 lectures col·lapsades per a realitzar les anàlisis posteriors.

Es varen mapar (alineament local) les lectures col·lapsades al genoma mitocondrial de *Caretta caretta* (Genbank NC_016923) com a referència emprant l'algoritme *backtrack* (opció *aln*) de BWA v.0.7.17 (LI & DURBIN, 2009). S'implementaren els paràmetres proposats per ADN antic (i.e., aln -n 0.01, -o 2, -l 1024), i després s'eliminaren les lectures de qualitat menor a Q25 emprant SAMtools v.1.11 (LI et al., 2009). Les lectures duplicades es varen filtrar emprant *FilterUniqueSAMCons.py* (KIRCHER, 2012). Al final del procés de mapatge es va generar una seqüència consens (75% *majority rule*) emprant Geneious Prime v.2022.0.2 (Biomatters, http://www.geneious.com KEARSE et al., 2012), retenint

aquells nucleòtids a les posicions amb una profunditat de cobertura ≥ 3×. Els patrons de degradació i fragmentació de l'ADN es varen verificar amb mapDamage v.2.1.1 (JÓNSSON et al., 2013).

Es va realitzar una anàlisi filogenètica en base a les seqüències de genomes mitocondrials de *Caretta caretta* disponibles a la base de dades genètiques Genbank (veure els nombres d'accés de la base de dades de Genbank a la Figura 2) per a verificar l'atribució taxonòmica de la mostra 339, emprant el genoma mitocondrial de *Chelonia mydas* (NC_000886) com a *outgroup*. Es varen alinear les seqüències amb MUSCLE implementat a Geneious, generant finalment un alineament de 72 seqüències amb una longitud de 15.551 pb. L'anàlisi filogenètica de Màxima Versemblança es va realitzar amb IQTREE2 (MINH et al., 2020) i estimant el suport de nodes amb 1.000 rèpliques ultraràpides (*ultrafast bootstrap*). L'arbre filogenètic generat es va visualitzar amb FigTree v.1.4.3 (http://tree.bio.ed.ac.uk/software/figtree/).

Resultats

Al final del procés de mapatge, 1.421 lectures varen alinear-se al genoma mitocondrial de *Caretta caretta*, amb una cobertura del 97,9 % del genoma a una profunditat mitja de 6,1× (desviació estàndard 3,0×). La mida mitjana de les lectures mapades va ser de 71,3 pb.

Els patrons de degradació obtinguts mitjançant mapDamage presenten el patró de mutació típic d'una llibreria construïda a partir d'una mostra antiga i amb el tractament aplicat (Figura 3), és a dir, deaminacions de C a T al principi de la seqüència i les complementaris G a A al final.

Cal esmentar que la seqüència de referència ja presentava uns 100 nucleòtids no identificats (Ns) a la Regió Control, una zona del genoma mitocondrial que és àmpliament variable i per tant, difícil de reconstruir. Per aquest motiu, en aquest treball ens vàrem centrar en la resta de la seqüència mitocondrial ja que interessava inicialment obtenir una identificació taxonòmica clara de la mostra. Així, després de tot el procés es varen obtenir un genoma mitocondrial parcial de la mostra de Na Guardis, d'una longitud de 15.409 pb amb un 8 % de posicions

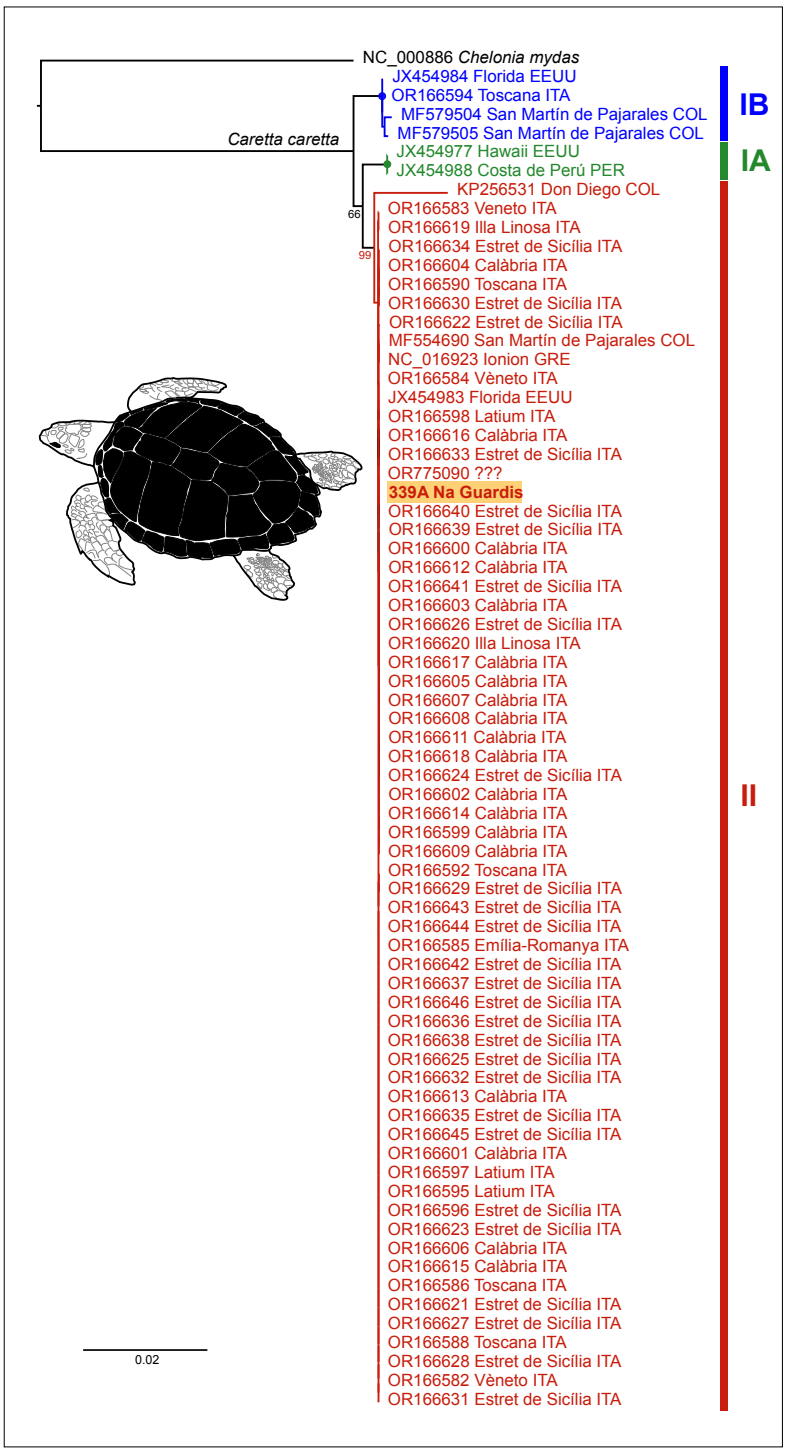


Figura 2: Arbre filogenètic de Màxima Versemblança dels genomes mitocondrials (complets i parcials) de *Caretta caretta* actuals i el genoma mitocondrial parcial de la tortuga marina de Na Guardis (339A), i emprant *Chelonia mydas* com a *outgroup* (la Regió Control es va excloure de l'anàlisi). Els números en els nodes indiquen els valor de *bootstrap* de la Màxima Versemblança (MLB). Els cercles dels nodes indiquen MLB=100. Els individus s'identifiquen amb el número de registre de GenBank, localitat i país. La nomenclatura dels haplogrups IA, IB i II segueixen la de TOLVE et al. (2024). COL= Colòmbia; GRE= Grècia; EEUU= Estats Units d'Amèrica; ITA= Itàlia; PER= Perú; ???= Localitat desconeguda.

Figure 2: Maximum Likelihood phylogenetic tree of modern *Caretta caretta* (complete or partial) mitochondrial genomes and the sea turtle partial mitochondrial genome from Na Guardis (339A), and using *Chelonia mydas* as outgroup (Control Region excluded from the analysis). Numbers in nodes indicate Maximum Likelihood Bootstrap (MLB) values. Circles in nodes indicate MLB=100. Individuals are identified with GenBank accession numbers, locality and country. Haplogroups IA, IB and II are following TOLVE et al. (2024). COL= Colombia; GRE= Greece; EEUU= United States of America; ITA= Italy; PER= Perú; ???= Unknown locality.

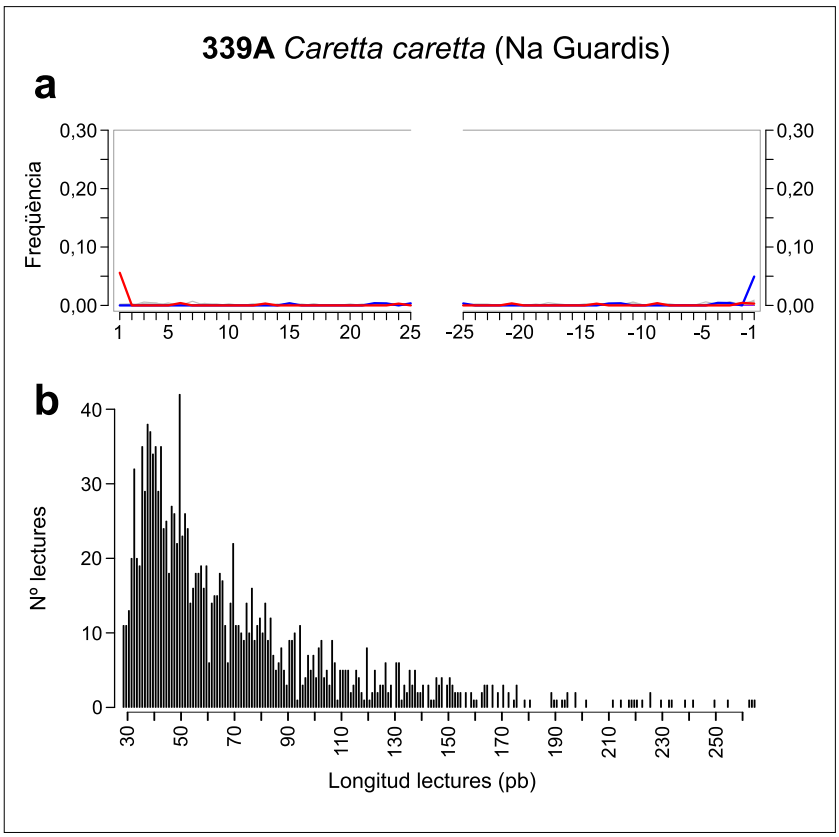


Figura 3: Informe de mapDamage del mapatge amb BWA de les dades de seqüenciació de la tortuga marina de Na Guardis al genoma mitocondrial de *Caretta caretta* emprat com a referència. (a) Gràfic de l'acumulació de transicions de C-a-T a l'extrem 5'(vermell) i de les transicions G-a-A a l'extrem 3'(blau). (b) Gràfic de distribució de la longitud de les lectures mapades.

Figure 3: mapDamage report of the BWA mapping of the sequencing data from Na Guardis sea turtle to the *Caretta caretta* mitochondrial genome used as reference. (a) Graphic of the accumulation of 5' C-to-T (red) and 3' G-to-A (blue) misincorporations. (b) Graphic of the read size distribution of mapped reads.

intermèdies desconegudes (3 Y, 1W, 1R i 1239 N), i un contingut en GC de 39,4 %. La seqüència parcial del mitogenoma de la mostra de *C. caretta* de Na Guardis s'ha depositada a Genbank amb el nombre d'accés PQ768540.

La presència de poques substitucions nucleotídiques de les lectures mapades respecte al genoma mitocondrial de referència de *C. caretta* suggeria que la mostra de Na Guardis era també d'aquesta espècie. Aquest fet es va confirmar comparant la seqüència de dos fragments adjacents al gen citocrom B (*cytb*) de la mostra de Na Guardis amb les bases de seqüències de Genbank amb el algorisme BLASTN (ALTSCHUL et al., 1990). La consulta a GenBank el 25/10/2024 amb un fragment de 326 pb va trobar com més semblants 10 seqüències de *cytb* de *Caretta caretta*. El primer resultat tenia el 100 % de la longitud de la nostra seqüència i una identitat nucleotídica del 99,08 %. Els resultats del fragment de 350 pb varen ser del 100 % per ambdós paràmetres.

L'anàlisi filogenètica mostra que la seqüència d'ADN de la mostra 339 de Na Guardis està inclosa dintre del grup format per les altres seqüències de la tortuga careta o babaua (*Caretta caretta*), i connectada per un branca curta, és a dir, té poques substitucions nucleotídiques respecte a les demés (Figura 2). S'identificaren tres grups monofilètics amb les seqüències mitocondrials completes i parcials utilitzades amb nodes altament suportats (*bootstrap* > 99) que en aquest treball hem anomenat com a IA, IB i II seguint TOLVE et al. (2024). Mentre que en el grup IA s'inclouen només dues seqüències de tortugues procedents de localitats de l'oceà Pacífic, als grups IA i II s'inclouen mostres mediterrànies i de la costa atlàntica del continent americà (bàsicament del Carib). És en el grup II on s'ubica la mostra de Na Guardis, juntament amb la immensa majoria de les mostres mediterrànies (només un individu de la Toscana s'ubica en el grup IA, juntament amb individus de Florida i del Carib colombià). Cal esmentar que les dades disponibles d'aquesta tortuga de Na Guardis no varen permetre realitzar una filogènia més acurada pel que fa a la posició dins un dels quatre haplogrups primaris identificats per a l'espècie en base a seqüències de la Regió Control mitocondrial (e.g., LUDWIG et al., 2024) ja que actualment no es disposa d'aquesta part del genoma, i la informació disponible en forma de genomes mitocondrials complets o parcials es redueix, a dia d'avui, a la que s'ha analitzat en aquest treball.

La tortuga careta o babaua (*Caretta caretta*) és la tortuga marina més habitual de les dues espècies nidificants a la Mediterrània, juntament amb la tortuga verda (*Chelonia mydas*). La població mediterrània es considerada una de les deu unitats regionals de gestió independent (RMUs, de l'anglès *Regional Management Units*) a nivell mundial (CASALE et al., 2018).

El registre arqueozoològic mostra que les tortugues marines (*Caretta caretta* i *Chelonia mydas*) han estat explotades a la Mediterrània oriental des de l'Edat del Bronze, amb un increment notable durant l'Edat del Ferro (ÇAKIRLAR et al., 2021). Restes trobades en jaciments costaners, especialment fragments de closca amb marques de tall, indiquen que aquestes espècies es caçaven tant per la carn com pel greix i les closques, amb un ús potencial per a fins domèstics o rituals (DE KOCK, 2023). Malgrat això, el registre arqueològic és limitat, possiblement per la naturalesa efímera dels materials orgànics i per la captura esporàdica en llocs on les tortugues no eren un recurs principal. A la Mediterrània

occidental, aquest registre és encara més escàs, i amb l'excepció del cas de Na Guardis, a dia d'avui no es coneixen més evidències d'aquesta explotació pre o protohistòrica de tortugues marines.

A èpoques més recents, la tortuga careta ha estat històricament explotada a la Mediterrània per la seva carn, greix, ous i closca. A Espanya, era fins i tot habitual mantenir les tortugues en captivitat a prop de la costa per disposar de carn fresca (BÁEZ & CAMIÑAS, 2004). Aquesta explotació va ser especialment intensa durant el segle XX fins que, a partir de la dècada de 1970, es van implementar mesures de conservació més estrictes, incloent la prohibició de certs ormeigs i la introducció de dispositius excloents de tortugues (*Turtle Excluder Devices*, TEDs) (LUCCHETTI et al., 2019).

Actualment, la tortuga careta està catalogada com a espècie vulnerable per la Unió Internacional per a la Conservació de la Natura (UICN) i a Espanya, en el Catàleg Espanyol d'Espècies Amenaçades. Aquesta protecció es complementa amb diversos convenis internacionals, com la Convenció sobre el Comerç Internacional d'Espècies Amenaçades (CITES) i la Convenció de Bonn sobre Espècies Migratòries, així com per la legislació comunitària europea, que la considera una espècie d'interès comunitari (CARRERAS et al., 2006).

Les aigües de les Illes Balears són una zona d'alimentació i pas migratori clau per a individus juvenils i subadults de *Caretta caretta* (e.g., ABALO-MORLA et al., 2022). Això es deu al fet que els corrents marins del Mediterrani occidental faciliten el desenvolupament d'aquests exemplars abans que retornin a les àrees de reproducció de la costa atlàntica o mediterrània (CAMIÑAS, 2002).

Entre els principals reptes actuals, les causes de mortalitat de l'espècie a les aigües balears inclouen la captura incidental per ormeigs de pesca, com el palangre de superfície i l'arrossegament (e.g., CARRERAS et al., 2004), així com la ingestió de plàstics que sovint es troben al seu hàbitat (e.g., SOLOMANDO et al., 2022; TOMAS et al., 2002). Malgrat aquests reptes, en els darrers anys s'ha observat un increment en els intents de nidificació a les Illes Balears. Per exemple, l'any 2023 es varen localitzar sis nius: tres a Mallorca i tres a Eivissa (VAQUER-SUNYER & BARRIENTOS, 2024). Aquest fenomen podria indicar una recuperació de la població i una adaptació a les condicions ambientals canviants.

Tot i els avenços en la protecció i la sensibilització, és essencial continuar amb les mesures de conservació per assegurar la supervivència de la tortuga careta al Mediterrani. Les dades arqueològiques i històriques ens recorden la complexa relació entre els humans i les tortugues marines, que han passat de ser un recurs clau a ser espècies emblemàtiques per a la conservació marina.

Discussió: els estudis d'ADN antic a les Illes Balears

Les Illes Balears es troben en una localització geogràfica amb unes condicions climàtiques que no són les més adequades per a la conservació d'ADN en materials fòssils i subfòssils. Com ja s'ha esmentat abans, les mostres procedents de sediments en *permafrost* presenten una conservació excepcional que facilita l'obtenció de material genètic en mostres de més d'un milió d'anys (VAN DER VALK et al., 2021; KJÆR et al., 2022). Contràriament, la zona mediterrània, amb el seu clima càlid i lleugerament humit, fa que la recuperació d'ADN de material subfòssil resulti més complicada. No obstant això, les millores en els mètodes d'extracció d'ADN o de construcció de llibreries genòmiques (e.g., ORLANDO et al., 2021), han permès l'obtenció de seqüències completes de genomes mitocondrials i una ingent quantitat de dades nuclears d'individus de fins a 16.000 anys d'antiguitat procedents de diversos jaciments de les Balears (Taula 1). A més de la varietat cronològica de les mostres que han proporcionat ADN, cal destacar la rellevància dels resultats obtinguts tant de vertebrats de talla gran com petita, procedents de jaciments en cova (més susceptibles de presentar una bona conservació) així com de jaciments exteriors.

Paleogenòmica humana

Si en general la paleogenòmica ha tingut un paper important en proporcionar noves informacions en un gran nombre d'espècies (especialment animals), l'espècie en que més s'han aplicat estudis a partir de mostres antigues és, sense cap dubte, la humana. I tal com seria d'esperar, les Balears no han estat una excepció, especialment tenint en compte la diversitat de pobles que han habitat l'arxipèlag al llarg de la seva història. Si bé al principi dels estudis sobre humans antics balears s'emprava la informació disponible del genoma mitocondrial i d'una relativament petita quantitat d'informació del genoma nuclear, el recent desenvolupament dels mètodes de seqüenciació massiva i especialment de panells d'SNPs (de l'anglès *Single Nucleotide Polymorphisms*, o posicions diferencials en el genoma d'una espècie), han permès estudis poblacionals humans a gran escala.

Així, una sèrie de treballs realitzats per part de l'equip de la investigadora Assumpció Malgosa de la Universitat Autònoma de Barcelona analitzaren, a més de fragments d'enzims de restricció (RFLP), seqüències de la Regió Control mitocondrial de mostres humanes de cronologia talaiòtica a tardorromana de diversos jaciments (principalment necròpolis) de Mallorca [Son Real (Santa Margalida), Illot des Porros (Santa Margalida) i Can Reiners (Alcúdia)] i Menorca [Son Olivaret (Ciutadella) i la Cova des Pas (Ferreries)] (diversos treballs i presentacions a congressos resumits en DÍAZ, 2009; SIMÓN & MALGOSA, 2014; SIMÓN et al., 2017). Com a resultats generals d'aquests treballs, es varen detectar similituds genètiques entre les diferents poblacions antigues balears, entre les poblacions antigues balears i les antigues catalanes estudiades, i que les poblacions talaiòtiques balears i nuràgiques sardes possiblement varen tenir un origen diferent. També es va identificar un cert component del Pròxim Orient a les seqüències antigues balears i que presentaven una continuïtat amb poblacions europees des d'almenys l'Edat de Bronze.

Altres autors (ZALLOUA et al., 2018) varen obtenir fins a 9 genomes mitocondrials complets o pràcticament complets d'individus procedents de necròpolis de cronologia diversa (Taula 1) d'Eivissa [Puig des Molins (Eivissa) i Cas Molí (Sant Antoni de Portmany)] i de Formentera (Ca Na Costa). Aquests autors varen obtenir per primera vegada informació a nivell genòmic d'una mostra de les Balears, en concret de la de Cas Molí d'Eivissa (amb cronologia 361-178 cal BC). A nivell mitocondrial, a part d'identificar i analitzar els diferents haplogrups mitocondrials per a cada individu, varen detectar una discontinuïtat genètica entre els individus antics analitzats i les poblacions modernes de l'illa, el quals presenten ascendència europea recent. Encara que la informació obtinguda a nivell nuclear va ser discreta (profunditat de cobertura de 0,47× del genoma complet de l'individu de Cas Molí), va permetre identificar un cert component de la Mediterrània oriental en la mostra analitzada.

OLALDE et al. (2019) i VILLALBA-MOUCO et al. (2021) varen detectar un reemplaçament del cromosoma Y en la pràctica totalitat dels homes de les poblacions humanes de la península ibèrica a partir del 2.200 cal BC associada a la migració de grups pastorils procedents de les estepes d'Europa de l'Est. Aquest procés de substitució va durar uns 300 anys i s'inicià fa uns 4.500 anys. Aquests nous llinatges s'estengueren a l'oest d'Europa a través de grups campaniformes que marquen la transició de l'Edat de Coure a la del Bronze. Aquesta senyal genètica dels pobles de les estepes s'hauria anant diluint i mesclant progressivament amb la senyal genètica de la població local. Així, FERNANDES et al. (2020) varen obtenir una enorme quantitat de dades genòmiques de tres mostres humanes d'una cronologia d'entre 2.700 i 3.900 anys procedents de, cronològicament ordenades de més antiga a més moderna (veure Taula 1), la Cova des Moro (Manacor, Mallorca), la Cova 127 (Formentera) i de la Naveta des Tudons (Ciutadella, Menorca). Aquests autors detectaren senyal genètica provinent d'aquests grups pastorils de les estepes a tres mostres, essent la mostra de la Cova des Moro (cronològicament més antiga i per tant associada als primers pobladors de les illes) la que major proporció presentava. VILLALBA-MOUCO et al. (2021) també varen obtenir una gran quantitat de dades genòmiques de fins a sis individus d'Es Forat de ses Aritges (Ciutadella, Menorca) de l'Edat de Bronze Final (1.200-1.400 cal BC), trobant també aquesta senyal de les poblacions pastorils de les estepes, però també amb una proporció menor que la mostra de la Cova des Moro, confirmant així aquesta petita disminució progressiva de la senyal dels pastors de l'estepa ja detectada a les Balears per FERNANDES et al. (2020).

Faunes pre-humanes

La història de la paleogenòmica de les Balears s'inicia fa quasi 25 anys de la mà del biòleg Carles Lalueza-Fox, en aquells moments en el Laboratori d'Antropologia de la Facultat de Biologia de la Universitat de Barcelona, i actualment investigador científic del CSIC a l'Institut de Biologia Evolutiva de Barcelona (UPF-CSIC) i Director del Museu de Ciències Naturals de Catalunya. En aquell primer treball, LALUEZA-FOX et al. (2000) amplificaren un petit fragment de 55 pb del gen mitocondrial citocrom B (*cytb*) d'un radi-ulna del petit bòvid endèmic extint *Myotragus balearicus* (Bovidae: Mammalia) d'uns 6.000 anys procedent de la Cova Estreta de Pollença (Pollença). L'obtenció d'aquest petit fragment d'ADN no va permetre establir unes relacions filogenètiques clares de *Myotragus* amb els seus parents actuals dins de la tribu dels Caprini, però ja indicava una possible relació amb el takin (*Budorcas taxicolor*, una espècie que actualment es troba a la serralada de l'Himàlaia). Aquesta possible relació de parentiu ja va ser suggerida en el seu moment per ANDREWS (1915) a causa de la seva particular anatomia compartida dels elements ossis de la part terminal de les extremitats. Encara que no és pogués analitzar de forma més acurada les relacions filogenètiques de *Myotragus*, aquest primer treball va suposar la demostració de que es podia obtenir informació genètica de materials molt antics de la regió mediterrània, malgrat les condicions temperades poc favorables per a la preservació d'ADN.

HUMANS					
MATERIAL	**ESPÈCIE**	**JACIMENT**	**CRONOLOGIA**	**ADN**	**REF.**
Dents i ossos llargs	*Homo sapiens sapiens*	Son Real (MA)	Posttalaiòtic (c. VI-II aC)	Diverses seqüències <200 bp Regió Control	1,2
Dents i ossos llargs	*Homo sapiens sapiens*	Illot des Porros (MA)	Posttalaiòtic (c. VI-II aC)	Diverses seqüències <200 bp Regió Control	1
Dents i ossos llargs	*Homo sapiens sapiens*	Can Reiners (MA)	VII dC	Diverses seqüències <200 bp Regió Control	1,2
Dents i ossos llargs	*Homo sapiens sapiens*	Son Olivaret (ME)	Edat del Bronze-Edat del Ferro	Diverses seqüències <200 bp Regió Control	2,3
Dents i ossos llargs	*Homo sapiens sapiens*	Cova des Pas (ME)	Edat del Bronze-Edat del Ferro	Diverses seqüències <200 bp Regió Control	2
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Puig des Molins (EI)	III-II aC	Genoma mitocondrial (100%)	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Puig des Molins (EI)	IV aC	Genoma mitocondrial (99.2%)	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Puig des Molins (EI)	Romà inicial	Genoma mitocondrial (99.9%)	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Puig des Molins (EI)	V-IV aC	Genoma mitocondrial (99.9%)	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Puig des Molins (EI)	V-IV aC	Genoma mitocondrial (100%)	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Puig des Molins (EI)	IV aC	Genoma mitocondrial (96.3%)	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Puig des Molins (EI)	IV aC	Genoma mitocondrial (100%)	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Ca Na Costa (FO)	900-750 cal BC	Genoma mitocondrial (90.62%)	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Cas Molí (EI)	361-178 cal BC	Genoma mitocondrial (100%) + 0.47x genoma complet	4
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Cova des Moro (MA)	3900±30 BP (2468-2294 cal BC)	Dades 1240K SNPs	5
Petrós	*Homo sapiens sapiens*	Cova 127 (FO)	3454±26 BP (1880-1688 cal BC)	Dades 1240K SNPs	5
Petrós	*Homo sapiens sapiens*	Naveta des Tudons (ME)	2715±20 BP (904-814 cal BC)	Dades 1240K SNPs	5
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Es Forat de ses Artitges (ME)	Edat Bronze Final (1200-1000 cal BC)	Dades 1240K SNPs, mitogenoma, cromosoma Y	6
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Es Forat de ses Artitges (ME)	Edat Bronze Final (1200-1000 cal BC)	Dades 1240K SNPs, mitogenoma, cromosoma Y	6
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Es Forat de ses Artitges (ME)	Edat Bronze Final (1200-1000 cal BC)	Dades 1240K SNPs, mitogenoma, cromosoma Y	6
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Es Forat de ses Artitges (ME)	Edat Bronze Final (1200-1000 cal BC)	Dades 1240K SNPs, mitogenoma, cromosoma Y	6
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Es Forat de ses Artitges (ME)	Edat Bronze Final (1200-1000 cal BC)	Dades 1240K SNPs, mitogenoma, cromosoma Y	6
Dent	*Homo sapiens sapiens*	Es Forat de ses Artitges (ME)	Edat Bronze Final (1200-1000 cal BC)	Dades 1240K SNPs, mitogenoma, cromosoma Y	6
FAUNA AMB CRONOLOGIA PRE-ARRIBADA HUMANA					
MATERIAL	**ESPÈCIE**	**JACIMENT**	**CRONOLOGIA**	**ADN**	**REF.**
Radi-ulna	*Myotragus balearicus*	Cova Estreta (MA)	5720±60 BP (4716-4406 cal BC)	55 bp citocrom B	7
Tíbia	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	8650±40 BP (7745-7587 cal BC)	338 bp citocrom B	8
Tíbia	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	7060±40 BP (6020-5842 cal BC)	1143 bp citocrom B, 305 bp 12S_rRNA, 101 bp Regió Control, 95 bp gen nuclear 28S	9
Radi	*Myotragus balearicus*	Cova Estreta (MA)	~ 6000 anys BP	15832 nucleòtids del genoma complet	10
Copròlit	*Myotragus balearicus*	Cova de Moleta (MA)	4905±40 BP (3776-3635 cal BC)	Seqüències diverses (plantes, fongs, bacteris)	11
Mandíbula	*Nesiotites hidalgo*	Coveta des Gorgs (MA)	~ 6000 anys BP	Genoma mitocondrial (~ 94 %)	12
Húmer	*Myotragus balearicus*	Cova des Màrmol (MA)	4035±32 BP (2663-2468 cal BC)	Genoma mitocondrial (~63 %)	13
Radi	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	4456±33 BP (3340-2940 cal BC)	Genoma mitocondrial (~97 %)	13
Tíbia	*Myotragus balearicus*	Avenc des Gorg Blau (MA)	5165±36 BP (4049-3810 cal BC)	Genoma mitocondrial (~66 %)	13
Fèmur	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	5438±35 BP (4352-4179 cal BC)	Genoma mitocondrial (100 %)	13
Falange	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	6313±37 BP (5363-5214 cal BC)	Genoma mitocondrial (~31 %)	13
Mandíbula	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	6588±35 BP (5617-5478 cal BC)	Genoma mitocondrial (~91 %)	13
Mandíbula	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	6594±35 BP (5617-5479 cal BC)	Genoma mitocondrial (100 %)	13
m3	*Myotragus balearicus*	Cova de s'Olla (MA)	6909±40 BP (5889-5718 cal BC)	Genoma mitocondrial (~45 %)	13
Tíbia	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	8372±40 BP (7536-7333 cal BC)	Genoma mitocondrial (100 %)	13
Mandíbula	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	8562±38 BP (7646-7528 cal BC)	Genoma mitocondrial (100 %)	13
Sacre	*Myotragus balearicus*	Coveta des Gorgs (MA)	9164±42 BP (8539-8287 cal BC)	Genoma mitocondrial (~86 %)	13
Tíbia	*Myotragus balearicus*	Avenc de Fra Rafel (MA)	9783±39 BP (9310-9218 cal BC)	Genoma mitocondrial (~92 %)	13
Metatars	*Myotragus balearicus*	Cova de Moleta (MA)	12251±53 BP (12852-12090 cal BC)	Genoma mitocondrial (~41 %)	13
Tíbia	*Hypnomys morpheus*	Coveta des Gorgs (MA)	~ 6000 anys BP	3501 bp mitocondrials	14
Vèrtebres	*Vipera latastei ebusitana*	Es Pouàs (EI)	16130±45 BP (17637-17388 cal BC)	Genoma mitocondrial (~80 %)	15

Taula 1: Llistat de les mostres antiques de les Balears de les que s'han obtingut seqüències d'ADN endògenes (no es tenen en compte els fragments obtinguts per enzims de restricció). Les datacions radiocarbòniques s'han re-cal·librat amb OxCal v.4.4 (BRONK RAMSEY, 2009) i fent servir la corba de calibració IntCal20 (REIMER et al., 2020). MA= Mallorca; ME= Menorca; EI= Eivissa; FO= Formentera. Referències (REF.): 1= DÍAZ (2009); 2= SIMON et al. (2017); 3= SIMON & MALGOSA (2014); 4= ZALLOUA et al. (2018); 5= FERNANDES et al. (2020); 6= VILLALBA-MOUCO et al. (2021); 7= LALUEZA-FOX et al. (2000); 8= LALUEZA-FOX et al. (2002); 9= LALUEZA-FOX et al. (2005a i b); 10= RAMÍREZ et al. (2010); 11= WELKER et al. (2014); 12= BOVER et al. (2018); 13= BOVER et al. (2019); 14= BOVER et al. (2020); 15= TORRES-ROIG et al. (2021); 16=ANDERUNG et al. (2005); 17= COLOMINAS et al. (2015); 18= VALENZUELA et al. (2016); 19= Aquest treball; 20= Inèdit.

Segueix a la pàgina següent

Starts on the previous page

FAUNA INTRODUÏDA O AMB CRONOLOGIA POST-ARRIBADA HUMANA					
MATERIAL	**ESPÈCIE**	**JACIMENT**	**CRONOLOGIA**	**ADN**	**REF.**
Os desconegut	*Bos taurus*	Cova de Mosset (MA)	Antic (desconegut)	272 bp Regió Control	16
Os desconegut	*Bos taurus*	Son Fornés (MA)	II aC-I dC	240 bp Regió Control	17
Mandíbula	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Tíbia	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Mandíbula	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Húmer	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Húmer	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Radi	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Metatars	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Metatars	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Tíbia	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Radi	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Metacarp	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Escàpula	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Calcani	*Dama* cf. *mesopotamica*	Pollentia (MA)	III-IV dC	333 bp Regió Control	18
Mandíbula	*Dama* cf. *mesopotamica*	Sa Mesquida (MA)	IV-VI dC	333 bp Regió Control	18
Mandíbula	*Dama* cf. *mesopotamica*	Sa Mesquida (MA)	IV-VI dC	333 bp Regió Control	18
Mandíbula	*Dama* cf. *mesopotamica*	Sa Mesquida (MA)	IV-VI dC	333 bp Regió Control	18
Maxil·lar	*Dama* cf. *mesopotamica*	Sa Mesquida (MA)	IV-VI dC	333 bp Regió Control	18
Mandíbula	*Dama* cf. *mesopotamica*	Sa Mesquida (MA)	IV-VI dC	333 bp Regió Control	18
Mandíbula	*Dama* cf. *mesopotamica*	Sa Mesquida (MA)	IV-VI dC	333 bp Regió Control	18
Plastró - fragment	*Caretta caretta*	Na Guardis (MA)	Púnic	Genoma mitocondrial (~92%)	19
Os llarg - fragment	*Bos taurus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~96%)	20
Os llarg - fragment	*Bos taurus*	Cova de sa Tossa Alta (MA)	Edat del Bronze-Ferro	Genoma mitocondrial (~72%)	20
Mandíbula	*Capra hircus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~99,5%)	20
Mandíbula	*Capra hircus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~99,8%)	20
Petrós	*Capra hircus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~99,4%)	20
Os llarg - fragment	*Capra hircus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~95%)	20
Os llarg - fragment	*Capra hircus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~18%)	20
Os llarg - fragment	*Capra hircus*	Cova de sa Tossa Alta (MA)	Edat del Bronze-Ferro	Genoma mitocondrial (~99,6%)	20
Petrós	*Capra hircus*	Cova de sa Tossa Alta (MA)	Edat del Bronze-Ferro	Genoma mitocondrial (100%)	20
Os llarg - fragment	*Ovis aries*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~50%)	20
Os llarg - fragment	*Ovis aries*	Cova de sa Tossa Alta (MA)	Edat del Bronze-Ferro	Genoma mitocondrial (~99,4%)	20
Metàpode	*Sus domesticus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~96%)	20
Metàpode	*Sus domesticus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~96%)	20
Mandíbula	*Apodemus sylvaticus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~93%)	20
Mandíbula	*Apodemus sylvaticus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~99%)	20
Mandíbula	*Apodemus sylvaticus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~95%)	20
Mandíbula	*Apodemus sylvaticus*	Cova Estreta (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~99%)	20
Mandíbula	*Apodemus sylvaticus*	Cova Estreta (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~99%)	20
Mandíbula	*Eliomys quercinus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~84%)	20
Mandíbula	*Eliomys quercinus*	Cova del Ninot (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~48%)	20
Mandíbula	*Eliomys quercinus*	Cova Estreta (MA)	Edat del Bronze	Genoma mitocondrial (~93%)	20

Table 1: List of the ancient samples from the Balearic Islands from which endogenous DNA sequences have been retrieved (fragments obtained using restriction enzymes are not included). Radiocarbon dates have been re-calibrated using OxCal v.4.4 (BRONK RAMSEY, 2009) and the IntCal20 calibration curve (REIMER et al., 2020). MA= Mallorca; ME= Menorca; EI= Eivissa; FO= Formentera. References (REF.): 1= DÍAZ (2009); 2= SIMON et al. (2017); 3= SIMON & MALGOSA (2014); 4= ZALLOUA et al. (2018); 5= FERNANDES et al. (2020); 6= VILLALBA-MOUCO et al. (2021); 7= LALUEZA-FOX et al. (2000); 8= LALUEZA-FOX et al. (2002); 9= LALUEZA-FOX et al. (2005a i b); 10= RAMÍREZ et al. (2010); 11=WELKER et al. (2014); 12= BOVER et al. (2018); 13= BOVER et al. (2019); 14= BOVER et al. (2020); 15= TORRES-ROIG et al. (2021); 16=ANDERUNG et al. (2005); 17= COLOMINAS et al. (2015); 18= VALENZUELA et al. (2016); 19= This work; 20= Unpublished.

Només dos anys després, en un treball també liderat pel mateix autor, LALUEZA-FOX et al. (2002) aconseguiren amplificar un fragment més gran (338 pb) d'aquest mateix gen mitocondrial, *cytb*, també de *Myotragus balearicus*, però aquesta vegada d'una tíbia del jaciment de la Coveta des Gorgs (Escorca, Mallorca), i amb una cronologia uns 3.000 anys més antiga (és a dir, fa uns 9.000 anys) que la de l'os emprat en el treball anterior. Els resultats obtinguts, encara que seguien sense ser totalment resolutius, indicaren les relacions filogenètiques que ja s'havien intuït en l'article del 2000, és a dir, una relació de *Myotragus* especialment amb el gènere *Budorcas*, però també amb *Ovis* (ovelles, muflons, etc).

Hagueren de passar tres anys més per a que LALUEZA-FOX et al. (2005a, b) obtinguessin el gen *cytb* complet (1.143 pb) de *Myotragus balearicus*. A més, varen obtenir fragments d'altres gens mitocondrials (i.e, 305 pb del gen 1*2S_rRNA* i 101 pb de la Regió Control) i un fragment de 95 pb del gen nuclear *28S ribosomal RNA*. En aquest cas, el material emprat va ser també una tíbia procedent de la Coveta des Gorgs però uns 1.000 anys més moderna que l'anterior. L'obtenció del gen *cytb* complet ja suposava poder gaudir d'una informació considerable si es té en compte que aquest gen és un dels que s'ha emprat àmpliament per a establir relacions filogenètiques entre mamífers. Així, aquesta informació, juntament amb la publicació d'una nova seqüència per al *cytb* de *Budorcas* [ROPIQUET & HASSANIN (2005) detectaren que la seqüència del *cytb* disponible anteriorment per a *Budorcas* era una seqüència quimèrica entre ovella i takin], va permetre establir una relació més directa amb el gènere *Ovis*, encara que sense poder tenir uns valors de certesa estadísticament significatius.

Uns resultats similars varen obtenir RAMÍREZ et al. (2009) en el que es seria el primer estudi paleogenòmic basat en dades de seqüenciació massiva, concretament mitjançant la plataforma de piroseqüenciació GS-FLX 454, sobre una mostra de *Myotragus balearicus*. Així, es va obtenir informació de gens mitocondrials i nuclears d'un radi de la Cova Estreta d'uns 6.000 anys d'antiguitat, del que es varen obtenir 96.357 lectures del genoma fragmentat, de les quals només un 0,27 % mapaven al genoma de vaca i, per tant, es consideraren potencialment endògenes a *Myotragus*.

Pel que fa a ossos de *Myotragus balearicus*, ja no fou fins 10 anys després que BOVER et al. (2019) aconseguiren per primera vegada recuperar fins quatre genomes mitocondrials complets i nou de parcials d'aquesta espècie, en base a mostres d'una cronologia d'entre 6.000 i 12.000 anys de sis jaciments mallorquins (veure Taula 1). Les anàlisis filogenètiques utilitzant el genoma mitocondrial varen permetre establir una relació filogenètica, encara que sense un suport complet, del bòvid fòssil amb l'abans esmentat takin (*Budorcas taxicolor*) i no amb *Ovis*, tal com havien suggerit els treballs anteriors emprant el *cytb*. Encara que es va poder disposar de 13 genomes mitocondrials complets o parcials, no es va poder obtenir cap senyal filogeogràfica rellevant entre les diferents poblacions de *M. balearicus*.

Dos treballs addicionals varen permetre corroborar les relacions de parentiu de les dues espècies de micromamìfers endèmics extingits de les Balears, el rosegador *Hypnomys morpheus* i la musaranya *Nesiotites hidalgo*. En aquest darrer cas, un genoma mitocondrial quasi complet del sorícid *Nesiotites hidalgo* d'uns 6.000 anys procedent de la Coveta des Gorgs (Mallorca) va permetre confirmar la relació de l'espècie extinta amb espècies actuals de Nectogalini com *Soriculus nigrescens* (BOVER et al., 2018), i l'obtenció de 3.500 pb de gens mitocondrials del glírid *Hypnomys morpheus* també de la Coveta des Gorgs confirmaren la seva relació amb rates cellardes del gènere *Eliomys*, *E. quercinus* i *E. melanurus* (BOVER et al., 2020).

Cal esmentar que les anàlisis filogenètiques emprant rellotges moleculars en aquestes tres darreres espècies, varen proporcionar cronologies de divergència de les tres espècies extintes amb els seus respectius parents continentals actuals més propers que resultaven plenament compatibles amb la seva cronologia d'arribada a les Balears durant la Crisi de Salinitat del Messinià (i.e., 5,97-5,33 milions d'anys, MANZI et al., 2013). Així, aquestes dates de divergència són anteriors a les dels moments en que s'haurien format passadissos de terra ferma durant la dessecació de la Mediterrània, com són els 7,1 milions d'anys [amb una probabilitat posterior de 95% (HPD) entre ~ 5,5-9,2 milions d'anys] entre *Myotragus balearicus* i *Budorcas taxicolor*, els 13,67 milions d'anys (95% HPD = 7,39-20,07) entre *Hypnomys morpheus* i *Eliomys* i els 6,44 milions d'anys (95% HPD = 4,68-8,36) entre *Nesiotites hidalgo* i *Soriculus nigrescens*.

Finalment, pel que fa a fauna endèmica prehumana, TORRES-ROIG et al. (2021) van realitzar una anàlisi filogenètica d'una serp fòssil en base a l'obtenció del 80 % del seu genoma mitocondrial d'unes restes òssies recuperades del jaciment d'Es Pouàs (Sant Antoni de Portmany, Eivissa). Encara que els materials, d'uns 16.000 anys d'antiguitat, presentaven unes particularitats morfològiques peculiars que inclús podrien indicar que es tractava d'una espècie nova, l'anàlisi genètica va ubicar aquestes restes dins de la diversitat genètica de l'espècie actual *Vipera latastei*, i per tant, es va descriure com una nova subespècie, *Vipera latastei ebusitana*. A més, l'anàlisi utilitzant rellotges moleculars situava la seva separació amb els seus parents més propers [les *V. latastei* del clade Est CNS (Central-Nord-Sud)

continentals] al voltant del milió d'anys, essent així el primer cas de colonització ultramarina per part d'un vertebrat no volador a les Balears des de la mencionada Crisi de Salinitat del Messinià de fa uns 5,35 milions d'anys (MANZI et al., 2013). Aquesta diferenciació morfològica important, que no es veu recolzada per les anàlisis genètiques, ja s'ha observat anteriorment en el rosegador gegant extingit de Tenerife, *Canariomys bravoi*. Tot i presentar un gran nombre d'autoapormorfies que fins i tot van portar a descriure'l com un gènere nou, les dades genètiques l'ubicarien dins del gènere *Arvicanthis* (RENOM et al., 2021).

Fins a la data, l'únic treball que ha intentat obtenir ADN de restes antigues no osteològiques de les Balears és el de WELKER et al. (2014) en el que analitzaren un copròlit de *Myotragus balearicus* de la Cova de Muleta (Sóller, Mallorca) de quasi 5.000 anys d'antiguitat (Taula 1) i un altre de la Balma de Son Matge (Valldemossa, Mallorca) d'edat desconeguda. D'aquests dos copròlits, l'únic que va proporcionar unes poques seqüències d'ADN és el de la Cova de Muleta, de bàsicament plantes i fongs, a més de seqüències potencialment identificades com a dos bacteris de la flora intestinal de *M. balearicus: Ruminococcus* sp. i *Slackia heliotrinireducens*. D'aquest estudi, entre d'altres, cal esmentar la particular incongruència de la gran proporció de grans de pol·len de boix (*Buxus* sp.) que es trobaren en el copròlit, tal com prèviament s'havia analitzat a copròlits de *M. balearicus* de la Cova Estreta de Pollença (ALCOVER et al., 1999), i la total manca de senyal genètica d'aquesta planta. Tampoc es va aconseguir amplificar cap seqüència d'ADN del productor del copròlit tal com també es detectà a l'estudi genòmic preliminar fet a partir de copròlits de la Cova Estreta i que es presentaren breument en un congrés (LIU et al., 2017).

Faunes introduïdes

Els estudis de la fauna acompanyant dels pobladors humans que han colonitzat les Balears s'han centrat per ara en estudis de materials procedents de jaciments mallorquins de cronologia romana. COLOMINAS et al. (2015) analitzaren diverses mostres de vaca (*Bos taurus*), entre elles una del jaciment de Son Fornés (Montuïri, Mallorca). Recuperaren un fragment de 240 pb de la Regió Control que va permetre la seva identificació com a pertanyent a l'haplogrup T1 i va contribuir a identificar la continuïtat d'aquest haplogrup durant èpoques romanes i medievals a la regió mediterrània.

Dels jaciments de cronologia romana de Pollentia (Alcúdia, Mallorca) i Sa Mesquida (Calvià, Mallorca) són les restes de daina de les que VALENZUELA et al. (2016) varen obtenir 333 pb de la Regió Control mitocondrial. L'anàlisi filogenètica d'aquestes seqüències mostra una afinitat més gran amb les daines perses (*Dama mesopotamica*) que amb les europees (*D. dama*). Tanmateix, des d'un punt de vista morfològic, les poblacions insulars semblen estar més emparentades amb *D. dama*. Aquestes discrepàncies, combinades amb la manca d'informació genètica actual sobre *D. mesopotamica* –degut a la reducció de les seves poblacions contemporànies– impedeixen establir una afinitat taxonòmica més precisa (VALENZUELA et al., 2016).

Finalment, esmentar que uns anys abans, ANDERUNG et al. (2005) varen reportar l'obtenció d'una seqüència de 272 pb de la Regió Control d'una mostra de vaca (*Bos taurus*) de cronologia desconeguda (teòricament antiga) de la Cova de Mosset (Escorca, Mallorca), indicant que pertanyia a un individu d'haplogrup T3.

La comprensió dels processos històrics de domesticació i introducció d'espècies domèstiques a les Illes Balears representa una de les línies futures més prometedores dins dels estudis paleogenòmics. Realitzar un transsecte temporal de les principals espècies domèstiques permetria explorar el potencial d'aquestes investigacions per detectar patrons de canvi genètic i fenotípic associats a les diferents onades de colonització i transformacions culturals a l'arxipèlag. Aquest enfocament no només ampliaria el coneixement sobre l'evolució de les pràctiques ramaderes, sinó que també destacaria el valor patrimonial i científic del registre arqueològic i les races autòctones actuals.

Projectes actius

A data d'avui, hi ha fins a tres projectes, en actiu o ja finalitzats però amb dades en estudi, que s'estan duent a terme amb mostres de fauna antiga de les Balears, gràcies a la col·laboració entre el laboratori de paleogenòmica del IUCA de la Universidad de Zaragoza i l'Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (IMEDEA, UIB-CSIC).

El projecte *Origen dels primers pobladors humans de Mallorca: la perspectiva zooarqueològica* subvencionat per la *Convocatòria de subvencions per la investigació en matèria d'arqueologia i/o paleontologia a l'illa de Mallorca, a l'arxipèlag de Cabrera i a illots adjacents, Plurianual 2020-2022, del Departament de Cultura, Patrimoni i Política Lingüística (Consell de Mallorca)* va analitzar una sèrie de

mostres de la fauna introduïda pels primers pobladors humans a l'illa de Mallorca: vaca (*Bos taurus*, Bovidae), cabra (*Capra hircus*, Bovidae), ovella (*Ovis aries*, Bovidae), porc (*Sus domesticus*, Suidae), ca (*Canis familiaris*, Canidae), rata cellarda (*Eliomys quercinus*, Gliridae) i ratolí de rostoll (*Apodemus sylvaticus*, Muridae). El principal objectiu del projecte era inferir l'origen de les diferents espècies introduïdes pels primers pobladors de l'illa mitjançant l'anàlisi de genomes mitocondrials. Amb aquest propòsit, es pretenia, contribuir al coneixement de l'origen dels primers humans, els quals, segons els patrons culturals arquitectònics i ceràmics, podrien tenir un paral·lel a la regió del Llenguadoc (entre els rius Vidourle i Roine, al sud de França) (veure la revisió d'ALCOVER, 2008). A nivell genòmic, però, s'ha suggerit un possible, encara que gens concloent, origen a la península ibèrica, sense poder-ne especificar més detalls (FERNANDES et al., 2020). En l'actualitat, es disposa de genomes complets o parcials (veure Taula 1) de les espècies domèstiques (excepte per al ca) dels jaciments de la Cova del Ninot (Pollença, Mallorca) i la Cova de sa Tossa Alta (Escorca, Mallorca, VALENZUELA et al., 2010), així com dels rosegadors dels jaciments de la Cova del Ninot i de la Cova Estreta (ENCINAS & ALCOVER, 1997). Aquests materials procedeixen de nivells estratigràfics que, teòricament, són coetanis amb l'arribada dels primers humans a Mallorca, fa aproximadament uns 4.500 anys, segons evidències directes com la datació radiocarbònica d'ossos (BOVER et al., 2016). En el cas de la Cova de sa Tossa Alta, la disposició de les mostres en una unitat estratigràfica amb cronologia poc acurada pot suposar que alguns individus siguin més moderns i, per tant, es requereixi una datació radiocarbònica per a poder realitzar afirmacions més precises. Les analítiques s'han endarrerit degut a la necessitat d'obtenir dades paleogenòmiques de mostres de la costa mediterrània de la península ibèrica, que s'estan processant actualment.

L'aparició de la nova tècnica de seqüenciació massiva que ha permès llegir seqüències llargues (>50 kb) i, per tant, l'obtenció de genomes continus i complets d'espècies no model. Malgrat tot, aquesta tecnologia de seqüenciació no s'ha pogut aplicar a espècies extintes perquè el seu ADN es troba degradat amb fragments de manco de 100 pb. Avui en dia, encara són molt poques les espècies extintes a on s'ha pogut obtenir el genoma complet a partir de mostres d'ADN antic, e.g, neandertals i mamuts, i normalment aquests s'aconsegueixen mapant (alineant) lectures curtes d'ADN sobre genomes de referència coneguts, *Homo sapiens* i elefant, respectivament.

No obstant això, l'existència de finançament mitjançant les *Ajudes a projectes de recerca en biodiversitat (Plans Complementaris) de la Conselleria de Fons Europeus, Universitat i Cultura del Govern de les Illes Balears* pel projecte *Marques evolutives de canvis climàtics del passat i aïllament insular en el genoma de Myotragus balearicus* per seqüenciar uns 0,7 bilions de nucleòtids ha permès assolir l'objectiu del projecte que era aconseguir quasi la totalitat del genoma de *M. balearicus*. Per a obtenir el genoma de *Myotragus balearicus* es van construir 48 genoteques a partir d'una mostra de *M. balearicus* de la Coveta des Gorgs d'uns 4.500 anys d'antiguitat que tengueren un percentatge d'ADN endogen del 5-25 %. En total, es varen seqüenciar quasi 6.000 milions de lectures aparellades amb una lectura mitjana de 56 pb que equivalen a 0,643 bilions de nucleòtids. És a dir, unes 200 vegades el genoma d'una cabra, ovella, o takin que són de mida similar a l'humà (3,2 Gb). Dels 0,7 bilions de nucleòtids aconseguits, una vegada eliminades les seqüències de baixa qualitat i els duplicats generats durant l'amplificació de la llibreria, un 5 % (260 milions de lectures) varen mapar al genoma de les tres espècies de referència: cabra, ovella i takin. Les seqüències d'ADN mostraren el característic perfil de degradació típic de l'ADN antic i, per tant, l'ADN extret de la mostra òssia de *Myotragus* no és producte d'una contaminació d'ADN d'espècies actuals. Per tant, el 94,4 % de les lectures restants són majoritàriament bacteris del sòl que han colonitzat l'os (aquesta gran presència de seqüències bacterianes posa de manifest la gran dificultat d'obtenir genomes d'espècies extintes).

El genoma de *Myotragus balaricus* s'ha recuperat en un 86 % si empram els genomes de les tres espècies amb un nivell de profunditat de cobertura d'un 5×, és a dir, que cada posició del genoma de *Myotragus* s'ha llegit cinc vegades de mitjana, que es pot considerar un bon resultat per un genoma reconstruït a partir d'ADN antic. A més, s'han pogut recuperar i anotar uns 38 mil gens (seqüències codificants) dels 44.352 descrits a l'ovella que s'han emprat com a referència, és a dir un 82 %. Una anàlisi més detallada demostra que s'ha recuperat més del 95 % de la seqüència d'un 75 % d'aquests gens amb una cobertura de 1×. Per cobertures més altes, com per exemple 3×, només es recuperen amb el 90 % de la seqüència del 60 % dels gens. Tot aquest èxit es deu al fet d'haver trobat una mostra òssia amb un contingut mitjà del 6 % d'ADN endogen, un valor que es pot considerar molt alt per una mostra tan antiga procedent d'un clima temperat.

Finalment, s'han intentat detectar a *Myotragus balearicus* fins a 171 gens que a ovella i cabra presenten funcions i adaptacions molt importants a immunologia, producció de carn, adaptació al medi ambient, producció de llet, mida corporal, creixement, desenvolupament, color i pigmentació de pell i pèl, reproducció, adaptació a l'altitud, producció de greix, homeòstasi, angiogènesi, energia,

metabolisme, sistema nerviós, domesticació i sistema olfactiu. D'aquests, a *Myotragus* s'han recuperat tots excepte 15 i dels recuperats s'ha obtingut un mínim d'un 95 % de la seqüència al 90 % d'ells.

En el context dels estudis d'ADN antic, actualment també s'està desenvolupant el projecte *Caracterització de mitogenomes i canvis morfològics i genètics en taxons seleccionats d'endemismes vertebrats de les Illes Balears*, coordinat per l'IMEDEA (CSIC-UIB, i que forma part dels *Projectes d'R+D en Biodiversitat del Govern de les Illes Balears*), cofinançats per NextGeneration EU dins el marc del Pla de Recuperació, Transformació i Resiliència. El projecte té com a objectiu principal estudiar la variabilitat genètica i morfològica d'un conjunt de quatre grups de vertebrats endèmics de les Balears: els amfibis del gènere Alytes (*A. muletensis* i *A. talaioticus*), les sargantanes gimnèsiques del gènere *Podarcis*, el corb marí *Phalacrocorax aristotelis desmarestii* i els mustèlids del gènere *Martes* (*M. martes* i *M. foina*).

L'estudi combina l'anàlisi de restes arqueozoològiques, històriques i actuals procedents de la col·lecció de vertebrats de l'IMEDEA (https://imedea.uib-csic.es/ca/serveis/colleccions-naturals/), un fons declarat Bé d'Interès Cultural. Aquesta col·lecció representa un recurs essencial per explorar les dinàmiques evolutives d'aquestes espècies en resposta a fenòmens com la insularitat, els canvis climàtics i les activitats humanes. La disponibilitat de mostres ben documentades ha permès obtenir, fins ara, un percentatge d'èxit superior al 80 % en l'extracció i seqüenciació d'ADN antic i històric, un resultat destacable atesa la dificultat de treballar amb materials d'aquesta naturalesa.

Aquest treball posa de manifest la importància d'abordar els canvis a llarg termini a través d'un enfocament interdisciplinari, integrant genètica, morfologia i context arqueològic. A més, contribueix a reforçar el valor patrimonial i científic de les col·leccions de vertebrats com eines fonamentals en la recerca sobre la biodiversitat passada i present de les Illes Balears, amb implicacions directes en la Biologia de la Conservació i la preservació d'endemismes amenaçats.

Amb la bibliografia i dades disponibles fins a la data, queda manifest que l'aplicació de metodologies paleogenòmiques és totalment viable a mostres de diferents cronologia de les Illes Balears. S'ha de dir però, que en el cas de les mostres de cronologies més antigues (i.e., pre-arribada humana) les mostres procedents de coves i a una determinada altitud semblen tenir més probabilitat d'èxit. Per exemple, de les 51 mostres de *Myotragus balearicus* analitzades per BOVER et al. (2019), només 13 proporcionaren dades suficients per a generar genomes mitocondrials (complets o parcials), de les quatre d'*Hypnomys morpheus* analitzades per BOVER et al. (2020) només es va obtenir informació genètica d'una i que de les set de *Nesiotites hidalgo* analitzades per BOVER et al. (2019) també només una va proporcionar ADN endogen. Els jaciments d'on es varen obtenir totes aquestes mostres són jaciments de la Serra de Tramuntana de Mallorca (veure Taula 1). En aquesta mateixa direcció sembla anar l'anàlisi de les mostres de fauna introduïda de cronologia pretalaiòtica o lleugerament posterior, actualment en estudi. Encara que es varen obtenir resultats negatius per a la mostra del ca (*Canis familiaris*) de la Cova Estreta de Gabellí (Campanet, Mallorca), de les 36 mostres de les diferents espècies processades (Taula 1) de la Cova del Ninot fins a 14 han proporcionat informació suficient per a generar genomes mitocondrials, mentre que les quatre analitzades de la Cova de sa Tossa Alta i tres de les cinc de la Cova Estreta han donat resultats positius. Tots aquests jaciments són també de la zona de la Serra de Tramuntana.

Agraïments

Volem agrair a Gloria Cuenca-Bescós i Blanca Bauluz del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza la seva inestimable ajuda per a que el laboratori de paleogenòmica del IUCA sigui una realitat. Agrair a Vanessa Villalba-Mouco de l'Institut de Biologia Evolutiva de Barcelona (IBE, CSIC-UPF) els seus comentaris a una part del manuscrit. Agrair també als laboratoris del Servei de Seqüenciació i Genòmica Funcional i als del Servei de Proteòmica, ambdós dels Serveis Científico-Tècnics del CIBA (IACS-Universidad de Zaragoza), per deixar-nos utilitzar les seves instal·lacions i equipament.

Aquesta recerca s'inclou dins de tres projectes subvencionats pels Departament de Cultura, Patrimoni i Política Lingüística (Consell de Mallorca) i per la Conselleria d'Innovació, Interior i Justícia i per la Conselleria de Fons Europeus, Universitat i Cultura (Govern de les Illes Balears).

Dedicatòria

Volem dedicar aquest treball a la memòria del nostre company investigador i espeleòleg Àngel Ginés, gran referent dels estudis científics espeleològics de les Illes Balears.

Bibliografia

ABALO-MORLA, S.; BELDA, E.; MARCH, D.; REVUELTA, O.; CARDONA, L.; GIRALT, S.; CRESPO-PICAZO, J.L.; HOCHSCHEID, S.; MARCO, A.; MERCHÁN, M.; SAGARMINAGA, R.; SWIMMER, Y. & TOMÁS, J. (2022): Assessing the use of marine protected areas by loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) tracked from the western Mediterranean. *Global Ecology and Conservation*, 38: 1-17.

ALCOVER, J.A. (2008): The first Mallorcans: Prehistoric colonization in the Western Mediterranean. *Journal of World Prehistory*, 21: 19-84.

ALCOVER, J.A.; PÉREZ-OBIOL, R.; YLL, E.I. & BOVER, P. (1999): The diet of *Myotragus balearicus* Bate 1909 (Artiodactyla: Caprinae), an extinct bovid from the Balearic Islands: evidence from coprolites. *Biological Journal of the Linnean Society*, 66: 57-74.

AN, C.; LI, Y.; ZHU, Y.; SHEN, X.; ZHANG, Y.; YOU, L.; LIANG, X.; LI, X.; WU, S.; WU, P.; GU, H.; ZHOU, Z. & CHEN, Z. (1995): Molecular cloning and sequencing the 18S rDNA from specialized dinosaur egg fossil found in Xixia Henan, China. *Acta Scientarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 14: 51.

ANDERUNG, C.; BOUWMAN, A.; PERSSON, P.; CARRETERO, J.M.; ORTEGA, A.I.; ELBURG, R.; SMITH, C.; ARSUAGA, J.L.; ELLEGREN, H. & GÖTHERSTRÖM, A. (2005): Prehistoric contacts over the Straits of Gibraltar indicated by genetic analysis of Iberian Bronze Age cattle. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 102: 8431-8435.

ANDREWS, C.W. (1915): A description of the skull and skeleton of a peculiarly modified rupicaprine antilope (*Myotragus balearicus* Bate), with a notice of a new variety *Myotragus balearicus* var. *major*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 206: 281-305.

BÁEZ, J.C. & CAMIÑAS, J.A. (2004): La tortuga boba y su conservación. *Spin Cero*, 8: 55-58.

BOVER, P.; VALENZUELA, A.; TORRES-ROIG, E.; COOPER, A.; PONS, J. & ALCOVER, J.A. (2016): Closing the gap: new data on the last documented *Myotragus* and the first human evidence on Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean Sea). *The Holocene*, 26: 1887-1891.

BOVER, P.; MITCHELL, K.J.; LLAMAS, B.; ROFES, J.; THOMSON, V.A.; CUENCA-BESCÓS, G.; ALCOVER, J.A.; COOPER, A. & PONS, J. (2018): Molecular phylogenetics supports the origin of an endemic Balearic shrew lineage (*Nesiotites*) coincident with the Messinian Salinity Crisis. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 125: 188-195.

BOVER, P.; LLAMAS, B.; MITCHELL, K.J.; THOMSON, V.A.; ALCOVER, J.A.; LALUEZA-FOX, C.; COOPER, A. & PONS, J. (2019): Unraveling the phylogenetic relationships of the extinct bovid *Myotragus balearicus* Bate 1909 from the Balearic Islands. *Quaternary Science Reviews*, 215: 185-195.

BOVER, P.; MITCHELL, K.J.; TORRES-ROIG, E.; LLAMAS, B.; THOMSON, V.A.; ALCOVER, J.A.; AGUSTÍ, J.; COOPER, A. & PONS, J. (2020): Ancient DNA from an extinct Mediterranean micromammal – *Hypnomys morpheus* (Rodentia: Gliridae) – provides insight into the biogeographic history of insular dormice. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 58: 427-438.

BRONK RAMSEY, C. (2009): Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51: 337-360.

BROTHERTON, P.; HAAK, W.; TEMPLETON, J.; BRANDT, G.; SOUBRIER, J.; ADLER, C.J.; RICHARDS, S.M.; DER SARKISSIAN, C.; GANSLMEIER, R.; FRIEDERICH, S.; DRESELY, V.; VAN OVEN, M.; KENYON, R.; VAN DER KOEK, M.B.; KORLACH, J.; LUONG, K.; HO, S.Y.W.; QUINTANA-MURCI, L.; BEHAR, D.M.; MELLER, H.; ALT, K.W.; COOPER, A. & THE GENOGRAPHIC CONSORTIUM. (2013): Neolithic mitochondrial haplogroup H genomes and the genetic origin of Europeans. *Nature Communications*, 4: 7064.

ÇAKIRLAR, C.; KOOLSTRA, F.J. & IKRAM, S. (2021): Tracking turtles in the past: zooarchaeological evidence for human-turtle interactions in the ancient Eastern Mediterranean. *Antiquity*, 95: 125-141.

CAMIÑAS, J.A. (2002): Estatus y conservación de las tortugas marinas en España. In: *Atlas y libro rojo de los anfibios y reptiles de España*. pp: 385-420. Dirección General de Conservación de la Naturaleza-AHE. Madrid.

CARRERAS, C.; CARDONA, L. & AGUILAS, A. (2004): Incidental catch of the loggerhead turtle *Caretta caretta* off the Balearic Islands (western Mediterranean). *Biological Conservation*, 117: 321-329.

CARRERAS, C.; PONT, S.; MAFFUCCI, F.; PASCUAL, M.; BARCELÓ, A.; BENTIVEGNA, F.; CARDONA, L.; ALEGRE, F.; SANFÉLIX, M.; FERNÁNDEZ, G. & AGUILAR, A. (2006): Genetic structuring of immature loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in the Mediterranean Sea reflects water circulation patterns. *Marine Biology,* 149: 1269-1279.

CASALE, P.; BRODERICK, A.C.; CAMIÑAS, J.A.; CARDONA, L.; CARRERAS, C.; DEMETROPOULOS, A.; FULLER, W.J.; GODLEY, B.J.; HOCHSCHEID, S.; KASKA, Y.; LAZAR, B.; MARGARITOULIS, D.; PANAGOPOULOU, A.; REES, A.F.; TOMÁS, J. & TÜRKOZAN, O. (2018): Mediterranean sea turtles: current knowledge and priorities for conservation and research. *Endangered Species Research*, 36: 229-267.

COLOMINAS, L.; EDWARDS, C.J.; BEJA-PEREIRA, A.; VIGNE, J.D.; SILVA, R.M.; CASTANYER, P.; TREMOLEDA, J. & SEGUÍ, M.S. (2015): Detecting the T1 cattle haplogroup in the Iberian Peninsula from Neolithic to medieval times: new clues to continuous cattle migration through time. *Journal of Archaeological Science*, 59: 110-117.

DABNEY, J.; KNAPP, M.; GLOCKE, I.; GANSAUGE, M.T.; WEIHMANN, A.; NICKEL, B.; VALDIOSERA, C.; GARCÍA, N.; PÄÄBO, S.; ARSUAGA, J.L. & MEYER, M. (2013): Complete mitochondrial genome sequence of a Middle Pleistocene cave bear reconstructed from ultrashort DNA fragments. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 110: 15758-15763.

DE KOCK, W. (2023): *Calipash and calipee: Population dynamics and foraging ecology of archaeological sea turtles*. Tesi Doctoral inèdita, University of Groningen. 183 pàgs. Groningen.

DÍAZ, N. (2009): *Bahía de Alcúdia, Mallorca: un crisol genético en el Mediterráneo*. Tesi Doctoral inèdita. Universitat Autònoma de Barcelona. 233 pàgs. Barcelona.

ENCINAS, J.A. & ALCOVER J.A. (1997): El jaciment fossilífer de la cova Estreta (Pollença, Mallorca). *Endins*, 21: 83-92.

ESSEL, E.; ZAVALA, E.I.; SCHULZ-KORNAS, E.; KOZLIKIN, M.B.; FEWLASS, H.; VERNOT, B.; SHUNKOV, M.V.; DEREVIANKO, A.P.; DOUKA, K.; BARNES, I.; SOULIER, M.C.; SCHMIDT, A.; SZYMANSKI, M.; TSANOVA, T.; SIRAKOV, N.; ENDAROVA, E.; McPHERRON, S.P.; HUBLIN, J.J.; KELSO, J.; PÄÄBO, S.; HAJDINJAK, M.; SORESSI, M. & MEYER, M. (2023): Ancient human DNA recovered from a Palaeolithic pendant. *Nature*, 618: 328-332.

FERNANDES, D.M.; MITTNIK, A.; OLALDE, I.; LAZARIDIS, I.; CHERONET, O.; ROHLAND, N.; MALLICK, S.; BERNARDOS, R.; BROOMANDKHOSHBACHT, N.; CARLSSON, J.; CULLETON, B.J.; FERRY, M.; GAMARRA, B.; LARI, M.; MAH, M.; MICHEL, M.; MODI, A.; NOVAK, M.; OPPENHEIMER, J.; SIRAK, K.A.; STEWARDSON, K.; MANDL, K.; SCHATTKE, C.; ÖZDOGAN, K.T.; LUCCI, M.; GASPERETTI, G.; CANDILIO, F.; SALIS, G.; VAI, S.; CAMARÓS, E.; CALÒ, C.; CATALANO, G.; CUETO, M.; FORGIA, V.; LOZANO, M.; MARINI, E.; MICHELETTI, M.; MICCICHÈ, R.M.; PALOMBO, M.R.; RAMIS, D.; SCHIMMENTI, V.; SUREDA, P.; TEIRA, L.; TESCHLER-NICOLA, M.; KENNETT, D.J.; LALUEZA-FOX, C.; PATTERSON, N.; SINEO, L.; COPPA, A.; CARAMELLI, D.; PINHASI, R. & REICH, D. (2020): The spread of steppe and Iranian-related ancestry in the islands of the western Mediterranean. *Nature Ecology and Evolution*, 4: 334-345.

GOLENBERG, E.M.; GIANNASI, D.E.; CLEGG, M.T.; SMILEY, C.J.; DURBIN, M.; HENDERSON, D. & ZURAWSKI, G. (1990): Chloroplast DNA sequence from a Miocene *Magnolia* species. *Nature*, 344: 656-658.

GUERRERO, V.M. (1984): *El asentamiento púnico de Na Guardis*. Colección Excavaciones Arqueológicas en España nº 133. 284 pàgs. Madrid.

GUERRERO, V.M. (1997): *Colonización púnica de Mallorca. La documentación arqueológica y el contexto histórico*. Ed. El Tall, col. El Tall del Temps Mayor nº 2. 591 pàgs. Palma.

HIGUCHI, R.; BOWMAN, B.; FREIBERGER, M.; RYDER, O.A. & WILSON, A.C. (1984): DNA sequences from the quagga, an extinct member of the horse family. *Nature*, 312: 282-284.

IBORRA, M.P. (2005). Estudio arqueofaunístico de una comunidad púnicoebusitana asentada en Mallorca. II. La fauna doméstica y la caza. *Mayurqa*, 30: 657-692.

KEARSE, M.; MOIR, R.; WILSON, A.; STONES-HAYAS, S.; CHEUNG, M.; STURROCK, S.; BUXTON, S.; COOPER, A.; MARKOWITZ, S.; DURAN, C.; THIERER, T.; ASHTON, B.; MEINTJES, P. & DRUMMOND, A. (2012): Geneious Basic: an integrated and extendable desktop software platform for the organization and analysis of sequence data. *Bioinformatics*, 28: 1647-1649.

KIRCHER, M. (2012): Analysis of high-throughput ancient DNA sequencing data. In: SHAPIRO, B. & HOFREITER, M. (eds.). *Ancient DNA: methods and protocols*. *Methods in Molecular Biology*, 840: 197-228.

KJÆR, K.H.; WINTHER PEDERSEN, M.; DE SANCTIS, B.; DE CAHSAN, B.; KORNELIUSSEN, T.S.; MICHELSEN, C.S.; SAND, K.K.; JELAVIĆ, S.; RUTER, A.H.; SCHMIDT, A.M.A.; KJELDSEN, K.K.; TESAKOV, A.S.; SNOWBALL, I.; GOSSE, J.C.; ALSOS, I.G.; WANG, Y.; DOCKTER, C.; RASMUSSEN, M.; JØRGENSEN, M.E.; SKADHAUGE, B.; PROHASKA, A.; KRISTENSEN, J.Å.; BJERAGER, M.; ALLENTOFT, M.E.; COISSAC, E.; PHYLONORWAY CONSORTIUM; ROUILLARD, A.; SIMAKOVA, A.; FERNÁNDEZ-GUERRA, A.; BOWLER, C.; MACIAS-FAURIA, M.; VINNER, L.; WELCH, J.J.; HIDY, A.J.; SIKORA, M.; COLLINS, M.J.; DURBIN, R.; LARSEN, N.K. & WILLERSLEV, E. (2022): A 2-million-year-old ecosystem in Greenland uncovered by environmental DNA. *Nature*, 612: 283-291.

LALUEZA-FOX, C.; BERTRANPETIT, J.; ALCOVER, J.A.; SHAILER, N. & HAGELBERG, E. (2000): Mitochondrial DNA from *Myotragus balearicus*, an extinct bovid from the Balearic Islands. *Journal of Experimental Zoology (Mol. Dev. Evol.)*, 288: 56-62.

LALUEZA-FOX, C.; SHAPIRO, B.; BOVER, P.; ALCOVER, J.A. & BERTRANPETIT, J. (2002): Molecular phylogeny and evolution of the extinct bovid *Myotragus balearicus*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 25: 501-510.

LALUEZA-FOX, C.; CASTRESANA, J.; SAMPIETRO, L.; MARQUÈS-BONET, T.; ALCOVER, J.A. & BERTRANPETIT, J. (2005a): Molecular dating of caprines using ancient DNA sequences of *Myotragus balearicus*, an extinct endemic Balearic mammal. *BMC Evolutionary Biology*, 5: 70.

LALUEZA-FOX, C.; SAMPIETRO, L.; MARQUÈS-BONET, T.; ALCOVER, J.A. & BERTRANPETIT, J. (2005b): Mitochondrial and nuclear genes from the extinct *Myotragus balearicus*. In: ALCOVER, J.A. & BOVER, P. (eds.). *Proceedings of the International Symposium "Insular Vertebrate Evolution: the Palaeontological Approach"*. *Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 12: 145-154.

LI, H. & DURBIN, R. (2009): Fast and accurate short read alignment with Burrows Wheeler transform. *Bioinformatics*, 25: 1754-1760.

LI, H.; HANDSAKER, B.; WYSOKER, A.; FENNELL, T.; RUAN, J.; HOMER, N.; MARTH, G.; ABECASIS, G.; DURBIN, R. & 1000 GENOME PROJECT DATA PROCESSING SUBGROUP. (2009): The sequence alignment/map (SAM) format and SAMtools. *Bioinformatics*, 25: 2078-2079.

LIU, Y.; BOVER, P.; WOOD, J.; WEYRICH, L.; ALCOVER, J.A.; PONS, J.; COOPER, A. & LLAMAS, B. (2017): Gut microbiome profile of an extinct caprine (*Myotragus balearicus*) from the Balearic Islands. In: *12th International Mammalogical, Advances in mammalogy in a changing world* (http://imc12-2017.m.promaco.currinda.com/schedule/session/200/abstract/877).

LLAMAS, B.; FEHREN-SCHMITZ, L.; VALVERDE, G.; SOUBRIER, J.; MALLICK, S.; ROHLAND, N.; NORDENFELT, S.; VALDIOSERA, C.; RICHARDS, S.M.; ROHRLACH, A.; BARRETO ROMERO, M.I.; FLORES ESPINOZA, I.; TOMASTO CAGIGAO, E.; WATSON JIMÉNEZ, L.; MAKOWSKI, K.; LEBOREIRO REYNA, I.L.; MASILLA LORY, J.; BALLIVIÁN TORREZ, J.A.; RIVERA, M.A.; BURGER, R.L.; CERUTI, M.C.; REINHARD, J.; WELLS, R.S.; POLITIS, G.; SANTORO, C.M.; STANDEN, V.G.; SMITH, C.; REICH, D.; HO, S.Y.W.; COOPER, A. & HAAK, W. (2016): Ancient mitochondrial DNA provides high-resolution time scale of the peopling of the Americas. *Science Advances*, 2: 1501385.

LUCCHETTI, A.; BARGIONE, G.; PETETTA, A.; VASAPOLLO, C. & VIRGILI, M. (2019): Reducing sea turtle bycatch in the Mediterranean mixed demersal fisheries. *Frontiers in Marine Science*, 6: 387.

LUDWIG, S.; AMORIM, L.; BARCELOS, A.C.; GUIMARAES, P.R. & VARGAS, S.M. (2024): Inferring the origin of new D-loop haplotypes of loggerhead sea turtles (Testudinata: Chelonidae) from the Southwest Atlantic lineage. *Mitochondrial DNA Part A*, en premsa.

MANZI, V.; GENNARI, R.; HILGEN, F.; KRIJGSMAN, W.; LUGLI, S.; ROVERI, M. & SIERRO, F.J. (2013): Age refinement of the Messinian salinity crisis onset in the Mediterranean. *Terra Nova*, 25: 315-327.

MEYER, M. & KIRCHER, M. (2010): Illumina sequencing library preparation for highly multiplexed target capture and sequencing. *Cold Spring Harbor Protocols*, 6: 1-10.

MINH, B.Q.; SCHMIDT, H.A.; CHERNOMOR, O.; SCHREMPF, D.; WOODHAMS, M.D.; VON HAESELER, A. & LANFEAR, R. (2020): IQ-TREE 2: New models and efficient methods for phylogenetic inference in the genomic era. *Molecular Biology and Evolution*, 37: 1530-1534.

OLALDE, I.; …+ 108 AUTORS…; LALUEZA-FOX, C. & REICH, D. (2019): The genomic history of the Iberian Peninsula over the past 8000 years. *Science*, 363: 1230-1234.

ORLANDO, L.; ALLABY, R.; SKOGLUND, P.; DER SARKISSIAN, C.; STOCKHAMMER, P.W.; ÁVILA-ARCOS, M.C.; FU, Q.; KRAUSE, J.; WILLERSLEV, E.; STONE, A.C. & WARINNER, C. (2021): Ancient DNA analysis. *Nature Reviews Methods Primers*, 1: 14.

PÄÄBO, S. (1985): Molecular cloning of ancient Egyptian mummy DNA. *Nature*, 314: 644-645.

RAMÍREZ, O.; GIGLI, E.; BOVER, P.; ALCOVER, J.A.; BERTRANPETIT, J.; CASTRESANA, J. & LALUEZA-FOX, C. (2009): Paleogenomics in a temperate environment: Shotgun sequencing from an extinct Mediterranean caprine. *PLoS ONE*, 4: e5670.

REIMER, P.J.; AUSTIN, W.E.N.; BARD, E.; BAYLISS, A.; BLACKWELL, P.G.; BRONK RAMSEY, C.; BUTZIN, M.; CHENG, H.; EDWARDS, R.L.; FRIEDRICH, M.; GROOTES, P.M.; GUILDERSON, T.P.; HAJDAS, I.; HEATON, T.J.; HOGG, A.G.; HUGHEN, K.A.; KROMER, B.; MANNING, S.W.; MUSCHELER, R.; PALMER, J.G.; PEARSON, C.; VAN DER PLICHT, J.; REIMER, R.W.; RICHARDS, D.A.; SCOTT, E.M.; SOUTHON, J.R.; TURNEY, C.S.M.; WACKER, L.; ADOLPHI, F.; BÜNTGEN, U.; CAPANO, M.; FAHRNI, S.M.; FOGTMANN-SCHULZ, A.; FRIEDRICH, R.; KÖHLER, P.; KUDSK, S.; MIYAKE, F.; OLSEN, J.; REINIG, F.; SAKAMOTO, M.; SOOKDEO, A. & TALAMO, S. (2020): The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62: 725-757.

RENOM, P.; DE-DIOS, T.; CIVIT, S.; LLOVERA, L.; SÁNCHEZ-GRACIA, A.; LIZANO, E.; RANDO, J.C.; MARQUÈS-BONET, T.; KERGOAT, G.J.; CASANOVAS-VILAR, I. & LALUEZA-FOX, C. (2021): Genetic data from the extinct giant rat from Tenerife (Canary Islands) points to a recent divergence from mainland relatives. *Biology Letters*, 17: 20210533.

ROHLAND, N.; HARNEY, E.; MALLICK, S.; NORDENFELT, S. & REICH, D. (2015): Partial uracil–DNA–glycosylase treatment for screening of ancient DNA. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 370: 20130624.

ROPIQUET, A. & HASSANIN, A. (2005): Molecular phylogeny of caprines (Bovidae, Antilopinae): the question of their origin and diversification during the Miocene. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 43: 49-60.

SCHUBERT, M.; LINDGREEN, S. & ORLANDO, L. (2016): AdapterRemoval v2: rapid adapter trimming, identification, and read merging. *BMC Research Notes*, 12: 88.

SIMÓN, M. & MALGOSA, A. (2014): Caracterització genètica de les restes humanes talaiòtiques del jaciment de Son Olivaret, Ciutadella, Menorca. *Revista de Menorca*, 93: 239-258.

SIMÓN, M.; DÍAZ, N.; SOLÓRZANO, E.; MONTIEL, R.; FRANCALACCI, P. & MALGOSA, A. (2017): Dissecting mitochondrial DNA variability of Balearic populations from the Bronze Age to the current era. *American Journal of Human Biology*, 29: e22883.

SOLOMANDO, A.; PUJOL, F.; SUREDA, A. & PINYA, S. (2022): Ingestion and characterization of plastic debris by loggerhead sea turtle, *Caretta caretta*, in the Balearic Islands. *Science of the Total Environment*, 826: 154-159.

TOMÁS, J.; GUITART, R.; MATEO, R. & RAGA, J.A. (2002): Marine debris ingestion in loggerhead sea turtles, *Caretta caretta*, from the Western Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, 44: 211-216.

TOLVE, L.; IANUCCI, A.; GAROFALO, L.; NINNI, A.; CAPOBIANCO DONDONA, A.; CECIARINI, I.; COCUMELLI, C.; DE LUCIA, A.; FALCONI, M.; FORMIA, A.; IACOVELLI, F.; MANCUSI, C.; MARCHIORI, E.; MARSILI, L.; MINGOZZI, T.; NANNARELLI, S.; NATALI, C.; TERRACCIANO, G.; ZUFFI, M.A.L.; NOVELLETO, A. & CIOFI, C. (2024): Whole mitochondrial genome sequencing provides new insights into the phylogeography of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) in the Mediterranean Sea. *Marine Biology*, 171: 19.

TORRES-ROIG, E.; MITCHELL, K.J.; ALCOVER, J.A.; MARTÍNEZ-FREIRÍA, F.; BAILÓN, S.; HEINIGER, H.; WILLIAMS, M.; COOPER, A.; PONS, J. & BOVER, P. (2021): Origin, extinction and ancient DNA of a new fossil insular viper: molecular clues of overseas immigration. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 192: 144-168.

VALENZUELA, A.; BONNIN, M.; BARTOLOMÉ, J.; ALCOVER, J.A. & TRIAS, M. (2010): La cova de sa Tossa Alta (Escorca, Mallorca): una estació remota prehistòrica a la serra de Tramuntana. *Endins*, 34: 19-34.

VALENZUELA, A.; BAKER, K.; CARDEN, R.F.; EVANS, J.; HIGHAM, T.; HOELZEL, A.R.; LAMB, A.; MADGWICK, R.; MILLER, H.; ALCOVER, J.A.; CAU, M.Á. & SYKES, N. (2016): Both introduced and extinct: The fallow deer of Roman Mallorca. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9: 168-177.

VAN DER VALK, T.; PEČNEROVÁ, P.; DÍEZ-DEL-MOLINO, D.; BERGSTRÖM, A.; OPPENHEIMER, J.; HARTMANN, S.; XENIKOUDAKIS, G.; THOMAS, J.A.; DEHASQUE, M.; SAĞLICAN, E.; FIDAN, F.R.; BARNES, I.; LIU, S.; SOMEL, M.; HEINTZMAN, P.D.; NIKOLSKIY, P.; SHAPIRO, B.; SKOGLUND, P.; HOFREITER, M.; LISTER, A.M.; GÖTHERSTRÖM, A. & DALÉN, L. (2021): Million-year-old DNA sheds light on the genomic history of mammoths. *Nature*, 591: 265-269.

VAQUER-SUNYER, R. & BARRIENTOS, N. (2024): Tortuga marina. In: VAQUER-SUNYER, R.; BARRIENTOS, N. & GOURAGUINE, A. (eds.). *Informe Mar Balear 2024*.

VILLALBA-MOUCO, V.; OLIART, C.; RIHUETE-HERRADA, C.; CHILDEBAYEVA, A.; ROHRLACH, A.B.; FREGEIRO, M.I.; CELDRÁN BELTRÁN, E.; VELASCO-FELIPE, C.; ARON, F.; HIMMEL, M.; FREUND, C.; ALT, K.W.; SALAZAR-GARCÍA, D.C.; GARCÍA ATIÉNZAR, G.; DE MIGUEL IBÁÑEZ, M.P.; HERNÁNDEZ PÉREZ, M.S.; BARCIELA, V.; ROMERO, A.; PONCE, J.; MARTÍNEZ, A.; LOMBA, J.; SOLER, J.; PUJANTE MARTÍNEZ, A.; AVILÉS FERNÁNDEZ, A.; HABER-URIARTE, M.; ROCA DE TOGORES MUÑOZ, C.; OLALDE, I.; LALUEZA-FOX, C.; REICH, D.; KRAUSE, J.; GARCÍA SANJUÁN, L.; LULL, V.; MICÓ, R.; RISCH, R. & HAAK, W. (2021): Genomic transformation and social organization during the Copper Age-Bronze Age transition in southern Iberia. *Science Advances*, 7: eabi7038.

WELKER, F.; DUIJM, E.; VAN DER GAAG, K.J.; VAN GEEL, B.; DE KNIJFF, P.; VAN LEEUWEN, J.; MOL, D.; VAN DER PLICHT, J.; RAES, N.; REUMER, J. & GRAVENDEEL, B. (2014): Analysis of coprolites from the extinct mountain goat *Myotragus balearicus*. *Quaternary Research*, 81: 106-116.

WOODWARD, S.R.; WEYAND, N.J. & BUNNELL, M. (1994): DNA sequences from Cretaceous period bone fragments. *Science*, 266: 122-1232.

ZALLOUA, P.; COLLINS, C.J.; GOSLING, A.; BIAGINI, S.A.; COSTA, B.; KARDAILSKY, O.; NIGRO, L.; KHALIL, W.; CALAFELL, F. & MATISOO-SMITH, E. (2018): Ancient DNA of Phoenician remains indicates discontinuity in the settlement history of Ibiza. *Scientific Reports*, 8: 17567.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Na Burguesa-2: un nou jaciment del zanclià (pliocè inferior) amb fauna de *Myotragus* (Mallorca, Illes Balears)

Enric TORRES-ROIG [1] i Josep Antoni ALCOVER [1,2]

[1] Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (CSIC-UIB, Center of Excellence María de Maeztu). Cr Miquel Marqués 21, Esporles, Balearic Islands (Spain). Email: etorres@imedea.uib-csic.es
[2] Affiliated Researcher ad Honorem

Abstract

This study presents a new Pliocene (Zanclian) fossil site, here named Na Burguesa-2, at the Na Burguesa mountain range. Four independent sampling points of the outcrop have delivered a *Myotragus*-fauna very similar in the composition and proportions of mammals to that obtained on Na Burguesa-1. To date, on the basis of our preliminary work, at least 16 different vertebrate taxa have been recorded in this new site, with mammals being the best represented group (82 % of the obtained fossils). 18 % of the obtained mammal bones belongs to a Soricidae (*Nesiotites* lineage), 23 % to the cricetid *Apocricetus*, 14 % to the murid *Paraethomys*, 32 % to a Gliridae (*Hypnomys* lineage), 9 % to a Leporidae (*Hypolagus* lineage), and the remaining 4 % to a Bovidae.

The morphological similarity among the *Apocricetus* and *Paraethomys* from Na Burguesa-1 and Na Burguesa-2 suggests a very close chronology of these deposits. The finding of both deposits confirms the existence of an ancient paleokarst during the Lower Pliocene at least at the Eastern part of the Na Burguesa mountain range. The preliminary analysis of the dentition of *Apocricetus* and *Paraethomys* from Na Burguesa-2 points to a slightly earlier chronology of this new site. This conclusion is mainly supported by the more simplified dental pattern and smaller dimensions of *Apocricetus*, suggesting an age closer to the Messinian colonization period.

Resum

Aquest estudi presenta un nou jaciment fòssil del pliocè (zanclià) de la serra de Na Burguesa, que aquí anomenam Na Burguesa-2. Quatre punts de mostreig independents de l'afloramen han lliurat fòssils representatius de la fase inicial de la coneguda com a "fauna de *Myotragus*". La fauna d'aquest nou jaciment és molt similar en composició i proporcions de mamífers a l'obtinguda a Na Burguesa-1. Fins ara, basant-se en l'estudi preliminar d'una mostra de 800 fòssils, s'han registrat almenys 16 tàxons de vertebrats diferents en aquest nou jaciment, essent els mamífers el grup millor representat (82 % dels fòssils obtinguts). El 18 % dels ossos de mamífers obtinguts pertanyen a un Soricidae (llinatge de *Nesiotites*), el 23 % al cricètid *Apocricetus*, el 14 % al múrid *Paraethomys*, el 32 % a un Gliridae (llinatge *d'Hypnomys*), el 9 % a un Leporidae (llinatge d'*Hypolagus*), i el 4 % restant a un Bovidae.

La similitud morfològica entre els *Apocricetus* i *Paraethomys* de Na Burguesa-1 i Na Burguesa-2 suggereix que la seva cronologia és molt propera. La troballa d'ambdós jaciments confirma l'existència d'un antic paleokarst durant el zanclià almenys a la part oriental de la serra de Na Burguesa. L'anàlisi preliminar de la dentició de *Apocricetus* i *Paraethomys* de Na Burguesa-2 apunta a que aquest nou jaciment seria lleugerament anterior al de Na Burguesa-1. Aquesta conclusió es recolza principalment en el patró dental més simplificat i les dimensions més petites de *Apocricetus*, i suggereix que el nou dipòsit té una edat més propera al període de colonització, que se situaria en un zanclià molt basal.

Torres-Roig, E. i Alcover, J.A. (2024): Na Burguesa-2: un nou jaciment del zanclià (pliocè inferior) amb fauna de *Myotragus* (Mallorca, Illes Balears).
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 237-248. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 27 desembre 2024; **Revisat:** 28 desembre 2024; **Acceptat:** 29 desembre 2024.
Publicat online: 31 desembre 2024.

Introducció

L'estudi dels vertebrats fòssils insulars de les Balears dels darrers 5,3 milions d'anys està íntimament lligat als dipòsits d'origen càrstic. La notable extensió de carbonats a les illes ha afavorit el desenvolupament d'un gran nombre de coves i crulls als terrenys calcaris, que han estat les principals fonts de coneixement sobre la composició faunística de les Balears abans de l'arribada dels primers pobladors humans. Generalment, l'interior de les cavitats càrstiques representa ambients estables on les restes d'organismes es dipositen juntament amb materials argilosos, clastes (principalment angulosos d'origen endogen i exogen) i espeleotemes. L'estratigrafia d'aquesta tipologia de dipòsits

sol ser complexa, i l'establiment de l'edat dels jaciments més antics per mètodes de datació absoluta se sol efectuar sobre nivells de colada que delimiten les acumulacions de sediments. Malauradament, molts dels dipòsits fossilífers que no poden ser datats per C^{14} no presenten formacions d'espeleotemes ni registres sedimentaris que permetin ser datats per altres mètodes absoluts. Per aquesta raó, la ubicació temporal de la majoria dels jaciments s'atribueix de forma relativa, basant-se en els caràcters morfològics més o menys derivats dels components paleofaunístics identificats.

El registre fòssil dels darrers vertebrats insulars de Mallorca estava compost per tres llinatges de mamífers (*Myotragus*, *Hypnomys* i *Nesiotites*; BATE, 1909, 1914, 1944), la sargantana balear (*Podarcis lilfordi*; BATE, 1918; BAUZÁ, 1946; KOTSAKIS, 1981), i el ferreret (*Alytes muletensis*; SANCHIZ & ADROVER, 1977). A aquest conjunt se l'ha anomenat "fauna de *Myotragus*", essent aquest gènere el representant més singular dels vertebrats terrestres de l'illa. Per extensió, dins la fauna de *Myotragus* s'hi varen incloure les restes d'un calàpet pintat (*Discoglossus* sp.; ALCOVER et al., 1981) i d'un escurçó petit (*Vipera* sp.; TORRES-ROIG, 2021) trobades a alguns jaciments del piacenzià/gelasià.

A partir de l'any 2003, aquesta visió sobre la fauna de *Myotragus* va canviar radicalment amb el descobriment del jaciment del Caló den Rafelino (CdR, Manacor, Mallorca), presentat formalment en una comunicació d'un simposi internacional de zoologia (BOVER et al., 2007). Aquest dipòsit consisteix en una bretxa d'origen càrstic molt pobre en restes fòssils, però summament interessant pel que fa a la seva composició paleofaunística. El seu registre no només va documentar espècies antigues dels llinatges ja coneguts, sinó que va evidenciar l'existència d'altres llinatges fins aleshores totalment desconeguts. Aquests darrers inclouen dos mamífers i possiblement sis rèptils. Els nous llinatges de mamífers documentats a CdR són els d'un lepòrid (*Hypolagus balearicus*; QUINTANA et al., 2010) i d'un cricètid gegant (*Tragomys macpheei*; AGUSTÍ et al., 2012). Els nous llinatges de rèptils inclouen un escurçó de gran mida pertanyent al "Complex d'Escurçons Orientals" (sigles en anglès "OVC", Oriental Vipers Complex; BAILON et al., 2010), un llangardaix ambliodont de mida grossa (*Maioricalacerta rafelinensis*; BAILON et al., 2014), una tortuga gegant, un ànguid, un colúbrid i, possiblement, un petit escurçó (BOVER et al., 2014).

El 2012 un grup d'espeleòlegs del Speleo Club Mallorca (actualment integrats a la Societat Espeleològica Balear) varen descobrir un nou jaciment que va aportar noves dades sobre la composició inicial de la fauna de *Myotragus*: Na Burguesa-1 (NB-1, Palma, Mallorca; BOVER et al., 2014). Aquest jaciment ha permès documentar l'existència d'altres llinatges que se sumen als anteriors: un mamífer més (*Paraethomys balearicus*; TORRES-ROIG et al., 2019), probablement vuit rèptils més (dos Gekkota, un Scincidae, tres Colubridae, un Scolecophidia i un Amphisbaenia; TORRES-ROIG, 2021) i dos amfibis més (un Bufonidae i un Ranidae; TORRES-ROIG et al., 2017b). A més d'aquests, es va obtenir una quantitat important de restes dels representants més antics dels llinatges ja coneguts (a excepció de *Myotragus*, del que les restes són escasses i molt fragmentàries), entre els quals s'ha descrit el cricètid *Apocricetus darderi* (TORRES-ROIG et al., 2017a), mentre que el glírid està en procés de descripció.

L'objectiu d'aquest treball és presentar el descobriment d'un nou jaciment, descobert l'any 2020 pels autors d'aquest article, i realitzar una aproximació preliminar a la seva composició faunística i al seu context temporal respecte a NB-1 i CdR. Les primeres observacions *in situ* del contingut d'alguns elements fòssils van permetre deduir immediatament que podrien ser molt pròxims als de NB-1. Un cop informades les autoritats competents i obtinguts els permisos pertinents, el març de 2022 es van extreure una sèrie de mostres per part de la brigada de Patrimoni del Consell de Mallorca, que van ser dipositades a l'IMEDEA. Fins a la data, s'han processat algunes mostres que confirmen la cronologia i la importància del dipòsit. Ens referirem a aquest nou jaciment com a Na Burguesa-2 (NB-2, Palma, Mallorca).

Context geogràfic i geològic

El jaciment de NB-2 està situat al vessant SE del Puig des Caragol a uns 130 m s.n.m. (Figura 1), pròxim a l'inici de la pujada al monument de Na Burguesa. El dipòsit es troba al talús que es troba exposat del carrer Pere Company. Es tracta d'una bretxa fossilífera constituïda per llims marrons-vermells fortament cimentats per calcita, molt semblant a la bretxa de NB-1, reblint una cavitat o fissura de direcció NE-SW desenvolupada sobre dolomies i calcàries del juràssic inferior. La fauna obtinguda, tant en composició com filogenèticament, està molt relacionada amb la de NB-1 i ambdues poden considerar-se cronològicament molt properes, amb una separació cronològica entre les dues molt més curta que l'existent entre CdR i NB-1.

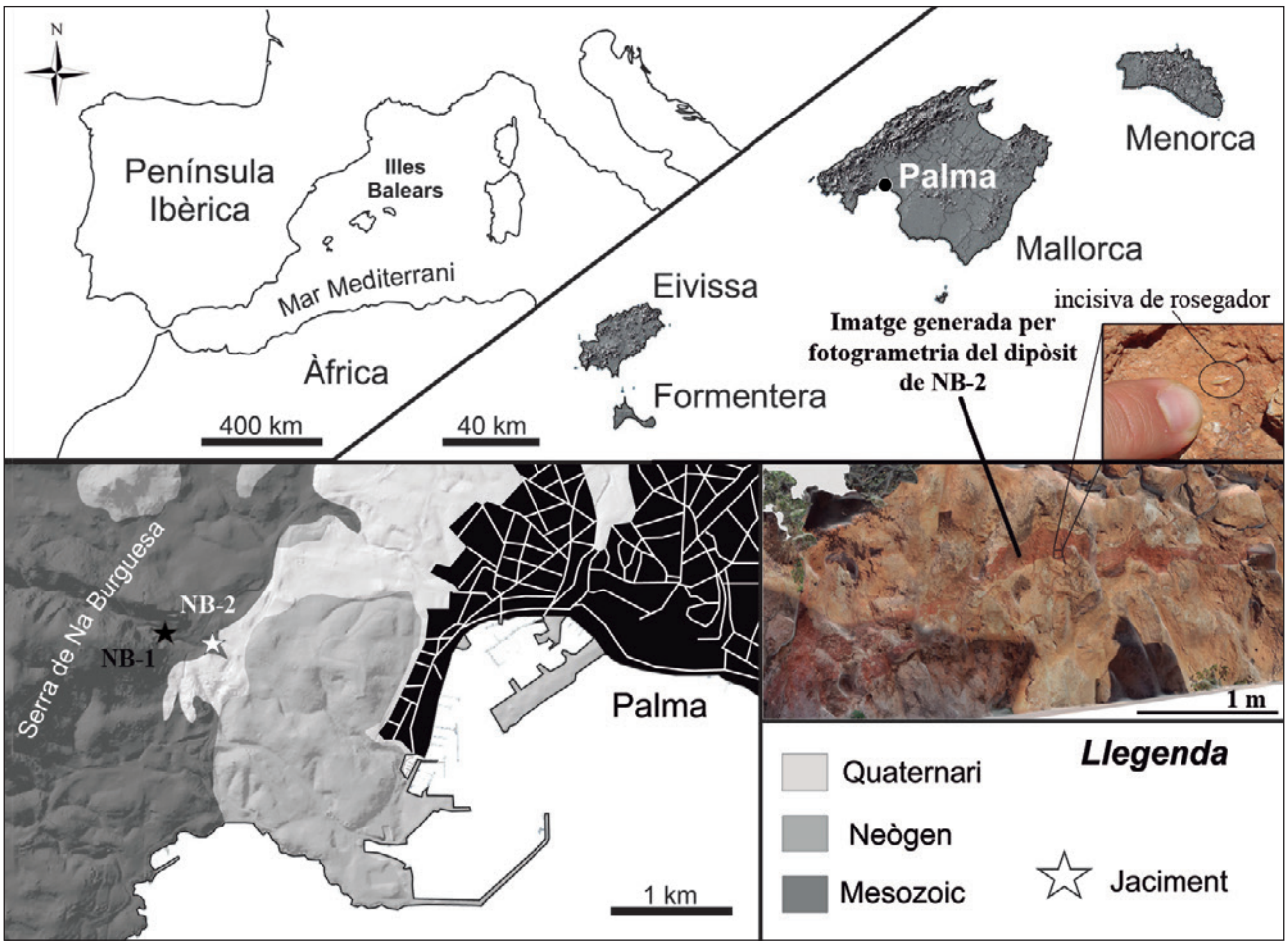


Figura 1: Context geogràfic i geològic dels jaciments de NB-2 i NB-1. El nivell on es troba el dipòsit de NB-2 es troba constituït per una bretxa composta de clastes predominantment calcaris amb una matriu de llims vermells fortament cimentats on s'hi poden distingir restes de petits vertebrats. El dipòsit correspon al rebliment d'una antiga cavitat formada sobre les calcàries i dolomies grises del juràssic inferior.
Figure 1: Geographical and geological context of the NB-2 and NB-1 deposits. The level where the NB-2 deposit is located is constituted by a breccia composed of predominantly calcareous clasts with a matrix of strongly cemented red silts where remains of small vertebrates can be distinguished. The deposit corresponds to the filling of an ancient karstic fissure formed on the limestones and gray dolomites of the Lower Jurassic.

Material i mètodes

En aquesta primera aproximació a aquest nou dipòsit, es va optar per la preparació d'una sèrie de mostres que s'obtingueren de diferents punts del jaciment. Per un costat es va extreure un bloc aïllat que formava part d'un mur adjacent al dipòsit. Aquest bloc consistia en una bretxa que contenia restes de macro– i micro–vertebrats amb un aspecte molt similar als materials que es trobaven *in situ*. Per una altra banda, es varen preparar dues mostres del paquet principal que contenia la major quantitat de fòssils visibles (bretxes 1 i 3) i una darrera mostra que es trobava per davall d'aquestes (bretxa 2).

La metodologia utilitzada per a l'extracció dels fòssils segueix el protocol descrit per BOVER et al. (2014) i TORRES-ROIG (2021). Fins a la data, s'han recollit uns 800 fòssils en bon estat de conservació. Tot i que el conjunt de la mostra és petit en comparació a l'obtinguda a Na Burguesa–1 (on s'obtingueren més de 7.500 fòssils identificables), permet presentar algunes dades preliminars. Els fòssils que s'han analitzat amb major detall, i que són objecte d'aquest treball preliminar, són els corresponents als molars que s'han identificat com pertanyents als gèneres *Apocricetus* i *Paraethomys*. Els molars inferiors es denominen m1–3 i els molars superiors M1–3. En el cas de *Apocricetus* s'han estudiat 12 molars (un m1 i un m2 d'una mandíbula, IMEDEA 109916; un m1 aïllat, IMEDEA 111725; un m2 d'una mandíbula, IMEDEA 109917; dues mandíbules amb m2 i m3, IMEDEA 111723 i 111809; dos m3s aïllats, IMEDEA 111852 i 111853; i dos M3s aïllats, IMEDEA 111823 i 111851). I en el cas de *Paraethomys* s'ha disposat de 31 molars (una mandíbula amb m1, m2 i m3, IMEDEA 111854; un m1 aïllat, IMEDEA 111307; tres mandíbules amb m2 i m3, IMEDEA 111302, 111304 i 111854; un m3 aïllat, IMEDEA 111308; cinc maxil·les amb M1 i M2, IMEDEA 111303, 111309, 111316 111855, 111857; dos M2 aïllats, IMEDEA 111305, 111306; una maxil·la

amb M1, M2 i M3, IMEDEA 111856; un crani parcial amb els sis molars, IMEDEA 109880; i un M3 aïllat, IMEDEA 111825).

Les mesures dels molars han estat obtingudes utilitzant un microscopi digital del model Dino-Lite Edge AM7915MZT, seguint el mètode de DAAMS & FREUDENTHAL (1988) per a *Apocricetus* i el mètode de MARTÍN SUÁREZ & FREUDENTHAL (1993) per a *Paraethomys*, amb els valors expressats en mil·límetres. La nomenclatura emprada per a la morfologia dentària segueix MANSINO et al. (2014) i OLIVER & PELÁEZ-CAMPOMANES (2013) per *Apocricetus* i VAN DE WEERD (1976) i MILLER (1912) per a *Paraethomys*. A nivell morfològic s'han tingut en compte els millors exemplars conservats, mentre que tots els exemplars obtinguts, inclosos els parcialment erosionats o amb un alt grau de desgast oclusiu, han estat mesurats.

La fauna vertebrada de NB-2

A partir de les restes fòssils obtingudes de forma preliminar s'han identificat un mínim de 16 tàxons diferents (veure la Figura 2 on es mostren els més ben representats). Al voltant del 86 % corresponen a restes de mamífers, aproximadament el 8 % són restes de l'herpetofauna (rèptils i amfibis) i el 6 % restant correspondrien a fòssils d'ocells, principalment falanges no identificables ni a nivell específic ni sovint a nivells taxonòmics superiors.

En el cas dels mamífers, els percentatges de presència dels diferents taxa obtinguts en base al nombre mínim d'individus (NMI) és força aproximat als que es varen obtenir a NB-1 (Figura 3). En el cas de NB-2, tenint en compte la petita mostra examinada, el glírid mostra la major representació en funció al nombre d'húmers (NMI=7) amb un 32 %. Seguidament vindria *Apocricetus* amb un 23 % (NMI=5, en funció del nombre de mandíbules). El tercer en major representació seria el sorícid amb un 18 % (NMI=4, en funció del nombre d'húmers). *Paraethomys* té una presència relativa major que a NB-1, ja que representa el 14 % dels mamífers (NMI=3, en funció del nombre d'húmers), mentre que el lepòrid i el bòvid, el dos taxons que poden assolir les

Figura 2: Mostres del conjunt paleofaunístic de NB-2. a) IMEDEA 109916, mandíbula esquerra d'individu juvenil de *Apocricetus darderi* en vista lateral (superior) i medial (inferior); b) IMEDEA 111809, mandíbula incompleta esquerra d'un individu adult de *Apocricetus darderi* en vista medial; c) IMEDEA 111646, mandíbula esquerra del glírid en vista lateral; d) IMEDEA 109880, crani incomplet de *Paraethomys balearicus* en vista dorsal; e) IMEDEA 111740, maxil·la esquerra d'un individu juvenil del lepòrid en vista ventral; f) IMEDEA 111610, crani incomplet del sorícid en vista dorsal; g) IMEDEA 110686, fragment proximal de fèmur d'un individu juvenil del bòvid en comparativa amb el fèmur (marcat amb *) d'un juvenil de *Myotragus balearicus* del jaciment inèdit de Ca na Biela (Manacor, Mallorca) (IMEDEA 109670), ambdós en vista posterior; h) IMEDEA 109996, vèrtebra dorsal incompleta del bòvid en vista anterior; i) IMEDEA 111611, vèrtebra dorsal d'escurçó pertanyent al complexe d'escurçons orientals (sigles en anglès, OVC, Oriental Vipers Complex); j) IMEDEA 109989, maxil·la de Gekkota; k) IMEDEA 111801, fragment proximal d'un fèmur d'un lacèrtid de gran mida; l) IMEDEA 109795, vèrtebra caudal o postcloacal de colúbrid; m) IMEDEA 109952, isqui d'alítid.
Figure 2: Samples from the NB-2 paleofaunal assemblage. a) IMEDEA 109916, left jaw of a juvenile *Apocricetus darderi* in lateral (superior) and medial (inferior) views; b) IMEDEA 111809, incomplete left jaw of an adult *Apocricetus darderi* in medial view; c) IMEDEA 111646, left mandible of a glirid in lateral view; d) IMEDEA 109880, incomplete skull of *Paraethomys balearicus* in dorsal view; e) IMEDEA 111740, left maxilla of a juvenile leporid in ventral view; f) IMEDEA 111610, incomplete skull of a soricid in dorsal view; g) IMEDEA 110686, proximal femur fragment of a juvenile individual of the bovid in comparison with the femur (market with *) of a juvenile *Myotragus balearicus* from the unpublished Ca na Biela site (Manacor, Mallorca) (IMEDEA 109670), both in posterior view; h) IMEDEA 109996, incomplete dorsal vertebra of the bovid in anterior view; i) IMEDEA 111611, dorsal vertebra of a viper belonging to the Oriental Vipers Complex (abbreviated OVC); i) IMEDEA 109989, maxilla of a Gekkota; k) IMEDEA 111801, proximal fragment of a femur of a large lacertid; l) IMEDEA 109795, caudal or postcloacal vertebra of a colubrid; m) IMEDEA 109952, alitid ischium.

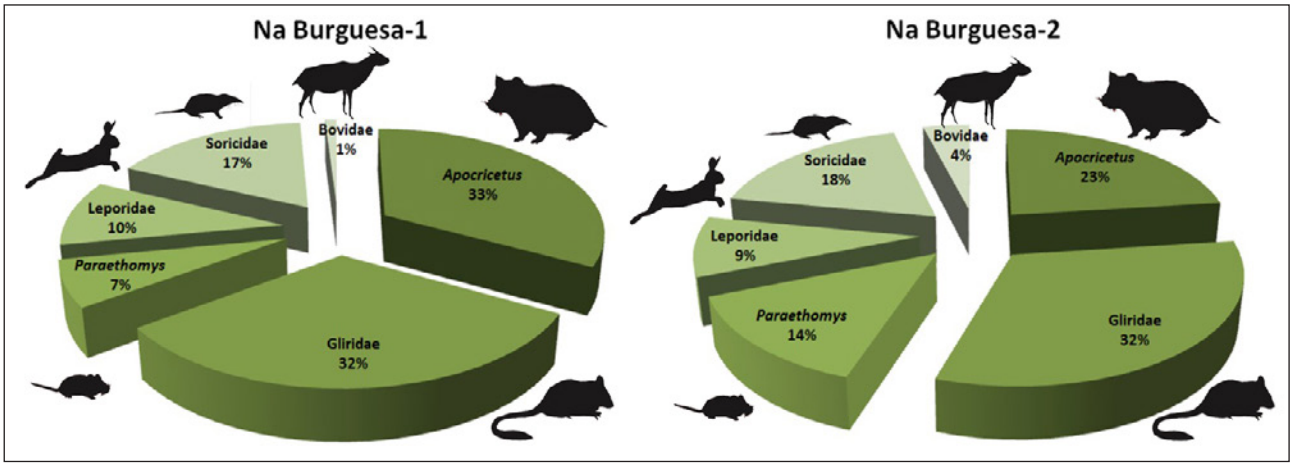


Figura 3: Comparativa entre el jaciment de NB-2 i NB-1 respecte al conjunt de mamífers terrestres identificats en base a les proporcions obtingudes a partir del Nombre Mínim d'Individus (NMI).
Figure 3: Comparison between the NB-2 and NB-1 sites regarding to the set of terrestrial mammals identified based on the proportions obtained from the Minimum Number of Individuals (NMI).

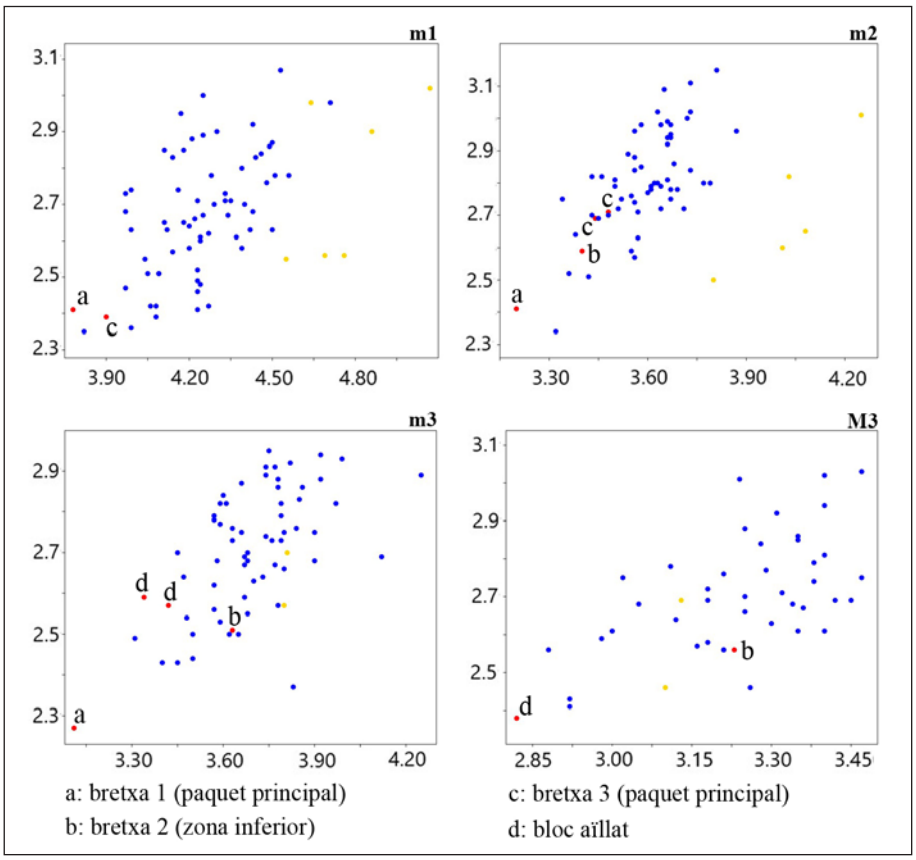


Figura 4: Diagrames bivariants on es representen la dispersió de les mesures realitzades sobre els molars de *Apocricetus* de NB-2 (vermell) i de NB-1 (blau) i de *T. macpheei* del CdR (groc). A l'eix X s'indiquen les longituds i a l'eix Y les amplades dels molars, en mm.
Figure 4: Bivariate diagrams showing the dispersion of measurements taken on the molars of *Apocricetus* from NB-2 (red) and NB-1 (blue) and *T. macpheei* from CdR (yellow). Molar lengths are indicated in the X-axis, and widths are represented on the Y-axis, both in mm.

majors mides, són els més mal representats i majoritàriament ho són per exemplars juvenils, talment com succeeix a NB-1. El primer es situaria amb un 9 % (NMI=2, en funció del nombre de fèmurs) i el segon amb un 4 % (NMI=1, en base a un fragment proximal de fèmur i una vèrtebra toràcica molt erosionada).

Anàlisi preliminar dels molars de *Apocricetus* i *Paraethomys*

En aquesta aproximació preliminar al contingut de vertebrats de NB-2, en primer lloc, s'ha volgut valorar la relació entre les diferents mostres analitzades (bretxa 1-3, 2, i bloc aïllat), donada la diferent provinença respecte al dipòsit principal, sense deixar de costat que es tracta d'una mostra reduïda. Mitjançant diagrames bivariants de dispersió, s'ha comprovat que les mides dels molars de *Apocricetus* i *Paraethomys* (punts vermells de les figures 4 i 5, respectivament) de les diferents mostres es troben relativament pròximes, fet que apunta que són coetanis i podrien ser tractats conjuntament com a una població temporalment acotada. A més, als diagrames s'han inclòs les dades dels espècimens de *A. darderi* i *P. balearicus* de NB-1 (punts blaus, Figures 4 i 5, respectivament) i de *T. macpheei* del CdR (punts grocs, Figura 4).

En el cas del *Apocricetus* de NB-2 és pot observar que els molars es troben concentrats a partir de la meitat inferior (cas dels m2s, m3s i M2s) o considerablement per sota (cas dels m1s) del núvol de punts dels molars de NB-1. Aquesta aproximació de mides entre les diferents mostres de NB-2 denota

una població presumiblement de menor mida que les de NB-1 i CdR. També es pot observar que les proporcions dels molars de NB-2 mantenen les observades a NB-1, ja que mantenen una dispersió de punts molt semblant (seguirien una recta de regressió amb un pendent similar), mentre que les del CdR mostren un important canvi, especialment en els m1s i els m2s (desplaçament del núvol de punts dintre del sistema de coordenades).

Respecte a la distribució de les mesures del *Paraethomys* de NB-2, en comparació amb les de NB-1, es pot veure que el núvol de punts no mostra cap conjunt que quedi aïllat de la resta d'una manera destacable i, en general, es mostra força coincident amb el núvol de punts de NB-1, sent ambdues poblacions molts semblants, tant en mides com en proporcions.

Considerant que el conjunt de dades obtingut de cada bretxa de NB-2 corresponen a una mateixa població, a efectes comparatius presentam a la Figura 6 els diagrames de caixa de cadascuna de les poblacions conegudes (NB-2, NB-1 i CdR). Les mesures utilitzades han estat la longitud total del molar, l'amplada del molar i la relació longitud/amplada (Figura 6). Pel que fa a *Apocricetus*, es disposa de molars inferiors (m1, m2 i m3) i tant sols de tercers molars superiors (M3). Les mostres de m1s i M3s són molt reduïdes i la seva anàlisi i interpretació és molt preliminar. Respecte a *Paraethomys*, s'ha disposat de tots els molars inferiors (m1, m2 i m3) i superiors (M1, M2 i M3), encara que la mostra dels molars inferiors és molt menor i, per tant, aportaran una menor resolució de la informació taxonòmica d'aquesta població fins que no es disposi de més material. Els resultats exposats a la Figura 6 s'explicaran a continuació per a cada un dels rosegadors analitzats

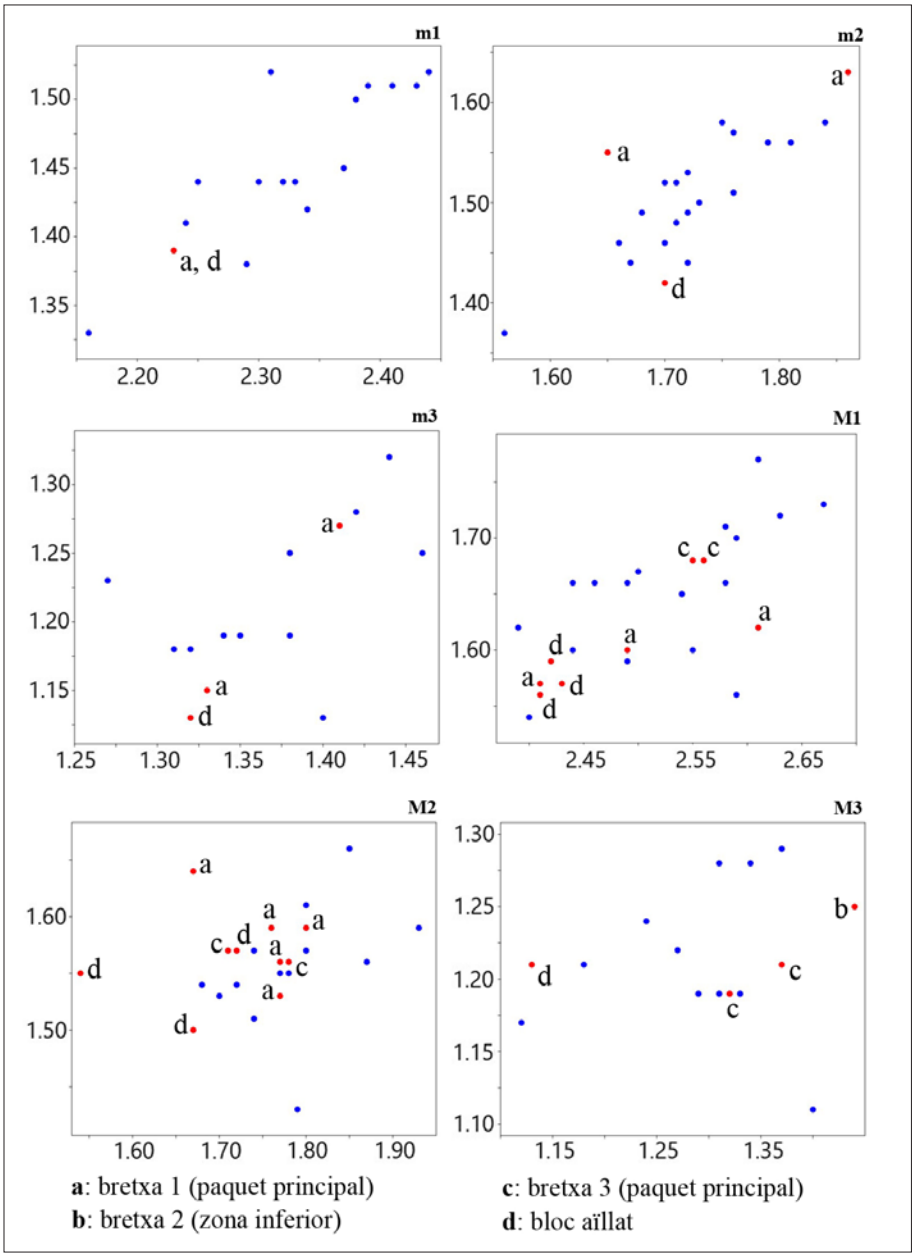


Figura 5: Diagrames bivariants on es representa la dispersió de les mesures realitzades sobre els molars de *Paraethomys* de NB-2 (vermell) i de NB-1 (blau). A l'eix X s'indiquen les longituds i a l'eix Y les amplades dels molars, en mm.

Figure 5: Bivariate diagrams showing the dispersion of measurements taken on the molars of *Paraethomys* NB-2 (red) and NB-1 (blue). Molar lengths are indicated in the X-axis, and widths are represented on the Y-axis, both in mm.

Apocricetus

Descripció preliminar del molars: els dos m1s del *Apocricetus* de NB-2 presenten una cresta simple a l'anterocònid. Un d'ells (IMEDEA 109916) té anterolòfid ligual i labial, mentre que l'altre exemplar IMEDEA 111725 sols en presenta un anterolòfid labial reduït. En ambdós casos l'anterolofúlid es doble i convergent. Presenten prelòfid i manquen de mesolòfid. L'ectomesolòfid també és absent en ambdós casos. Presenten metalofúlid i hipolofúlid anterior. Els m2s tenen únicament anterolòfid labial. El mesolòfid és absent en tots els exemplars, així com l'ectomesolòfid. Presenten únicament un

metalofúlid anterior. Els m3s presenten un anterolòfid labial i lingual ben desenvolupats en IMEDEA 111809 i 111853, a l'exemplar IMEDEA 111723 el lingual és incipient i en IMEDEA 111852 sols presenta el labial. El mesolòfid és present als exemplars IMEDEA 111809 i 111853. Tots manquen de ectomesolòfid. Presenten un metalofúlid anterior, tot i que l'espècimen IMEDEA 111852 mostra un metalofúlid posterior incipient sobre la cúspide del metacònid. Els dos M3s disponibles presenten únicament un anterolof labial. Ambdós tenen protolòful posterior i un d'ells (IMEDEA 111851) presenta un protolòful anterior curt sobre la cúspide del paraconus, sense arribar a dividir l'anterosinus.

Els diagrames de caixa dels molars inferiors del *Apocricetus* de NB-2 (Figura 6) mostren unes medianes, tant de longitud com d'amplada, que queden fora i clarament per sota del rang interquartílic del *Apocricetus* de NB-1 i encara més del *T. macpheei* del CdR, amb l'excepció de l'amplada dels m2s que és coincident amb els molars de CdR. En tots el casos el límit inferior de les longituds dels molars inferiors de NB-2 es troba per sota dels límits inferiors tant de NB-1 com del CdR, mentre que sols l'amplada dels m3s de NB-2 quedaria per sota de la resta de les poblacions analitzades. Respecte a la relació longitud/amplada és pot observar que les medianes de NB-2 són força coincidents amb les de NB-1 i els rangs interquartílics de NB-2 entren dintre dels valors mostrats per NB-1 per als m1s i els m2s, mentre que els m3s de NB-2 mostren una major dispersió de les dades, però igualment són força coincidents. En canvi, els valors mostrats pels molars inferiors de *T. macpheei*, presenten unes medianes de la relació longitud/amplada que es troben clarament per damunt de les de NB-1 i NB-2 (Figura 6).

Respecte als M3s, es pot observar que les medianes de la longitud i de l'amplada del *Apocricetus* de NB-2 també queden per sota del rang interquartílic dels M3s de *A. darderi* de NB-1, mentre que el rang interquartílic de la longitud dels M3s de *T. acpheei* entren dintre del rang dels M3s de NB-2 i l'amplada quedaria lleugerament per damunt del rang interquartílic dels de NB-2 (Figura 6).

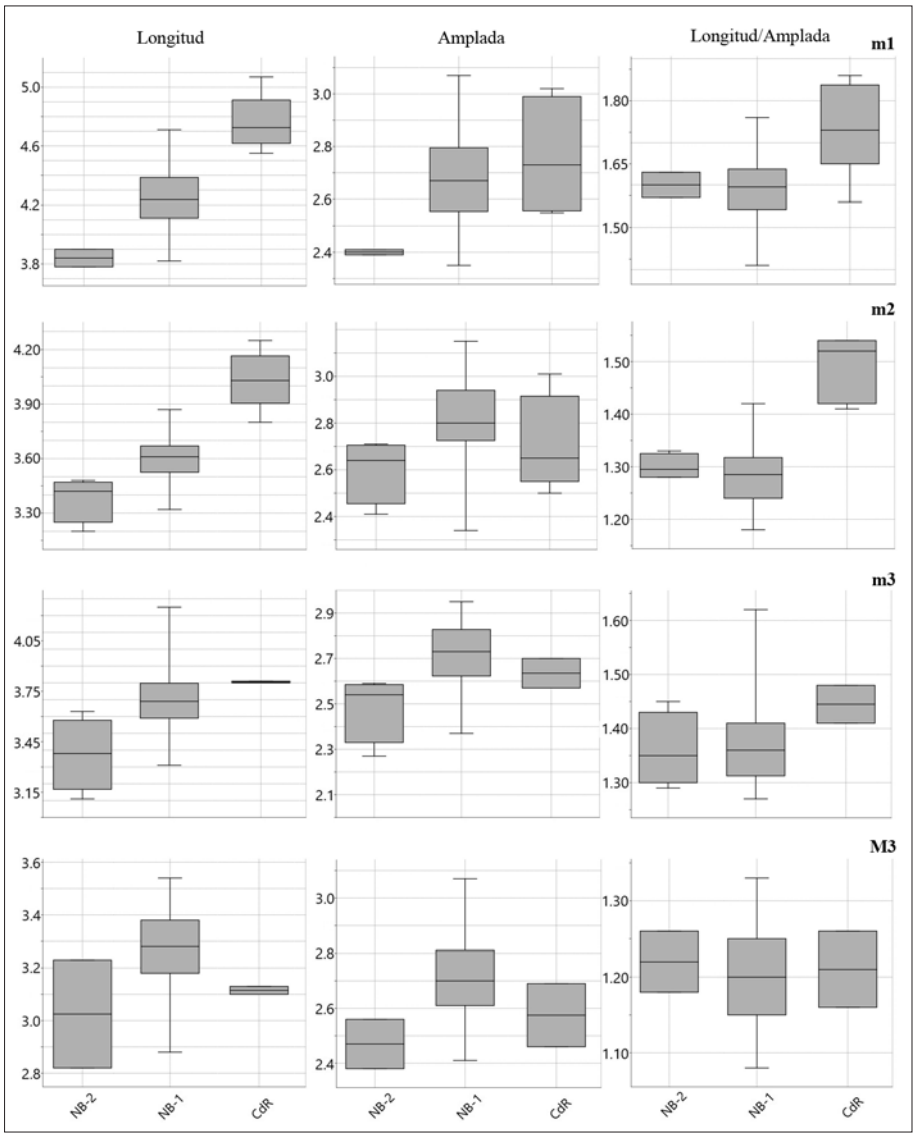


Figura 6: Diagrames de caixa dels molars inferiors i dels tercers molars superiors de *Apocricetus* de NB-2, de NB-1 i de *T. macpheei* de CdR, distribuïts al llarg de l'eix X. A l'eix Y es representa la longitud, l'amplada i la relació longitud/amplada en mm.
Figure 6: Box plots of the lower molars and upper third molars of *Apocricetus* from NB-2, NB-1 and *T. macpheei* from CdR, distributed along the X-axis. In the Y-axis length, width and length/width ratio in mm are indicated.

Paraethomys

Descripció preliminar dels molars: l'únic m1 analitzable en detall (mandíbula IMEDEA 111854) presenta un cíngol anterior molt reduït. La forma del anterocònid és molt simètrica. Sembla presentar dues cúspides accessòries al cíngol labial. Els m2s presenten una cúspide anterolabial de morfologia oval. La cresta longitudinal és curta encara que la de l'exemplar IMEDEA 111304 arriba a la base del protocònid-entocònid. Els exemplars observats generalment no mostren cúspides accessòries o són molt rudimentàries. Els m3s mostren un anterocònid lleugerament asimètric i no

presenten cúspides accessòries. Generalment, hi ha molts d'aquests molars inferiors (m1, m2 i m3) amb un estat avançat de desgast.

Respecte els molars superiors, els M1s presenten la típica connexió estreta entre els tubercles t1s i t2s i més ample entre els t2s i t3s. Generalment presenten un esperó dirigit del t1 al t5 i del t3 al t6. Poden presentar un t12. Cap dels exemplars observats mostra una cúspide extra entre el t1 i el t4. Únicament l'exemplar IMEDEA 111855 podria ser que en presentés una, però es troba massa desgastat com per poder observar-ho clarament. Els M2s no presenten cresta anterior. Generalment hi ha un predomini de t1 i t3 amb esperons dirigits cap a la connexió t4-t5 i t5-t6, respectivament. Poden presentar t9. El t12 no s'ha observat a cap dels exemplars. Els M3s observats no presenten t3. Molts dels espècimens observats mostren crestes que connecten el t8 amb el t4-t5-t6. Generalment, tal com passa amb els molars inferiors, hi ha molts dels molars superiors (M1, M2 i M3) que presenten un estat avançat de desgast.

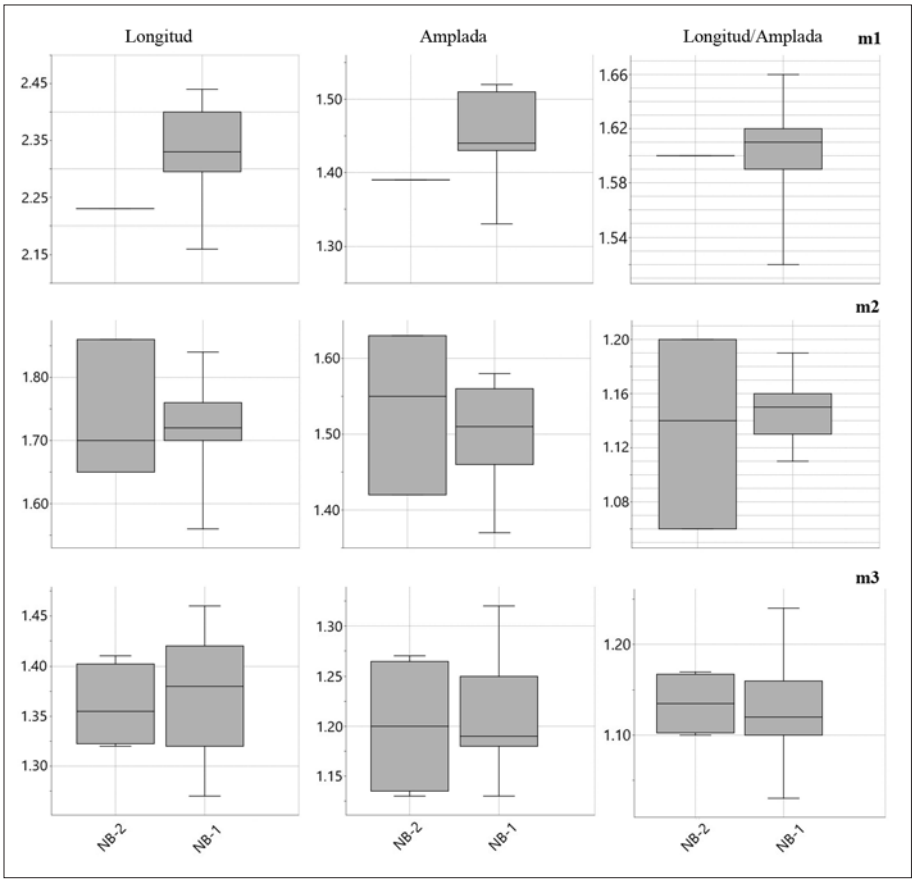


Figura 7: Diagrames de caixa dels molars inferiors de *Paraethomys* de NB-2 i de NB-1, distribuïts al llarg de l'eix X. A l'eix Y es representa la longitud, l'amplada i la relació longitud/amplada en mm.
Figure 7: Box plots of the lower molars of *Paraethomys* from NB-2 and NB-1, distributed along the X-axis. In the Y-axis length, width and length/width ratio in mm are indicated.

D'altra banda, als diagrames de caixa s'ha pogut observar que els molars, tant superiors com inferiors, no mostren unes diferències tan marcades com en el cas del *Apocricetus* de NB-2 respecte el de NB-1. Les medianes dels molars inferiors del *Paraethomys* de NB-2, amb excepció del m1 (representat per únicament dos molars, IMEDEA 111307 i 111854), cauen dintre del rang interquartílic dels molars del *Paraethomys* de NB-1, tant en longitud com en la relació longitud/amplada. No obstant això, el límit superior del rang interquartílic dels m2s de NB-2 és superior al límit màxim de la distribució dels m2s de NB-1 (Figura 7).

Pel que respecta a les medianes dels molars superiors del *Paraethomys* de NB-2 mostren una certa variabilitat (Figura 8). Els M1s tenen una mediana quasi per sota (longitud) o per sota (amplada) del rang interquartílic dels M1s de NB-1, mentre que la mediana en la relació longitud/amplada cau en el tercer quartil dels M1s de NB-1. En el cas dels M2s de NB-2 les medianes, tant de la longitud, de l'amplada com de la relació d'ambdues mesures, cauen dintre del rang interquartílic dels M2s de NB-1. Les mínimes de la longitud i de la longitud/amplada dels M2s del *Paraethomys* de NB-2 són inferiors als mínims de la població de NB-1. I en el cas dels M3s de NB-2, la mediana de la longitud i de la relació longitud/amplada es troba lleugerament per sobre del límit interquartílic dels molars de NB-1. Els valors màxims de la longitud es donen amb els exemplars de NB-2, mentre que els mínims de la relació longitud/amplada es troben per sota dels de NB-1.

Discussió

Els llinatges de *Apocricetus* i *Paraethomys* són considerats com uns dels més rellevants per establir el marc biostratigràfic entre el miocè superior i el pliocè superior continental al sud d'Europa (FREUDENTHAL et al., 1998; GARCÍA-ALIX et al., 2008a, 2008c; MINWER-BARAKAT et al., 2012; RUIZ-SÁNCHEZ et al., 2014; PIÑERO & AGUSTÍ, 2017; PIÑERO & VERZI, 2020).

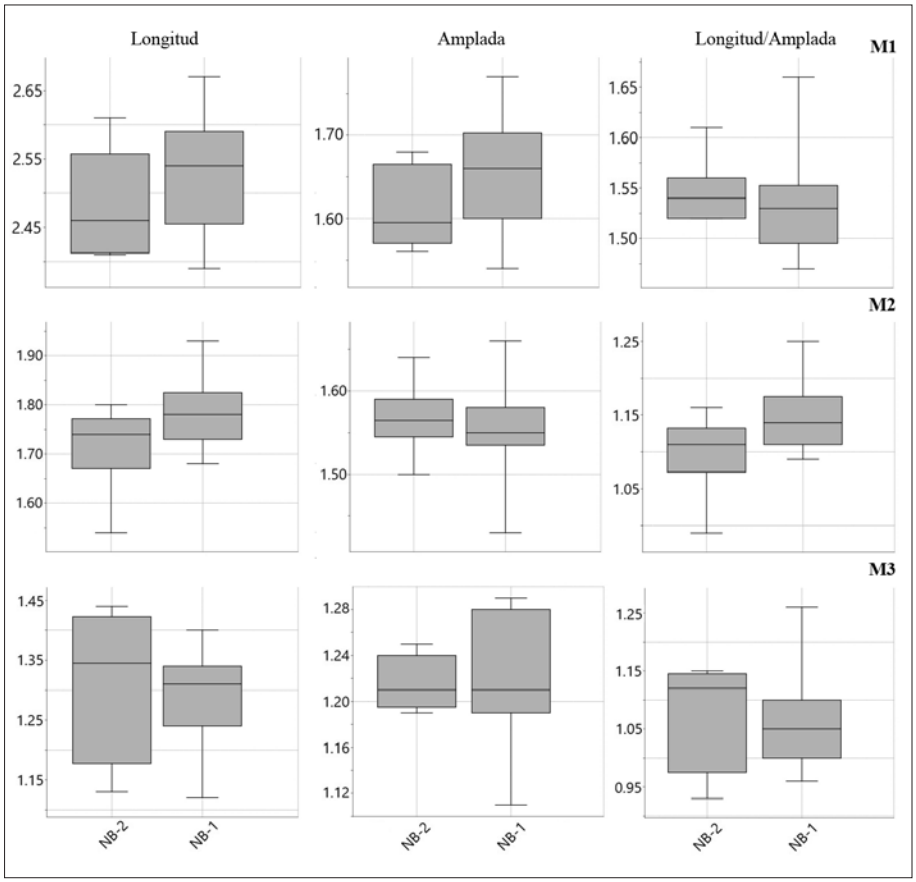


Figura 8: Diagrames de caixa dels molars superiors de *Paraethomys* de NB-2 i de NB-1, distribuïts al llarg de l'eix X. A l'eix Y es representa la longitud, l'amplada i la relació longitud/amplada en mm.
Figure 8: Box plots of the upper molars of *Paraethomys* from NB-2 and NB-1, distributed along the X-axis. In the Y-axis length, width and length/width ratio in mm are indicated.

Al llarg de l'evolució d'aquest dos rosegadors es produeix un augment de mida (FREUDENTHAL et al., 1998; GARCÍA-ALIX et al., 2008b) i diversos canvis morfològics que permeten diferenciar les espècies de cada llinatge (MANSINO et al., 2014; PIÑERO & VERZI, 2020).

La troballa de representants insulars d'aquests dos gèneres a NB-1 va proporcionar un important suport a la proposta de l'origen messinià de la fauna de *Myotragus*, que a més, presentaria una regió d'origen localitzada predominantment al llevant de la península Ibèrica. Tant *A. darderi* com *P. balearicus* mostren indicis d'una evolució en condicions clarament d'insularitat, especialment el primer, que representa l'espècie més gran del gènere. També presenten trets morfològics que els diferencien de les espècies continentals, com són, entre d'altres, la gran variabilitat morfològica dels anterocònids i del nombre d'anterolofúlids en els m1s de *A. darderi*, i la hipsodòncia dels molars de *P. balearicus*, més marcada que la dels exemplars continentals de *Paraethomys*, i la presència d'un cíngol anterior als m1s, un tret inusual per aquest gènere (TORRES-ROIG et al., 2019).

Morfologia

A través d'aquestes primeres mostres de molars del *Apocricetus* del jaciment de NB-2 podem dir que són morfològicament coincidents amb les de *A. darderi* de NB-1, donada l'elevada variabilitat morfològica documentada en aquesta espècie (TORRES-ROIG et al., 2017a). Aquesta variabilitat també es documenta en les espècies continentals, especialment amb *A. alberti*, del qual també es disposa de bones mostres (MANSINO et al., 2014). Tot això fa difícil saber quines tendències evolutives segueix aquest llinatge al llarg del temps. Si es té en compte a *T. macpheei*, presumpte descendent d'*A. darderi*, es podria dir que hi ha una tendència a la subdivisió de l'anterocònid, i l'aparició d'altres crestes impròpies en *Apocricetus,* com és la presència de mesolòfid en els m1s, molt rara en *A. darderi* (al voltant del 4 % dels m1s). Els dos m1s de NB-2 presenten una cresta simple a l'anterocònid tal com s'observa al 60 % dels m1s de *A. darderi*, mentre que en la resta l'anterocònid està subdividit en dos o tres lòbuls. En quant als m2s de NB-2, destaca l'absència d'anterolòfids linguals, mentre que el 13 % dels m2s de NB-1 sí que el presenten. Els m3s de NB-2 destaquen pel fet de que el 50 % (dos dels quatre molars) no presenten mesolòfid quan el 100 % dels m3s de NB-1 sí que en tenen (TORRES-ROIG et al., 2017a). Dels dos M3s disponibles destaca que cap d'ells presenti anterolof lingual, mentre que pràcticament el 40 % dels M3s de NB-1 en presenten. A més, tan sols en un d'aquests molars de NB-2 (IMEDEA 111851) s'observa un protolòful anterior, encara que aquest és molt curt i, en canvi, pràcticament el 50 % dels M3s de NB-1 el tenen completament format aïllant l'anterosinus.

Pel que fa a la morfologia dels molars del *Paraethomys* de NB-2, l'únic m1 analitzable a nivell morfològic (IMEDEA 111854) mostra un cíngol anterior summament reduït en comparació amb el que presenten els m1s de *P. balearicus* de NB-1. Aquest és un caràcter que no es menciona en les poblacions continentals d'aquest llinatge (TORRES-ROIG et al., 2019). En els m2s sembla que el

nombre de cúspides accessòries sigui menor en els exemplars de NB-2, ja que o bé no en presenta o bé són rudimentàries o bé es troben completament desgastades. L'asimetria de la forma del anterocònid dels m3s de NB-2 sembla no ser tant marcada com l'observada en els m3s de NB-1. Pel que respecta als molars superiors no s'han observat trets destacables i/o diferenciables respecte els molars de *P. balearicus* de NB-1, i tant sols es podria fer menció a l'absència de cúspides addicionals entre el t1 i el t4 dels vuit M1s de NB-2, mentre que en quatre dels 19 M1s de NB-1 és present.

Mides

La tendència contínua en l'augment de la mida amb el temps està ben documentada al llinatge del *Apocricetus* continental (FREUDENTHAL et al., 1998). Tot i que la mida s'ha utilitzat àmpliament com a indicador per a la identificació d'espècies d'aquest llinatge, el rang de mida d'algunes espècies queda solapada amb els seus avantpassats i descendents immediats, especialment en les formes més basals (*A.* aff. *plinii - A. plinii - A. alberti*, del miocè superior). En conseqüència, la mida no és el millor criteri per discriminar les espècies de *Apocricetus*, excepte per a les espècies més recents (*A. barrierei* i *A. angustidens*, del pliocè) (MANSINO et al. 2014; RUIZ-SÁNCHEZ et al. 2014). El llinatge mallorquí és molt més gran que qualsevol dels *Apocricetus* continentals a causa de la seva evolució insular i presumiblement les seves formes més basals presentaran unes mides que s'aniran aproximant a les de les formes continentals.

Les mides observades en els diagrames de caixa dels molars del *Apocricetus* de NB-2 són significativament menors, tant en longitud com en amplada, a les de NB-1; mentre que les proporcions es mantenen entre NB-2 i NB-1 en comparació amb *T. macpheei* del CdR. Aquesta diferència en la mida entre els *Apocricetus* de NB-1 i NB-2 seria el principal indici que ens permet deduir que el nou dipòsit fossilífer pugui ser lleugerament anterior al de NB-1.

Pel que fa als llinatges europeus de *Paraethomys* també es va observar un augment de la mida amb el temps. GARCÍA-ALIX et al. (2008c) van registrar aquest augment de mida des de les poblacions més primerenques (turolià tardà, miocè superior) fins a les darreres (ruscinià inicial) de *P. meini* a la conca de Granada. De la mateixa manera, PIÑERO & AGUSTÍ (2017) van reconèixer un augment de mida des de les primeres poblacions de *P. meini* fins a *P.* aff. *abaigari* a la conca de la Fortuna, del qual finalment *P.* aff. *abaigari* ha estat identificat com una nova espècie, *P. baeticus* (PIÑERO & VERZI, 2020).

El *Paraethomys* de NB-2 no mostra diferències significatives respecte a la població de *P. balearicus* de NB-1, especialment entre els segons i tercers molars tant inferiors com superiors, encara que les mides màximes dels m2s i dels M3s es registren als exemplars de NB-2. Aquet fet podria indicar una tendència a la reducció d'aquests molars al llarg del temps en contraposició a la resta de molars. Aquesta tendència progressiva on es produeix una pèrdua d'importància d'aquest molars en la sèrie dental es contrarestada per un augment dels molars precedents. De fet, aquest fenomen es pot observar en els diagrames de caixa entre *A. darderi* i *T. macpheei*, on el segon presenta un augment en la longitud dels primers molars.

Conclusions

La troballa d'aquest dipòsit prop de l'entorn de NB-1, el predomini de petits vertebrats en el registre, les proporcions composicionals i la tipologia del sediment, fan pensar que NB-2 és temporal i tipològicament molt semblant a NB-1, denotant la possible existència d'un antic complexe paleocàrstic del zanclià en la zona de Na Burguesa.

Segons la mostra disponible que es té actualment, en el cas del *Apocricetus* es pot observar un patró dentari lleugerament més simplificat que el que s'observa a la població de NB-1 i unes mides menors que serien congruents amb un estadi més pròxim al de la colonització messiniana. Aquestes dades apunten a que el depòsit de NB-2 seria el jaciment més antic conegut fins ara amb presència de la fauna de *Myotragus*. Respecte a *Paraethomys* no s'han observat diferències tan significatives ni a nivell de mides ni morfològic. Aquest fet no denota una contradicció en la proposta que es presenta, sinó que és esperable donat que quan es produeix la colonització d'illes per part de més d'un rosegador, sembla que el fenomen de gegantisme és dona sols en un únic llinatge.

Finalment, tan sols volem remarcar que aquests resultats són molt preliminars i que algunes d'aquestes observacions poden variar rere l'exhumació de nous fòssils a partir de la dissolució de més blocs de bretxes obtingudes a NB-2. A més, l'obtenció de més restes d'aquest nou dipòsit pot ajudar a dilucidar la identitat taxonòmica d'altres taxons presents i pendents d'estudi del jaciment de NB-1.

Agraïments

Voldríem mostrar el nostre agraïment al Dr. Jaume Cardell i a la brigada del Consell de Mallorca (Direcció General de Patrimoni de Consell de Mallorca) per facilitar-nos l'obtenció de les mostres de NB-2. El Dr. Alejandro Valenzuela va realitzar la fotogrametria de l'aflorament del dipòsit. Rosario Cañas (IMEDEA) ha fet algunes de les fotografies presentades a la Figura 2. També voldríem agrair els valuosos comentaris sobre la primera versió del treball per part dels revisors. Amb tot el nostre afecte, dedicam aquesta nota preliminar a honorar la memòria del nostre company Angel Ginés, amb el nostre reconeixement per la seva llarga, original i productiva trajectòria espeleològica i científica.

Bibliografia

AGUSTÍ, J.; BOVER, P. & ALCOVER, J.A. (2012): A new genus of endemic cricetid (Mammalia, Rodentia) from the late Neogene of Mallorca (Balearic Islands, Spain). *Journal of Vertebrate Palaeontology*, 32: 722-726.

ALCOVER, J.A.; MOYÀ-SOLÀ, S. & PONS-MOYÀ, J. (1981): *Les Quimeres del Passat. Els Vertebrats Fòssils del Plio-Quaternari de les Balears i Pitiüses*. *Monografies Cientifiques*, 1. Editorial Moll. 260 pàgs. Palma.

BAILON, S.; BOISTEL, R.; BOVER, P. & ALCOVER, J.A. (2014): *Maioricalacerta rafelinensis*, gen. et sp. nov. (Squamata, Lacertidae), from the early Pliocene of Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean Sea). *Journal of Vertebrate Paleontology*, 34: 318–326.

BAILON, S.; BOVER, P.; QUINTANA, J. & ALCOVER, J.A. (2010): First fossil record of *Vipera* Laurenti 1768 "Oriental vipers complex" (Serpentes: Viperidae) from the Early Pliocene of the western Mediterranean islands. *Comptes Rendus Palevol*, 9: 147–154.

BATE, D.M.A. (1909): A new artiodactyle from Majorca. *Geological Magazine*, N. S., Dec. 5, 6: 385-388.

BATE, D.M.A. (1914): The Pleistocene ossiferous deposits of the Balearic Islands. *Geological Magazine*, N. S., Dec. 6, 1: 347-354.

BATE, D.M.A. (1918): On a new genus of extinct muscardine rodent from the Balearic Islands. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 88: 209-222.

BATE, D.M.A. (1944): Pleistocene Shrews from the larger western Mediterranean islands. *Annals and Magazine of Natural History*, Ser. 11, 11: 738-769.

BAUZÁ, J. (1946): Hallazgo del *Lophiotherium* cf. *cervulum* P. Gervais en los lignitos de Lloseta. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 44: 566-568.

BOVER, P.; QUINTANA, J.; AGUSTÍ, J.; BAILON, S. & ALCOVER, J.A. (2007): Caló den Rafelino: an Early Pliocene site in Mallorca, Western Mediterranean. In: *Libro de Resúmenes del VII Simposio Internacional de Zoología*, Topes de Collantes, Sancti Spiritus, Cuba, pp. 119.

BOVER, P.; ROFES, J.; BAILON, S.; AGUSTÍ, J.; CUENCA-BESCÓS, G.; TORRES, E. & ALCOVER, J.A. (2014). The late Miocene/early Pliocene vertebrate fauna from Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean): an update. *Integrative Zoology*, 9: 183-196.

DAAMS, R. & FREUDENTHAL, M. (1988): Cricetidae (Rodentia) from the type Aragonian; the genus *Megacricetodon*. In: FREUDENTHAL, M. (ed.) *Biostratigraphy and paleo-ecology of the Neogene micromammalian faunas from the Calatayud-Teruel Basin (Spain)*. *Scripta Geologica*, spec issue, 1, pp: 39-132. NCB Naturalis. Leiden.

FREUDENTHAL, M.; MEIN, P. & MARTÍN-SUÁREZ, E. (1998): Revision of Late Miocene and Pliocene Cricetinae (Rodentia, Mammalia) from Spain and France. *Treballs del Museu de Geologia de Barcelona*, 7: 11-93.

GARCÍA-ALIX, A.; MINWER-BARAKAT, R.; MARTÍN-SUÁREZ, E. & FREUDENTHAL, M. (2008a): Cricetidae and Gliridae (Rodentia, Mammalia) from the Miocene and Pliocene of southern Spain. *Scripta Geologica*, 136: 1-37.

GARCÍA-ALIX, A.; MINWER-BARAKAT, R.; MARTÍN-SUÁREZ, E. & FREUDENTHAL, M. (2008c): Muridae (Rodentia, Mammalia) from the Mio-Pliocene boundary in the Granada Basin (southern Spain). Biostratigraphic and phylogenetic implications. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 248: 183-215.

GARCÍA-ALIX, A.; MINWER-BARAKAT, R.; MARTÍN, J.M.; MARTÍN-SUÁREZ, E. & FREUDENTHAL, M. (2008b): Biostratigraphy and sedimentary evolution of Late Miocene and Pliocene continental deposits of the Granada Basin (southern Spain). *Lethaia*, 41: 431-446.

KOTSAKIS, T. (1981): Le lucertole (Lacertidae. Squamata) del Pliocene. Pleistocene e Olocene delle Baleari. *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 25: 135-150.

MANSINO, S.; RUIZ-SANCHEZ, F.J.; FREUDENTHAL, M. & MONTOYA, P. (2014): A new approach to the Late Miocene-Early Pliocene forms of the genus *Apocricetus*. *Apocricetus alberti* (Rodentia, Mammalia) from Venta del Moro (Cabriel Basin, Spain). *Proceedings of the Geologists' Association*, 125: 392-405.

MARTÍN-SUAREZ, E. & FREUDENTHAL, M. (1993): Muridae (Rodentia) from the lower Turolian of Crevillente (Alicante, Spain). *Scripta Geologica*, 103: 65–118.

MILLER, G.S. (1912): *Catalogue of the mammals of Western Europe (Europe exclusive of Russia) in the collection of the British Museum*. British Museum of Natural History. 1019 pàgs. London.

MINWER-BARAKAT, R.; GARCÍA-ALIX, A.; MARTÍN-SUÁREZ, E.; FREUDENTHAL, M. & VISERAS, C. (2012): Micromammal biostratigraphy of the Upper Miocene to lowest Pleistocene continental deposits of the Guadix basin, southern Spain. *Lethaia*, 45: 594-614.

OLIVER, A. & PELÁEZ-CAMPOMANES, P. (2013): *Megacricetodon vandermeuleni*, sp. nov. (Rodentia, Mammalia), from the Spanish Miocene: a new evolutionary framework for *Megacricetodon*. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 33: 943-955.

PIÑERO, P. & AGUSTÍ, J. (2017): The rodent succession in the Sifón de Librilla section (Fortuna Basin, SE Spain): implications for the Mio-Pliocene boundary in the Mediterranean terrestrial record. *Historical Biology*, 3: 279-321.

PIÑERO, P. & VERZI, D.H. (2020): A new early Pliocene murine rodent from the Iberian Peninsula and its biostratigraphic implications. *Acta Palaeontologica Polonica*, 65: 719-731.

QUINTANA, J.; BOVER, P.; ALCOVER, J.A.; AGUSTÍ, J. & BAILON, S. (2010): Presence of *Hypolagus* Dice, 1917 (Mammalia, Lagomorpha) in the Neogene of the Balearic Islands (Western Mediterranean): Description of *Hypolagus balearicus* nov. sp. *Geobios*, 43: 555-567.

RUIZ-SÁNCHEZ, F.J.; FREUDENTHAL, M.; MANSINO, S.; CRESPO, V.D. & MONTOYA, P. (2014): *Apocricetus barrierei* (Rodentia, Mammalia) from La Bullana 2B and La Bullana 3 (Cabriel Basin, Valencia, Spain). Revision of the Late Miocene-Early Pliocene forms of the genus *Apocricetus*. *Paläontologische Zeitschrift*, 88: 85-98.

SANCHIZ, B. & ADROVER, R. (1977): Anfibios fósiles del Pleistoceno de Mallorca. *Doñana Acta Vertebrata*, 4: 5-25.

TORRES-ROIG, E.; AGUSTÍ, J.; BOVER, P. & ALCOVER, J.A. (2017a): A new giant cricetine from the basal Pliocene of Mallorca (Balearic Islands, western Mediterranean): biostratigraphic nexus with continental mammal zones. *Historical Biology*, 31: 559-573.

TORRES-ROIG, E.; BAILON, S.; BOVER, P. & ALCOVER, J.A. (2017b): An early Pliocene anuran assemblage from Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean): palaeobiogeographic and palaeoenvironmental implications. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 97: 315-327.

TORRES-ROIG, E.; PIÑERO, P.; AGUSTÍ, J.; BOVER, P. & ALCOVER, J.A. (2019): First evidence of endemic Murinae (Rodentia, Mammalia) in the early Pliocene of the Balearic Islands (western Mediterranean). *Geological Magazine*, 156: 1742-1750.

TORRES-ROIG, E. (2021): Vertebrats post-messinians de Mallorca i Eivissa (Illes Balears, Mediterrània occidental): descripció, origen i extinció d'espècies. Tesi Doctoral inèdita. Universitat de Barcelona. 258 pàgs. Barcelona.

VAN DE WEERD, A. (1976): Rodent faunas of the Mio-Pliocene continental sediments of the Teruel-Alfambra region, Spain. *Utrecht Micropaleontological Bulletins, Special Publication*, 2: 1-217.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Àngel Ginés (1950-2024). Una vida dedicada a l'espeleologia científica, a la seva difusió i a la docència

Joan J. FORNÓS [1, 2] i Joaquín GINÉS [1, 2]

[1] Grup de Recerca Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca. Email: joan.fornos@uib.cat
[2] Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca.

Abstract

Àngel Ginés i Gracia, biologist by profession dedicated to teaching, and speleologist by vocation, passed away last January 2024 at the age of 74. He had an intense life dedicated to the study and dissemination of any branch related to karst sciences, which he entered at a very young age. His dedication was not limited to the strictly speleological world but interacted symbiotically with the academia both in relation to teaching and research. Its activities are complemented by a strong involvement with the entities related to speleology and natural sciences (SHNB, MBCN, FBE, SEB, SEDECK) both in terms of their management and in the dissemination of knowledge, with membership in editorial committees or management of journals (Bolletí de la SHNB, Papers de la SEB, Endins, Boletín de la SEDECK). His long scientific career, which covers a wide range of topics, such as the description and topography of caves, speleogenesis, the role of CO_2, the recognition of sea level oscillation based on the presence of phreatic speleothems in coastal caves, the study of karren morphologies, biospeleology, or the history of science, led him to publish more than 200 papers both nationally and internationally in the best journals as well as book chapters. He did not limit himself to the publication of his research or the edition of monographic books, but also widely disseminated his research in congresses and meetings all over the world. This intense activity led him to collaborate with prestigious international scientists of recognized prestige among whom, clearly, we can include him.

Resum

Àngel Ginés i Gracia, biòleg de professió dedicat a la docència i espeleòleg de vocació, traspassà el passat mes de gener de 2024 a l'edat de 74 anys. La seva intensa vida estigué dedicada a l'estudi i la divulgació de qualsevol branca relacionada amb les ciències del carst en les quals hi entrà ja de molt jovenet. La seva dedicació no es limità al món estrictament espeleològic sinó que interaccionà de forma simbiòtica amb el món acadèmic, tant en relació a la docència com a la recerca. Les seves activitats es complementaren amb una forta implicació amb les entitats dedicades a l'espeleologia i a les ciències naturals (SHNB, MBCN, FBE, SEB, SEDECK), tant pel que fa a la seva gestió, com en la difusió dels coneixements, o la pertinença a comitès editorials i la direcció de revistes científiques (Bolletí de la SHNB, Papers de la SEB, Endins, Boletín de la SEDECK). La llarga trajectòria científica desenvolupada, que abastà una àmplia sèrie de temàtiques, com són la descripció i topografia de cavitats, l'espeleogènesi, el paper del CO_2, el reconeixement de l'oscil·lació del nivell marí en base a la presència dels espeleotemes freàtics en coves litorals, l'estudi de les morfologies de lapiaz, la bioespeleologia, o la història de la ciència, el dugué a publicar més de 200 treballs, tant a nivell nacional com internacional, en les millors revistes científiques, així com també nombrosos capítols de llibres. No es limità a la publicació de treballs o edició de llibres monogràfics, sinó que també feu una gran difusió de la seva recerca en congressos i reunions d'especialistes per tot el món. Aquesta intensa activitat el dugué a col·laborar amb científics internacionals, de reconegut prestigi, entre els quals, sense cap mena de dubte, el podem incloure.

Fornós, J.J. i Ginés, J. (2024): Àngel Ginés (1950-2024). Una vida dedicada a l'espeleologia científica, a la seva difusió i a la docència.
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 249-264. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 27 novembre 2024; **Revisat:** 2 desembre 2024; **Acceptat:** 6 desembre 2024.
Publicat online: 31 desembre 2024.

Figura 1: Àngel Ginés fotografiat l'any 2006 durant una sortida de camp per la Serra de Tramuntana. (Foto: M. Fiol).
Figure 1: Àngel Ginés photographed in 2006 during a field trip in the Serra de Tramuntana mountains. (Photo: M. Fiol).

Introducció

El 6 de gener de 2024 traspassà de forma sobtada i totalment inesperada, el nostre col·lega, amic, company i germà Àngel (Figura 1), tot produint un gran buit i un enorme impacte en tots els que el coneixíem. N'Àngel ens deixà una forta empremta, per les seves aportacions tant de caire científic, com en les tasques de divulgació i docència, les quals se centraren principalment en del món del carst i l'espeleologia, però sense defugir de qualsevol aspecte que hi estàs relacionat, cosa que el

convertí en un autèntic naturalista i lletraferit (FORNÓS, 2024; VICENS & PONS, 2024). La seva empremta no se centrà exclusivament en l'àmbit naturalístic, sinó que cal destacar-hi un altre aspecte important com era el de la seva qualitat humana, la seva bonhomia i el seu compromís en tot allò relacionat amb la difusió del coneixement. El fet d'estar sempre disposat a donar un cop de mà feu que fos molt estimat per tots els que el coneguérem.

En resum, una vida dedicada a l'ensenyament i a l'espeleologia, en tots els seus vessants. Esperem que aquesta modesta aportació, sigui capaç d'estar a l'alçada del que ell aportà al coneixement del carst, les coves i a la seva difusió.

Un esbós biogràfic

Àngel naixia a Palma el dia 3 d'agost de 1950, fill de pares aragonesos, n'Alejandro nascut a Saragossa i n'Agustina nascuda a Rudilla (Terol). Seria el primer fill de la parella al que s'uniria dos anys més tard el seu germà Joaquín, amb qui durant la resta de la seva vida compartiria el neguit per la natura, l'excursionisme i, molt especialment, el món de l'espeleologia, en particular des del vessant científic.

Acabats els estudis secundaris realitzats al col·legi La Salle de Palma (Figura 2), n'Àngel inicià la carrera de Biologia el curs 1974-75, a la llavors Universitat de Palma de Mallorca, actualment Universitat de les Illes Balears (UIB). Un cop obtinguda la titulació, a la mateixa universitat, l'any 1982 llegí la Tesi de Llicenciatura que duia per títol: *Bioespeleología del karst mallorquín, datos ecológicos preliminares* dirigida pel Dr. Miquel Morey, i obtení el títol de Grau el 18 de gener de 1983. Més endavant es doctorà a la mateixa universitat amb la Tesi Doctoral titulada: *Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica,* dirigida, en aquest cas, pels Drs. Miquel Morey i Joan J. Fornós i que fou llegida el 20 de juliol de 1999, amb la qual aconseguí la màxima qualificació d'Excel·lent *cum laude*. El tema de la seva dissertació estava centrat en l'estudi de l'exocarst de la Serra incidint en l'anàlisi morfomètrica i en les connotacions ecològiques de les formes de lapiaz.

Figura 2: Alumnes del primer curs de batxillerat del col·legi La Salle, de Palma. Àngel apareix situat a la fila de davant, en el quart lloc des del costat esquerre.
Figure 2: Students of the first year of high school at La Salle school, in Palma. Àngel appears in the front row, fourth from the left.

La vida laboral: la docència

La seva vida professional estigué relacionada, com a llicenciat en biologia, amb la docència dins del món de les Ciències Naturals. Des de l'any 1984 fins a la seva jubilació, l'any 2010, exercí com a professor d'ensenyament secundari dins de la branca de Ciències Naturals (Biologia i Geologia), impartint la seva docència de forma itinerant en diversos centres d'Ensenyament Secundari (IES). Així, un cop superada l'oposició a Madrid per entrar a formar part del cos de professorat de secundària (en aquells temps el cos funcionarial de professorat era un cos únic a nivell de l'Estat), estigué des de l'any 1984 fins al 1990 en expectativa de destí rodant per diversos centres de la península (Alcañíz) i de les Illes (Ciutadella de Menorca, i Pollença a Mallorca). L'any 1990 fou destinat finalment a l'IES Guillem Colom Casasnovas de Sóller, on hi restà fins el curs 2002-2003, per passar seguidament a l'IES Bendinat de Calvià, on es jubilaria a finals del curs 2009-2010. Aquesta complexa itinerància, deguda al sistema d'adjudicacions de places de funcionari docent, a la llarga el beneficiaria ja que entrà en contacte amb diferents grups culturals i espeleològics amb els quals mantindria un intens i fructífer contacte al llarg de la seva vida, com veurem més endavant.

Figura 3: Nombroses tasques de docència i de formació del professorat foren desenvolupades per Àngel, els anys 1980 i 1990, en els camps de lapiaz de les rodalies de Lluc i de Menut. (Foto: J.J. Fornós).
Figure 3: Numerous teaching and scholar training tasks were carried out by Àngel during the 1980s and 1990s in the karren fields near Lluc and Menut. (Photo: J.J. Fornós).

En els darrers anys dins de l'ensenyament secundari, i gràcies al contacte que mantingué sempre amb la Universitat, fruit sobretot de la seva tasca investigadora dins del món del carst, obtingué una plaça de Professor Associat a la Universitat de les Illes Balears adscrita al Departament de Biologia, on impartí diverses assignatures de la branca d'Ecologia dins la llavors Llicenciatura de Biologia. Més endavant, l'any 2001, fou també Professor Associat del Departament de Ciències de la Terra, on impartí l'assignatura de Processos i Morfologies Càrstiques, dins la Llicenciatura de Geografia.

Aquesta tasca docent, tant a l'Ensenyament Secundari com a la Universitat, la compaginà amb activitats relacionades amb la didàctica de les Ciències Naturals (Figura 3), sobretot dins l'àmbit de la divulgació de la Geologia, en cursos com el de Geologia de Mallorca, organitzat per l'*Institut de Ciències de l'Educació* (ICE) i la Universitat (UIB) el 1986; el 1994 un curs d'itineraris geològics i la seva relació amb la vegetació organitzat pel *Centre de Professorat* de Palma; o el curs sobre Propostes Metodològiques relacionades amb les activitats de camp que es realitzà l'any 2000, organitzat pel *Centre de Professorat i Recursos* d'Inca.

Mereix una atenció especial, dins aquest àmbit divulgatiu relacionat amb la docència de la Geologia, l'organització l'any 1998 del *X Simposio sobre Enseñanza de la Geología* en associació amb l'*Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (AEPECT), entitat estatal que s'encarrega de defensar i divulgar la presència i la contribució de les Ciències de la Terra en la formació de la ciutadania. En aquest simposi realitzat a Mallorca, a més de les ponències, s'hi organitzaren diverses excursions de camp, entre elles les dedicades a l'exocarst i endocarst de la Serra de Tramuntana, temes que també foren tractats en el volum publicat per la UIB amb aquest motiu i que duu per títol: *Aspectes Geològics de les Balears* (FORNÓS, 1998).

Aquesta divulgació es complementà amb la creació de diversos materials didàctics relacionats amb els cursos i sortides de camp, que pretenien facilitar la tasca docent entre el professorat de secundària i aportar coneixement sobre el patrimoni natural de les Illes. Entre els quals podem destacar el llibre publicat l'any 1990 per la *Conselleria de Cultura Educació i Esports* del *Govern Balear* dins de la seva col·lecció de materials didàctics, titulat: *El carst a Mallorca* (GINÉS & BORRÀS, 1990).

Dins la tasca docent i de divulgació, cal incloure també tot un seguit de conferències que impartí en diferents institucions sobre la temàtica espeleològica, des d'un punt de vista científic, tenint sempre present el vessant més ecològic, però també sense deixar de banda ponències relacionades amb la història de la ciència i especialment amb l'evolució del coneixement espeleològic del carst mallorquí, en el qual hi estava especialment interessat. La major part de les conferències es realitzaren a les seus de la *Societat d'Història Natural de les Balears* (SHNB), al *Museu Balear de Ciències Naturals* de Sóller (actualment el MUCBO), així com a d'altres institucions acadèmiques com la UIB i científiques com a la *Societat Espeleològica Balear* (SEB), de difusió i ensenyament de les ciències de la terra com a l'*Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (AEPECT) o de caire esportiu com a la *Federació Balear d'Espeleologia* (FBE).

Dels inicis en l'àmbit de l'espeleologia al seu paper en el món acadèmic

El seu interès per la natura s'inicià gràcies a les excursions de muntanya i natura realitzades amb el seu germà i companys del col·legi La Salle, durant l'etapa de l'ensenyament secundari. Aquestes

excursions despertaren una gran curiositat pel medi natural que, amb el temps, inclouria també l'interès per les cavitats que s'obren a les nostres contrades.

Les incursions de caire espeleològic s'iniciaren amb els mateixos companys de joventut. L'any 1968, quan tingué lloc el descobriment de les noves extensions de les Coves des Màrmol (Calvià), fou el punt de sortida de tota una sèrie d'actuacions lligades al coneixement del món subterrani i el carst, que es perllongarien sense interrupció durant més de 50 anys (Figura 4). Seria especialment remarcable l'activitat durant els primers anys de la dècada dels 70 del segle passat, amb una intensa tasca d'exploració i topografia a tot Mallorca i a Balears en general. Podríem destacar les exploracions de grans cavitats verticals, sobretot a la Serra de Tramuntana de Mallorca, amb l'ús de tècniques relacionades amb les escaletes metàl·liques lleugeres. Cal esmentar, especialment, el primer descens del pou de 116 m de vertical, totalment aeri, que es realitzà l'any 1972 a l'Avenc d'Escorca o de sa Vessa a Escorca (Figura 5), o la topografia, aquell mateix any, de la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia) i el reconeixement dels espeleotemes freàtics (POS) relacionats amb paleonivells marins.

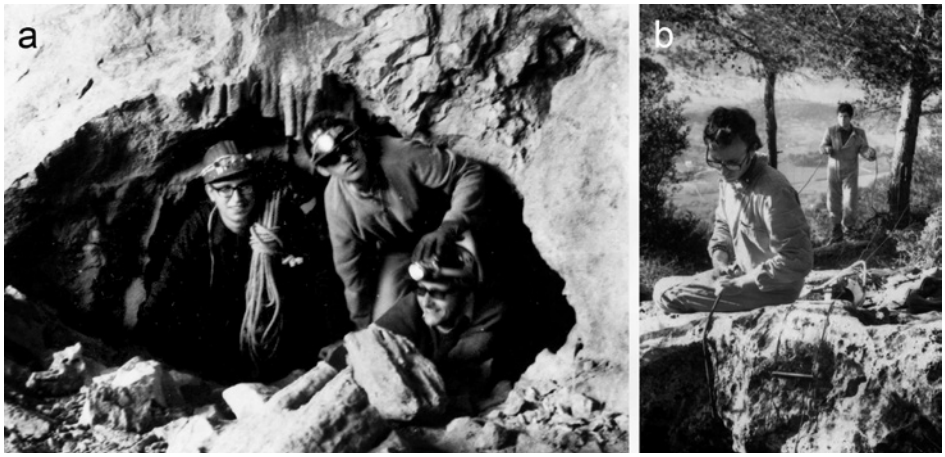


Figura 4: a) Exploració de les Coves des Màrmol (Calvià), l'any 1968; d'esquerra a dreta, Àngel Ginés, Paco Trobat i Oriol de Bobes (Foto: J. Ginés). b) L'any 1971, assegurant el descens a l'Avenc de Fangar (Campanet) amb escales metàl·liques lleugeres; Àngel Ginés apareix en primer pla, i el seu germà Joaquín al fons (Foto: V. García-Delgado).
Figure 4: a) Exploration of Coves des Màrmol (Calvià), in 1968; from left to right, Àngel Ginés, Paco Trobat and Oriol de Bobes (Photo: J. Ginés). b) In 1971, securing the descent to Avenc de Fangar (Campanet) with light metal ladders; Àngel Ginés appears in the foreground, and his brother Joaquín in the background (Photo: V. García-Delgado).

Pel que fa a la seva relació amb el món acadèmic, durant les primeres dècades de dedicació espeleològica s'hi establí una estreta col·laboració, a partir de 1974, amb el Dr. Lluís Pomar, professor de Geologia de la UIB, amb qui realitzà diferents incursions en l'estudi dels processos i morfologies relacionades amb la precipitació de carbonats en els llacs de les coves litorals de Mallorca.

La citada línia de treball que s'havia iniciat a començaments de la dècada del 70 (1972-1974) i a la qual s'hi afegiria Lluís Pomar (1975-1976) obtingué, l'any 1981, el *Premi Ciutat de Palma d'Investigació*, concedit al *Proyecto Hades: Estratigrafía de las cristalizaciones subacuáticas del Pleistoceno en las cuevas de Mallorca* (HADES, 1985), projecte co-dirigit per Lluís Pomar i Joaquín Ginés. Aquesta línia d'investigació ja no l'abandonaria durant tota la seva carrera.

Aquests primers estudis es focalitzarien en la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia) amb la interpretació estratigràfica dels espeleotemes freàtics omnipresents en aquesta cavitat. Les dificultats d'accés, així com la presència d'una elevada concentració de diòxid de carboni, requeriren la implicació de molt personal (Figura 6) i mitjans tècnics i infraestructura en les dues campanyes que s'hi dugueren a terme (MAROTO & FONT, 1981; HADES, 1985). Fruit també d'aquesta col·laboració primerenca, en fou la recerca sobre els precipitats freàtics subactuals de la Cova A de Cala

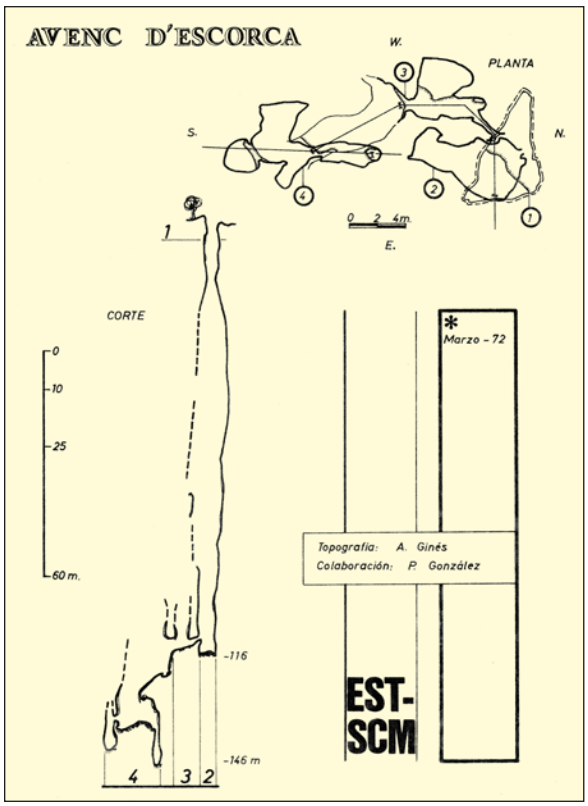


Figura 5: El març de 1972 s'efectuà la primera exploració de l'Avenc d'Escorca (o de sa Vessa), utilitzant escales metàl·liques lleugeres per descendir el gran pou inicial de 116 m de vertical absoluta.
Figure 5: In March 1972, the first exploration of Avenc d'Escorca (or Avenc de sa Vessa) was carried out, using light metal ladders to descend the large free hanging initial shaft 116 m deep.

Figura 6: Un dels sopars durant les feines de camp del Projecte HADES (1981), desenvolupat a la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia) per al mostreig i estudi dels espeleotemes freàtics del seu interior. Toni Mora i Joaquín Ginés, drets a l'esquerra; Joan Pons, assegut al centre; i Àngel Ginés, a la dreta. (Foto: Equip HADES).
Figure 6: One of the dinners during the fieldwork of the HADES Project (1981), developed in Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia) for the sampling and study of the phreatic speleothems inside. Toni Mora and Joaquín Ginés, standing on the left; Joan Pons, seated in the center; and Àngel Ginés, on the right. (Photo: HADES Team).

Varques (Manacor) i alguns altres aspectes sobre la formació de calcita flotant.

Després d'una curta etapa de certa desvinculació amb el món acadèmic, el 1994 definitivament es reprèn o, millor dit, s'inicia, una estreta relació simbiòtica amb la UIB, en la qual de forma intensa i directa s'hi implicarà, juntament amb el seu germà Joaquín, en tota una sèrie de projectes d'investigació formant part activa del Grup de Recerca Ciències de la Terra de la UIB, que dirigeix, de llavors ençà, el Dr. Joan J. Fornós.

El mes de setembre de 1991 representa el que a la llarga seria un salt qualitatiu important en la recerca relacionada amb els POS i en la seva internacionalització. A la ciutat de Pàdua, entre el 15 i el 27 d'aquell mes, s'hi celebrà la "*International Conference on Environmental Changes in Karst Areas*" (ICECKA) organitzada pel prestigiós estudiós del carst Ugo Sauro, professor de la Università di Padova. En aquesta reunió, Àngel entrà en contacte amb la Dra. Paola Tuccimei amb qui s'iniciaria una etapa d'estreta col·laboració focalitzada en la datació radiomètrica dels espeleotemes freàtics, gràcies a la llavors recent creació d'un laboratori a la *Università Roma Tre*. A la mateixa reunió també entrà en contacte amb el Dr. José Mª Calaforra, de la *Universidad de Almería*, amb qui amb el temps l'uniria una bona amistat (Figura 7), i que acabaria, juntament amb la participació d'altres espeleòlegs científics de l'estat espanyol, amb la creació de la *Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst* (SEDECK).

Figura 7: L'any 2009, fent un poc de vida social en ocasió del *15th International Congress of Speleology*, celebrat a Kerrville, Texas. D'esquerra a dreta: Àngel, José M. Calaforra, Tony Merino i Toni Mulet. (Foto: J. Ginés).
Figure 7: In 2009, having a bit of social life on the *15th International Congress of Speleology*, held in Kerrville, Texas. From left to right: Àngel, José M. Calaforra, Tony Merino and Toni Mulet. (Photo: J. Ginés).

Un altre salt important es donà l'any 2004 quan el Dr. Bogdan P. Onac, en aquell moment Professor de la *Universitate Babeș Bolyai* de Cluj a Romania, inicià una sèrie d'estades a Mallorca, per col·laborar amb el grup de recerca de Ciències de la Terra de la UIB. L'estreta relació amb aquest investigador, que esdevindrà professor a la *University of South Florida,* a Tampa, als Estats Units, obrirà les portes a tota una sèrie de treballs en col·laboració amb diversos grups dels Estats Units, entre els quals podem citar per exemple, Jeffrey A. Dorale de la *University of Iowa*, Oana A. Dumitru llavors a la *Columbia University* i actualment a la *University of Florida*, Jerry Mitrovica de la *Harvard University*, Victor Polyak i Yemane Asmerom de la *University of New Mexico*, o Igor Villa de la *Universität Bern* a Suïssa.

L'estreta col·laboració amb els investigadors citats facilitarà la

possibilitat d'accedir a les tècniques més punteres sobretot pel que fa a la datació dels espeleotemes mitjançant tècniques radiomètriques (U/Th i U/Pb). Això, juntament amb les exploracions de la part submergida del carst liderades per Francesc Gràcia de la SEB, portarà a la publicació d'una sèrie de treballs dins de les revistes científiques més rellevants i prestigioses del moment a escala internacional, com són *Science* (2010), *Nature Geoscience* (2018) i *Nature* (2019), a les quals se sumaran molts altres articles a revistes d'alt impacte científic.

Cal comentar, en aquest apartat, que la relació d'Àngel amb el món acadèmic, tant nacional com internacional, es complementà amb els vincles amb el sector privat i públic. La seva bona relació amb les empreses turístiques relacionades amb el món de les coves (Coves del Drac, Coves d'Artà i Coves de Campanet) o dels espais naturals (Parc Natural de l'illa de sa Dragonera) propicià i facilità tota una sèrie de treballs científics que resultaren en diverses publicacions de caràcter divulgatiu o tècnic.

Presència i relació amb altres institucions espeleològiques i naturalístiques

Al llarg de la seva vida, Àngel s'implicà activament en tota una sèrie d'institucions relacionades amb el món naturalístic, en general, i espeleològic, en particular. A continuació, passem a descriure breument el paper que hi jugà en la gestió d'aquestes institucions, així com en els mitjans de difusió del coneixement del carst en les diferents revistes publicades per cada una de les institucions.

La Societat d'Història Natural de les Balears

Si una cosa no refusà mai Àngel, fou la seva implicació en diverses institucions que tenien a veure tant en la difusió i el coneixement del carst i la espeleologia, com amb la Història Natural. Ben aviat fou soci de la *Societat d'Història Natural de les Balears* (SHNB) en la qual s'implicà activament de diverses formes. Fou vocal de la Junta de Publicacions, i el responsable de la publicació del *Bolletí de la SHNB* durant els anys 1980 i 1981 i el 2014. Així mateix, exercí el càrrec de tresorer a la Junta Directiva durant els anys 1991 i 1992 (VICENS et al., 2022). També hi publicà nombrosos treballs, de fet fou en el *Bolletí de la SHNB* on publicà en col·laboració amb el seu germà Joaquín el primer treball espeleològic l'any 1971. Aquest fou tan sols el primer de tot un reguitzell de treballs que anirien sortint en diverses publicacions de la Societat. Les seves aportacions a la SHNB tingueren un pes important en la sèrie de *Monografies de la SHNB*, no tan sols amb la publicació de treballs, sinó també tot exercint d'editor. Cal destacar dins aquest apartat, per la visió globalitzadora, la publicació en col·laboració amb la revista *Endins* de dos números monogràfics que posaven al dia el coneixement del *Carst i les Coves de Mallorca*. El primer dels treballs, del qual fou editor, de nou amb el seu germà, es publicà el 1995 amb motiu de la celebració de l'*International Symposium on Karren Landforms*. Més tard, l'any 2011, s'implicà activament en els treballs que formaven part del volum titulat *El Carst Patrimoni Natural de les Illes Balears*. A part d'algunes altres aportacions que podeu veure referides a GINÉS & FORNÓS (2024), volem destacar per la seva internacionalització la Monografia número 18, de la qual fou co-editor juntament amb altres membres de *Grup de Recerca Ciències de la Terra* de la UIB, publicada l'any 2012 amb motiu de la celebració del *Workshop sea level changes into MIS 5: from observations to predictions*, organitzat pel grup de recerca de la UIB i la *National Science Foundation* dels Estats Units. La monografia duia per títol *Mallorca: a Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies*.

La Federació Balear d'Espeleologia

L'any 1972 es creà la Delegació Balear del *Comité Catalano-Balear de Espeleología* (CCBE) que, en aquells moments, depenia de la *Federación Española de Montañismo* (FEM). Àngel Ginés en fou nomenat delegat, la qual cosa feu que es convertís en el primer dirigent de l'estructura organitzativa de l'espeleologia balear. Aquesta delegació balear del CCBE va comptar des del primer moment amb el suport institucional i econòmic del *Comité Nacional de Espeleologia* que llavors era presidit pel destacat carstòleg i espeleòleg especialista en carst glacial Adolfo Eraso Romero, qui desgraciadament també traspassà el 2021.

Del 1975 al 1979 Àngel s'implicà activament amb l'independitzat *Comitè Balear d'Espeleologia* (Figura 8), que passaria a denominar-se, entre el 1979 i 1982, *Secció Balear d'Espeleologia*, com a pas previ a la creació de la futura federació espeleològica a nivell estatal. Aquest darrer any, finalment es crearia la *Federació Balear d'Espeleologia*. Dins d'aquesta institució assumí el càrrec de Vocal de

Figura 8: Llicències esportives d'Àngel Ginés. A dalt, llicència de l'any 1977 expedida pel *Comitè Balear d'Espeleologia*; a baix, llicència del 1983 de la *Federació Balear d'Espeleologia*.
Figure 8: Caving licenses of Àngel Ginés. Above, license from 1977 issued by the *Comitè Balear d'Espeleologia*; below, license from 1983 from the *Federació Balear d'Espeleologia*.

Publicacions, fet que li comportà la coordinació de la revista *Endins* des del 1978 fins al 1995, interval en què es publicaren 12 volums que corresponen del número 5-6 fins al 20 (alguns d'ells foren dobles) i que sumaren un total de 137 articles. En qualsevol cas, hi estigué involucrat com a revisor o autor de diversos treballs fins al darrer número publicat (36) l'any 2014. La revista *Endins,* gràcies a la seva implicació, juntament amb la d'altres membres, adquirí un gran prestigi tant en l'àmbit nacional com internacional.

Àngel, en total, publicaria 63 articles a la revista *Endins*, treballs de temàtiques molt diverses, que van des de l'exocarst a la geoespeleologia, passant per moltes altres disciplines relacionades amb les coves i el carst (GINÉS & FORNÓS, 2024).

El Museu Balear de Ciències Naturals de Sóller (MBCN)

L'etapa en què Àngel residí a Sóller, com a conseqüència de la plaça obtinguda de professor de secundària a l'Institut d'Educació Secundària Guillem Colom Casasnovas, propicià la seva implicació i un contacte diari amb el recent creat Museu Balear de Ciències Naturals (Figura 9). De fet, la seva intensa dedicació li comportà obtenir el càrrec de Director, que exercí des del 1991 fins al 1996, moment en què ocupà el càrrec Damià Crespí. Un cop deixada la direcció l'any 1996, continuà vinculat a la institució sollerica com a col·laborador actiu i com a membre de l'*Associació del Museu Balear de Ciències Naturals* (Associació MBCN) que el designà com a representant al *Patronat de la Fundació Jardí Botànic de Sóller*, de la qual en fou vicepresident.

Figura 9: Reunió conjunta del Museu Balear de Ciències Naturals (MBCN) i de la Societat d'Història Natural de les Balears (SHNB), celebrada el 1992 al parc de l'Albufera d'Alcúdia. D'esquerra a a dreta: Joan Mayol, Àngel Ginés, Tonyo Alcover, Josep Ll. Gradaille, Carles Constantino, Andreu Muntaner, Joana Mª Rayó, Joan J. Fornós, Guillem X. Pons, Catalina Massuti, Irene Mestre, Antoni Martínez i Mateu Cifre.
Figure 9: Joint meeting of the Museu Balear de Ciències Naturals (MBCN) and the Societat d'Història Natural de les Balears (SHNB), held in 1992 in the Albufera Park in Alcúdia. From left to right: Joan Mayol, Àngel Ginés, Tonyo Alcover, Josep Ll. Gradaille, Carles Constantino, Andreu Muntaner, Joana Mª Rayó, Joan J. Fornós, Guillem X. Pons, Catalina Massuti, Irene Mestre, Antoni Martínez and Mateu Cifre.

Durant la seva direcció, l'any 1993, s'assolí el gran repte d'obrir les portes del museu al públic, la qual cosa es feu juntament amb el Jardí Botànic. Es culminaria així, amb gran èxit, un procés que s'havia iniciat per l'*Associació* creada a principis dels anys 80 del segle passat amb l'objectiu de crear un Museu d'Història Natural i un Jardí Botànic de flora balear a la ciutat de Sóller. Després de la inauguració, l'Associació n'assumí la gestió fins l'any 1997 i, des d'aquest any, fins al 2020 només gestionà el Museu. L'any 2020 es creà la Fundació MUCBO que serà l'encarregada de gestionar de forma conjunta, de nou, tant el museu com el Jardí Botànic.

La Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst (SEDECK)

El 21 de febrer de 1998 se celebrà a la *E.T.S. Ingenieros de Minas* de Madrid l'assemblea de constitució de la *Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del*

Karst (SEDECK), societat que té com a objectiu la promoció i difusió de les ciències relacionades amb el carst, especialment des del vessant científic i de protecció de les cavitats. Àngel seria un dels assembleistes i enformaria part com a Soci Fundador juntament amb altres membres de reconegut prestigi dins del món espeleològic de l'Estat Espanyol (Adolfo Eraso, José Mª Calaforra, Policarp Garay, entre d'altres). Després de la constitució es creà la primera Junta Directiva de la qual en formaria part, essent nomenat Vocal, càrrec que ostentaria des de l'any 1998 fins al 2017.

Un dels objectius de la SEDECK fou la creació d'una revista per al foment i la difusió científica de qualsevol aspecte relacionat amb les ciències del carst. Àngel s'involucrà també en el *Boletín de la SEDECK* del qual formà part del Comitè Científic des del primer número, publicat el mes de setembre de l'any 2000, fins el 2006. També fou l'editor principal del *Boletín* entre el 2002 i el 2006. L'any 2020 tornaria a formar part del Comitè Científic de la revista.

Fruit de la col·laboració amb aquesta societat, fou la celebració de les *VIII Jornadas Científicas de la SEDECK*, que se celebrararen a Palma a l'edifici de sa Riera de la UIB del 5 al 8 d'abril de 2002. Les Jornades constaren de set ponències, una taula rodona desenvolupada al MBCN de Sóller i una sortida de camp que dirigí Àngel per mostrar l'exocarst de la Serra de Tramuntana, que acabà amb la visita a les Coves de Campanet. La celebració de les Jornades implicà l'edició i publicació del número 3 del *Boletín de la SEDECK*, l'any 2002, on aparegueren publicades 10 aportacions que, des de diferents vessants, presentaven l'estat actual del coneixement del carst de Mallorca.

La Societat Espeleològica Balear

Un darrer salt important es dona el 2016 quan, després de greus problemes i discussions entre el vessant esportiu i el científic dins de la *Federació Balear d'Espeleologia*, es produeix la dimissió de tots els membres de la Junta de Publicacions d'*Endins*, la qual cosa feu que es deixàs de publicar la revista. Com a conseqüència, el 2017, es creà la *Societat Espeleològica Balear* (SEB) gràcies a la incorporació dels membres del Grup Nord de Mallorca, de l'Speleo Club Mallorca i del Grup Espeleològic EST, del qual formava part Àngel, juntament amb membres procedents del món acadèmic. La SEB es constituí el dia 27 de març de 2017 i Àngel en fou un dels 11 socis fundadors. El principal objectiu era continuar amb les tasques relacionades amb qualsevol branca de l'estudi del medi hipogeu i del carst, però sempre des d'un vessant científic. Fruit d'aquest objectiu fou la creació de la revista *Papers de la Societat Espeleològica Balear*, que prenia el relleu a la revista *Endins* seguint amb la seva mateixa filosofia. Així, l'any 2018 es publicava el primer volum, en aquest cas, un monogràfic dedicat a les Coves del Drac. De llavors ençà s'ha anat publicant un volum anual, tant en format paper com digital. Àngel hi va col·laborar estretament des de la seva creació, presentant una tretzena d'articles en els quals hi destaquen els aspectes històrics relacionats amb el carst, així com alguns altres sobre espeleogènesi, espeleotemes freàtics o la bioespeleologia. A aquests treballs cal afegir-ne un parell més que tenia en preparació i que s'han publicat el 2024. Justament poc abans de la seva mort, l'any 2023, passà a formar part de la Junta de Publicacions de la revista.

Les aportacions al món del carst i l'espeleologia

Durant tota la seva vida, Àngel mostrà interès en l'estudi de les formes subaèries i subterrànies del carst, des del punt de vista de l'espeleologia física i carstologia en general. Dedicà un considerable esforç al coneixement morfològic i genètic de les cavitats, així com a l'estudi dels espeleotemes i a altres aspectes relacionats amb la climatologia subterrània, mostrant un especial interès en el paper del diòxid de carboni en els processos càrstics i el seu origen.

Des de l'any 1994 fins a la fi dels seus dies va tenir una estreta relació amb el món acadèmic i formà part, de manera activa, en diversos projectes de recerca finançats per diversos ministeris i per l'*Agencia Estatal de Investigación*. Fou un dels membres més actius del *Grup de Recerca Ciències de la Terra* de la UIB. En aquest sentit, cal destacar la seva presència en un total de 10 projectes que tenien com a objectiu el modelat càrstic i l'evolució morfològica i sedimentària del litoral de les Balears, com a resultat de les oscil·lacions del nivell marí, projectes que no tan sols es desenvoluparen a l'illa de Mallorca sinó també a Menorca i a l'illa italiana de Sardenya.

Fruit, doncs, de la seva activitat inicial i amb posterioritat de l'activitat simbiòtica amb el món acadèmic, tant nacional com internacional, en resulten un gran nombre de publicacions que podem agrupar en una sèrie de línies d'investigació principals com serien, potser per ordre de rellevància:

els espeleotemes freàtics i la geocronologia de les coves litorals, l'exocarst i les morfologies de lapiaz, l'espeleogènesi en els ambients litorals, el paper del diòxid de carboni, la biospeleologia, la flora de les cavitats i els ambients càrstics, treballs de caire paleontològic i, finalment, articles sobre la història de l'espeleologia illenca, o la cultura popular, la toponímia i el folklore en relació a les cavitats illenques.

A continuació passem a descriure'ls breument, tenint present que les referències completes de totes les aportacions que comentarem en aquest apartat estan relacionades i, per tant poden ser consultades, al treball publicat al present volum dels *Papers de la Societat Espeleològic Balear* (GINÉS & FORNÓS, 2024), per la qual cosa creiem que no fa falta repetir-les aquí.

Espeleotemes freàtics (POS) i geocronologia de les coves litorals

Sens dubte els treballs relacionats amb la geocronologia dels espeleotemes freàtics presents a les coves litorals, i la seva relació amb l'evolució del nivell marí, ha estat una de les temàtiques més exitoses de la recerca en què va participar Àngel.

L'any 1972 començà aquesta singladura amb la topografia de la Cova de sa Bassa Blanca i el reconeixement dels espeleotemes freàtics presents a la cova, tot relacionant-los amb els paleonivells marins. Aquestes dades serien presentades aquell mateix any a Oviedo en el *II Congreso Nacional de Espeleología*, i posteriorment, el 1974, al Bolletí de la SHNB. Arran d'aquesta primera incursió, l'any 1975, s'iniciaria tota una sèrie d'estudis sobre la morfologia, mineralogia i aspectes cristal·logràfics dels espeleotemes freàtics en col·laboració amb el Dr. Lluís Pomar, qui s'implicaria l'any 1981 dins del projecte HADES que seria guardonat amb el Premi Ciutat de Palma d'Investigació.

També l'any 1981 s'estableix contacte amb el Dr. Gerd J. Hennig de la *Universität Köln*, i amb posterioritat a la *Niedersachsisches Landesamt für Bodenforschung* (Hannover), la qual cosa propiciaria les primeres datacions per mètodes radiomètrics (U/Th) i *Electron Spin Resonance* (ESR) dels espeleotemes freàtics. Aquesta col·laboració perduraria fins a l'any 1988, quan tingué lloc la defunció del Dr. Hennig.

L'any 1994 entraria en contacte amb la Dra. Paola Tuccimei i el seu equip de la *Università Roma Tre* (Figura 10), amb qui establiria una estreta relació de col·laboració en els aspectes geoquímics i isotòpics, així com en la datació radiomètrica (U/Th) dels espeleotemes freàtics, inicialment mitjançant espectrometria *alpha*. Aquesta col·laboració seria especialment intensa i fructífera fins a l'any 2012, encara que es perllongaria, amb menor intensitat, fins al present. Fruit d'aquesta col·laboració fou el bateig internacional de la terminologia dels espeleotemes freàtics coneguts com a POS per les seves sigles en anglès (*Phreatic Overgrowths on Speleothems*).

L'any 2004 començà la col·laboració amb el Dr. Bogdan P. Onac de la *Universitate Babeș Bolyai* (actualment a la *University of South Florida*, Tampa) focalitzada principalment dins del camp dels espeleotemes freàtics, encara que es tocarien altres aspectes relacionats amb el món espeleològic. El Dr. Onac propiciaria a partir d'aquell moment l'accés a altres centres de recerca dels Estats Units, la qual cosa redundaria en una allau de publicacions relacionades amb aquesta temàtica i que continuen activament fins a l'actualitat.

Figura 10: L'any 2000, preparant el material per a l'exploració de la Grotta Verde, de Capo Caccia (Alghero, Sardenya), amb dos companys del *Gruppo Speleologico Sassarese*. (Foto: J. Ginés).
Figure 10: In 2000, preparing the material for the exploration of Grotta Verde, in Capo Caccia (Alghero, Sardegna), with two colleagues from *Gruppo Speleologico Sassarese*. (Photo: J. Ginés).

Fruit d'aquesta col·laboració fou una publicació a la revista *Science*, el 2010, amb el Dr. Jeffrey A. Dorale de la *University of Iowa*; i l'organització d'una trobada amb seu a la UIB titulada: *Workshop on sea level changes into MIS-5: from observations to predictions* el 2012, i en què Àngel figurava com a primer editor de la monografia publicada amb el títol *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary Studies* (Monografia número10 de la SHNB).

A partir de l'any 2013, i de la mà del Dr. Onac, començà la col·laboració amb el Dr. Victor J. Polyak (*University of New Mexico*) i la doctoranda Oana A. Dumitru (en aquell moment a la *University of South*

Florida). Seria un moment d'elevada productivitat científica i s'aconseguí datar una gran quantitat de POS, tant mitjançant la tècnica del U/Th com del U/Pb, tot abastant edats des del miocè superior fins a l'holocè. Així, entre el 2018 i el 2024 es publicarien importants avenços en revistes internacionals sobre els espeleotemes freàtics del MIS-5 i de l'Holocè. Entre el 2019 i el 2021 es publicarien els resultats de les datacions U/Pb de les coves del Cap Vermell (Coves d'Artà i Coves Petites) a les revistes *Nature* i *Scientific Reports*.

Figura 11: Entrada de l'Avenc del Puig Caragoler (Escorca), l'any 2006. Les morfologies exocàrstiques i, en particular, el lapiaz o karren foren una de les principals línies d'investigació desenvolupades per Àngel. (Foto: J. Ginés).
Figure 11: Entrance to Avenc del Puig Caragoler (Escorca), in 2006. Exokarstic morphologies and the karren features were one of the main lines of research developed by Àngel. (Photo: J. Ginés).

Exocarst i morfologies de lapiaz

Si hi ha un aspecte de l'estudi del carst que és inherent a la trajectòria científica d'Àngel, aquest és el de l'exocarst i les morfologies de lapiaz que fou el tema de la seva tesi doctoral. Això implicà que des del 1979 i fins al 1989 apareguessin, en diversos treballs publicats sobre el carst de Mallorca, extenses referències a les morfologies exocàrstiques.

L'any 1990 publicà els primers treballs sobre la morfometria del lapiaz i el paper que juga com a indicador geoecològic (Figura 11). Aquest aspecte el presentaria l'any 1991 a la ciutat de Padova (Itàlia) a la *International Conference on Environmental Changes in Karst Areas*. L'any 1992, en col·laboració amb el Dr. Lluís Fiol, expert en líquens, aportaria dades noves sobre el *Rillenkarren* i el biocarst. Aspectes que s'ampliarien l'any 1995 relacionant l'evolució del *karren* i la desforestació. Fruit d'aquests estudis fou l'organització, aquell mateix any, de l'*International Symposium on Karren Ladforms* que se celebrà a Sóller en col·laboració entre la UIB i el MBCN. La convocatòria d'aquest simposi comportà la publicació l'any següent (1996) del llibre, editat per la UIB, *Karren Landforms*, del qual Àngel en fou editor juntament amb Joan J. Fornós. També, aquell any 1996, publicaria, en col·laboració, un treball sobre el *rillenkarren* i el biocarst a la revista *Earth Surface Processes and Landforms*.

L'any 1999, any de la lectura de la seva tesi doctoral (*Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica*), publicaria a la *International Journal of Speleology* un treball que tractava de les relacions entre l'agricultura i usos del sòl en l'exocarst de la Serra de Tramuntana.

El reconeixement de la seva feina en l'àmbit internacional el conduí a la publicació de l'entrada del terme *Karren*, a l'*Encyclopedia of Caves and Karst Science* publicada per Fitzroy Dearborn l'any 2004. Aquest reconeixement culminaria l'any 2009 amb un compendi sobre les morfologies del lapiaz

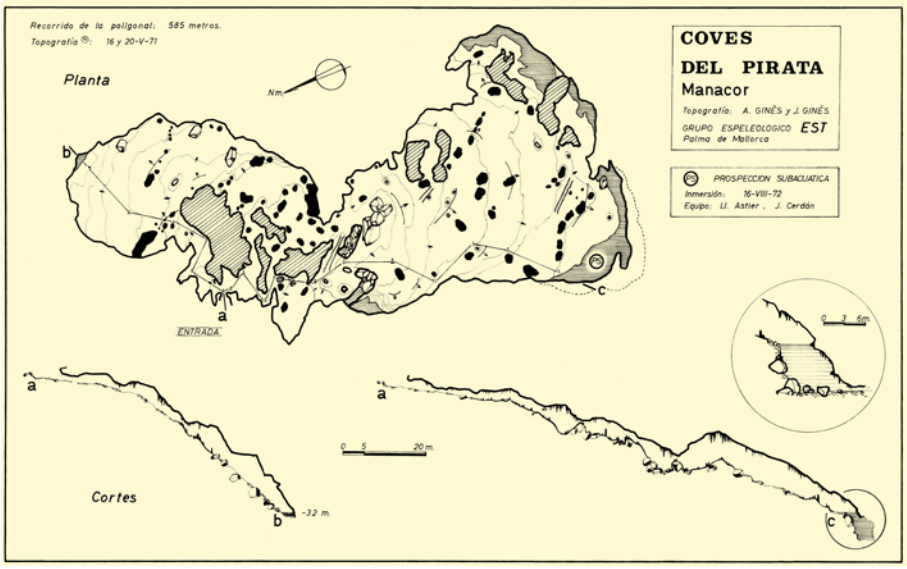


Figura 12: L'any 1971, Àngel Ginés liderà la primera topografia detallada de les Coves del Pirata, una de les coves clàssiques del litoral de Manacor.
Figure 12: In 1971, Àngel Ginés led the first detailed topography of Coves del Pirata, one of the classic caves on the Manacor coast.

reunit en el llibre *Karst rock features. Karren sculpturing*, del qual en fou el primer editor i que fou publicat pel *Karst Research Institute* (ZRC SAZU) de Postojna (Eslovènia). Així mateix, cal esmentar la redacció del capítol "The karst of the Tramuntana range" dins del llibre, *Landscapes and Landforms of Spain* publicat per la prestigiosa editorial científica Springer.

Espeleogènesi en ambients litorals

Els processos espeleogenètics del carst litoral, on trobem els espeleotemes freàtics comentats anteriorment, són uns dels aspectes més tractats en les seves publicacions. De fet, ja el 1976 començà a treballar sobre l'espeleogènesi en condicions freàtiques en els materials carbonatics del miocè superior que afloren a la zona litoral del llevant i el migjorn de Mallorca. Es parlava de l'evolució vadosa d'unes primigènies cavitats freàtiques i de la relació amb les oscil·lacions del nivell marí durant el plio-quaternari. Es publicaren alguns treballs pioners, com per exemple un dedicat a les Coves del Pirata (Figura 12).

L'any 1989 apareix publicat el llibre *El Karst de las Islas Baleares*, per la *Sociedad Española de Geomorfología*, on en un capítol signat pels dos germans Ginés es descriuen les zones càrstiques de les illes i les cavitats de cada zona, amb especial referència a les coves del Migjorn de l'illa.

Serà entre l'any 1991 i 1992, tot estudiant l'espeleogènesi de les Coves del Drac, que es proposa el paper que juga la zona de mescla entre les aigües meteòriques i l'aigua marina, juntament amb les oscil·lacions del nivell marí en la formació de les cavitats, treball publicat a la revista *Endins* (vol. 17-18). Contribució a la qual s'unirà, l'any 2000, el paper dels col·lapses (esfondraments) en l'endocarst del Migjorn, publicat a *Acta Carsologica*.

Els models proposats en la bibliografia internacional sobre les *Flank Margin Caves* i el *Carbonate Island Karst Model* (Figura 13) donaren lloc a dues publicacions, els anys 2007 i 2008, sobre la viabilitat d'aquests models per tal d'explicar l'espeleogènesi costera de Mallorca, sengles treballs aparegueren a l'*Endins* (vol. 32) i a la *International Journal of Speleology*.

Arran de les intenses tasques exploratòries que realitzaven diversos grups a la Cova des Pas de Vallgornera, i a la llum dels nous descobriments, l'any 2009 s'introduïren els mecanismes espeleogenètics hipogènics dins de l'esquema evolutiu de les cavitats, així com el paper de la litologia en el patró de desenvolupament de les coves litorals de l'illa.

L'any 2013, Àngel liderà la publicació d'un capítol sobre la morfologia i la gènesi de les coves litorals de Mallorca en el llibre, publicat per l'editorial Springer, *Coastal Karst Landforms*. L'any 2014 l*a International Journal of Speleology*, publicà un número monogràfic sobre la Cova des Pas de Vallgornera en què hi participà en un article sobre la seva espeleogènesi (Figura 14).

Finalment, l'any 2017 participà en la confecció d'un capítol sobre les evidències hipogèniques en cavitats de Mallorca en el llibre *Hypogene karst regions and caves of the World*, publicat també per l'editorial Springer.

Figura 13: Les investigacions sobre l'espeleogènesi en el carst litoral de Mallorca, es beneficiaren dels contactes amb investigadors forans. En aquesta imatge, presa el 2009, John E. Mylroie ideòleg del *Carbonate Island Karst Model* i Àngel durant una jornada de camp a l'illa. (Foto: J.R. Mylroie).
Figure 13: Research on speleogenesis in the coastal karst of Mallorca benefited from contacts with foreign researchers. In this image, taken in 2009, John E. Mylroie ideologue of the *Carbonate Island Karst Model* and Àngel during a field trip on the island. (Photo: J.R. Mylroie).

Figura 14: Una de les nombroses jornades de treball a la Cova des Pas de Vallgornera, l'any 2009. D'esquerra a dreta, Tony Merino, Àngel Ginés i Joaquín Ginés. (Foto: J.E. Mylroie).
Figure 14: One of the many work trips to Cova des Pas de Vallgornera, in 2009. From left to right, Tony Merino, Àngel Ginés and Joaquín Ginés. (Photo: J.E. Mylroie).

El paper del CO_2

La problemàtica de l'origen del CO_2 i els valors presents dins les cavitats de l'endocarst era un dels temes que més preocupaven Àngel i, de fet, era una de les tasques a les quals invertia major dedicació en els darrers temps.

Des del 1979 i fins al 1984 es realitzaren nombroses mesures d'aquest gas en diverses cavitats de l'illa. Fou especialment interessant el treball publicat l'any 1987, a la revista *Endins,* sobre la Cova de les Rodes de Pollença i la seva dinàmica estacional, que a la llarga seria extrapolable a nombroses cavitats de l'illa. A partir de l'any 2000 i gràcies a l'adquisició de nous aparells de mesura, realitzà nombroses mesures puntuals del CO_2 a diverses cavitats de l'illa, com la Cova Nova de Son Lluís, la Cova de sa Bassa Blanca o la mateixa Cova de les Rodes. El 2014 s'implicà en el control anual d'aquest gas, de forma regular i periòdica, a la Cova de sa Font de l'illa de sa Dragonera, treball que publicaria l'any 2017 dins del marc de *17th International Congress of Speleology* celebrat a la ciutat australiana de Sydney.

Seguint aquesta temàtica, l'any 2018 iniciaria una intensa col·laboració amb el grup que dirigia el Dr. José Mª Calaforra, juntament amb el Dr. Ángel Fernández-Cortés, de la *Universidad de Almería*, per estudiar a la Cova de sa Font la variació i característiques isotòpiques tant de l'aire de la cova, com del sòl suprajacent, per tal de dilucidar l'origen del cicle del diòxid de carboni que s'acumulava a la cova. Per aquesta tasca s'efectuaren mesures periòdiques de forma regular, tant de l'aire com del sòl edàfic, així com registres en continu. Aquestes mesures es perllongarien fins a l'any 2023. Es feu una publicació parcial dels resultats en el *18th International Congress of Speleology*, celebrat l'any 2021 a Bourget-du-Lac, Savoie Mont Blanc a França, després de diverses pròrrogues degudes a la pandèmia de la COVID.

Cal finalment comentar que, a la vegada que es mostrejava a l'illa de sa Dragonera, entre l'any 2019 i 2020, el mateix tipus de recerca s'estengué a la Cova dets Ases a Felanitx. A causa del seu traspàs, una bona síntesi dels resultats que restaven pendents de publicar, han aparegut en aquest mateix volum gràcies a la feina del seu germà Joaquín.

Bioespeleologia

La seva formació acadèmica com a biòleg quedà palesa en el seu interès dins del camp de la biospeleologia, que no abandonà en cap moment durant la seva dilatada carrera científica, encara que sense dedicar-hi una atenció preferent.

Fou el 1975 quan cursava la llicenciatura en biologia, que començà la seva dedicació als aspectes bioespeleològics. El seu interès s'incrementà l'any 1976 a causa dels contactes amb les investigadores Nicole Gourbault i Françoise Lescher-Moutoué, del *Muséum National d'Histoire Naturelle* i del *Laboratoire Souterrain du CNRS*, de Moulis (França), que aterren a Mallorca per prospectar les aigües subterrànies de l'illa i amb les quals hi col·laborarà. Com a continuació d'aquestes tasques, el 1977 es publiquen els resultats de la primera campanya de prospecció faunística exhaustiva de les aigües càrstiques de Mallorca.

Entre el 1980 i el 1982 publicà tota una sèrie d'actualitzacions referents a la biospeleologia de les Balears, així com un extens inventari de les espècies cavernícoles de les Illes. Aquesta implicació

Figura 15: L'any 2004 es celebraren a Mallorca les *XIII Jornadas Científicas de la SEDECK*, en ocasió del centenari del descobriment de l'isòpode cavernícola *Typhlocirolana moraguesi*, a les Coves del Drac (Manacor). A la fotografia, efectuada al costat de l'estàtua del biòleg romanès Émile G. Racovitza existent al passeig marítim de Palma, apareixen destacats investigadors sobretot en el camp de la bioespeleologia. Així mateix, es veu al col·lega Bogdan P. Onac (el segon personatge des de la dreta), que començà aquell any una col·laboració estreta i fructífera amb el grup de recerca de la UIB.

Figure 15: In 2004, the *XIII Jornadas Científicas de la SEDECK* meeting was held in Mallorca, to commemorate the centenary of discovering *Typhlocirolana moraguesi*, a cave-dwelling isopod collected in Coves del Drac (Manacor). In the photograph, taken next to the statue of the Romanian biologist Émile G. Racovitza on the Palma seafront, prominent researchers appear, especially in the field of biospeleology. Also seen is colleague Bogdan P. Onac (second figure from the right), who began a close and fruitful collaboration with the UIB research group that year.

bioespeleològica quedà sintetitzada en la seva tesi de llicenciatura *Bioespeleología del karst mallorquín, datos ecológicos prliminares* que li serví per obtenir el Grau en Biologia l'any 1983.

L'any 1992 redactà el capítol titulat *Karst phenomena and biospeleological environments*, en el llibre publicat pel *Museo Nacional de Ciencias Naturales* de Madrid: *The Natural History of Biospeleology*.

L'any 2004, amb motiu del centenari de la descoberta a les Coves del Drac de l'isòpode *Typhlocirolana moraguesi* organitzà una trobada internacional aprofitant les *XIII Jornadas Científicas de la SEDECK*. Aquestes jornades foren molt emotives i es visitaren les Coves del Drac (Manacor), així com l'estàtua d'Émile G. Racovitza situada al Passeig Marítim de Palma (Figura 15). Les comunicacions que es presentaren foren publicades al número 28 de la revista *Endins* de l'any 2005.

El novembre del 2009 se celebrà a Palma, sota la coordinació local de Damià Jaume, la trobada internacional *Anchialine Ecosystems: reflection and prospects*, organitzada pel *Karst Waters Institute* (USA), l'IMEDEA i el *Western Australian Museum* (Figura 16). Aquesta fou la primera edició d'una sèrie de simposis internacionals dedicats als ecosistemes anquihalins, en dos dels quals participà Àngel exposant les característiques de l'endocarst litoral de les Balears.

Figura 16: Foto de grup dels participants en el simposi internacional *Anchialine Ecosystems: reflection and prospects*, que tingué lloc a Palma el 2009 sota la coordinació de Damià Jaume de l'IMEDEA.
Figure 16: Photo of participants in the international symposium *Anchialine Ecosystems: reflection and prospects,* which took place in Palma in 2009 under the coordination of Damià Jaume from IMEDEA.

L'any 2020 es publicà la Monografia número 30 de la SHNB dedicada a la Història Natural de l'Arxipèlag de Cabrera, de caràcter enciclopèdic i en què hi publicà l'article titulat *Els ecosistemes subterranis del subarxipèlag de Cabrera*. Aquesta publicació precediria l'any següent (2021) una comunicació sobre la tolerància de la fauna cavernícola terrestre a elevades concentracions de CO_2. Treball presentat al *18th International Congress of Speleology*, de Bourget-du-Lac, Savoie Mont Blanc (França). Una recerca que es realitzà de forma paral·lela als treballs sobre el CO_2 a la Cova de sa Font, de sa Dragonera, que s'han comentat anteriorment.

Finament, l'any 2023 sortí a la llum el voluminós llibre coordinat per Alberto Sendra, de la *Universitat de València*, que du per títol *Habitantes de la oscuridad. Fauna Ibero-Balear de las Cuevas*, on Àngel tingué un paper destacat participant en el capítol referent a la història de la bioespeleologia espanyola.

Flora de les cavitats i dels ambients càrstics

Dins d'aquest apartat, malgrat el seu interès com a biòleg, cal reconèixer que fou una línia d'investigació que no donà lloc a gaires publicacions. Així, inicialment s'interessà per la brioflora (molses i hepàtiques) de les cavitats càrstiques, especialment a causa de les campanyes que efectuà amb el Dr. Josep A. Rosselló, tot prospectant nombroses cavitats mallorquines. També s'interessà per la vegetació present en algunes dolines de la Serra de Tramuntana, que resultà en un treball publicat a la revista *Endins* en col·laboració amb altres autors. Si més no, no podem defugir tornar a citar la seva tesi doctoral *Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecològica*, que evidentment inclou diversos aspectes que tracten el paper de la vegetació i el carst.

Aportacions al coneixement paleontològic

No podem deixar de comentar el que podríem definir com a estudis colaterals relacionats amb el carst. Pel seu efecte de protecció davant l'erosió mecànica, el carst és un magnífic medi de preservació del registre paleontològic terrestre. Per tant, no és d'estranyar que en tota la recerca espeleològica hi pugui haver contactes amb aquesta ciència.

El primer treball publicat a la revista *Endins* sobre aquesta temàtica, en col·laboració amb el Dr. Lluís Fiol, l'any 1981, fou el reconeixement de la complexa estratigrafia del jaciment paleontològic (amb presència entre d'altres de *Myotragus* sp.) de la Cova des Fum, a Son Carrió. Aquest treball es reprendria més endavant en col·laboració amb els col·legues dels Estats Units, esmentats anteriorment, i amb les datacions de les diverses unitats presents al jaciment. Resultats que en l'actualitat encara estan pendents de publicar.

El 1986 treballà també a Almenara, a la província de Castelló, amb el malaguanyat Joan Pons, descrivint el jaciment paleontològic Casa Blanca I, del pleistocè inferior. També l'any 1989, en col·laboració amb els Drs. John N. Andrews de la *University of Bath* i Peter L. Smart de la *University of Bristol*, juntament amb Miquel Trias, i de nou amb Joan Pons, publicaren dades geocronològiques del jaciment de la Cova de na Barxa, a Capdepera, localitat tipus de *Myotragus balearicus*.

Aportacions sobre història de l'espeleologia illenca

A més d'algunes publicacions sobre temes molt marginals, com són la cultura popular o el folklore en relació a les cavitats de Mallorca, els aspectes històrics de l'espeleologia balear sempre foren objecte d'atenció per part d'Àngel. Esmentarem els diversos treballs sobre la història de l'activitat espeleològica apareguts a les planes d'*Endins*, així com nombroses publicacions relacionades amb els aspectes històrics de cavitats clàssiques com les Coves del Drac i les Coves d'Artà. Per altra banda, les pàgines dels *Papers de la Societat Espeleològica Balear* han donat cabuda a articles històrics i/o bibliogràfics sobre personatges clau dins l'espeleologia mallorquina, com són Joaquim Mª Bover, Édouard-Alfred Martel o Robert de Joly.

La difusió del coneixement de l'espeleologia mallorquina a nivell nacional i internacional

Des dels seus inicis a partir de la dècada dels anys 70 del segle passat, Àngel, i com sempre la major part de vegades acompanyat pel seu germà, no aturà de fer difusió de la recerca i dels diferents àmbits de coneixement del carst mallorquí en tota mena de fòrums, congressos, *workshops*, simposis, jornades i altres tipus de trobades.

Podem dir que aquesta tasca de difusió començà entre els anys 1972 i 1977, quan participà activament presentant diverses contribucions en els simposis organitzats per l'*Escola Catalana d'Espeleologia*. També participarà en els *Congresos Nacionales de Espeleología* celebrats l'any 1972 a Oviedo i l'any 1974 a Madrid.

La tasca de difusió internacional del carst mallorquí el dugué a assistir a diversos congressos internacionals d'espeleologia, organitzats per la *International Union of Speleology* (UIS). El primer al qual assistí i hi participà fou a Bowling Green, ciutat de Kentucky als Estats Units (1981) on foren presentats per primera vegada els POS dins d'un àmbit internacional. A aquest, el seguirien els congressos de Barcelona (1986); Budapest, Hongria (1989); Beijing, Xina (1993) (Figura 17); La Chaux-de-Fonds, Suïssa (1997); Brasilia, Brasil (2001); Atenes, Grècia (2005); Kerrville, Texas, també als Estats Units (2009) i Brno, a la República Txeca (2013).

A part d'aquests congressos, no podem oblidar altres trobades nacionals i locals, començant per exemple pels simposis organitzats per la Cueva de

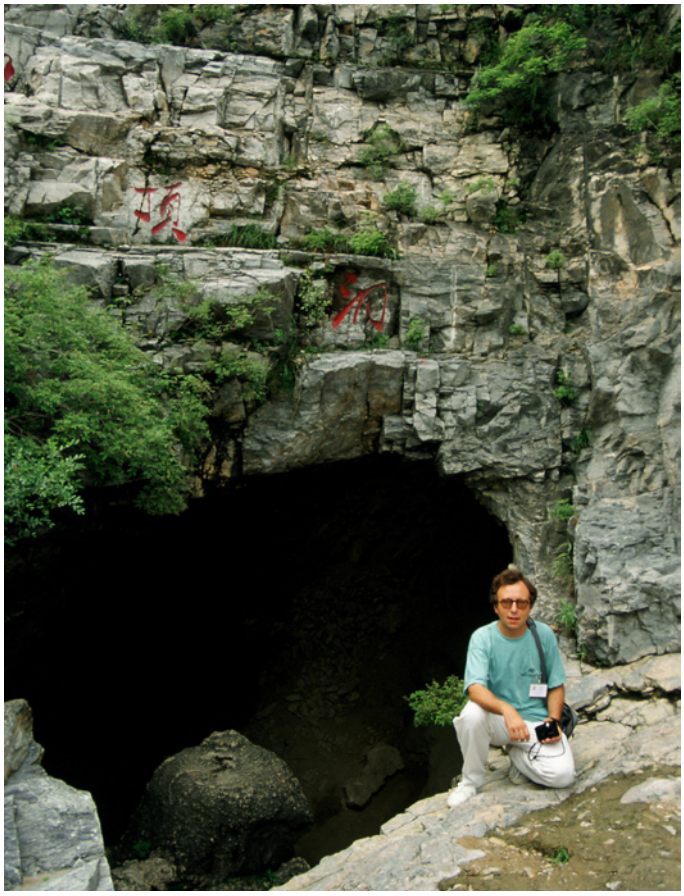


Figura 17: Una de les coves de l'important jaciment paleontològic de Zhoukoudian, durant una visita en ocasió del *11th International Congress of Speleology*, celebrat a Beijing (China) l'estiu del 1993. (Foto: J. Ginés).
Figure 17: One of the caves at the important paleontological site of Zhoukoudian, during a visit on the occasion of the *11th International Congress of Speleology*, held in Beijing (China) in the summer of 1993. (Photo: J. Ginés).

Figura 18: Després d'una visita a les *Galerías Altas* i *Galerías Nuevas* de la Cueva de Nerja (Málaga), realitzada coincidint amb el *I Simposio de Geología Cueva de Nerja* celebrat el 1999 a aquesta important cova turística. En la primera fila, d'esquerra a dreta, Yavor Shopov, Àngel Ginés, Jerónimo López, Paolo Forti, Juan J. Durán, ¿?, i Derek Ford; darrere, Antonio Rivas i Rafael Fernández-Rubio.
Figure 18: After a visit to *Galerías Altas* and *Galerías Nuevas* of Cueva de Nerja (Málaga), during the *I Simposio de Geología Cueva de Nerja* held in 1999 at this important show cave. In the front row, from left to right, Yavor Shopov, Àngel Ginés, Jerónimo López, Paolo Forti, Juan J. Durán, ¿?, and Derek Ford; behind, Antonio Rivas and Rafael Fernández-Rubio.

Nerja (Málaga) entre el 1999 i el 2002 (Figura 18), i acabant per les diverses edicions de les *Jornades de Medi Ambient* de Palma en les quals també feu difusió dels treballs que anaven sortint al llarg dels anys, i que representen una llarga llista que s'allunya del caràcter sintètic d'aquest treball.

Dins dels contactes a nivell internacional també cal ressaltar la col·laboració amb diferents convocatòries de la *International Karstological School*, organitzades pel *Karst Research Institute* (ZRC SAZU) a la ciutat de Postojna, a Eslovènia, i en les quals hi participà en les edicions dels anys 2000, 2003 i 2005 (Figura 19). Fruit d'aquestes estades s'establí un interessant intercanvi d'experiències entre Mallorca i Eslovènia per mostrar les característiques del carst d'ambdues zones, en què hi van participar per part eslovena el director de l'Institut, el Dr. Tadej Slabe, i el Dr. Martin Knez. Fruit de la col·laboració amb aquest centre d'investigació d'Eslovènia, el 2009, es publicà el llibre *Karst rock features. Karren sculpturing*, citat anteriorment.

Figura 19: Àngel i Joaquín Ginés, l'any 2005, en el *Karst Research Institute* de Postojna (Eslovènia), durant la celebració de la *13th International Karstological School*.
(Foto: J.J. Fornós).
Figure 19: Àngel and Joaquín Ginés, in 2005, at the *Karst Research Institute* in Postojna (Slovenia), during the celebration of the *13th International Karstological School*.
(Photo: J.J. Fornós).

Acabarem aquest apartat de difusió del coneixement esmentant altres dos premis. El primer en el Festival Internacional Spéléovision-2000, on es presentà la pel·lícula de Paco Alburquerque que duia per títol "*El laberint subterrani*", un documental sobre la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor) que rebé el premi com a millor film d'exploració i en què Àngel fou qui elaborà el guió. El segon, l'any 2012, correspon al *Premi Bartomeu Darder* atorgat per la *Societat d'Història Natural de les Balears* a la millor contribució naturalística de l'any a les Balears, de la qual Àngel era co-autor.

Figura 20: Interessat en tots els aspectes relacionats amb el carst, l'espeleologia i l'estudi de les coves de Mallorca centraren les activitats d'Àngel Ginés. Fotografia presa el 2006 a la Cova de s'Ònix, de Manacor. (Foto: J. Ginés).
Figure 20: Although interested in all aspects related to karst, the speleology and the study of Mallorcan caves were the focus of research conducted by Àngel Ginés. Photograph taken in 2006 at Cova de s'Ònix, in Manacor. (Photo: J. Ginés).

Corol·lari

No volem acabar sense remarcar el paper decisiu que tingué Àngel amb les seves inquietuds i amb totes les activitats que promogué al llarg de la seva vida. Sense cap mena de dubte, el seu impuls i l'estreta col·laboració simbiòtica entre el món espeleològic i l'acadèmic, ha consolidat l'espeleologia científica a les Balears tot assolint un reconegut prestigi científic dins l'àmbit local, estatal i internacional (Figura 20).

Agraïments

El present treball és una contribució al projecte PID2020-112720GB-I00/AEI/ de l'Agencia Estatal de Investigación. Agraïm a Maria Roig i als revisors dels Papers de la SEB els comentaris i suggeriments fets al manuscrit original.

Bibliografia

FORNÓS, J.J. (1998): *Aspectes Geològics de les Balears*. Universitat de les Illes Balears. 473 pp. Palma.

FORNÓS, J.J. (2024): Àngel Ginés (1950-2024). *International Journal of Speleology*, 53 (1): 75-77.

GINÉS, À. & BORRÀS, C. (1990): *El carst a Mallorca*. Conselleria de Cultura Educació i Esports. Govern Balear. Materials Didàctics, 50 pàgines. + 114 diapositives.

GINÉS, J. & FORNÓS, J.J. (2024): Àngel Ginés (1950-2024). Publicacions i anàlisi bibliomètric. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 7: 265-279.

HADES, Equipo (1985): Los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras de Mallorca: estado actual de las investigaciones. In: BARCELÓ, B. (ed.) *Geomorfología litoral y Cuaternario. Homenaje a Juan Cuerda.* Universitat de València. pp. 103-122.

MAROTO, A. & FONT, A. (1981): Proyecto Hades: Campañas de 1981. *Endins*, 8: 81-90.

VICENS, D. & PONS, G. (2024): Àngel Ginés Gracia (1950-2024). L'espeleòleg naturalista. In Memoriam. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 67: 193-211.

VICENS, D., PONS, G. X. & GINARD, A. (2022): Les juntes directives dels darrers 41 anys de la Societat d'Història Natural de les Balears (1981-2022). *VIII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears*, 641-644.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Àngel Ginés (1950-2024). Publicacions i anàlisi bibliomètric

Joaquín GINÉS [1, 2] i Joan J. FORNÓS [1, 2]

[1] Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca. Email: jginesgracia@yahoo.es
[2] Grup de Recerca de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca.

Abstract

A list of the bibliographical production on karst and speleology performed by Àngel Ginés is presented, including publications from 1971 until his death in 2024. This compilation includes a total of 212 references, ordered by year, that are grouped into five large categories: books and other works produced as the main author or editor (8), book chapters (20), papers in international scientific journals (23), articles in journals and other publications edited in Spain (114), and papers published in the proceedings of national and international symposiums and congresses (47). A brief bibliometric analysis of the subjects covered in his scientific production is included.

Resumen

Se presenta un listado de la producción bibliográfica de Àngel Ginés sobre karst y espeleología, publicada desde el año 1971 hasta su defunción ocurrida el presente año. Esta recopilación incluye un total de 212 referencias –ordenadas por años– que son agrupadas en cinco grandes categorías: libros y otras obras elaboradas como autor o editor principal (8), capítulos de libros (20), artículos en revistas científicas internacionales (23), artículos en revistas y publicaciones editadas en el estado español (114), y trabajos publicados en simposiums y congresos tanto nacionales como internacionales (47). Se incluye un breve análisis bibliométrico sobre la temática tratada en su producción científica.

Ginés, J. i Fornós, J.J. (2024): Àngel Ginés (1950-2024). Publicacions i anàlisi bibliomètric.
Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 265-279. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 24 juliol 2024; **Revisat:** 3 agost 2024; **Acceptat:** 20 agost 2024.
Publicat online: 31 desembre 2024.

Introducció

L'obra del company Àngel Ginés ha estat molt extensa i abraça vessants molt diverses dels coneixements sobre el carst, l'espeleologia i les ciències naturals, sobretot de les Balears. Es presenta ara un llistat de la seva producció bibliogràfica, publicada des de l'any 1971 fins al seu traspàs ocorregut el gener d'enguany. Aquesta recopilació inclou un total de 212 referències –ordenades per anys– que són agrupades en cinc grans categoriess: llibres i altres obres elaborades com a autor o editor (8), capítols de llibres (20), articles en revistes científiques internacionals (23), articles en revistas i publicacions editadss a l'estat espanyol (114), i treballs publicats a les actes o *proceedings* de simpòsiums i congressos tant nacionals com internacionales (47). La producció bibliogràfica d'Àngel Ginés inclou, així mateix, 30 resums breus –d'una pàgina o menys– presentats a congressos, sobretot internacionals, que no han estat inclosos en la present recopilació.

Breu anàlisi bibliomètric

La pluridisciplinarietat i la feina en equip que normalment requereix l'estudi del carst, en qualsevol de les seves vessants, fa que a bona part dels treballs que es publiquen hi intervinguin autors diversos. En aquest sentit de les 212 referències que es llisten a continuació, una gran majoria d'elles estan signades per diversos autors. En qualsevol cas, n'Àngel està com a primer signant, o bé tot sol, en un total de 87 referències (41,04 %). En el 70 % de les referències que es relacionen en aquesta recopilació apareix com a coautor Joaquín Ginés, fet que posa de manifest la estreta relació simbiòtica que mantenia amb el seu germà en matèria de publicacions.

Les temàtiques tractades abracen un ampli ventall de disciplines (Figura 1) d'entre les que destaquen les relacionades amb l'estudi dels espeleotemes freàtics, sigui en les seves variants descriptives, tant

mineralògiques com geoquímiques, les relacionades amb la seva edat (datacions per métodes radiomètrics) o la relació amb les oscil·lacions del nivell marí, que abracen des del miocè superior fins a l'època més recent (53 referències; 25 %). En segon lloc destaquen el treballs descriptius de coves i avencs amb les seves corresponents topografies (26 referències; 12,26 %). Els articles que fan referència a l'exocarst, així com articles generals sobre el carst de Mallorca, bàsicament de tipus descriptiu i recopilatori, són els següents en importància amb un total de 23 referències cadascun d'ells (10,85 %).

Els treballs sobre espeleogènesi representen un total del 9,45 % (20 referències). Dins d'aquestes destaquen els dedicats a l'espeleogènesi de les coves situades al litoral (12 referències; 5.67 %), les coves hipogèniques (5 referències; 2,36 %) i l'espeleogènesi general dins del carst (3 referències; 1,42 %).

La temàtica del quaternari, des de diferents vessants com la geomorfologia, les dunes, o el paleoclima, està tractada en 10 referències (4,72 %). Resulta curiós que la temàtica de la seva tesi doctoral, feta dins del doctorat en biologia per la Universitat de les Illes Balears, estigui poc representada a nivell de publicacions. De fet, només hem comptabilitzat 6 referències sobre carst i vegetació, la qual cosa representa un 2,83 % del total. Tanmateix, a aquestes hi podríem afegir les que tracten de la biodiversitat (7 referències; 3,30 %) i les relacionades amb la bioespeleologia (12 referències; 5,67 %) que en total sumarien 25 referències.

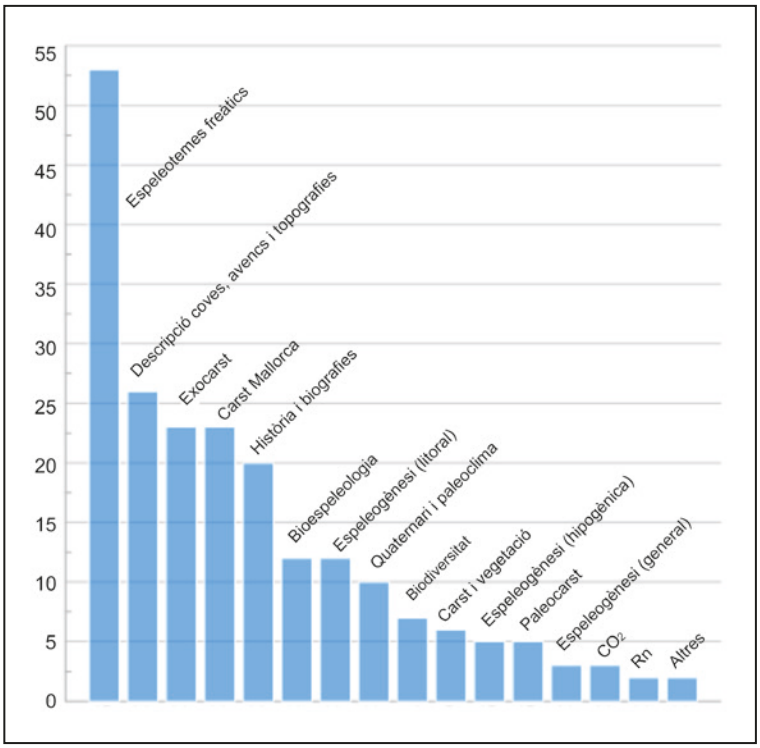


Figura 1: Anàlisi bibliomètric de les temàtiques tractades a la producció científica d'Àngel Ginés (n = 212 referències).
Figure 1: Bibliometric analysis of the subjects covered in the scientific production of Àngel Ginés (n = 212 references).

Capítol a part mereixen els treballs de tipus històric i social que tracten bàsicament sobre l'evolució del coneixement de les coves i el carst mallorquí, els quals inclouen compendis bibliogràfics i biografies (20 referències; 9,43 %).

També podem parlar d'articles que tracten diverses temàtiques molt més específiques i que podríem considerar per incloure dins d'un apartat de miscel·lània. Dins d'aquest grup hi inclouríem treballs sobre el paleocarst (5 referències; 2,36 %), l'anàlisi de la presència de CO_2 a les coves illenques (3 referències;1,42 %), o la presència de gas radó (2 referències; 0,94 %). També hi ha 2 referències (0,94 %) que, potser ja a tall més anecdòtic, s'ocupen del cançoner de Mallorca i les rondalles des de la perspectiva espeleològica.

Llibres i altres volums elaborats com a autor o editor

GINÉS, A. (1982): *Bioespeleología del karst mallorquín, datos ecológicos preliminares*. Tesi de Llicenciatura. Departamento de Ecología, Universidad de Palma de Mallorca. 219 pàgs. Inèdit.

GINÉS, A. & BORRÀS, L. (1990): *El carst a Mallorca. Materials didàctics*. Centre de Professors. 50 pàgs + 114 diapositives. Palma.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) (1995): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3. 216 pàgs. Palma.

FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) (1996): *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 450 pàgs. Palma. (Figura 2)

GINÉS, A. & MOREY, M. (1998): *Tres documents sobre biodiversitat i desenvolupament sostenible*. Museu Balear de Ciències Naturals. Sèrie Documents Didàctics M.B.C.N. 54 pàgs. Sóller.

GINÉS, A. (1999): *Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica*. Tesi Doctoral. Departament de Biologia Ambiental, Universitat de les Illes Balears. 581 pàgs + 70 làms. Inèdit.

GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) (2009): *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9. 561 pàgs. Ljubljana, Eslovènia. (Figura 2)

GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) (2012): *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18. 219 pàgs. Palma. (Figura 2)

Figura 2: Algunes publicacions destacables de les quals Àngel Ginès fou coeditor.
Figure 2: Some notable publications of which Àngel Ginès was co-editor.

Capítols de llibres

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1989): El karst en las islas Baleares. In: DURÁN, J.J. & LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (eds.) *El karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía nº 4: 163-174. Madrid.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1991): Morfologías kársticas. Karst costero y espeleogénesis en el Migjorn de Mallorca. Espeleotemas freáticos y paleoniveles del Mediterráneo. In: GRIMALT, M. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (eds.) *Libro-Guía de las Excursiones de las VII Jornadas de Campo de Geografía Física.* Universitat de les Illes Balears. 109-142, 197-206. Palma.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1992): Karst phenomena and biospeleological environments. In: CAMACHO, A.I. (ed.) *The Natural History of Biospeleology*. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Monografías. 27-56. Madrid.

GINÉS, A. (1993): IX. Morfologies exocàrstiques. In: ALCOVER, J.A.; BALLESTEROS, E. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Història Natural de l'arxipèlag de Cabrera*. C.S.I.C. - Editorial Moll. 153-160. Palma.

GINÉS, A. (1995): Les coves i els avencs. 1. Les cavitats subterrànies aïllades. In: FOLCH, R. & CAMARASA, J.M. (directors) *Biosfera. 9. Tundra i insularitat*. Fundació Enciclopèdia Catalana. 381-383. Barcelona.

GINÉS, A. (1998): L'exocarst de la serra de Tramuntana de Mallorca. In: FORNÓS, J.J. (ed.) *Aspectes geològics de les Balears*. Universitat de les Illes Balears. 361-389. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A. & PONS, G.X. (1998): Carst, coves i fauna cavernícola. In: BLÀZQUEZ, M.; DÍAZ, R. & RULLAN, O. (eds.) *La Serra de Tramuntana, natura i cultura*. GOB / Editorial Moll. 77-81. Palma.

GINÉS, A. (2004): Europe, Mediterranean. In: GUNN, J. (ed.) *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn. 337-338. New York.
GINÉS, A. (2004): Karren. In: GUNN, J. (ed.) *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn. 470-473. New York.

GINÉS, A. (2009): Karrenfield landscapes and karren landforms. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 13-24. Ljubljana, Eslovènia.
GINÉS, A. & LUNDBERG, J. (2009): Rainpits: an outline of their characteristics and genesis. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 169-183. Ljubljana, Eslovènia.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009): Mid-mountain karrenfields at Serra de Tramuntana in Mallorca Island. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 375-390. Ljubljana, Eslovènia.
LUNDBERG, J. & GINÉS, A. (2009): Rillenkarren. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 185-210. Ljubljana, Eslovènia.

GINÉS, A.; GINÉS, J. & GRÀCIA, F. (2013): 11. Cave development and patterns of caves and cave systems in the eogenetic coastal karst of southern Mallorca (Balearic Islands, Spain). In: LACE, M.J. & MYLROIE, J.E. (eds.) *Coastal karst landforms*. Springer. Coastal Research Library, Vol. 5: 245-260. Dordrecht, Holanda.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (2014): 7. The karst of the Tramuntana range, Mallorca Island. In: GUTIÉRREZ, F. & GUTIÉRREZ, M. (eds.) *Landscapes and landforms of Spain*. Springer. World Geomorphological Landscapes, Vol. 2: 91-100. Dordrecht, Holanda.

RITA, J.; BALLESTEROS, E.; GINÉS, A.; McMINN, M. & PÉREZ, V. (2016): Capítulo 8. Tejiendo naturaleza: el Archipiélago de Cabrera, lugar de encuentro y armonía entre la gea, la fauna y la flora. In: ROBLEDO, P.A. (ed.) *El Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera: un paisaje entre la tierra y el mar.* Instituto Geológico y Minero de España, Organismo Autónomo Parques Nacionales. 201-231. Madrid.

GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F.; MERINO, A.; ONAC, B.P. & GINÉS, A. (2017): 5. Hypogene imprints in coastal karst caves of Mallorca Island (Western Mediterranean): morphological features and speleogenetic approach. In: KLIMCHOUK, A.; PALMER, A.N.; DE WAELE, J.; AULER, A.S. & AUDRA, P. (eds.) *Hypogene karst regions and caves of the World*. Springer International Publishing AG. Cave and Karst Systems of the World. 99-112. Cham, Suïssa.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F. & MERINO, A. (2019): Chapter 7. Littoral endokarst from Mallorca Island (Western Mediterranean). In: MORALES, J.A. (ed.) *The Spanish coastal systems. Dynamic processes, sediments and management*. Springer Nature Switzerland AG. 143-166. Cham, Suïssa.

GINÉS, A. (2020): Els ecosistemes subterranis del subarxipèlag de Cabrera. In: GRAU, A.M.; FORNÓS, J.J.; MATEU, G.; OLIVER, P.A. & TERRASA, B. (eds.) *Arxipèlag de Cabrera: Història Natural*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 30: 697-708. Palma.

SENDRA, A.; PÉREZ, T.; CABALLERO, B.; MASÓ, G.; AUROUX, L.; PRIETO, M. MONSALVE, M.A. & GINÉS, A. (2023): Treinta y ocho. Historia, un relato sobre hallazgos y descubrimientos. In: SENDRA, A. (Coord.) *Habitantes de la oscuridad. Fauna Ibero-Balear de las cuevas*. Sociedad Entomológica Aragonesa. 579-632. Saragossa.

Publicacions en revistes científiques internacionals

GINÉS, A. (1995): Deforestation and karren development in Mallorca, Spain. In: BÁRÁNY-KEVEI, I. (ed.) *Environmental effects on karst terrains*. Special issue of Acta Geographica Szegediensis. Homage to László Jakucs. 25-32. Szeged, Hongria.

FIOL, L.A.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (1996): Effects of biokarstic processes on the development of solutional rillenkarren in limestone rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 447-452. Londres.

GINÉS, A. (1999): Agriculture, grazing and land use changes at the Serra de Tramuntana karstic mountains. *International Journal of Speleo*logy, 28 B (1/4): 5-14. Bologna, Itàlia.

GINÉS, A. (2000): Patterns of collapse chambers in the endokarst of Mallorca (Balearic islands, Spain). *Acta Carsologica*, 29 (2): 139-148. Ljubljana, Eslovènia.

VESICA, P.L.; TUCCIMEI, P.; TURI, B.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2000): Late Pleistocene paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca, Spain. *Quaternary Science Reviews*, 19: 865-879. Oxford, U.K.

FORNÓS, J.J.; GELABERT, B.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; TUCCIMEI, P. & VESICA, P.L. (2002): Phreatic overgrowths on speleothems: a useful tool in structural geology in littoral karstic landscapes. The example of eastern Mallorca (Balearic islands). *Geodinamica Acta*, 15: 113-125.

TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; DELITALA, C.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J. & TADDEUCCI, A. (2006): Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (1): 1-21. Berlín.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (2007): Eogenetic karst, glacioeustatic cave pools and anchialine environments on Mallorca Island: a discussion of coastal speleogenesis. *International Journal of Speleology*, 36 (2): 57-67. Bologna, Itàlia.

HODGE, E.J.; RICHARDS, D.A.; SMART, P.L.; GINÉS, A. & MATTEY, D.P. (2008): Sub-millennial climate shifts in the western Mediterranean during the last glacial period recorded in a speleothem from Mallorca, Spain. *Journal of Quaternary Science*, 23 (8): 713-718.

DORALE, J.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; TUCCIMEI, P. & PEATE, D.W. (2010): Sea-level highstand 81,000 years ago in Mallorca. *Science*, 327: 860-863 + 4 pàgs Supl. Washington. (Figura 3)

TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; KRAMERS, J. & VILLA, I.M. (2010): Constraining Holocene sea levels using U-Th ages of phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (7): 782-790. Londres.

FORNÓS, J.J.; MERINO, A.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & GRÀCIA, F. (2011): Solutional features and cave deposits related to hypogene speleogenetic processes in a littoral cave of Mallorca Island (western Mediterranean). *Carbonates and Evaporites*, 26 (1): 69-81.

TUCCIMEI, P.; VAN STRYDONCK, M.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; SOLIGO, M.; VILLA, I.M. & FORNÓS, J.J. (2011): Comparison of ^{14}C and U-Th ages of two Holocene phreatic overgrowths on speleothems from Mallorca (Western Mediterranean): Environmental implications. *International Journal of Speleology*, 40 (1): 1-8. Tampa, U.S.A.

TUCCIMEI, P.; ONAC, B.P.; DORALE, J.A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; SPADA, G.; RUGGIERI, G. & MUCEDDA, M. (2012): Decoding last interglacial sea-level variations in the western Mediterranean using speleothem encrustations from coastal caves in Mallorca and Sardinia: a field data - model comparison. *Quaternary International*, 262: 56-64.

GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; MERINO, A. & GRÀCIA, F. (2014): Geologic constraints and speleogenesis of Cova des Pas de Vallgornera, a complex coastal cave from Mallorca Island (Western Mediterranean). *International Journal of Speleology*, 43 (2): 105-124. Tampa, U.S.A.

DUMITRU, O.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; COSMA, C.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & MERINO, A. (2015): Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain. *Science of the Total Environment*, 526: 196-203. Amsterdam.

DE WAELE, J.; D'ANGELI, I.M.; TISATO, N.; TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; VILLA, I.M.; GRAU GONZÁLEZ, E.R.; BERNASCONI, S.M. & BONTOGNALI, T.R.R. (2017): Coastal uplift rate at Matanzas (Cuba) inferred from MIS5e phreatic overgrowths on speleothems. *Terra Nova*, 29 (2): 98-105.

POLYAK, V.J.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; HAY, C.; ASMEROM, Y.; DORALE, J.A.; GINÉS, J.; TUCCIMEI, P. & GINÉS, A. (2018): A highly resolved record of relative sea level in the western Mediterranean Sea during the last interglacial period. *Nature Geoscience*, 11 (11): 860-864 + 20 pàgs Supl. Londres. (Figura 3)

DUMITRU, O.A.; AUSTERMANN, J.; POLYAK, V.J.; FORNÓS, J.J.; ASMEROM, Y.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & ONAC, B.P. (2019): Constraints on global mean sea level during Pliocene warmth. *Nature*, 574 (7777): 233-236 + 12 pàgs Supl. Londres. (Figura 3)

DUMITRU, O.A.; AUSTERMANN, J.; POLYAK, V.J.; FORNÓS, J.J.; ASMEROM, Y.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & ONAC, B.P. (2021): Sea-level stands from the Western Mediterranean over the past 6.5 million years. *Scientific Reports*, 11: article nº 261, 10 pàgs. Londres.

LUCIA, G.; POLYAK, V.J.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; ASMEROM, Y. & ONAC, B.P. (2021): Chronology of middle Pleistocene coastal karst evolution and relative sea-level changes in Mallorca. *Journal of Coastal Research*, 37 (2): 408-420. Coconut Creek, U.S.A.

ONAC, B.P.; MITROVICA, J.X.; GINÉS, J.; ASMEROM, Y.; POLYAK, V.J.; TUCCIMEI, P.; ASHE, E.L.; FORNÓS, J.J.; HOGGARD, M.J.; COULSON, S.; GINÉS, A.; SOLIGO, M. & VILLA, I.M. (2022): Exceptionally stable preindustrial sea level inferred from the western Mediterranean Sea. *Science Advances*, 8 (26): article nº eabm6185, 8 pàgs + 34 pàgs. Supl. Washington.

ONAC, B.P.; POLYAK, V.J.; MITROVICA, J.X.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & ASMEROM, Y. (2024): Submerged bridge constructed at least 5600 years ago indicates early human arrival in Mallorca, Spain. *Communications Earth & Environment*, 5: article nº 457, 6 pàgs + 13 pàgs. Supl. Londres.

Figura 3: Portades de les revistes de major impacte internacional en les que Àngel Ginés va publicar treballs.
Figure 3: Covers of the journals with the greatest international impact in which Àngel Ginés published papers.

Articles en revistes i publicacions editades a l'estat espanyol

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1971): Avenc des Cocons. Contribución al estudio de las cavidades del Coll den Pastor (Fornalutx). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 16: 7-18. Palma.

GINÉS, A. (1971): Cavidades de la isla Dragonera. *Speleon*, 18: 37-42. Barcelona.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1971): Exploraciones en Ibiza. *Cavernas*, 16: 19-26. Badalona, Barcelona.

GINÉS, A.; GINES, J. & ALONSO, A. (1971): Sobre la posibilidad de efectos erosivos afectando a concreciones de carácter pisolítico. *Geo y Bio Karst*, 28: 15. Barcelona.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1972): Algunas observaciones sobre los fenómenos kársticos de Sa Coma de Mortitx (Mallorca). *Geo y Bio Karst*, 32: 22-24. Barcelona.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1972): Les cavitats de sa Fita del Ram. *Espeleòleg*, 16: 769-779. Barcelona.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1974): Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con formaciones marinas del Cuaternario. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 19: 11-28. Palma.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (1974): Estudio estadístico de las cavernas de Mallorca. *Endins*, 1: 11-16. Palma.

BELTRÁN, J.M.; GINÉS, A. & RIERA, G. (1975): Bibliografía bioespeleológica de Baleares. *Endins*, 2: 39-41. Palma.
GINÉS, A. (1975): Relación actualizada de las cavidades más profundas de la isla de Mallorca. *Endins*, 2: 44-47. Palma.
GINÉS, A. & GINÉS, J. (1975): Los medios lacustres hipogeos representados en el karst mallorquín, y sus respectivas tendencias morfogénicas. *Endins*, 2: 9-12. Palma.
POMAR, L.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; MOYÀ, G. & RAMÓN, G. (1975): Nota previa sobre la petrología y mineralogía de la calcita flotante de algunas cavidades del levante mallorquín. *Endins*, 2: 3-5. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1976): Ses Coves del Pirata. *Endins*, 3: 41-45. Palma.
POMAR, L.; GINÉS, A. & FONTARNAU, R. (1976): Las cristalizaciones freáticas. *Endins*, 3: 3-25. Palma.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1977): Discusión bibliográfica comparativa entre las entalladuras de corrosión y otras morfologías de aspecto semejante. *Endins*, 4: 13-20. Palma.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (1977): El medio fluvio-lacustre hipogeo en las cuevas de Mallorca y su asociación de morfologías. *Endins*, 4: 3-12. Palma.
GINÉS, J.; GINÉS, A. & BORRÀS, L. (1977): Bibliografía espeleológica de las Baleares. Espeleología Física. *Endins*, 4: 57-64. Palma.

GINÉS, A.; GINÉS, J.; POMAR, L. & SALVÀ, P.A. (1979): *La Serra de Tramuntana*. VI Coloquio de Geografía, Excursión nº 1. 38 pàgs. Palma.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (1979): L'Avenc Fonda (Pollença, Mallorca). *Endins*, 5-6: 39-42. Palma.
POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. *Endins*, 5-6: 3-17. Palma.

GINÉS, A. (1980): Bibliografía bioespeleológica actualizada de las Islas Baleares. *Endins*, 7: 69-73. Palma.
GINÉS, J.; BORRÀS, L. & GINÉS, A. (1980): Estudi geo-espeleològic del massís del Massanella (Escorca, Mallorca). 1– Les cavitats del Puig den Galileu. *Endins*, 7: 3-16. Palma.
ROSSELLÓ, J.A. & GINÉS, A. (1980): Introducció a la brioflora dels avencs mallorquins. *Endins*, 7: 27-35. Palma.

GINÉS, A. & FIOL, L.A. (1981): Estratigrafía del yacimiento de la Cova des Fum (Sant Llorenç, Mallorca). *Endins*, 8: 25-42. Palma.
GINÉS, J.; BORRÀS, L. & GINÉS, A. (1981): Estudi geo-espeleològic del massís del Massanella (Escorca, Mallorca). 2– Les cavitats de la Serra des Teix. *Endins*, 8: 3-12. Palma.
HENNIG, G.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981): Avance de los resultados obtenidos mediante datación isotópica de algunos espeleotemas subacuáticos mallorquines. *Endins*, 8: 91-93. Palma.

GINÉS, A. (1982): Inventario de especies cavernícolas de las Islas Baleares. *Endins*, 9: 57-75. Palma.
GINÉS, J.; BORRÀS, L. & GINÉS, A. (1982): Estudi geo-espeleològic del massís del Massanella (Escorca, Mallorca). 3– Les cavitats del Puig de Massanella. *Endins*, 9: 3-13. Palma.

HADES, Equipo (1985): Los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras de Mallorca: estado actual de las investigaciones. *Geomofología litoral y Cuaternario. Homenaje a Juan Cuerda*. Universidad de València, 103-122. València.

GINÉS, A. & PONS-MOYÀ, J. (1986): Aproximación al origen del yacimiento paleontológico del Pleistoceno inferior de Casa Blanca I (Almenara, Castelló). *Endins*, 12: 41-49. Palma.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1987): Características espeleológicas del karst de Mallorca. *Endins*, 13: 3-19. Palma.
GINÉS, A.; HERNÁNDEZ, J.; GINÉS, J. & POL, A. (1987): Observaciones sobre la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de la Cova de les Rodes (Pollença, Mallorca). *Endins*, 13: 27-38. Palma.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (1987): Datos espeleocronológicos sobre el karst de la isla de Mallorca. *Revista de Ciència*, 1: 81-92. Palma.
POMAR, L.; RODRÍGUEZ-PEREA, A.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; FONT, A. & MORA, A. (1987): Phreatic speleothems in coastal caves: a new method to determine sea-level fluctuations. In: ZAZO, C. (ed.) *Late Quaternary sea level changes in Spain*. Museo Nacional de Ciencias Naturales C.S.I.C. Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario, 10: 197-224. Madrid.

ANDREWS, J.N.; GINÉS, A.; PONS-MOYÀ, J.; SMART, P.L. & TRIAS, M. (1989): Noves dades sobre el jaciment paleontològic de la Cova de na Barxa (Capdepera, Mallorca). *Endins*, 14-15: 17-25. Palma.
GINÉS, A.; FIOL, L.A.; POL, A. & ROSSELLÓ, J.A. (1989): Morfologia i vegetació d'un grup de dolines de la Serra de Tramuntana (Mallorca). *Endins*, 14-15: 43-52. Palma.
GINÉS, J.; BORRÀS, L. & GINÉS, A. (1989): Grup Espeleològic EST: 1968-1988. Vint anys d'espeleologia mallorquina. *Endins*, 14-15: 101-116. Palma.

BORDOY, M. & GINÉS, A. (1990): Observaciones morfométricas sobre la profundidad de estrías de lapiaz (Rillenkarren) en Mallorca. *Endins*, 16: 21-25. Palma.
FERRIOL, A.; FORTEZA, V.; GINÉS, A.; LLOBERA, M.; MARTÍNEZ, A.; MOYÀ, G. & RAMON, G. (1990): Els ambients aquatics insulars. Un patrimoni que cal conèixer i protegir. *Bolletí de la Societat Arqueològica Lul·liana*, 46: 235-243. Palma.
GINÉS, A. (1990): Utilización de las morfologías de lapiaz como geoindicadores ecológicos en la Serra de Tramuntana (Mallorca). *Endins*, 16: 27-39. Palma.

FIOL, L.A.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (1992): El Rillenkarren: un tipus particular de biocarst? Primeres dades. *Endins*, 17-18: 43-49. Palma.
GINÉS, A. (1992): Inauguració de la primera fase del "Museu Balear de Ciències Naturals" de Sóller. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 35: 171-176. Palma.
GINÉS, A. & GINÉS, J. (1992): Las Coves del Drac (Manacor, Mallorca). Apuntes históricos y espeleogenéticos. *Endins*, 17-18: 5-20. Palma.
GINÉS, A. & GINÉS, P. (1992): Principals característiques climàtiques des Clot des Sero (Calvià, Mallorca). *Endins*, 17-18: 37-42. Palma.

GINÉS, A. (1993): El conocimiento espeleo-topográfico de las cavidades baleares (1862-1992). *Endins*, 19: 55-70. Palma.
GINÉS, A. (1993): Apuntes históricos sobre las Coves d'Artà (Capdepera, Mallorca). *Boletín del Museo Andaluz de la Espeleología*, 7: 21-27. Granada.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993): Dataciones isotópicas de espeleotemas freáticos recolectados en cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 19: 9-15. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1994): Coves del Drac, Manacor (Mallorca). *Tecno Ambiente*, 39: 73-80. Madrid.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (1994): Coves del Drac, Manacor (Mallorca). In: FRASA Ingenieros Consultores S.L. (ed.) *Mundo Subterráneo*. TIASA. 73-80. Madrid.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1995): El paleocarst a Mallorca / Paleokarst in Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 113-123. Palma. (Figura 4)
GINÉS, A. (1995): Els espeleotemes de les coves de Mallorca / The speleothems of Majorcan caves. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 87-97. Palma. (Figura 4)
GINÉS, A. & GINÉS, J. (1995): Les formes exocàrstiques de l'illa de Mallorca / The exokarstic landforms of Mallorca island. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 59-70. Palma. (Figura 4)
GINÉS, A. & MAYOL, J. (1995): Conservació del carst i les coves a Mallorca / Conservation of the karst and caves of Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 205-216. Palma. (Figura 4)
GINÉS, J. & GINÉS, A. (1995): Aspectes espeleocronològics del carst de Mallorca / Speleochronological aspects of karst in Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 99-112. Palma. (Figura 4)

FIOL, L.A.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (1996): The role of biokarstic processes on the development of solutional rillenkarren: an experience on Jurassic carbonate rocks of Mallorca. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 63-64. Palma.
GINÉS, A. (1996): An environmental approach to the typology of karren landform assemblages in a Mediterranean mid-mountain karst: the Serra de Tramuntana, Mallorca, Spain. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 163-176. Palma.
GINÉS, A. (1996): Quantitative data as a base for the morphometrical definition of rillenkarren features found on limestones. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 177-191. Palma.

GINÉS, A. (1996): The geoecological significance of two types of dissolution flutes wider than rillenkarren observed in Mallorca (Spain). In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 193. Palma.

GINÉS, A. (1998): Dades morfomètriques sobre les estries de lapiaz dels Alps calcaris suïssos i la seva comparació amb les estries de la Serra de Tramuntana. *Endins*, 22: 109-118. Palma.

TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J. & VESICA, P.L. (1998): Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos controlados por el nivel marino, procedentes de cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 22: 99-107. Palma.

GINÉS, A. (2000): Morfologia càrstica i vegetació a la Serra de Tramuntana. Una aproximació ecològica a la dinàmica de l'exocarst. *Endins*, 23: 101-110. Palma.

TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; DELITALA, C.; PAZZELLI, L.; TADDEUCCI, A.; CLAMOR, B.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GRÀCIA, F. (2000): Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos recolectados a cotas inferiores al actual nivel marino en cuevas costeras de Mallorca (España). Aportaciones a la construcción de una curva eustática detallada de los últimos 300 ka para el Mediterráneo occidental. *Endins*, 23: 59-71. Palma.

GINÉS, A. (2001): Les coves de la costa oriental de Mallorca i els canvis de nivell de la mar durant els darrers 150.000 anys. Una experiència d'investigació potenciada des del MBCN. *Aubaïna*, 3 (1): 17-22. Sóller, Mallorca.

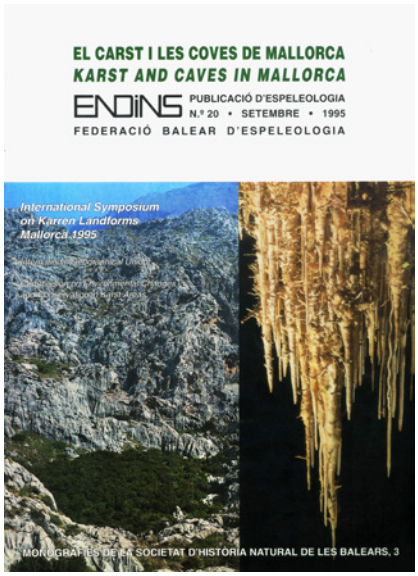
GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F.; DELITALA, C.; TADDEUCCI, A.; TUCCIMEI, P. & VESICA, P.L. (2001): Els espeleotemes freàtics de les coves litorals de Mallorca: canvis del nivell de la Mediterrània i paleoclima en el Pleistocè superior. In: PONS, G.X. & GUIJARRO, J.A. (eds.) *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 9: 33-52. Palma.

GINÉS, A. (2002): La fauna anquihalina de las Baleares un siglo después del descubrimiento de *Typhlocirolana moraguesi* Racovitza 1905 / La fauna anquihalina de les Illes Balears un segle després del descobriment de *Typhlocirolana moraguesi* Racovitza 1905. *Boletín SEDECK*, 3: 124-127. Madrid. (Figura 4)

GINÉS, A. & GINÉS, J. (2002): Estado actual del conocimiento científico del karst y de las cuevas de las islas Baleares / Estat actual del coneixement científic del carst i de les coves de les Illes Balears. *Boletín SEDECK*, 3: 26-45. Madrid. (Figura 4)

GINÉS, J.; TUCCIMEI, P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F. & VESICA, P.L. (2002): Los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras de Mallorca: su contribución al estudio del Cuaternario / Els espeleotemes freàtics de les coves costaneres de Mallorca: la seva contribució a l'estudi del Quaternari. *Boletín SEDECK*, 3: 76-90. Madrid.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2003): Joan Pons Moyà (1955-2003). *Endins*, 25: 5-8. Palma.



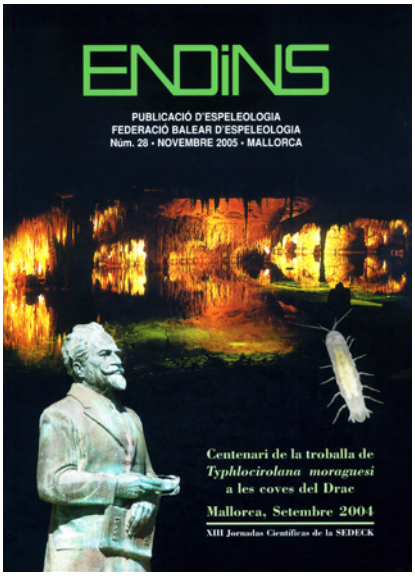


Figura 4: Publicacions relacionades amb esdeveniments científics promoguts per Àngel Ginés.
Figure 4: Publications related to scientific events and meetings promoted by Àngel Ginés.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2004): Bibliografia actualitzada sobre espeleologia física i carst de les Illes Balears. *Endins*, 26: 125-142. Palma.
GINÉS, J.; FIOL, M. & GINÉS, A. (2004): Avencs relacionats amb el comerç de la neu a l'illa de Mallorca. *Endins*, 26: 15-30. Palma.

GINÉS, A. (2005): Centenari de la troballa de *Typhlocirolana moraguesi* a les Coves del Drac. Presentació. XIII Jorndas Científicas de la SEDECK. *Endins*, 28: 7-9. Palma. (Figura 4)
GINÉS, J.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (2005): Els espeleotemes freàtics del Quaternari de Mallorca: aspectes morfològics, mineralògics i cristal·logràfics. In: SANJAUME, E. & MATEU, J.F. (eds.) *Geomorfologia litoral i Quaternari. Homenatge al professor Vicenç M. Rosselló i Verger*. Universitat de València. 151-165. València.
ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2005): Mineralogical reconnaissance of caves from Mallorca island. *Endins*, 27: 131-140. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2006): La Cova Nova de Son Lluís (Porreres, Mallorca). Notes sobre aspectes històrics i geoespeleològics. *Endins*, 29: 5-24. Palma.
GINÉS, J.; FIOL, M. & GINÉS, A. (2006): Els avencs i el cançoner popular de Mallorca: algunes aportacions inèdites. *Endins*, 30: 83-86. Palma.

GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & TUCCIMEI, P. (2007): 2.7. Endokarst costero, niveles marinos y tectónica: el ejemplo de la costa oriental de Mallorca. In: FORNÓS, J.J.; GINÉS, J. & GÓMEZ-PUJOL, L. (eds.) *Geomorfología litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 201-220. Palma.
GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; TRIAS, M.; GINÉS, A. & SANTANDREU, G. (2007): Els fenòmens endocàrstics de la zona de Ca n'Olesa: la Cova de s'Ònix i altres cavitats veïnes (Manacor, Mallorca). *Endins*, 31: 5-30. Palma.
TUCCIMEI, P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F. & MUCEDDA, M. (2007): Sea level change at Capo Caccia (NW Sardinia) and Mallorca (Balearic Islands) during oxygen isotope substage 5e, based on Th/U datings of phreatic overgrowths on speleothems. In: PONS, G.X. & VICENS, D. (eds.) *Geomorfología litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerda Barceló*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 14: 121-135. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2008): Jaume Damians Gelabert. 1960-2008. *Endins*, 32: 7-10. Palma.
GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F. & MERINO, A. (2008): Noves observacions sobre l'espeleogènesi en el Migjorn de Mallorca: els condicionants litològics en alguns grans sistemes subterranis litorals. *Endins*, 32: 49-79. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009): Proposta d'una nova classificació morfogenètica de les cavitats càrstiques de l'illa de Mallorca. *Endins*, 33: 5-18. Palma.
PERICÀS, J.; GINÉS, A. & ROSSELLÓ, J.A. (2009): New bryophyte records for Majorca (Balearic Islands). *Flora Montiberica*, 43: 87-91. València.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (2010): La Cova de sa Font i l'origen del topònim Dragonera. In: MAYOL, J.; MUNTANER, L. & RULLAN, O. (eds.) *Homenatge a Bartomeu Barceló i Pons, geògraf*. Lleonard Muntaner Editor, col. L'Arjau, 20. 153-167. Palma.
GINÉS, A. & GINÉS, J. (2010): La Cova de sa Font (o Cova des Moro) i l'origen del topònim de l'illa de sa Dragonera: una hipòtesi espeleològica. *Endins*, 34: 9-18. Palma.
GINÉS, A.; GINÉS, J. & MIRALLES, P.M. (2010): Anàlisi morfomètrica del carst de pinacles mediterrani de sa Mitjania (Escorca, Mallorca). *Endins*, 34: 109-124. Palma.

GINARD, A.; GINÉS, A. & VICENS, D. (2011): Les exploracions espeleològiques a les Illes Balears. La Federació Balear d'Espeleologia. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 11-36. Palma.
GINÉS, A. & GINÉS, J. (2011): El modelat exocàrstic de les Balears i els camps de lapiaz de mitjana muntanya mediterrània a la Serra de Tramuntana de Mallorca. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 53-68. Palma.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (2011): Classificació morfogenètica de les cavitats càrstiques de les Illes Balears. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 85-102. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2011): Les coves turístiques de les Illes Balears: antecedents i estat de la qüestió. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 333-344. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A. & FORNÓS, J.J. (2011): Dades sobre paleocarst i espeleocronologia de les Illes Balears. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 213-226. Palma.

MERINO, A.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (2011): Espeleotemes i minerals de les coves de les Illes Balears. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 183-198. Palma.

FORNÓS, J.J.; CLEMMENSEN, L.B.; GÓMEZ-PUJOL, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2012): Pleistocene eolianites and low sea levels. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 85-109. Palma.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; GRÀCIA, F.; MERINO, A.; ONAC, B.P.; TUCCIMEI, P. & VICENS, D. (2012): Upper Pleistocene deposits and karst features in the littoral landscape of Mallorca Island (Western Mediterranean): a field trip. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 163-219. Palma.

GINÉS, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; BOVER, P.; GÓMEZ-PUJOL, L.; GRÀCIA, F.; MERINO, A. & VICENS, D. (2012): An introduction to the Quaternary of Mallorca. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 13-53. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; TUCCIMEI, P.; ONAC, B.P. & GRÀCIA, F. (2012): Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) from Mallorca, Spain: updating forty years of research. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 111-146. Palma.

ONAC, B.P.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J. & DORALE, J.A. (2012): Late Quaternary sea-level history: a speleothem perspective. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 147-161. Palma.

VICENS, D.; GRÀCIA, F. & GINÉS, A. (2012): Quaternary beach deposits in Mallorca: paleontological and geomorphological data. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 55-83. Palma.

GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; GAMUNDÍ, P.; CIRER, A.; FERNÁNDEZ, J.F.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; URIZ, M.J.; MUNAR, S.; VICENS, D.; GINARD, A.; BETTON. N.; VIVES, M.A.; JAUME, D.; MAS, G.; PERELLÓ, M.A.; CARDONA, F. & TIMAR-GABOR, A. (2014): Es Dolç (Colònia de Sant Jordi, ses Salines, Mallorca). Cavitat litoral amb influències hipogèniques excavada a les eolianites quaternàries i als materials del Pliocè. *Endins*, 36: 69-96. Palma.

GINÉS, A.; SANTANDREU, G.; GRÀCIA, F.; ENSEÑAT, J.J. & GINÉS, J. (2018): Principals etapes de l'exploració i topografia de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 1-20. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2018): Aspectes històrics i bibliogràfics de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 21-47. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F. & FORNÓS, J.J. (2018): L'espeleogènesi de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca): evolució dels coneixements i interpretació actual. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 141-163. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2019): Les coves de Mallorca al llibre d'Édouard-Alfred Martel "La Spéléologie ou science des cavernes" (1900). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 2: 15-27. Palma.

SANTANDREU, G.; ENSEÑAT, J.J.; PLA, V.; GINÉS, A.; GUAL, M.A. & GAVIÑO, B. (2019): La cova des Ranxo des Coll (Santa Maria del Camí, Mallorca). Descripció, contextualització i aspectes destacats. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 2: 55-67. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2020): Algunes obres d'É.A. Martel publicades el primer quart del segle XX: referències al carst i les coves de Mallorca. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 33-45. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2020): Les "Rondayes de Mallorca" de l'Arxiduc Lluís Salvador: una aproximació espeleològica. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 83-92. Palma.
GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F.; TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; ONAC, B.P. & POLYAK, V.J. (2020): El nivell marí a Mallorca durant el darrer interglacial (MIS-5): estat de la qüestió basat en les datacions d'espeleotemes freàtics. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 3: 115-132. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2021): Grup Espeleològic EST: 1968-2017. Mig segle d'espeleologia mallorquina (2ª part, 1989-2017). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 4: 103-138. Pama.
GINÉS, J.; GINÉS, A. & FORNÓS, J.J. (2021): Les investigacions sobre el carst i les coves de Mallorca: evolució dels coneixements i perspectives actuals. In: GÓMEZ-PUJOL. L.; ROIG-MUNAR, F.X.; GELABERT, B. & MARTÍN, J.A. (eds.) *De la terra a la mar i de la mar a la terra. Homenatge a Antonio Rodríguez-Perea*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 34: 111-131. Palma.
GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; DUMITRU, O.A.; AUSTERMANN, J.; POLYAK, V.J.; ASMEROM, Y. & ONAC, B.P. (2021): Els espeleotemes freàtics del miocè superior i pliocè de les Coves d'Artà (Capdepera, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 4: 19-34. Palma.

GINÉS, A.; SENDRA, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; CALAFORRA, J.M.;; DUMITRU, O.A. & FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2022): Tolerància de la fauna cavernícola terrestre de la Cova de sa Font (Sa Dragonera, Illes Balears) envers altes concentracions de diòxid de carboni. *Papers Soc. Espeleo. Balear,* 5: 87-99. Palma.
GINÉS, J. & GINÉS, A. (2022): L'obra espeleològica de Joaquim Maria Bover de Rosselló (1810-1865). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 5: 1-43. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2023): La campanya de Robert de Joly a Mallorca el 1929. Una valoració des dels punts de vista espeleològic i geològic. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 6: 1-18. Palma.

GINÉS, J.; ONAC, B.P.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F.; POLYAK, V.J.; TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M. & ASMEROM, Y. (2024): Els espeleotemes freàtics de l'holocè a les coves de Mallorca: evolució dels coneixements i investigacions recents sobre el nivell de la Mediterrània durant els darrers 4.000 anys. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 7: 1-20. Palma.
GINÉS, J.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; GRÀCIA, F.; ENSEÑAT, J.J.; FORNÓS, J.J.; CALAFORRA, J.M. & GINÉS, A. (2024): Algunes dades sobre els gasos de l'atmosfera de la Cova dets Ases (Felanitx, Mallorca). Avaluació de les concentracions de CO_2 i CH_4 i les seves signatures isotòpiques. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 7: 135-150. Palma.

Treballs publicats en congressos nacionals i internacionals

GINÉS, A. (1972): Relación de las cavidades más profundas de la isla de Mallorca. *II Simp. Metod. Espel. Topografía*. Escuela Catalana de Espeleología - S.I.E. del C.E.A. Com. VI d. 3 pàgs. Barcelona.
GINÉS, A. & GINÉS, J. (1972): Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con las formaciones marinas del Cuaternario. *II Cong. Nacional Espeleol*. Com. 13. 16 pàgs. Oviedo.

GINÉS, A. (1973): Sobre el posible hallazgo de formaciones de edad Milazziense en ses Coves Petites (Canyamel). *III Simposium Espeleología*. Escola Catalana d'Espeleologia - Agrupació Científico Excursionista de Mataró. 87-91. Mataró, Barcelona.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1974): El medio fluvio-lacustre hipogeo en Mallorca y su asociación de morfologías. *III Cong. Nacional Espeleol.*, 2: 1-15. Madrid.

GINÉS, A.; GINÉS, J. & PONS-MOYÀ, J. (1975): Nuevas aportaciones al conocimiento morfológico y cronológico de las cavernas costeras mallorquinas. *Speleon. Monografía I, V Symposium de Espeleología, Cuaternario*. Escola Catalana d'Espeleologia. 49-56. Barcelona.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1977): Datos bioespeleológicos obtenidos en las aguas cársticas de la isla de Mallorca. *6è Simposium d'Espeleologia*. Escola Catalana d'Espeleologia - S.I.S. del C.E. de Terrassa. 81-95. Terrassa, Barcelona.

POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Las cristalizaciones freáticas del Pleistoceno mallorquín. *Actas del VI Coloquio de Geografía*. 111-113. Palma.

GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981): Phreatic speleothems in coastal caves of Majorca (Spain) as indicators of Mediterranean Pleistocene paleolevels. *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 533-536. Bowling Green, U.S.A.

GINÉS, J.; GINÉS, A. & POMAR, L. (1981): Morphological and mineralogical features of phreatic speleothems occurring in coastal caves of Majorca (Spain). *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 529-532. Bowling Green, U.S.A.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1986): On the interest of speleochronological studies in karstified islands. The case of Mallorca (Spain). *Com. 9º Cong. Int. Espeleol.*, 1: 297-300. Barcelona.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1988): Paleokarst collapse breccias in the uppermost Miocene of Mallorca island (Spain). *9th I.A.S. Regional Meeting of Sedimentology*. 76-77. Leuven, Bèlgica.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1989): Paleokarst collapse features in the uppermost Miocene of Mallorca island (Spain). *Proc. 10th Int. Congress Speleol.*, 1: 46-48. Budapest.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1989): Absolute dating of phreatic speleothems from coastal caves of Mallorca (Spain). *Proc. 10th Int. Congress Speleol.*, 1: 191-193. Budapest.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1990): Paleokarst collapse breccias in the uppermost Miocene of Mallorca island (Spain). *II Jornades del Medi Ambient de les Balears*. Universitat de les Illes Balears - Soc. Hist. Nat. Balears. 46-47. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1990): La fotogrametría analítica y las ciencias de la naturaleza. Cartografía 1/2.000 del paraje kárstico de Sa Mitjania (Escorca). *II Jornades del Medi Ambient de les Balears*. Universitat de les Illes Balears - Soc. Hist. Nat. Balears. 197-198. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993): Speleochronological approach to some coastal caves from Cap Vermell area in Mallorca island (Spain). *Proc. 11th Int. Congress Speleol.* 56-59. Beijing.

GINÉS, A. & GARCIA, L. (1994): El carst com a recurs natural a Mallorca. In: SALVÀ, P.; SASTRE, F. & AGUILÓ. E. (coords.) *El desenvolupament turístic a la Mediterrània durant el segle XX*. XIII Jornades d'Estudis Històrics Locals. Institut d'Estudis Baleàrics. 137-150. Palma.

TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & FORNÓS, J.J. (1997): Th/U dating of sea level-controlled phreatic speleothems from coastal caves of Mallorca (Western Mediterranean). *Proc. 12th Int. Congress Speleol.*, 1: 37-40. La Chaux-de-Fonds, Suïssa.

GINÉS, A. (1999): Edouard-Alfred Martel et la spéléologie à Majorque. In: ANDRÉ, D. & DUTHU, H. (eds.) *L'homme qui voyageait pour les gouffres.* Archives Départamentales de la Lozère. 291-300. Mende, França.

GINÉS, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J. & TUCCIMEI. P. (1999): Dataciones isotópicas de espeleotemas procedentes de cuevas costeras de Mallorca. Estado actual de las investigaciones. In: ANDREO, B.; CARRASCO, F. & DURÁN, J.J. (eds.) *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja. 143-152. Nerja, Màlaga.

TUCCIMEI, P.; ANTONIOLI, F.; DELITALA, C.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; MUCEDDA, M.; ORRÙ, P. & TADDEUCCI, A. (2000): Sea level changes during oxygen isotope stage 5 at Capo Caccia (Alghero, Sardinia), based on U/Th datings of phreatic overgrowths on speleothems and geomorphological evidences. *L'Eemiano e il Tirreniano in Italia. Convegno Associazione Italiana per lo Studio del Quaternario*, 24-26. Verona, Itàlia.

GINÉS, A.; TUCCIMEI, P.; DELITALA, C.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F. & TADDEUCCI, A. (2001): Phreatic Overgrowths on Speleothems as indicators of sea level fluctuations between 150-60 ka in coastal caves of Mallorca (Balears, Spain). *Proc. 13th Int. Congress Speleol.*, 1: 28-32. Brasília, Brasil.

GINÉS, J.; TUCCIMEI, P.; DELITALA, C.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F.; TADDEUCCI, A. & VESICA, P.L. (2001): Canvis del nivell marí i paleoclima durant el Pleistocè Superior a la Mediterrània occidental: aportacions procedents de l'estudi dels espeleotemes freàtics presents a les coves litorals de Mallorca. In: PONS, G.X. (ed.) *III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears*. Soc. Hist. Nat. Balears. 84. Palma.

GINÉS, A. (2002): Geoecología de las formas de lapiaz y correlación entre ecosistemas kársticos. In: CARRASCO, F.; DURÁN, J.J. & ANDREO, B. (eds.) *Karst and Environment*. Fundación Cueva de Nerja, Instituto de Investigación. 401-407. Nerja, Màlaga.

GINÉS, A.; TUCCIMEI, P.; DELITALA, C.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F. & TADDEUCCI, A. (2002): Phreatic overgrowths on speleothems in coastal caves of Mallorca: a significant record of Mediterranean sea level history over the time span 60-150 ka B.P. In: CARRASCO, F.; DURÁN, J.J. & ANDREO, B. (eds.) *Karst and Environment*. Fundación Cueva de Nerja, Instituto de Investigación. 453-458. Nerja, Màlaga.

GINÉS, J.; TUCCIMEI, P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F. & VESICA, P.L. (2003): The upper Pleistocene sea-level history in Mallorca (western Mediterranean) approached from the perspective of coastal phreatic speleothems. In: RUIZ, M.B.; DORADO, M.; VALDEOLMILLOS, A.; GIL, M.J.; BARDAJÍ, T.; de BUSTAMANTE, I. & MARTÍNEZ, I. (eds.) *Quaternary climatic changes and environmental crises in the Mediterranean region*. Universidad de Alcalá - Ministerio de Ciencia y Tecnología - INQUA. 241-247. Alcalá de Henares, Madrid.

TUCCIMEI, P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.: GRÀCIA, F. & MUCEDDA, M. (2003): Sea level change at Capo Caccia (Sardinia) and Mallorca (Balearic islands) during oxygen isotope substage 5e, based on Th/U datings of phreatic overgrowths on speleothems. In: MASTRONUZZI, G. & SANSÒ, P. (eds.) *Quaternary coastal morphology and sea level changes. Project IGCP 437, Puglia 2003 - Final Conference. Abstract book*. GI2S Coast, Research Publication, 4: 235-237. Otranto / Taranto, Itàlia.

GINÉS, A.; TUCCIMEI, P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J. & GRÀCIA, F. (2004): Los espeleotemas freáticos en cuevas costeras del Mediterráneo. Evidencias de cambios del nivel marino durante los últimos 250.000 años. *PalaeoMed. Climate change and human occupation of coastal sites in the Mediterranean from 250 thousand years ago until the historic Holocene*. 4 pàgs. Gibraltar.

GINÉS, J.; TUCCIMEI, P.; DELITALA, C.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F.; TADDEUCCI, A. & VESICA, P.L. (2004): Noves dades sobre el nivell marí a Mallorca durant el darrer interglacial: datacions Th/U d'alta precisió d'espeleotemes freàtics litorals. In: PONS, G.X. (ed.) *IV Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears*. Soc. Hist. Nat. Balears. 52-53. Palma.

ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; TUCCIMEI, P.; PEATE, D.W. & BJÖRK, S. (2006): Sea-level position at ~80 ka based on phreatic overgrowths on speleothems from Mallorca. In: ONAC, B.P.; TĂMAŞ, T.; CONSTANTIN, S. & PERŞOIU, A. (eds.) *Archives of Climate Change in Karst. Proceedings of the symposium Climate Change: the Karst Record (IV)*. Karst Water Institute. Special Publication 10: 189-191. Băile Herculane, Romania.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; MERINO, A.; MULET, A. & MULET, G. (2008): La Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca). Una localitat excepcional des del punt de vista del patrimoni geoespeleològic. In: PONS, G.X. (ed.) *V Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears*. Soc. Hist. Nat. Balears. 59-60. Palma.

GINÉS, A.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F. & FORNÓS, J.J. (2009): Cave surveying and cave patterns in the southeastern coastal karst of Mallorca Island (Spain). In: WHITE, W.B. (ed.) *Proc. 15th Int. Congress Speleol.*, 1: 488-495. Kerrville, U.S.A.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; MERINO, A. & GRÀCIA, F. (2009): On the role of hypogene speleogenesis in shaping the coastal endokarst of southern Mallorca (Western Mediterranean). In: KLIMCHOUK, A.B. & FORD, D.C. (eds.) *Hypogene speleogenesis and karst hydrogeology of artesian basins*. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1: 91-99. Simferopol, Ucraïna.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; MERINO, A. & GRÀCIA, F. (2009): About the genesis of an exceptional coastal cave from Mallorca Island (Western Mediterranean). The lithological control over the pattern and morphology of Cova des Pas de Vallgornera. In: WHITE, W.B. (ed.) *Proc. 15th Int. Congress Speleol.*, 1: 481-487. Kerrville, U.S.A.

TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; ONAC, B.P. & VILLA, I.M. (2009): Precipitation of phreatic overgrowths at the water table of meteoric-marine mixing zones in coastal cave systems: a useful tool in sea level change reconstruction. In: WHITE, W.B. (ed.) *Proc. 15th Int. Congress Speleol.*, 1: 554-560. Kerrville, U.S.A.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F.; MERINO, A.; CIFRE, J. & HIERRO, F. (2010): Hypogene speleogenetic evidences in the development of Cova des Pas de Vallgornera (Mallorca Island, Western Mediterranean). In: ANDREO, B.; CARRASCO, F.; DURÁN, J.J. & LAMOREAUX, J.W. (eds.) *Advances in research in karst media*. Springer-Verlag. Environmental Earth Sciences Series. 349-354. Berlín.

TUCCIMEI, P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; ONAC, B.P.; DORALE, J.A.; SOLIGO, M.; SPADA, G.; VILLA, I.M.; GRÀCIA, F & MERINO, A. (2012): Constraining Quaternary sea level changes using

U-Th ages of phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves: a critical review. In: ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Sea level changes into MIS 5: from observations to predictions. Proceedings of the National Science Foundation Workshop, Palma de Mallorca 2012*. Studia Universitatis Babes-Bolyai, Geologia. Special Issue 2012: 57-62. Cluj-Napoca, Romania.

GINÉS, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; TUCCIMEI. P.; ONAC, B.P. & GRÀCIA, F. (2013): Forty years of Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) research in coastal caves of Mallorca. In: FILIPPI, M. & BOSÁK, P. (eds.) *Proc. 16th Int. Congress Speleol.*, 2: 394-399. Brno, República Txeca.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F.; ASMEROM, Y.; ONAC, B.P.; POLYAK, V.J. & TUCCIMEI, P. (2015): Decoding sea level changes during the MIS 5 by means of Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) research in coastal caves of Mallorca (western Mediterranean). *Workshop Global and Regional Sea Level Variability and Change, Book of Abstracts.* IMEDEA-UIB. 15-16. Palma.

DUMITRU, O.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; COSMA, C.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2016): Evaluación de las concentraciones de radón y su variabilidad estacional en cuevas turísticas de Mallorca. In: ANDREO, B. & DURÁN, J.J. (eds.) *Cuevatur 2016. El karst y el hombre: las cuevas como patrimonio mundial.* VI Congreso Español sobre Cuevas Turísticas, Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE). 157-167. Madrid.

GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F.; MERINO, A.; ONAC, B.P. & GINÉS, A. (2016): Hypogene imprints in coastal karst caves from Mallorca Island (Western Mediterranean): a review of the current knowledge on their morphological features and speleogenesis. In: CHAVEZ, T. & REEHLING, P. (eds.) *Proceedings of Deepkarst 2016: origins, resources and management of hypogene karst*. National Cave and Karst Research Institute. Symposium 6: 105-113. Carlsbad, U.S.A.

GINÉS, A.; MULET, A.; RODRÍGUEZ-HOMAR, M.; VADELL, M.; SÁNCHEZ-CAÑETE, E.P. & GINÉS, J. (2017): Extreme seasonal fluctuations of carbon dioxide in the cave atmosphere of Cova de sa Font (Sa Dragonera islet, Balearic Islands, Spain). In: MOORE, K. & WHITE, S. (eds.) *Proc. 17th Int. Congress Speleol. (Edition 2)*, 1: 230-233. Sydney, Austràlia.

GINÉS, A. (2018): Ludwig Salvator, promotor y divulgador de las ciencias naturales de las Baleares, desde la perspectiva de su tiempo. In: GREGOROVIČOVÁ, E. (ed.) *Ludvík Salvátor Toskánský, Vědec a Cestovatel, V Roce 170. Výročí Narození*. Národní Archiv. 153-161, 380-382. Praga.

GRÀCIA, F.; VALERO, A.R.; PLA, V.; VICENS, D.; ENSEÑAT, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GUAL, M.A. & GINARD, A. (2018): La Societat Espeleològica Balear (SEB). In: PONS, G.X.; DEL VALLE, L.; VICENS, D.; PINYA, S.; McMINN, M. & POMAR, F. (eds.) *VII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*. Soc. Hist. Nat. Balears - Universitat de les Illes Balears. 553-555. Palma.

DUMITRU, O.A.; AUSTERMANN, J.; POLYAK, V.J.; FORNÓS, J.J.; ASMEROM, Y.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & ONAC, B.P. (2020): Neogene and Quaternary sea-level elevations using U-Pb dated phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves on Mallorca Island. *American Geophysical Union, Fall Meeting. December 2020*. Abstract PP009-0015. iPoster Sessions, 9 pàgs. Washington.

GINÉS, A.; SENDRA, A.; FORNÓS, J.J.; CALAFORRA, J.M.; GINÉS, J.; DUMITRU, O.A. & FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2022): Terrestrial cave-fauna enduring extreme CO_2 seasonal changes in the vadose environment: lessons from Dragonera Islet, Balearic Islands. *Proc. 18th Int. Congress Speleol. Vol. I - Karstologia Mémoires,* 21: 281-284. Savoie Mont Blanc, França.

GINÉS, J.; GINÉS, A. & FORNÓS, J.J. (2022): Cinquanta anys d'investigacions sobre el nivell marí durant el quaternari i el pliocè a Mallorca mitjançant els espeleotemes freàtics de les coves litorals. In: PONS, G.X.; DEL VALLE, L.; McMINN, M.; PINYA, S. & VICENS, D. (eds.) *VIII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Comunicacions*. Soc. Hist. Nat. Balears - Universitat de les Illes Balears. 59-62. Palma.

Agraïments

El present treball és una contribució al projecte PID2020-112720GB-I00/AEI/ de l'Agencia Estatal de Investigación.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

In Memoriam

Lluís Pomar Gomà (1949 - 2024)

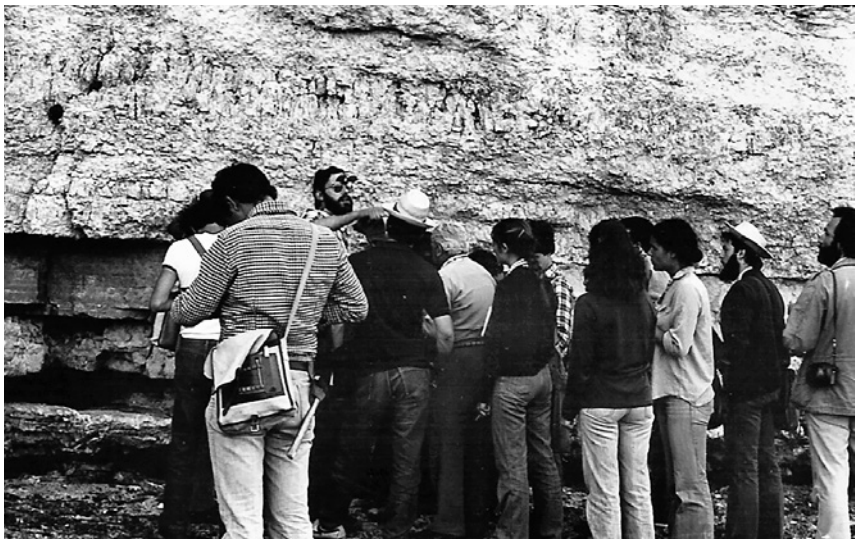
El Dr Lluís Pomar durant una sortida geològica, l'any 2009. (Foto: Guillem Mateu).

Aquest estiu ens ha deixat el que ha estat un referent dins de la geologia balear dels darrers temps, en Lluís Pomar, persona que ha gaudit durant la seva vida acadèmica d'un prestigi notable també a nivell internacional. Nascut a la població de Torres de Segre (Lleida), estudià geologia a la Universitat de Barcelona on, sota la direcció del Dr Oriol Riba i Arderiu, catedràtic d'estratigrafia, es doctorà el 1975 amb la seva tesi *Procesos telodiagenéticos en rocas carbonatadas del litoral catalán y Baleares: su relación con microorganismos*. Aquesta tesi, encara que corresponent al doctorat de la Universitat de Barcelona, fou defensada a l'aleshores Universitat de Palma de Mallorca, essent la primera tesi doctoral que s'hi llegia. Malgrat el seu lligam amb la universitat catalana, l'any 1974 s'instal·là a Palma passant a formar part del personal docent de la primera Facultat de Ciències, dins del que amb el temps seria la Universitat de les Illes Balears (UIB). Tota la seva vida acadèmica transcorregué a la UIB, impartint docència dins l'àmbit de la geologia a nombroses promocions de biòlegs i geògrafs, i on arribà a catedràtic l'any 1988.

La seva producció científica dels primers temps, lligada encara amb la Universitat de Barcelona, es va centrar en l'estratigrafia i sedimentologia de les Balears, però amb el temps la seva atenció es centrà en els processos de producció de sediments carbonatats. Destaquen els seus estudis d'arquitectura de fàcies de les plataformes miocenes de les Balears, en especial del Cap Blanc a Mallorca i del Migjorn de Menorca. Les seves aportacions al camp de la sedimentologia li han valgut diverses distincions a nivell internacional, entre les quals es troba la Medalla Sorby, la més alta distinció atorgada per la *International Association of Sedimentologists* (IAS).

Pel que fa a la seva relació amb el món del carst, durant les primeres dècades de la seva vida professional realitzà diferents incursions en l'estudi dels processos i morfologies relacionades amb el carst, sobretot arran de l'estreta col·laboració que s'establí a partir de 1974 amb Àngel i Joaquín Ginés, els quals s'acostaren a la UIB des del camp de l'espeleologia. Fruit d'aquesta col·laboració primerenca, es

publicaren diversos treballs en relació amb els processos i morfologies de precipitació de carbonats en els llacs de les coves litorals de Mallorca. Precisament, aquesta línia de treball fou guardonada amb el Premi Ciutat de Palma d'Investigació, l'any 1981, que fou concedit al *Proyecto Hades: Estratigrafía de las cristalizaciones subacuáticas del Pleistoceno en las cuevas de Mallorca*, projecte codirigit per Lluís Pomar i Joaquín Ginés. Molts dels esforços de recerca realitzats aquells anys, i les publicacions resultants, es focalitzaren en la interpretació de l'estratigrafia dels espeleotemes freàtics presents a la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia), on s'hi realitzaren un parell de campanyes de sondatges (durant els anys 1981 i 1984), que requeriren molts mitjans i personal, així com una complexa infraestructura per dur-la a terme. Al mateix temps, foren objecte d'investigació els precipitats freàtics subactuals presents a localitats com la Cova A de Cala Varques (Manacor).



El Dr Lluís Pomar en tasques docents l'any 1977 explicant l'estratigrafia, la sedimentologia i el paleocarst del miocè terminal en una sortida de camp a la zona del Mirador des Pontàs (Santanyí), amb alumnes de l'assignatura d'estratigrafia del Dr Oriol Riba de la Facultat de Geologia de la Universitat de Barcelona. Bona part d'aquests alumnes (Antonio Rodríguez, Salvador Moyà, Alberto Sáez, Belen Alonso, Miquel Canals), amb el temps acabarien doctorant-se i sent professors universitaris i investigadors de centres de recerca. (Foto: Joan J. Fornós).

També relacionades amb els processos càrstics, trobem diverses publicacions dedicades tant a la meteorització de roques carbonatades, com als aspectes geoquímics dels aqüífers litorals. Un altre aspecte treballat per en Lluís relacionat amb el carst, foren les contribucions efectuades durant la primeria del segle XXI en relació als fenòmens de paleocarst que es donen a les plataformes carbonatades del miocè del sud i llevant de Mallorca. En aquest sentit, cal mencionar nombrosos treballs publicats en col·laboració amb Pedro A. Robledo, deixeble seu al que dirigí la tesi doctoral.

Deixant de banda la seva indubtable transcendència pel que fa al coneixement geològic de les Balears, així com el prestigi assolit per les seves aportacions sedimentològiques sobre les plataformes carbonatades, cal reconèixer a Lluís Pomar un paper clau en la consolidació de l'espeleologia científica illenca i en els estudis sobre el carst balear. Les possibilitats de col·laboració simbiòtica que s'establiren des de 1974 entre el món acadèmic de la UIB i l'estament espeleològic local han fet possible uns avenços molt importants en el coneixement científic de les nostres coves. Aquesta productiva simbiosi acadèmic-espeleològica, que s'inicià gràcies a la implicació personal d'en Lluís Pomar, s'ha perllongat fins a l'actualitat de la mà del relleu agafat per altres companys geòlegs de la UIB com són Antoni Rodríguez-Perea i sobretot Joan J. Fornós.

El Dr Pomar mostrant un espeleotema freàtic desenvolupat sobre una estalagmita a la Cova A de Cala Varques, l'any 1984. (Foto: Ultima Hora).

El Dr Pomar a la Cova de sa Bassa Blanca durant la campanya del mes de febrer de 1984. (Foto: Jaume Munar).

De fet, la constitució de la *Societat Espeleològica Balear* el 2017 vindria a ser una culminació d'aquesta estreta activitat de col·laboració entre dos estaments tan diferenciats.

Per tal de complementar aquesta breu ressenya biogràfica, incloem una recopilació exclusivament de la producció bibliogràfica dedicada a aspectes relacionats directa o indirectament amb el carst; les referències estan agrupades en tres categories en funció de l'autoria dels treballs, i en tots els casos apareixen ordenades cronològicament. Així, les nombroses i importants aportacions sobre geologia general, sedimentologia o altres aspectes no relacionats amb el carst, no han estat objecte d'aquesta recopilació.

Joan J. Fornós i Joaquín Ginés

Bibliografia relacionada amb el carst del Dr Lluís Pomar

Treballs com a únic autor

POMAR, L. (1975): *Procesos telodiagenéticos en rocas carbonatadas del litoral catalán y Baleares: su relación con microorganismos*. Tesis Doctoral. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona. 321 pàgs. Inèdit.

POMAR, L. (1989): Espeleotemas freáticos, karst litoral y oscilaciones del nivel del mar durante el Cuaternario en la isla de Mallorca. In: DURÁN, J.J. & LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (eds.) *El karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía nº 4: 265-275. Madrid.

Treballs com a primer autor

POMAR, L. & CALVET, F. (1974): Nota previa sobre el análisis comparativo de elementos traza en las aguas de escorrentía superficial, como indicadores de la acción alterante de microorganismos. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 19: 115-138. Palma.

POMAR, L.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; MOYÀ, G. & RAMÓN, G. (1975): Nota previa sobre la petrología y mineralogía de la calcita flotante de algunas cavidades del levante mallorquín. *Endins*, 2: 3-5. Palma.

POMAR, L.; GINÉS, A. & FONTARNAU, R. (1976): Las cristalizaciones freáticas. *Endins*, 3: 3-25. Palma.

POMAR, L. & CUERDA, J. (1979): Los depósitos marinos pleistocénicos en Mallorca. *Acta Geológica Hispánica. Homenatge a Lluís Solé i Sabaris*, 14: 505-513. Barcelona.

POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. *Endins*, 5-6: 3-17. Palma.

POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Las cristalizaciones freáticas del Pleistoceno mallorquín. *Actas del VI Coloquio de Geografía*. 111-113. Palma.

POMAR, L.; RODRÍGUEZ-PEREA, A. & FORNÓS, J.J. (1983): Proyecto HADES. Un nuevo método para la investigación del Pleistoceno. *X Congreso Nacional Sedimentología, Menorca '83*. 633-636. Palma.

POMAR, L.; RODRÍGUEZ-PEREA, A.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; FONT, A. & MORA, A. (1987): Phreatic speleothems in coastal caves: a new method to determine sea-level fluctuations. In: ZAZO, C. (ed.) *Late Quaternary sea level changes in Spain*. Museo Nacional de Ciencias Naturales C.S.I.C. Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario, 10: 197-224. Madrid.

Treballs en col·laboració amb altres autors

GINÉS, A.; GINÉS, J.; POMAR, L. & SALVÀ, P.A. (1979): La Serra de Tramuntana. *VI Coloquio de Geografía, Excursión nº 1*. 38 pàgs. Palma.

GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981): Phreatic speleothems in coastal caves of Majorca (Spain) as indicators of Mediterranean Pleistocene paleolevels. *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 533-536. Bowling Green, U.S.A.

GINÉS, J.; GINÉS, A. & POMAR, L. (1981): Morphological and mineralogical features of phreatic speleothems occurring in coastal caves of Majorca (Spain). *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 529-532. Bowling Green, U.S.A.

HENNIG, G.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981): Avance de los resultados obtenidos mediante datación isotópica de algunos espeleotemas subacuáticos mallorquines. *Endins*, 8: 91-93. Palma.

HADES, Equipo (1985): Los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras de Mallorca: estado actual de las investigaciones. *Geomorfología litoral y Cuaternario. Homenaje a Juan Cuerda*. Universidad de València. 103-122. València.

HERMAN, J.S.; BACK, W. & POMAR, L. (1985): Geochemistry of groundwater in the mixing zone along the east coast of Mallorca, Spain. Karst Water Resources. *Proceedings of the Ankara-Antalya Symposium*. IAHS Publ. nº 161: 467-479. Ankara, Turquia.

HERMAN, J.S.; BACK, W. & POMAR, L. (1986): Speleogenesis in the groundwater mixing zone: the coastal carbonate aquifers of Mallorca and Menorca, Spain. *Com. 9º Cong. Int. Espeleol.*, 1: 13-15. Barcelona.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1988): Paleokarst collapse breccias in the uppermost Miocene of Mallorca island (Spain). *9th I.A.S. Regional Meeting of Sedimentology*. 76-77. Leuven, Bèlgica.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1990): Paleokarst collapse breccias in the uppermost Miocene of Mallorca island (Spain). *II Jornades del Medi Ambient de les Balears*. Universitat de les Illes Balears - Soc. Hist. Nat. Balears. 46-47. Palma.

JENKYNS, H.C.; SELLWOOD, B.W. & POMAR, L. (1990): *A field excursion guide to the island of Mallorca.* The Geologists' Association. 93 pàgs. Londres.

ROBLEDO, P.A. & POMAR, L. (2000): Las estructuras de colapso kárstico en el Mioceno superior de Mallorca; modelo genético. *Geo-Temas*, 1 (4): 267-271.

ROBLEDO, P.A. & POMAR, L. (2000): Modelo genético de las estructuras de colapso kárstico del Mioceno superior de Mallorca. *Geo-Temas*, 2: 189-192.

ROBLEDO, P.A. & POMAR, L. (2000): Upper Miocene karst collapse structures of the east coast, Mallorca, Spain. *Acta Carsologica*, 29 (2): 177-184. Ljubljana, Eslovènia.

ROBLEDO, P.A. & POMAR, L. (2000): The karst collapse structures in the Upper Miocene of the east coast of Mallorca: genetic model. *Karst studies and problems: 2000 and beyond*, 1: 107-112.

ROBLEDO, P.A. & POMAR, L. (2001): Genetic model of the karst collapse structures on the east coast of Mallorca, Spain. In: GÜNAY, G.; JOHNSON, K.S. FORD, D.; & JOHNSON, A.I. (eds.) *Present state and future trends of Karst studies*. IHP-V Technical Documents in Hydrology, 49 (1): 339-344. París.

ROBLEDO, P.A.; POMAR, L. & DURÁN, J.J. (2002): Relación entre la alta frecuencia de las fluctuaciones del nivel del mar durante el Mioceno superior y la ocurrencia y distribución de las estructuras de paleocolapso kárstico en la plataforma carbonática del levante de Mallorca (España). In: CARRASCO, F.; DURÁN, J.J. & ANDREO, B. (eds.) *Karst and Environment*. Fundación Cueva de Nerja, Instituto de Investigación. 409-418. Nerja, Màlaga.

ROBLEDO, P.A.; DURÁN, J.J. & POMAR, L. (2004): Estructuras de paleocolapso kárstico en plataformas carbonatadas: el ejemplo de Mallorca. In: ANDREO. B. & DURÁN, J.J. (eds.) *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 12: 101-122. Madrid.

ROBLEDO, P.A.; DURÁN, J.J. & POMAR, L. (2004): Paleocollapse structures as geological record for reconstruction of past karst processes during the upper Miocene of Mallorca island. *International Journal of Speleology*, 33 (1-4): 81-94. Bologna, Itàlia.

CSOMA, A.E.; GOLDSTEIN, R.H. & POMAR, L. (2006): Pleistocene speleothems of Mallorca: implications for palaeoclimate and carbonate diagenesis in mixing zones. *Sedimentology*, 53: 213-236.

ROBLEDO, P.A.; DURÁN, J.J. & POMAR, L. (2008): Análisis de la fracturación de la plataforma carbonática de Santanyí, Mallorca. Relación con los paleocolapsos y su cronología. *Geogaceta*, 44: 67-70. Salamanca.

ROBLEDO, P.A.; DURÁN, J.J. & POMAR, L. (2008): Deducciones paleoclimáticas de los resultados isotópicos en los cementos de los paleocolapsos kársticos de Mallorca, Baleares (España). *Geo-Temas*, 10: 1585-1588.

Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Papers de la Societat Espeleològica Balear
http://socespbal.blogspot.com/

Societat d'Història Natural de les Balears

Amb la col·laboració de:
la Societat d'Història Natural de les Balears

SOCIETAT ESPELEOLÒGICA BALEAR
SEB