

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.

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 morfológicas 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:** 27 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 la darrera contribució elaborada per Angel Ginés, abans del seu traspàs el gener del 2024. El present treball està dedicat a la seva memòria.

(*) This paper was the last contribution performed by 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 varies 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 morfogèniques 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'ubiquïtat. 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

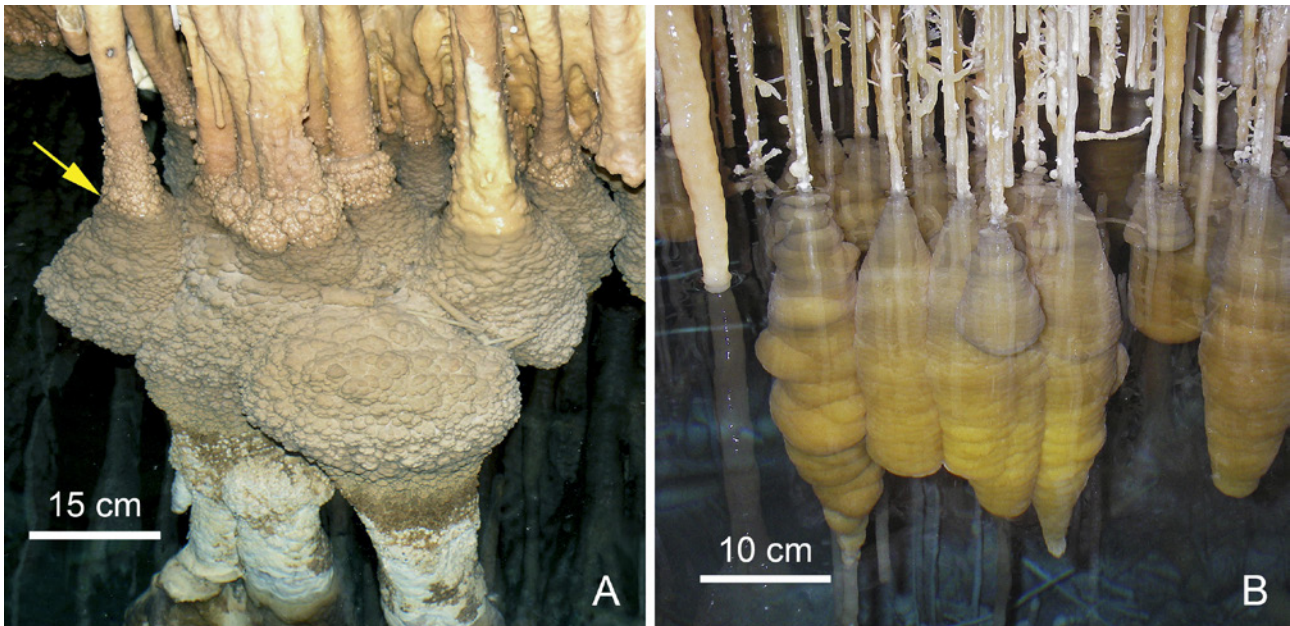


Figura 1: Espeleotemes freàtics (POS) observables a les vores dels llacs de coves costaneres de Mallorca. En ambdós casos, la banda horitzontal de cristallitzacions freàtiques apareix gairebé totalment submergida per mor de la pujada del nivell marí de les darreres dècades. A) POS de mineralogia calcítica 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 Lluçmajor (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, Lluçmajor (Photo: A. Merino).

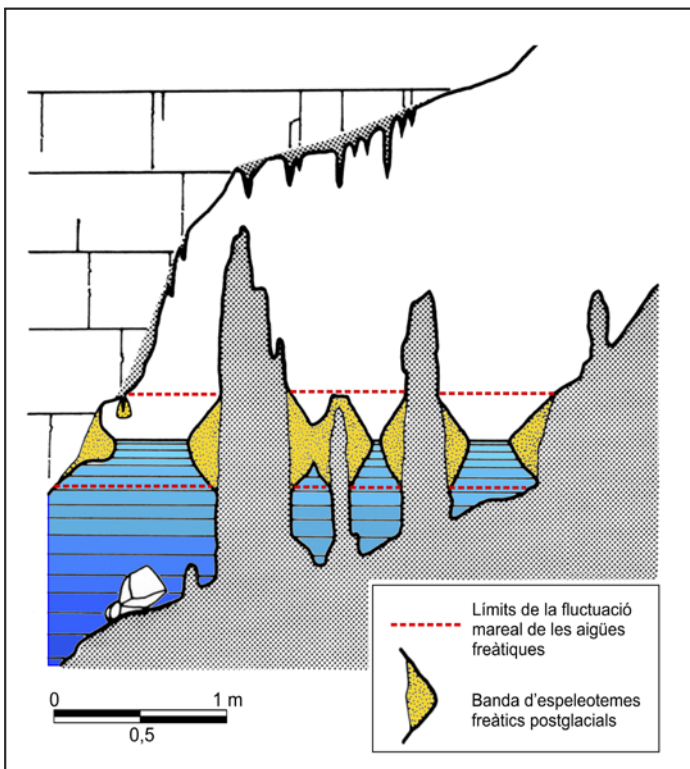


Figura 2: Visió idealitzada dels espeleotemes freàtics en una secció de la Cova A de Cala Varques, tal i com apareixen descrits a la publicació pionera sobre els POS d'aquesta cavitat (Modificat a partir de POMAR et al., 1979).
 Figure 2: Idealized representation of the phreatic speleothems along a profile 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 cristallitzacions 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 cristallitzacions. 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

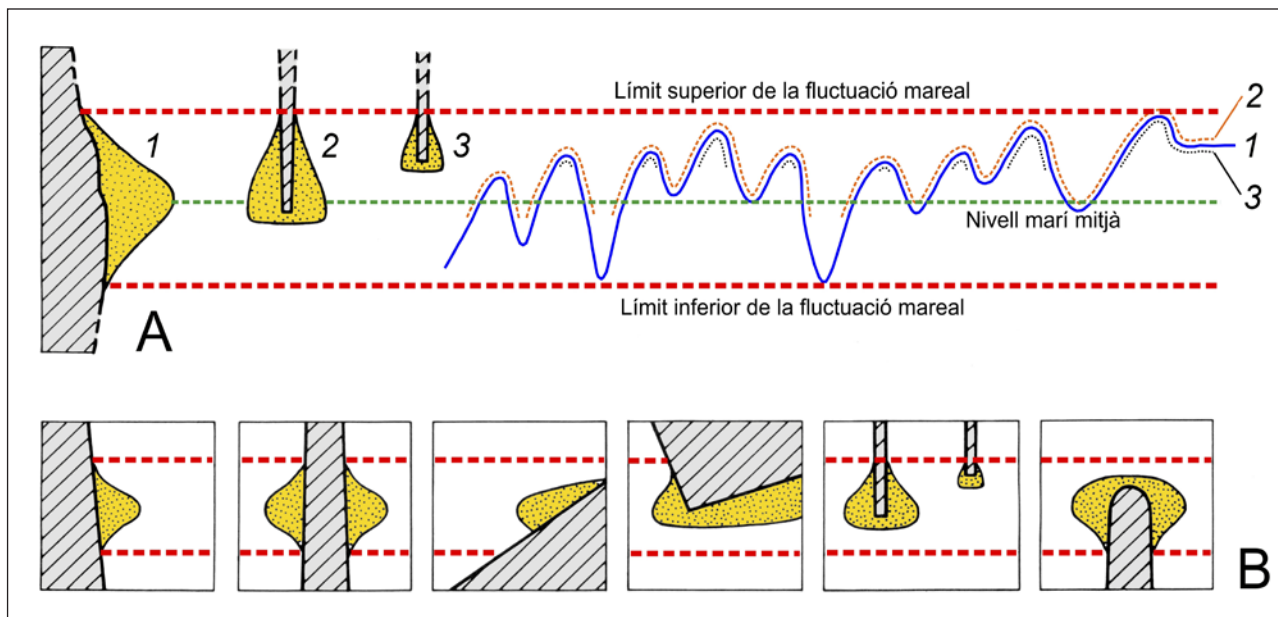


Figura 3: A) Intervals de creixement d'una banda d'espeleotemes freàtics en funció de la penetració del suport dins la zona de fluctuació de les aigües freàtiques: 1, penetració completa del suport, amb màxima gruixa al centre de la banda; 2 i 3, penetració incompleta que genera morfologies de base plana 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 *Dipartimento 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

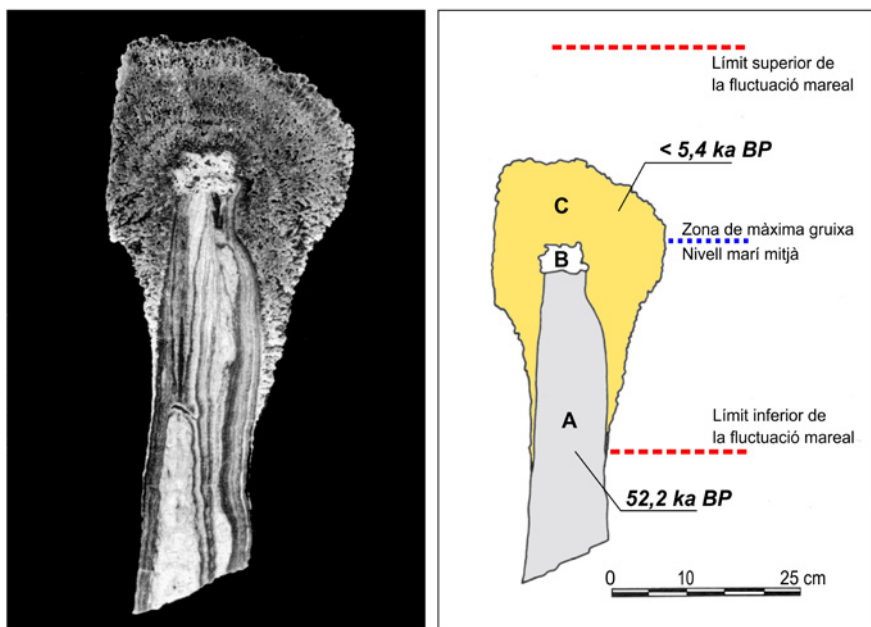


Figura 4: Secció vertical de l'espeleotema estudiat inicialment a la Cova A de Cala Varques, amb indicació de les primeres datacions U-Th efectuades. A) espeleotemes vadosos convencionals; B) possible acumulació de làmines de calcita flotant recristal·litzades; C) cristallitzacions freàtiques que formen 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).

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 magnesià, 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).

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 rejuveneixen 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.

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 $\delta^{18}\text{O}$ (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 $\delta^{18}\text{O}$ entre -5,0 i -5,6 ‰. Els valors de $\delta^{18}\text{O}$ obtinguts per a les mostres de POS són indicatius de la mescla entre aigües meteòriques i marines dins d'aquest aquífer 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 $\delta^{13}\text{C}$ (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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 (TUCCIMEI 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

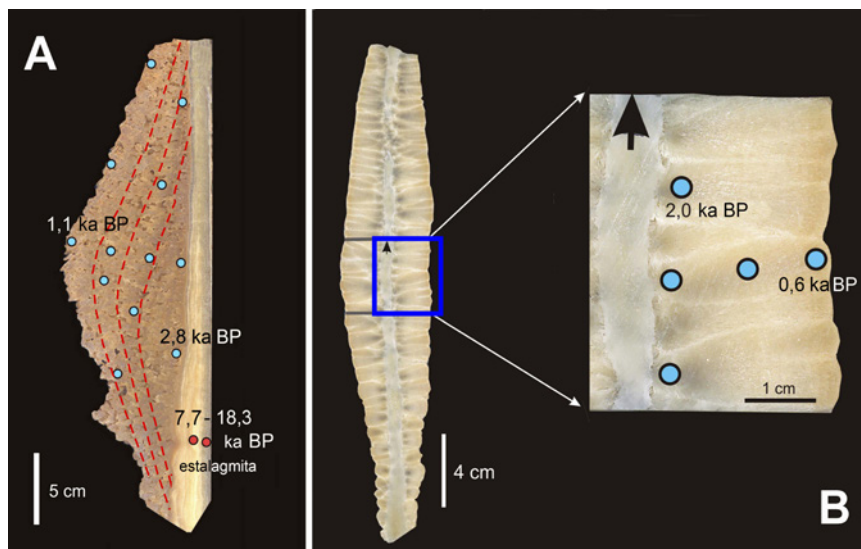


Figura 5: Espeleotemes freàtics (POS) holocènics que han estat datats mitjançant el mètode U-Th (MC-ICPMS). A) Espeleotema freàtic de calcita de la Cova A de Cala Varques que permet observar l'estalagmita vadosa que serveix de suport al POS; amb línies discontinues s'indiquen les bandes de creixement, 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·litacions 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).

l'isòtop radiactiu ^{14}C – procedent de la dissolució de la roca, i veure quina és la seva repercussió 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 intenses 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

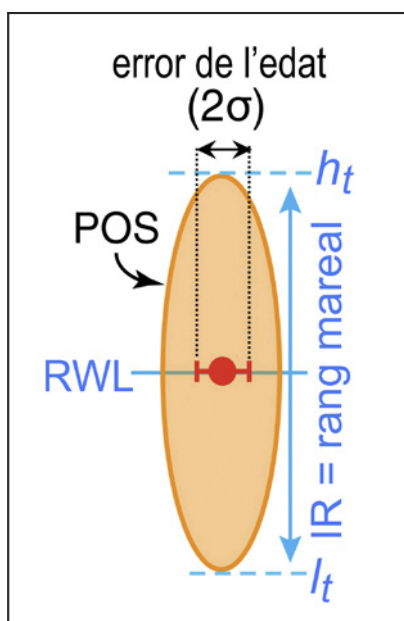


Figura 6: Els espeleotemes freàtics holocèns de Mallorca. Representació esquemàtica d'un POS, on s'observa com la part més gruixuda (RWL) correspon a la posició mitjana del nivell marí durant el període de formació del POS. IR = *indicative range*; h_t = marea alta; l_t = marea baixa; vegeu informacions 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 cristallitzacions 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 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 t_1 o IR 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 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,

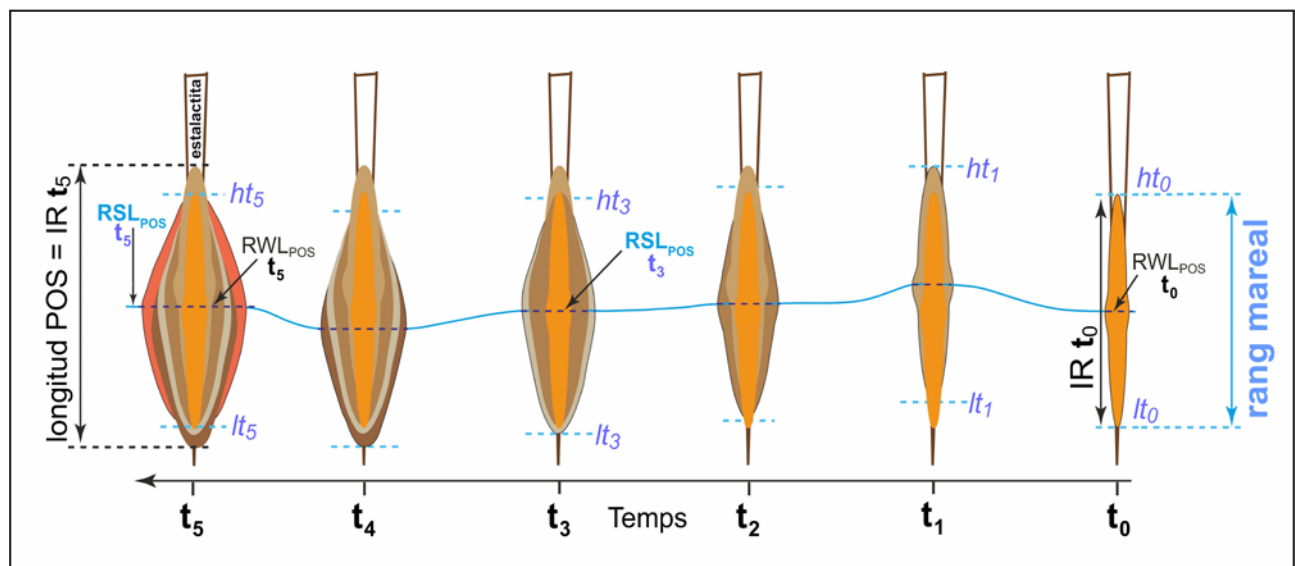


Figura 7: Diagrama esquemàtic que il·lustra els canvis en la morfologia dels POS deguts a fluctuacions del nivell marí al llarg del temps. Quan el nivell marí relatiu (RSL) fluctua entre t_0 i t_5 , la precipitació de capes addicionals de carbonats té lloc lleugerament per damunt o per sota del *Reference 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 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 t_0 and 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 t_5) corresponds to the vertical length of the whole POS. (ht = high tide; lt = low tide). (Modified from ONAC et al., 2022).

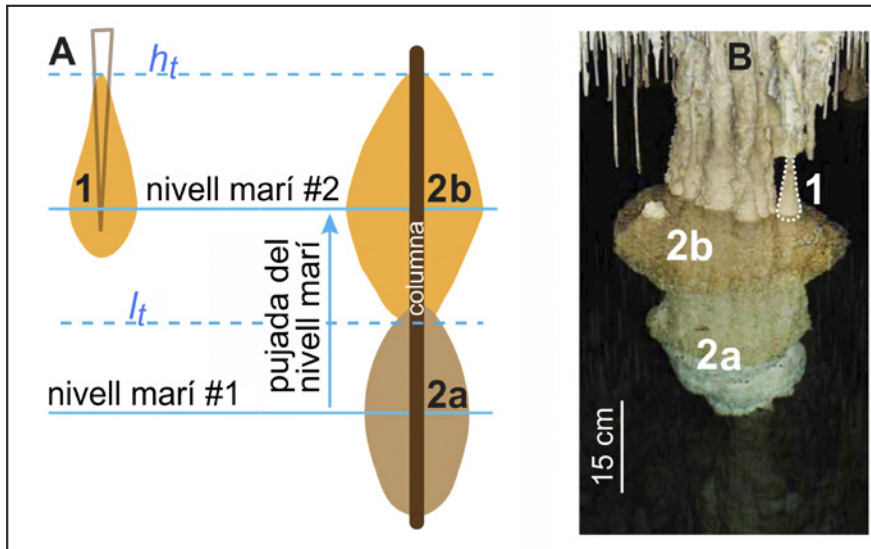


Figura 8: Els espeleotemes freàtics holocens de Mallorca. A) Dibuix que mostra diversos tipus de creixement dels POS. **1**: exemplar de morfologia bulbosa que recobre una estalactita massa curta per a permetre el creixement sobre tot el rang mareal. **2a-2b**: exemple de POS compost de morfologia fusiforme 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 cristallitzacions (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

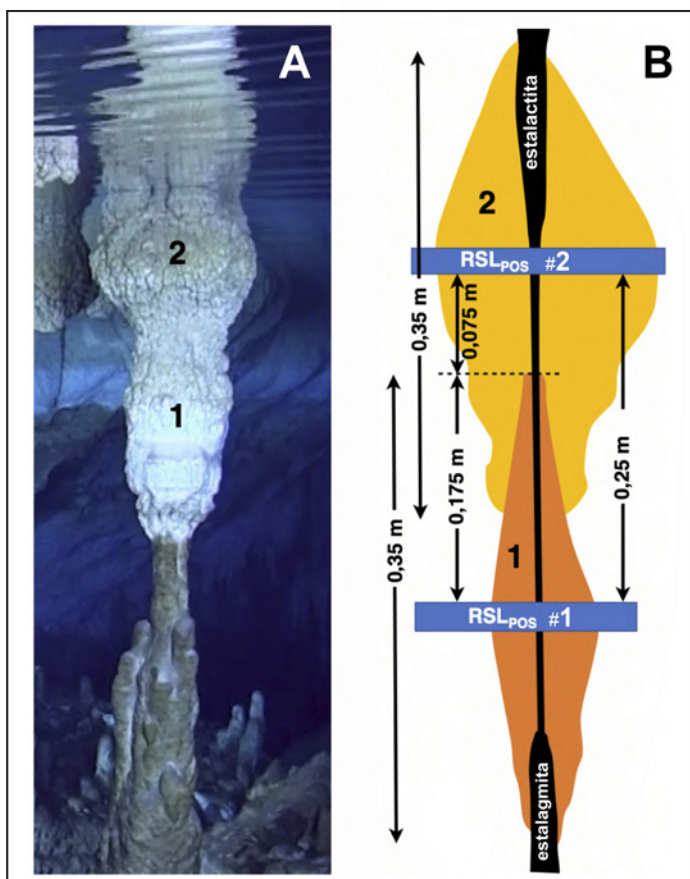


Figura 9: Interpretació morfogenètica d'un POS compost de les Coves del Drac, a Manacor (Foto: M.A. Perelló). Aquest espeleotema enregistra dos nivells marins diferents separats per una pujada del nivell de la mar d'aproximadament 25 cm. RSL_{POS} = nivells marins relatius, deduïts de la pròpia morfologia 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 morfofenètica 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 mostrat exemplars prèviament romputs (per causes naturals, o no), però dels quals era factible esbrinar el seu emplaçament i context morfofenètic. 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 mostrats. 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.).

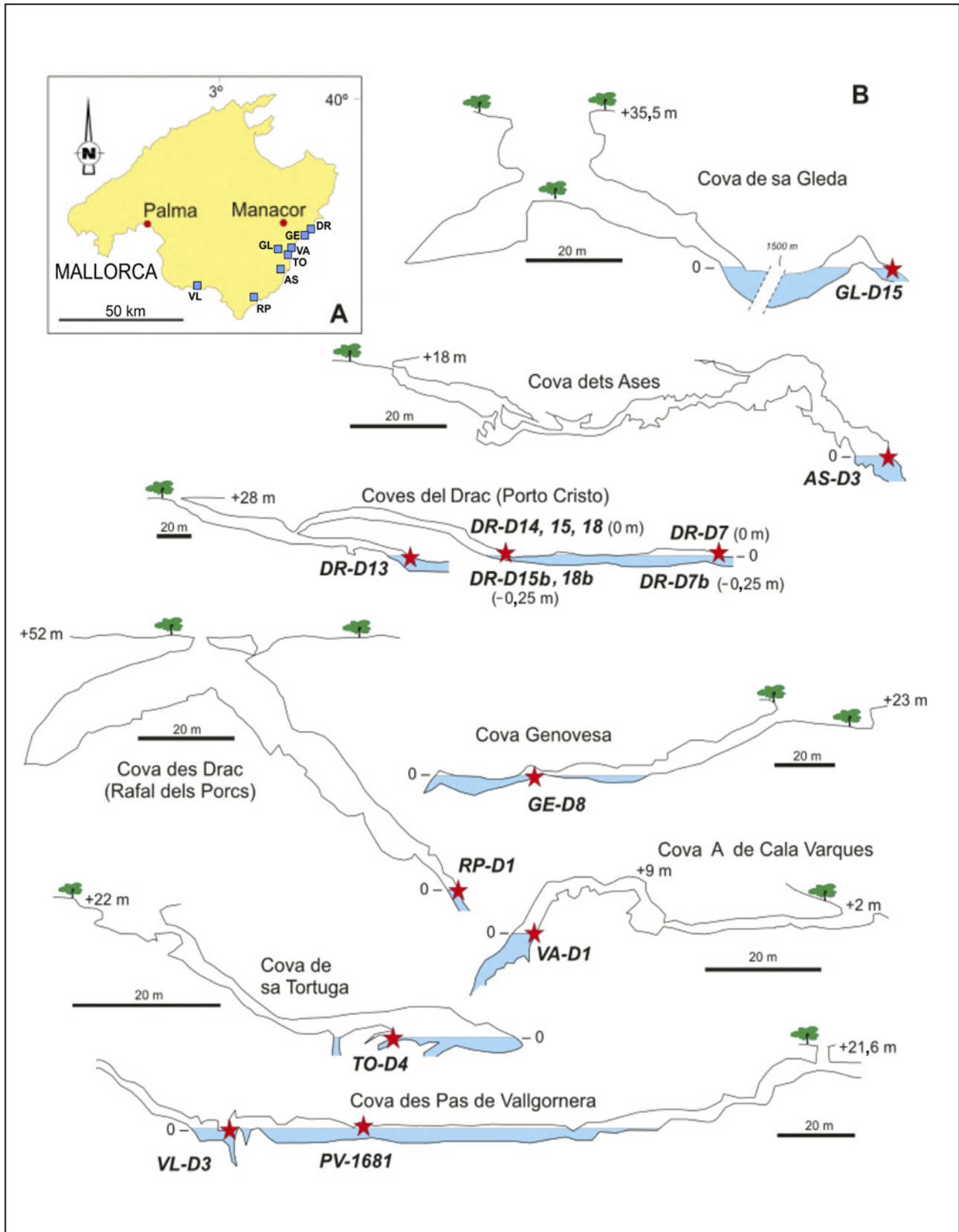


Figura 10: A) Localització de les coves investigades. DR: Coves del Drac; GE: Cova Genovesa; VA: Cova A de Cala Varques; TO: Cova de sa Tortuga; GL: Cova de sa Gleda; AS: Cova dets Ases; RP: Cova des Drac (Rafal des Porcs); VL: Cova des Pas de Vallgornera. B) Perfils esquemàtics de les coves estudiades 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).

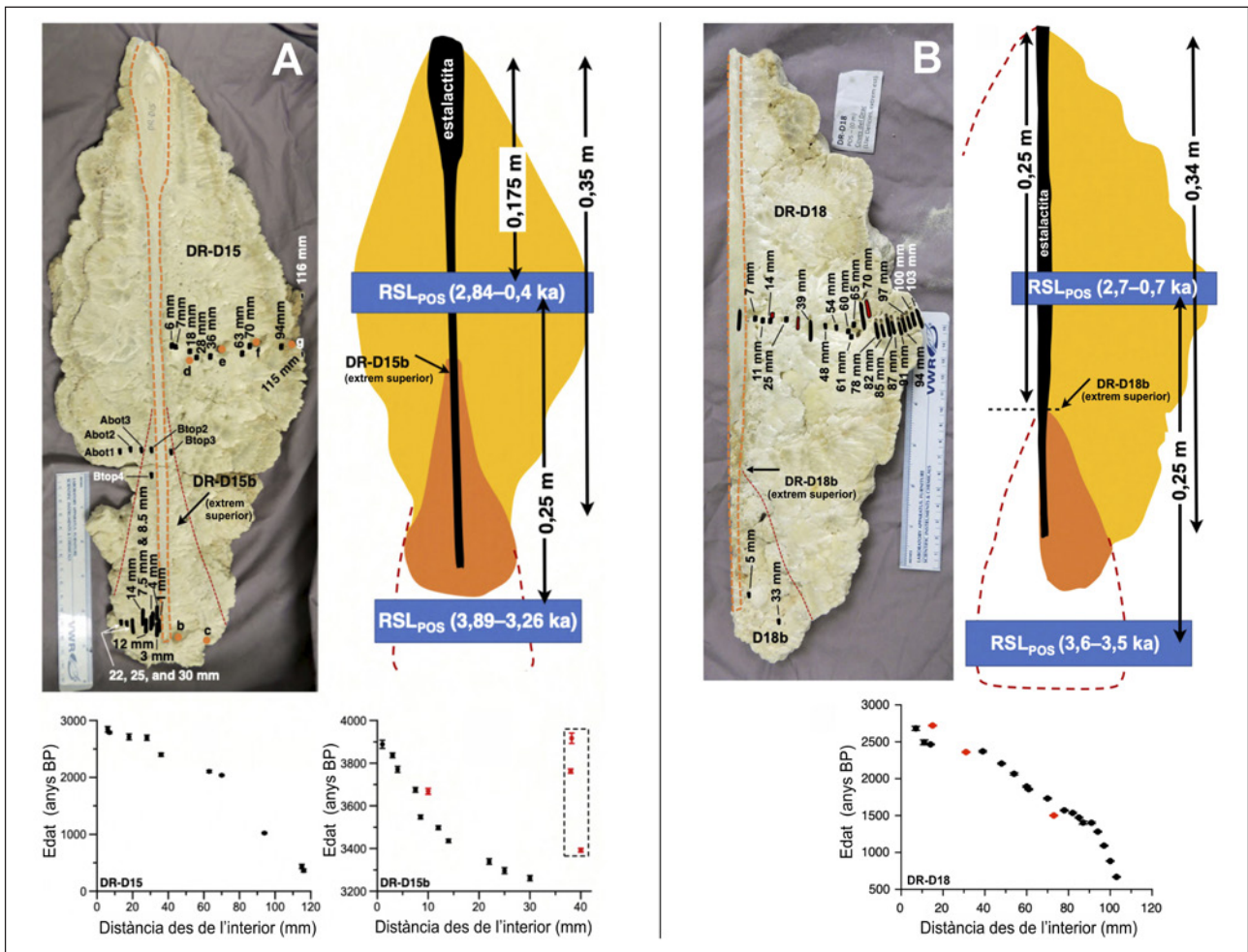


Figura 11: Els POS compostos DR-D15/15b (A) i DR18/18b (B) de les Coves del Drac (Manacor). Vista en secció dels espeleotemes amb la localització de les submostres extretes per a les datacions U-Th, i interpretació morfogenètica que es deriva (RSL_{POS} = nivells marins relatius deduïts dels POS i les 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 (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

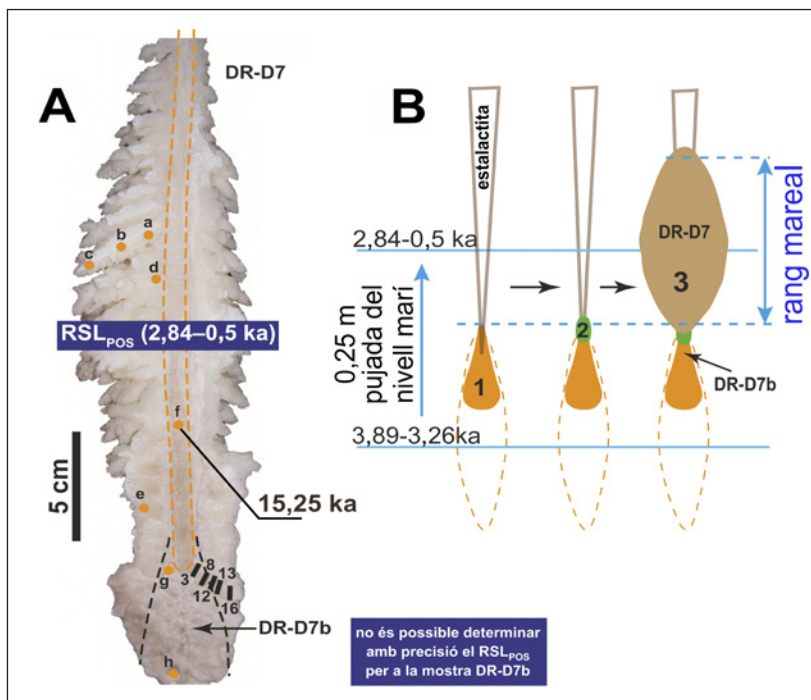


Figura 12: Mostres DR-D7/7b de les Coves del Drac (Manacor). A) Vista en secció d'aquest POS compost, el qual conté evidències de les dues estabilitzacions marines de ± 0 (nivell marí preindustrial) i de $-0,25$ m. La mostra DR-D7b representa tan sols el creixement de l'espeleotema durant la marea alta 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

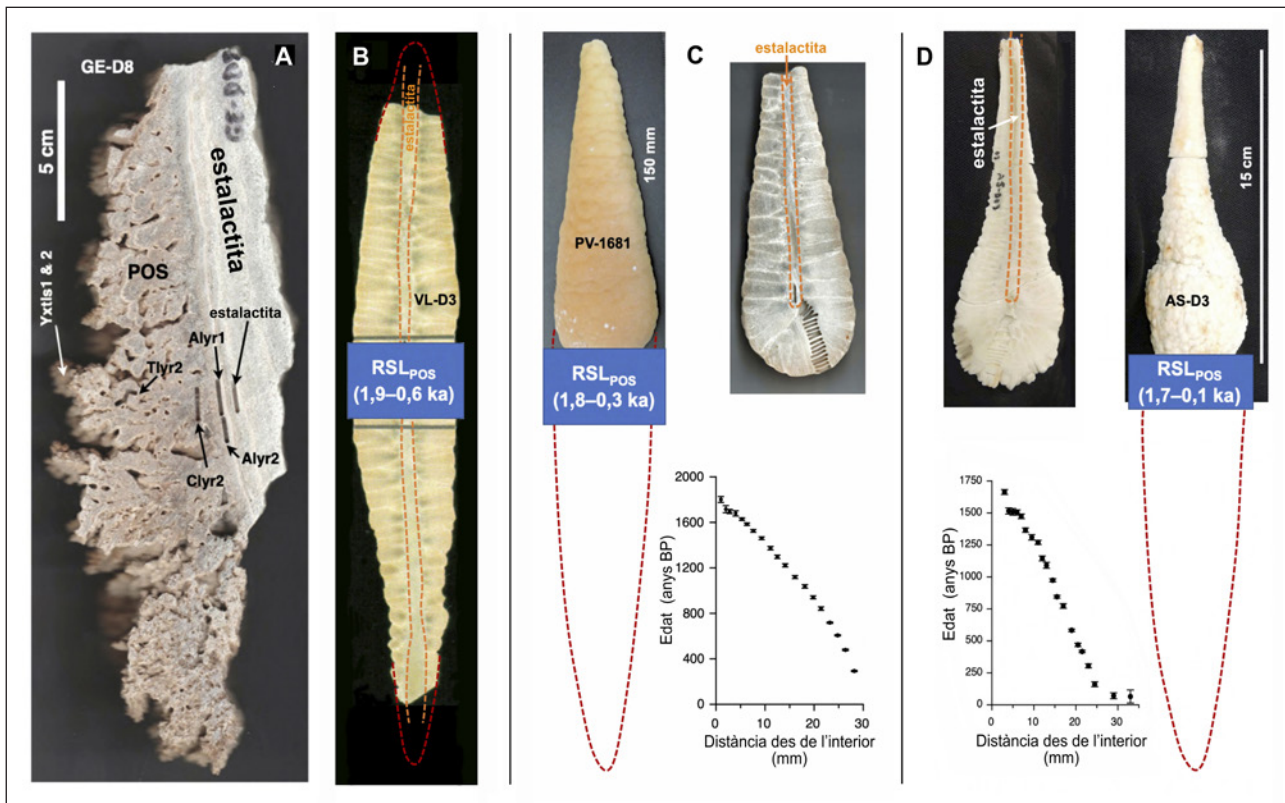


Figure 13: Mostres de POS corresponents al nivell marí preindustrial. A) POS de calcita (mostra GE-D8) de la Cova Genovesa, a Manacor; l'estalactita del seu interior ha donat una edat corresponent a la darrera glaciació. B) Vista en secció de la mostra VL-D3 de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor), 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 discontinües (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 hidrosostàsia; 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).

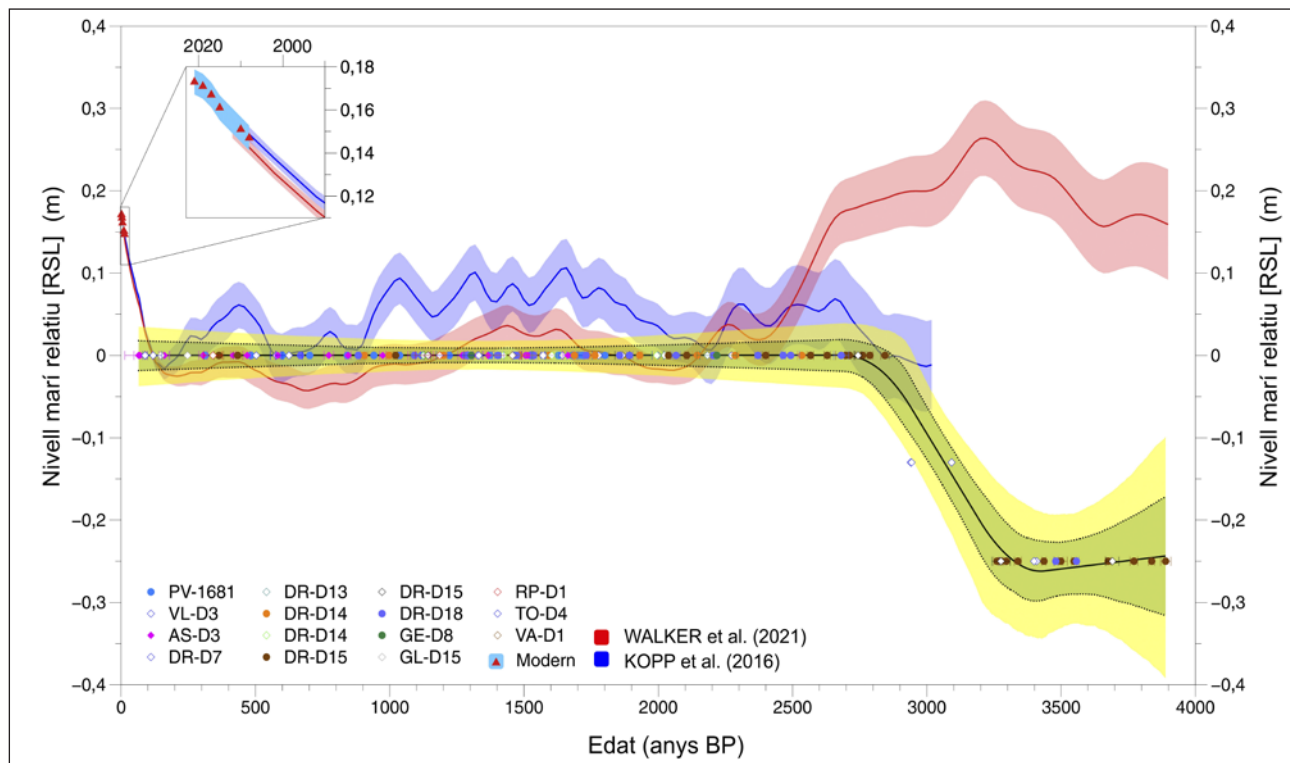


Figura 14: El nivell marí relatiu (RSL) a Mallorca durant l'holocè final, segons les dades aportades pels espeleotemes freàtics. El RSL romangué estable a $-0,25$ m entre $\sim 3,89$ i $\sim 3,26$ ka BP i, després d'una ràpida pujada, es va establitzar en el nivell marí preindustrial els darrers $\sim 2,84$ 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

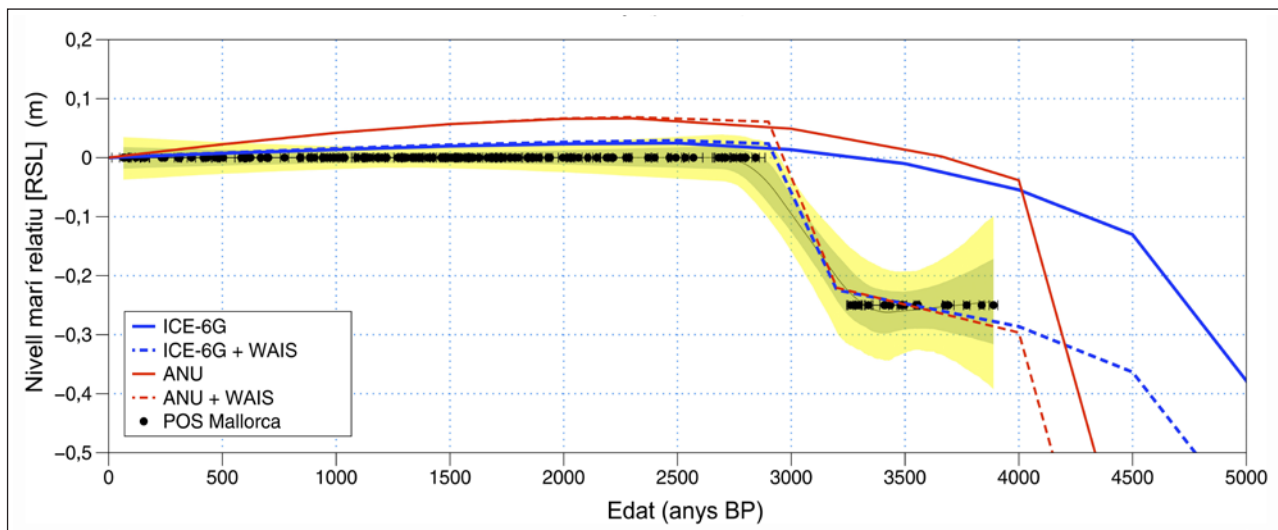


Figura 15: Comparació entre les observacions sobre el nivell marí relatiu (RSL) deduït dels espeleotemes freàtics i les prediccions dels models d'ajustament isostàtic global (GIA) a Mallorca durant els darrers 5.000 anys. Predicció basada en el model glacial ICE-6G i el model geofísic VM5 (línia blava contínua); la línia blava discontinua 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 àrees acolorides en verd i en groc 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 ka 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.

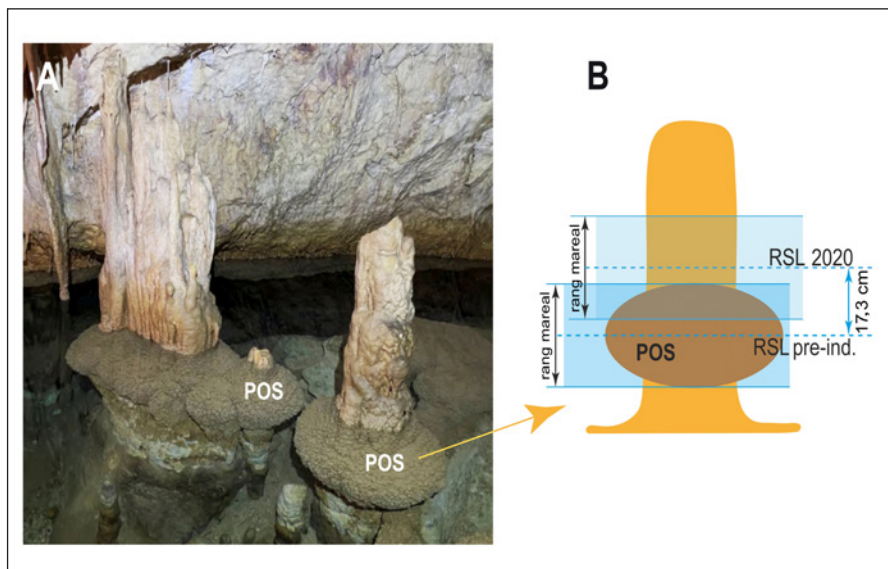


Figura 16: Espeleotemes freàtics corresponents al nivell marí preindustrial de la Cova A de Cala Varques (Manacor). A) Fotografia dels POS que es formaren en correspondència amb el nivell marí preindustrial (1900 = ±0 m) i que es troben submergits actualment. B) Dibuix esquemàtic que mostra la relació 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'excelsa 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 la 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'Agència Estatal de Investigació (AEI).

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 morfogènica 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.
- 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.
- 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.; LORSCHIED, 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 ¹⁴C 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.; LORSCHIED, 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 millennial 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.

