

# Els espeleotemes freàtics del miocè superior i pliocè de les Coves d'Artà (Capdepera, Mallorca)

Joaquín GINÉS<sup>1,2</sup>, Angel GINÉS<sup>1,2</sup>, Joan J. FORNÓS<sup>1,2</sup>, Oana A. DUMITRU<sup>3,4</sup>, Jacqueline AUSTERMANN<sup>3</sup>, Victor J. POLYAK<sup>5</sup>, Yemane ASMEROM<sup>5</sup> i Bogdan P. ONAC<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca, Spain. Email: jginesgracia@yahoo.es

<sup>2</sup> Grup de Recerca de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca, Spain.

<sup>3</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory. Columbia University. Palisades, NY, USA.

<sup>4</sup> School of Geosciences. University of South Florida. Tampa, FL, USA.

<sup>5</sup> Earth & Planetary Sciences. University of New Mexico. Albuquerque, NM, USA.

## Abstract

This paper presents the results of the investigations carried out on the phreatic overgrowths on speleothems (POS) existing in Coves d'Artà, a show cave located in the northeastern part of Mallorca Island. At this site, at least seven POS paleolevels located at elevations ranging between +14.3 and +31.8 m a.s.l. have been recognized so far; they are related to ancient sea level stands that occurred from the end of Miocene and during the Pliocene times. The radiometric dating of these speleothems by means of U-Pb method yielded ages that range from 5.86 million years ago (Ma) –corresponding to the onset of the Messinian Salinity Crisis– to 2.63 Ma matching the Pliocene-Pleistocene transition. We describe the general characteristics of these peculiar deposits and provide their absolute ages as well as estimates on the Pliocene global mean sea level in the Western Mediterranean basin. Specifically, two of the POS deposits from Coves d'Artà dated at 4.39 and 3.27 Ma suggest that during the early Pliocene Climate Optimum (Zanclean) and the mid-Piacenzian Warm Period, the global sea level was +23.5 m and +16.2 m, respectively, higher than the present-day level.

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de los espeleotemas freáticos (POS) observables en las Coves d'Artà, cavidad turística situada en el extremo nororiental de la isla de Mallorca. En dicha localidad se han reconocido al menos siete paleoniveles de sobrecrecimientos freáticos, localizados a altitudes comprendidas entre los +14,3 y +31,8 m s.n.m., los cuales se relacionan con antiguos niveles marinos del final del Mioceno y del Plioceno. La datación radiométrica de estos espeleotemas ha sido efectuada mediante el método U-Pb, habiendo suministrado edades que van desde hace 5,86 millones de años (Ma) –cronología correspondiente al momento inicial de la Crisis de Salinidad del Messiniense– hasta llegar a los 2,63 Ma, ya en la transición Plioceno-Pleistoceno. Se describen las características generales de estos depósitos, aportándose también sus edades absolutas, así como estimaciones sobre el nivel marino global durante el Plioceno en el Mediterráneo occidental. En concreto, los espeleotemas freáticos de las Coves d'Artà aportan evidencias de que durante el óptimo climático del Plioceno temprano (Zancliense) –con una edad U-Pb de 4,39 Ma– el nivel marino global fue +23,5 m superior al actual; por otra parte, durante el período cálido del Piacenziense se ha podido estimar un GMSL de +16,2 m, con una cronología de 3,27 Ma.

GINÉS, J. et al. (2021): Els espeleotemes freàtics dels miocè superior i pliocè de les Coves d'Artà (Capdepera, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 4: 19-34. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.  
Rebut: 5 maig 2021; Revisat: 7 juny 2021; Acceptat: 9 juny 2021.  
Publicat online: 28 juny 2021.

## Introducció

Les investigacions sobre els espeleotemes freàtics de les coves de Mallorca, i la seva formació relacionada amb antics nivells de la mar Mediterrània, s'iniciaren ara fa gairebé mig segle arran de l'exploració i topografia de la Cova de sa Bassa Blanca, al municipi d'Alcúdia (GINÉS & GINÉS, 1972, 1974). A partir d'aquelles dates, s'han desenvolupat i publicat nombrosos treballs sobre aquest tipus de dipòsits, que apareixen convenientment detallats i sintetitzats a GINÉS et al. (2012), motiu pel qual no ens estendrem aquí sobre les generalitats relatives a aquesta categoria d'espeleotemes; les investigacions portades a terme al llarg de més de quatre decennis s'han centrat en aspectes morfològics, cristal·logràfics i geocronològics, incloent la seva datació absoluta mitjançant mètodes radiomètrics.

En els darrers anys s'han produït importants avenços pel qual fa a l'estudi dels espeleotemes freàtics corresponents al darrer interglacial, avenços que s'han sustentat en nombroses i acurades datacions efectuades mitjançant el mètode U-Th (TUCCIMEI et al., 2006; DORALE et al., 2010; POLYAK et al., 2018; GINÉS et al., 2020). Aquests treballs permeten un bon coneixement de les vicissituds

del nivell marí a Mallorca durant l'estadi MIS-5 (que inclou el darrer esdeveniment interglacial), subministrant també interessants dades sobre els possibles ajustaments isostàtics que han determinat el nivell marí global al llarg d'aquest estadi.

Avui en dia el fet que els espeleotemes freàtics constitueixen un important registre de les variacions del nivell marí als litorals calcaris és del tot admès dins la comunitat científica, tal i com es posa de manifest, per exemple, a les publicacions de DUTTON (2013) i de VAN HENGSTUM et al. (2015). Val a dir que a la bibliografia internacional s'ha generalitzat l'ús de l'acrònim POS per designar els espeleotemes freàtics, sigles que provenen del terme *Phreatic Overgrowths on Speleothems*, que hem anat utilitzant de manera progressiva als treballs sobre aquests dipòsits, publicats en llengua anglesa (TUCCIMEI et al., 2006; GINÉS et al., 2012).

A les presents pàgines ens ocuparem dels espeleotemes freàtics estudiats els darrers anys a les Coves d'Artà (Capdepera), famosa cavitat turística situada a les costes de l'extrem nord-est de l'illa de Mallorca. Els abundants i espectaculars paleonivells freàtics d'aquesta cova han estat datats recentment mitjançant el mètode U-Pb, i constitueixen un registre excepcional del nivell marí durant el pliocè a la Mediterrània occidental, el qual abraça des dels moments finals del miocè fins arribar a la transició pliocè-pleistocè (DUMITRU et al., 2019, 2021). En aquesta nota ens centrarem en els aspectes més morfològics i espeleològics de les investigacions realitzades, encara que també es tractaran, molt per damunt, les implicacions paleoclimàtiques dels resultats obtinguts.

## Antecedents: la presència de POS a les cavitats del Cap Vermell

La presència d'espeleotemes freàtics a les coves del promontori litoral del Cap Vermell, del municipi de Capdepera (on se situen les Coves d'Artà i altres cavitats properes com les Coves Petites i la Cova de na Mitjana; Figura 1), està documentada a partir dels primers anys de la dècada dels 70 del passat segle. Les observacions efectuades el 1972 a la Cova de sa Bassa Blanca (GINÉS & GINÉS, 1972, 1974) varen facilitar el reconeixement, un any més tard, de l'existència d'aquest tipus de dipòsits en algunes cavitats d'aquest sector de l'illa de Mallorca. Concretament, a una nota publicada per GINÉS (1973) es descrivien els espeleotemes freàtics presents dins les Coves Petites a altituds superiors als 30 m s.n.m. –que eren atribuïts a l'interglacial gūnz-mindel, o milazzià– esmentant també l'observació de precipitats freàtics a la Cova de na Mitjana, així com al *saló de les Banderes* de les Coves d'Artà. En base a criteris altimètrics, es proposava una edat paleotirreniana per a aquests darrers dipòsits (GINÉS & GINÉS, 1987), segons la terminologia en ús en aquells moments pel que fa a l'estudi del quaternari marí de Mallorca (CUERDA, 1975).

En els següents anys les investigacions es centraran en les Coves Petites i, sobretot, en la Cova de na Mitjana (GINÉS et al., 1975), mentre que les Coves d'Artà quedaran de moment al marge de noves observacions fins a la dècada dels 90 del segle XX. Aquest fet té a veure amb dos motius principals: els espeleotemes de la Cova de na Mitjana –situats a altituds inferiors als +6 m s.n.m.– pareixien més favorables per a la seva datació radiomètrica en ser previsiblement més joves, mentre que els dipòsits de les Coves Petites podien donar dades geocronològiques sobre els paleonivells més elevats d'aquesta zona, sense la necessitat de mostrejar les Coves d'Artà tot evitant possibles interferències amb la seva activitat turística.

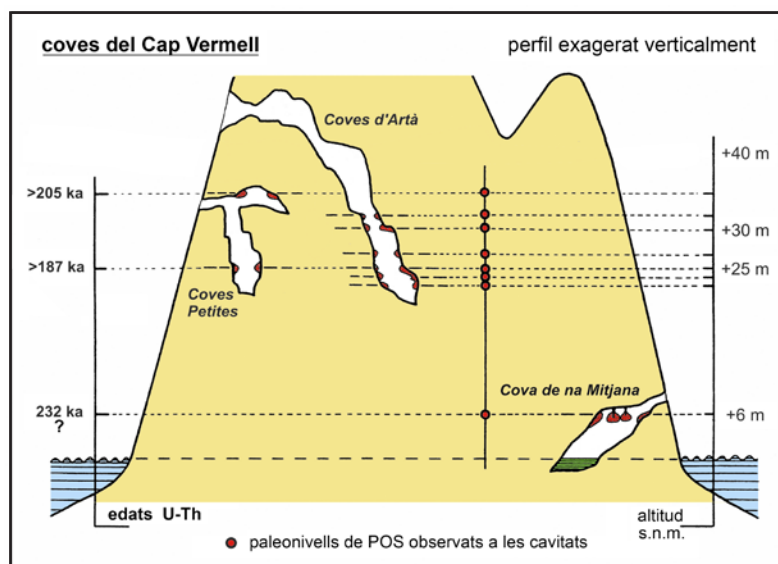


Figura 1: Perfil esquemàtic del promontori costaner del Cap Vermell, al municipi de Capdepera, amb indicació dels paleonivells d'espeleotemes freàtics (POS) observats a les seves cavitats (modificat a partir de GINÉS & GINÉS, 1993b). S'indiquen els resultats de les datacions absolutes U-Th disponibles aleshores.  
Figure 1: Schematic profile of the coastal promontory of Cap Vermell, in the municipality of Capdepera, with indication of the paleolevels of phreatic overgrowths on speleothems (POS) observed in its caves (modified from GINÉS & GINÉS, 1993b). The results of U-Th datings available at that time are indicated.

Durant la dècada dels 80 del passat segle es va tenir la possibilitat d'incloure mostres de les cavitats del Cap Vermell en les primeres campanyes de datació radiomètrica pel mètode U-Th, desenvolupades gràcies a la implicació del desaparegut col·lega i amic Gerd J. Hennig, del *Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung* (Hannover). Els resultats obtinguts aparegueren publicats a GINÉS & GINÉS (1989, 1993a) proporcionant dades poc concloents pel que fa a les cavitats que ens interessien: les mostres de la Cova de na Mitjana es trobaven molt recristal·litzades i les datacions (efectuades mitjançant espectrometria alfa) no resultaven fiables i, en el cas de les Coves Petites, tan sols permetien calcular unes edats mínimes de > 200 ka BP.

L'any 1992 es va fer un exhaustiu reconeixement dels paleonivells d'espeleotemes freàtics existents a les Coves d'Artà, que suposà el començament d'un futur de fructíferes tasques d'investigació, propiciades per la bona predisposició de la propietat i els gestors d'aquesta cova turística. Una primera aproximació espeleocronològica al conjunt de les cavitats del Cap Vermell fou publicada a GINÉS & GINÉS (1993b), encara que les informacions sobre els POS de les Coves d'Artà es limitaven a esmentar la presència de 6 paleonivells, localitzats entre +23 i +32 m s.n.m. (Figura 1), als que se'ls suposava una antiguitat corresponent al pleistocè mitjà, com a mínim.

A l'extens treball acadèmic elaborat per GINÉS (2000) sobre el carst litoral del llevant de Mallorca, es fa referència als paleonivells freàtics observats a diversos indrets de les Coves d'Artà (*l'Infern*, el *Baptisteri*, el *Teatre* i el *saló de les Banderes*). Aquests dipòsits delimiten espectaculars alineacions rigorosament horitzontals situades a les següents elevacions: +23, +24, +25, +27, +30 i +32 m s.n.m. Al

treball citat, no s'aporten noves informacions rellevants sobre la cronologia d'aquests paleonivells marins, encara que s'inclouen els resultats dels mesuraments d'ESR (*Electron Spin Resonance*) portats a terme els anys 80 per Gerd J. Hennig i Rainer Grün, sobre mostres de les Coves Petites; cal assenyalar que aquest sistema de datació no va subministrar cap informació vàlida per a la cronologia de les cavitats del Cap Vermell, degut a que les dosis acumulades de radiació eren molt baixes a causa de la forta recristal·lització de les mostres.

En ocasió de l'encontre internacional *Sea level changes into MIS-5: from observations to predictions*, desenvolupat el 2012 a Palma, es va programar una visita a les Coves d'Artà. Al llibre-guia de l'esmentat esdeveniment s'inclouen les dades conegudes aleshores sobre els POS d'aquesta localitat (FORNÓS et al., 2012), afirmant tan sols que aquests dipòsits són anteriors a l'estadi isotòpic MIS-9.



Figura 2: Perforant a la zona coneguda com *l'Infern* de les Coves d'Artà, el juny de 2014, per a l'extracció de la mostra AR-05 (Foto: J.J. Fornós).

Figure 2: Drilling a POS core (sample AR-05) in the area known as *Infern* from Coves d'Artà, in June 2014 (Photo: J.J. Fornós).

Finalment, entre el 2013 i el 2018 es pogueren portar a terme diversos mostrejors a les Coves d'Artà, en una campanya de col·laboració entre la *Universitat de les Illes Balears*, la *University of South Florida* i la *University of New Mexico*. Es recol·lectaren mostres dels espectaculars POS que abunden a les sales més internes de la cavitat, la majoria de les quals foren obtingudes mitjançant la perforació dels sobrecreixements freàtics (Figura 2), per tal d'obtenir-ne testimonis continus d'aquests gruixuts dipòsits. L'objectiu principal dels mostrejors era intentar la seva datació radiomètrica pel mètode U-Pb, tenint en compte la previsible gran antiguitat d'aquestes cristallitzacions. Els resultats obtinguts han estat publicats recentment (DUMITRU et al., 2019, 2021) i el present article només pretén, com a principal objectiu, la seva divulgació dins l'àmbit espeleològic illenc.

Els fets geològics intrigants que planteja aquesta arxiconeguda cova ja foren intuïts per CABRER (1840), qui en el seu històric opuscle "*Viaje á la famosa gruta llamada Cueva de la Hermita ...*" s'expressa de la següent manera en descriure una de les sales més internes de la cova, arran de les seves visites efectuades entre 1807 i 1826: "*Desde el piso hasta la altitud de siete pies, corre á nivel horizontal por todo el rededor de las paredes, una faja de color ceniciento muy cargado, cogiendo al mismo tiempo el pilar de enmedio ... ésto induce solamente á persuadir que tal columna céntrica se fundó con anterioridad al indicado depósito*". Les preocupacions espeleocronològiques de l'autor són evidents quan es pregunta:

«¿Qué fecha deberemos atribuirle á aquellas filtraciones que no pudieron consolidarse sobre aquel piso, sin que se desaguase enteramente la pieza, la cual presenta todavía indudables vestigios de haber sido vasto depósito de aguas?». Malgrat que no és segur que el prevere Antoni Cabrer reconegués els espeleotemes freàtics pròpiament dits, el fet que queda clar és que va constatar que la cova havia sofert episodis d'inundació parcial i que hi havia diverses generacions d'espeleotemes, anteriors i posteriors a aquestes fases de negament; farà falta encara que passi més d'un segle per poder començar a esbrinar en detall les informacions geocronològiques que hostatjaven les Coves d'Artà.

## Els espeleotemes freàtics de les Coves d'Artà

Aquesta important cova turística s'obre als materials carbonatats juràssecs que formen el promontori costaner del Cap Vermell. A les sales més internes del recorregut de la cavitat, les quals a més a més es troben lleugerament més fondes, es poden identificar diferents paleonivells de POS que es poden resseguir amb major o menor facilitat a l'*Infern*, el *Purgatori*, el *Teatre* i el *saló de les Banderes* (Figura 3), segons la nomenclatura de les sales principals utilitzada per GINÉS et al. (2019). Aquests paleonivells es troben tots ells per davall dels 32 m d'altitud s.n.m., de tal manera que el *Vestíbul* i les sales més externes i/o elevades de la cova (per exemple, la sala de la *Reina de les Columnes* i la *Glòria*) no mostren alineacions evidents d'aquest tipus de dipòsits.

Les cotes de les alineacions horitzontals d'espeleotemes freàtics foren determinades amb precisió el 2013, mitjançant diferents anivellacions trigonomètriques realitzades a l'efecte. Cal afegir que durant les exploracions efectuades el 2019 –a la saleta situada sota l'*Infern*– s'identificà un altre sobrecreixement freàtic, molt més baix, de tal manera que en total s'han reconegut i estudiat 7 paleonivells de POS, les altituds dels quals apareixen recollides a la Taula 1. Gairebé la totalitat dels paleonivells es distribueixen entre els +31,8 i els +22,6 m s.n.m., mentre que l'horitzó mostrejat davall de l'*Infern* es troba a una altitud bastant inferior, de +14,3 m s.n.m. Cal esmentar que també s'han observat exemplars aïllats d'espeleotemes freàtics en diversos punts de la cova, però sense arribar a formar paleonivells ben evidents; això succeeix tant a una zona del *Vestíbul* (a una cota aproximada de +37 m), com al sector del *Purgatori* i l'*Infern* (a una altitud de devers +26 m), i a diversos punts de les sales situades sota l'*Infern*, a alçades inferiors als +17 m s.n.m.

### Característiques dels POS mostrejats

Tot seguint el recorregut turístic habitual de les Coves d'Artà els primers vestigis d'espeleotemes freàtics, encara que molt emmascarats per les obres de condicionament de la cavitat, es troben a la zona d'accés a l'*Infern* (Figura 4); concretament, just damunt la plataforma que permet gaitar

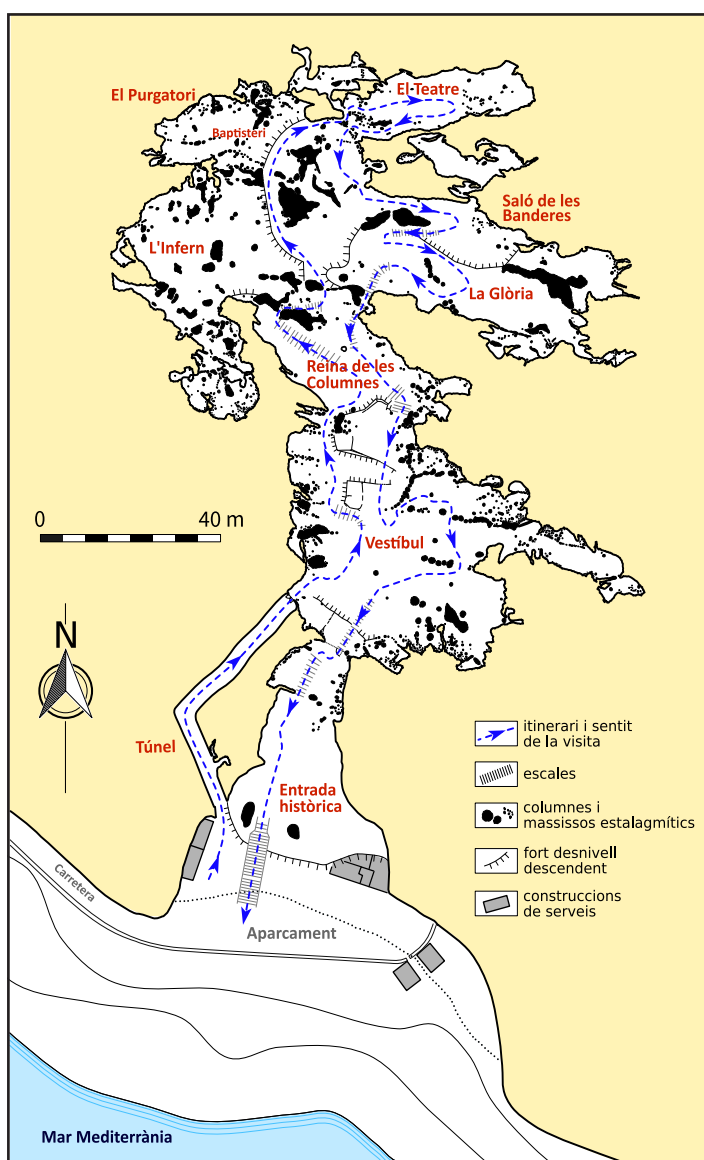


Figura 3: Plànol simplificat de les Coves d'Artà (Capdepera, Mallorca) amb indicació de la toponímia de les sales principals (Base topogràfica SEB - Societat Espeleològica Balear).  
Figure 3: Simplified map of Coves d'Artà (Capdepera, Mallorca) showing the names of the main chambers (Topographic base SEB - Societat Espeleològica Balear).

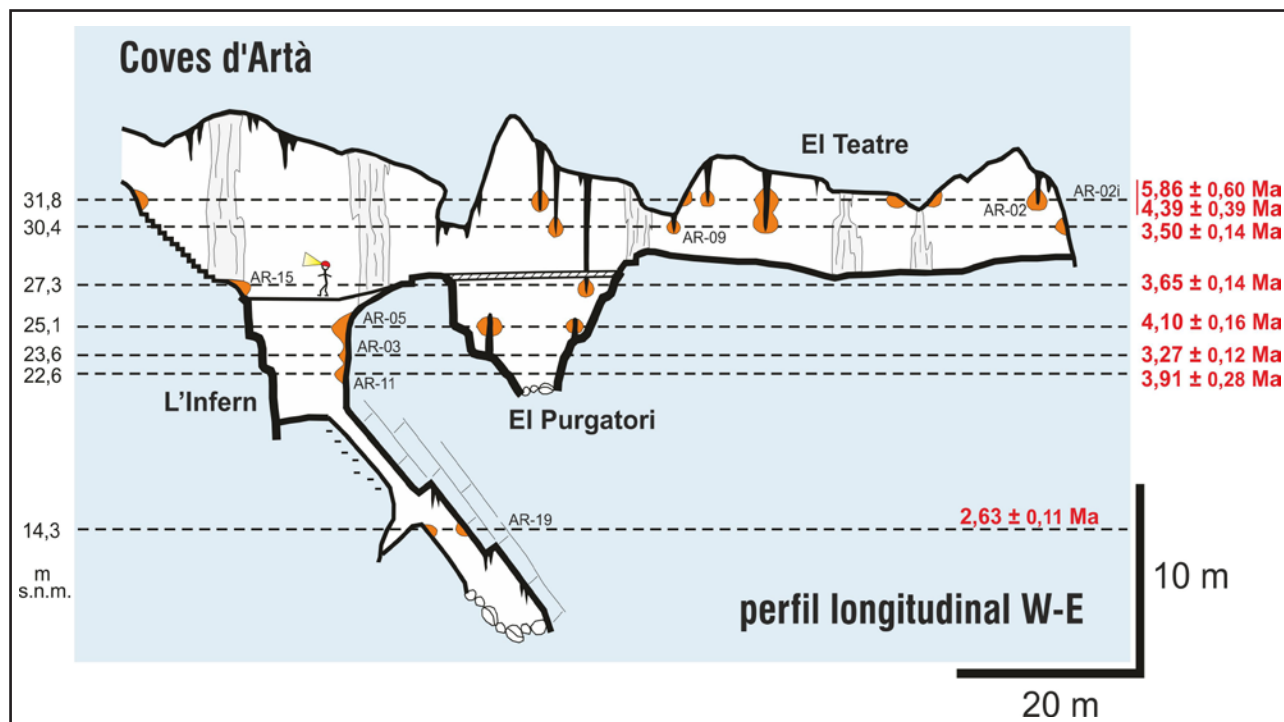


Figura 4: Perfil esquemàtic de les sales més internes de les Coves d'Artà, on s'indiquen els paleonivells de POS mostrejats, les seves altituds, així com les edats U-Pb obtingudes (actualitzat a partir de DUMITRU et al., 2019).

Figure 4: Schematic profile of the innermost chambers from Coves d'Artà, on which the sampled POS paleolevels, their elevations, as well as the obtained U-Pb ages are indicated (updated from DUMITRU et al., 2019).

sobre aquesta impressionant sala, es troben evidències d'un paleonivell situat a +27,3 m (mostra AR-15) que també apareix representat més endavant, a prop de la passarel·la elevada que travessa el *Purgatori*. No obstant això, les alineacions més espectaculars de POS de tota la cova es poden contemplar baixant a l'*Infern* pròpiament dit (Figura 5), on s'aprecien 3 paleonivells successius a altituds de +25,1 m (AR-05), +23,6 m (AR-03) i +22,6 m (AR-11). Aquests paleonivells són destacables per les seves grans dimensions (Taula 1), i formen unes alineacions paral·leles molt cridaneres sobre les parets de la cavitat; donades la gran gruixa i la disposició parietal d'aquests POS, foren mostrejats

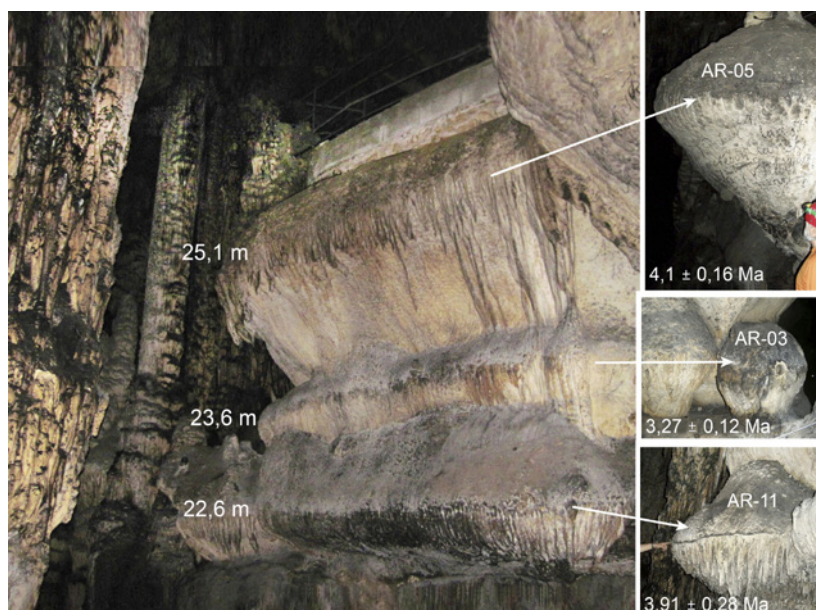


Figura 5: Aspecte general i detalls dels paleonivells d'espeleotemes freàtics mostrejats a la sala coneguda com l'*Infern* (Fotos: B.P. Onac, publicades a DUMITRU et al., 2019).

Figure 5: General view and details of phreatic speleothem paleolevels sampled in the chamber known as *Infern* (Photos: B.P. Onac, published in DUMITRU et al., 2019).

efectuant perforacions horitzontals per tal d'extreure testimonis (*cores*) dels sobrecreixements freàtics (Figures 2 i 6).

Continuant el recorregut habilitat, la següent sala –és a dir, el *Purgatori*– conté espeleotemes freàtics molt singulars, entre els quals destaca el *Baptisteri* (Figura 7) i d'altres gruixudes formacions similars desenvolupades sobre estalagmites, que corresponen al paleonivell de +25,1 m observat a l'*Infern* (Figura 4). Al sòtil del *Purgatori* sovintegen exemplars de POS que han crescut sobre estalactites, originant morfologies globulars d'uns pocs decímetres de mida, que es relacionen amb els paleonivells situats a +30,4 i +31,8 m observables també al llarg del trajecte cap a les següents cambres.

A la sala denominada el *Teatre*, es troben molt ben representats els antics nivells corresponents als +30,4 m (mostra AR-09) i +31,8 m (AR-02 i

cavitat	codi de la mostra	característiques de la mostra	altitud (m s.n.m.)	amplària vertical del paleonivell (m)	gruix del paleonivell (m)	mineralogia	edat U-Pb (Ma)	GMSL (m s.n.m.)
Coves d'Artà	AR-02i (Teatre)	POS sobre estalactita	31,8	0,40	0,10	calcita	<b>5,86 ± 0,60</b>	–
	AR-02 (Teatre)	POS sobre estalactita	31,8	0,55	0,10	calcita	<b>4,39 ± 0,39</b>	23,5 (9,0–26,7)
	AR-09 (Teatre)	POS sobre estalactita	30,4	0,70	0,40	aragonita	<b>3,50 ± 0,14</b>	22,5 (11,3–25,7)
	AR-15 (Infern)	POS parietal (core: 20 cm)	27,3	0,50	0,25	aragonita	<b>3,65 ± 0,14</b>	19,5 (7,6–22,6)
	AR-05 (Infern)	POS parietal (core: 86 cm)	25,1	1,20	0,80	aragonita	<b>4,10 ± 0,16</b>	16,9 (3,5–20,2)
	AR-03 (Infern)	POS parietal (core: 34 cm)	23,6	0,55	0,30	aragonita (42%) calcita (58%)	<b>3,27 ± 0,12</b>	16,2 (5,6–9,2)
	AR-11 (Infern)	POS parietal (core: 63 cm)	22,6	0,85	0,50	calcita	<b>3,91 ± 0,28</b>	14,7 (2,0–18,0)
	AR-19 (Infern)	POS parietal	14,3	0,50	0,10	aragonita	<b>2,63 ± 0,12</b>	6,4 (-2,0–8,8)
Coves Petites	CP-04	POS sobre estalactita	33,3	0,30	0,10	calcita	<b>6,54 ± 0,37</b>	–

Taula 1: Característiques de les mostres i resultats de les investigacions. Els rangs d'incertesa de les datacions són  $2\sigma$ . A la Figura 10 s'indiquen quins són els paràmetres morfomètrics mesurats als diferents paleonivells de POS. Per a la metodologia del càlcul del nivell marí mitjà global (GMSL) cal consultar l'apartat pertinent al text.

Table 1: Sample information and results. The age uncertainties are reported as  $2\sigma$  absolute values. The morphometric parameters measured for the different POS paleolevels are shown in Figure 10. For the methodology used in estimating global mean sea levels (GMSL) see the section on this subject in the text.

AR-02i), que resulten molt evidents en forma de sobrecreixements frèatics que han crescut sobre les estalactites (Figures 4 i 8). Un espeleotema frèatic que crida l'atenció dins aquesta estança se sembla a un petit anyell penjat al sòtil de la sala per les seves potes (Figura 9); es tracta d'un curiós mimetisme, molt popular entre els guies de la cova. Aquests paleonivells més elevats es continuen al llarg dels passatges fins arribar al *saló de les Banderes*, cobrint bona part de les parets i sòtils de la cavitat; a partir de l'esmentada sala, els sobrecreixements frèatics desapareixen tan bon punt començam la pujada cap a les sales elevades de la *Glòria*.

Els 6 paleonivells de POS que es coneixen a la zona turística de la cova estan convenientment documentats al treball de DUMITRU et al. (2019), on s'aborden sobretot els aspectes geocronològics i paleoclimàtics de les investigacions realitzades. Posteriorment, s'ha identificat un nivell addicional localitzat, a una altitud de +14,3 m s.n.m. (mostra AR-19), dins les saletes que es troben sota la part més fonda de l'*Infern*; aquest paleonivell ha estat investigat molt recentment per DUMITRU et al. (2021).

La morfologia dels espeleotemes frèatics de les Coves d'Artà és l'habitual en aquesta classe de dipòsits: franges horitzontals de sobrecreixements cristal·lins arrodonits, que presenten una major gruixa cap a la seva banda central, la qual enregistra el nivell mitja de les aigües marines (POMAR et



Figura 6: Testimoni de perforació extret a l'*Infern*, corresponent al paleonivell mostrejat a +22,6 m s.n.m. (Foto: JJ. Fornós).  
Figure 6: The core extracted from the POS paleolevel occurring at an elevation of +22.6 m a.s.l. in the chamber named *Infern* (Photo: JJ. Fornós).



Figura 7: Espectacular formació coneguda com el *Baptisteri*, a la sala denominada el *Purgatori*. Destaca el notable sobrecreixement freàtic existent a la cota +25,1 m s.n.m. (Foto: A. Merino).

Figure 7: Spectacular formation known as *Baptisteri*, in the room called *Purgatori*. It is worth noting the remarkable size of the phreatic overgrowth existing at +25.1 m a.s.l. (Photo: A. Merino).

al., 1979; TUCCIMEI et al., 2010; GINÉS et al., 2012). Malgrat aquesta homogeneïtat morfològica, és necessari afegir que alguns dels paleonivells existents a la localitat que ens ocupa presenten unes dimensions remarcables.

Amb la intenció d'il·lustrar aquestes qüestions, s'han mesurat dos paràmetres morfomètrics segons s'indica a la Figura 10, on es mostra com s'han pres les mesures segons siguin les característiques dels suports sobre els que s'han desenvolupat els POS. Pel que fa a l'amplària vertical del paleonivell –que marca el rang de fluctuació de les aigües freàtiques– aquest paràmetre es veu freqüentment infravalorat en el cas de sobrecreixements que s'han desenvolupat sobre estalactites que penetren tan sols somerament l'antic nivell freàtic (Figura 10-2). Quant al gruix del dipòsit, aquesta dimensió màxima és inequívoca en el cas dels recobriments parietals (Figura 10-1) però, quan es tracta de POS sobre espeleotemes vadosos axials (estalactites o estalagmites), aquest paràmetre no correspon al diàmetre de l'espeleotema sinó al gruix real del recobriment que envolta de forma anular el suport central (Figures 10-2 i 10-3). L'amplària vertical dels paleonivells de les Coves d'Artà oscil·la entre 0,4 i 1,2 m (Taula 1), dels quals els valors majors corresponen als espectaculars paleonivells representats a *l'Infern* i al *Purgatori*, concretament els 0,85 m d'amplària vertical del nivell de +22,6 m i el valor màxim de 1,2 m del paleonivell situat a +25,1 m. El gruix dels sobrecreixements freàtics és bastant variable (Taula 1), anant des de 0,1 m fins als valors màxims de 0,5 i 0,8 m corresponents també als notables paleonivells ja esmentats de +22,6 i +25,1 m s.n.m.

La mineralogia dels POS varia d'uns paleonivells als altres: alguns d'ells estan constituïts per calcita, mentre que la majoria de sobrecreixements freàtics són d'aragonita (Figura 11); cal consignar que a un dels paleonivells mostrejats (+23,6 m, mostra AR-03) estan presents ambdues mineralogies (Taula 1). Una menció especial mereix l'exemplar de POS recol·lectat a +31,8 m s.n.m., el qual presenta dues generacions cristal·lines fortament diferenciades (Figura 12), ambdues de calcita, motiu pel qual es varen individualitzar dues mostres diferents per a la seva ulterior datació (AR-02 i AR-02i). El fet que la major part dels paleonivells siguin d'aragonita ha de ser considerat un bon indicador de cara a la seva datació radiomètrica, donat que és possible descartar l'existència de processos importants de recristal·lització o de neomorfisme que hagin pogut afectar algunes de les mostres (DUMITRU et al., 2021).



Figura 8: Diversos paleonivells d'espeleotemes freàtics desenvolupats sobre estalactites a la sala coneguda com el *Teatre*. S'observen dos paleonivells principals situats a les cotes +30,4 i +31,8 m s.n.m. (Foto: A. Merino).

Figure 8: Several POS paleolevels developed on stalactites in the chamber known as *Teatre*. Two main paleolevels located at +30.4 and +31.8 m a.s.l. are visible (Photo: A. Merino).

**Dades cronològiques: les datacions U-Pb**

L'objectiu principal que es va plantejar en les presents investigacions fou la datació absoluta dels POS de les Coves d'Artà, amb la intenció de conèixer més dades sobre la història del nivell marí en temps geològics anteriors al pleistocè superior. Tenint com a referència de partida les datacions radiomètriques efectuades sobre mostres de les properes Coves Petites (GINÉS & GINÉS, 1989), es suposava una edat per a aquests espeleotemes freàtics que previsiblement quedaria fora del límits de datació de les tècniques més recents utilitzades amb el mètode U-Th. Per aquests motius es va procedir a la seva datació radiomètrica mitjançant el mètode U-Pb –que permet datacions amb més d'un milió d'anys d'antiguitat–, mètode que es basa en l'avaluació de les dues cadenes paral·leles de desintegració radioactiva dels isòtops de l'Urani ( $^{238}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}$  i  $^{235}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}$ ) que es troba present a les mostres analitzades. La metodologia d'aquestes tècniques és molt complexa i fora de l'objectiu d'aquestes pàgines, però les generalitats sobre aquests mètodes geocronològics poden ser consultades, per exemple, a DICKIN (2018) i SCHOENE (2014).

Els resultats obtinguts a les nostres investigacions han estat prèviament publicats a DUMITRU et al. (2019, 2021) on es detallen les dades i informacions específiques sobre les datacions U-Pb realitzades.

Les edats dels POS mostrejats a aquestes campanyes de datació apareixen compilades a la Taula 1, així com a la Figura 4 que subministra una representació gràfica dels paleonivells i les seves respectives alçades i cronologies. En total s'han portat a terme més d'un centenar d'anàlisis U-Pb, que foren realitzades al *Radiogenic Isotope Laboratory* de la *University of New Mexico* (Albuquerque, USA). Les edats calculades s'expressen a la Taula 1 en milions d'anys (Ma), indicant així mateix els rangs d'incertesa associats a les datacions ( $\pm 2 \sigma$ ).

En general les dates obtingudes se situen majoritàriament en el pliocè (DUMITRU et al., 2019), abraçant un rang d'edats compreses entre 4,39 i 2,63 Ma (Figura 13). Repassant els resultats en ordre cronològic descendent, la mostra AR-02 amb una edat de 4,39 Ma (recol·lectada a +31,8 m) podria situar-se al voltant de l'òptim climàtic del pliocè inferior o zancià (PCO, *Pliocene Climatic Optimum*), mentre que la mostra AR-03 (+23,6 m) presenta una edat de 3,27 Ma que es relacionaria amb el període càlid ocorregut al piacenzià (MPWP, *Mid-Piacenzian Warm Period*). Altres mostres (AR-05, AR-11, AR-15 i AR-09) documentarien diversos esdeveniments càlids del pliocè entre 4,10 i 3,50 Ma



Figura 9: Curiosa formació freàtica arrodonida, desenvolupada a partir de diverses estalactites, que s'assembla a un petit anyell penjat per les seves potes, segons els guies de la cova. A ambdós costats s'observen exemplars de discos, espeleotemes que són molt abundants a les Coves d'Artà (Foto: B.P. Onac).

Figure 9: Conspicuous bulbous POS developed on stalactites, which resembles a small lamb hanging from its legs, according to cave-guides explanations. On both sides there are good examples of shields, speleothems that are very abundant in Coves d'Artà (Photo: B.P. Onac).

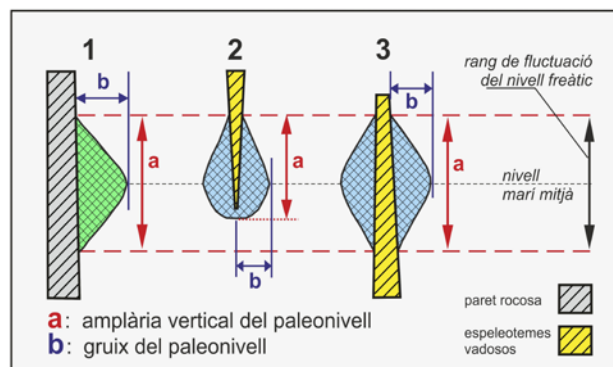


Figura 10: Paràmetres morfomètrics dels POS inclosos a la Taula 1, en funció de les característiques del seu suport. 1: sobre la paret de la cova; 2: sobre estalactita; 3: sobre estalagmita.

Figure 10: Morphometric parameters of the POS presented in Table 1, controlled by the characteristics of their support. 1: on the cave wall; 2: on a stalactite; 3: on a stalagmite; a: vertical amplitude of the paleolevel; b: thickness of the overgrowth.



Figura 11: Aspecte del recobriment freàtic d'aragonita mostrejat en la sala situada sota l'*Infern* (mostra AR-19) a una altitud de +14,3 m s.n.m. (Foto: J.J. Enseñat).

Figure 11: Aragonite phreatic overgrowth sampled in the chamber located below the *Infern* (sample AR-19) at an altitude of +14.3 m a.s.l. (Photo: J.J. Enseñat).



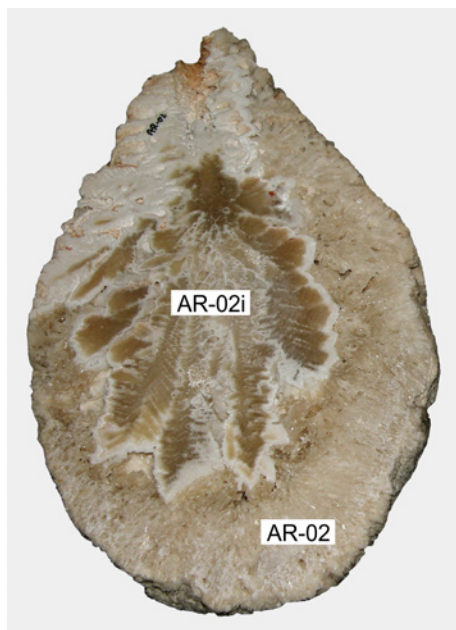


Figura 12: La mostra recol·lectada al paleonivell més elevat de les Coves d'Artà (+31,8 m s.n.m.) presenta dues generacions calcítiques amb hàbits cristal·lins ben diferenciats. S'han individualitzat dues mostres: la part externa (AR-02) i la part interna (AR-02i) (Foto: J.J. Fornós).

Figure 12: The sample collected at the highest paleolevel of Coves d'Artà (+31.8 m a.s.l.) presents two calcite generations with well-defined crystalline habits. Two samples have been selected: the outer part (AR-02) and the inner part (AR-02i) (Photo: J.J. Fornós).

(recol·lectats entre +30,4 i +22,6 m). Finalment la datació recent de la mostra AR-19, amb una edat de 2,63 Ma (+14,3 m), correspondria ja a la transició pliocè-pleistocè (DUMITRU et al., 2021), situant-se de forma plausible en els estadis MIS G1/G2 (Figura 14).

Menció apart mereix la datació de la mostra AR-02i (Figura 12), publicada també molt recentment, que correspon a la part interna del paleonivell observable a +31,8 m s.n.m. (DUMITRU et al., 2021). Aquesta mostra ha donat una cronologia de 5,86 Ma, data que la situaria dins el miocè superior, concretament a la fase inicial de la crisi de salinitat del messinià (*Messinian Salinity Crisis*; MAS & FORNÓS, 2020), encara que el rang d'error de la datació no exclou la seva deposició als moments terminals de la crisi messiniana. En aquest sentit, cal ressenyar que al mateix treball citat es reporta una datació procedent de les Coves Petites (Taula 1) amb una edat de 6,54 Ma, la qual implicaria una cronologia anterior a l'inici de la crisi messiniana, esdeveniment geològic que suposà la dessecació parcial de la conca mediterrània (MAS et al., 2018; RYAN, 2009).

## Nivell marí i paleoclima en el miocè superior i pliocè

Els espeleotemes freàtics subministren dos paràmetres fonamentals per a extreure possibles inferències paleoclimàtiques. Per una banda els POS són susceptibles de datació radiomètrica, amb la qual cosa

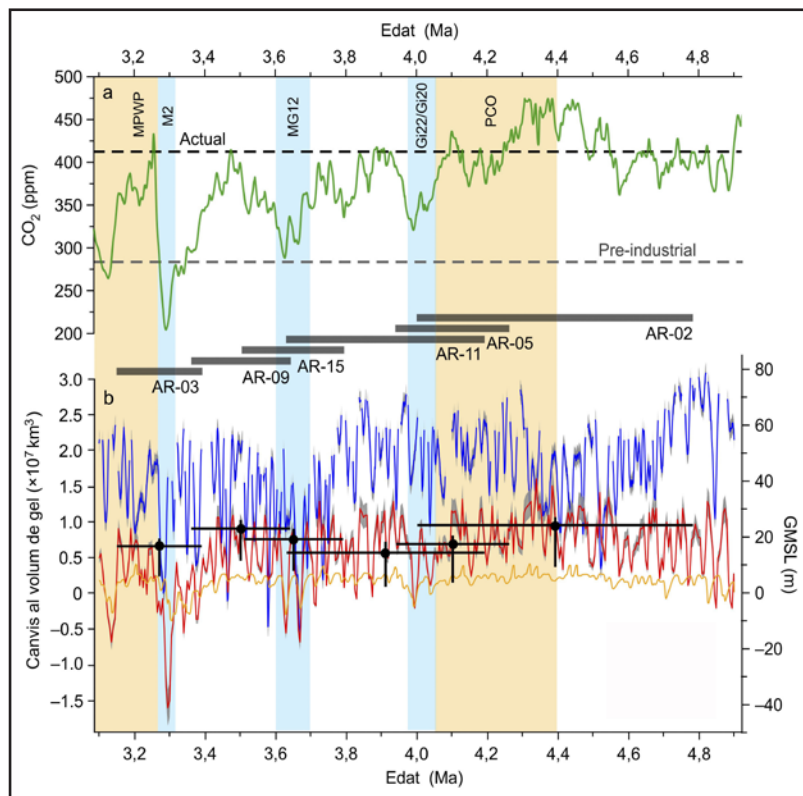


Figure 13: Nivells marins i concentracions de  $\text{CO}_2$  durant el pliocè (modificat a partir de DUMITRU et al., 2019). a: Reconstrucció de les concentracions de  $\text{CO}_2$  (STAP et al., 2016) amb indicació d'alguns períodes climàtics rellevants calids (franges taronges) i freds (franges blaves). b: Nivells marins globals (GMSL) i canvis en el volum del gel, calculats a partir dels POS de les Coves d'Artà. Les mostres estudiades apareixen com símbols negres, indicant-se les seves respectives incerteses tant d'edat com dels GMSL calculats segons s'explica al text; el codi de cada mostra s'indica a les franges grises situades entre els dos panells. Les corbes de colors corresponen a tres reconstruccions de GMSL diferents: blau, ROHLING et al. (2014); vermell, LISIECKI & RAYMO (2005); i groc, DE BOER et al. (2010).

Figure 13: Pliocene sea-level and  $\text{CO}_2$  concentration changes (modified from DUMITRU et al., 2019). a:  $\text{CO}_2$  reconstruction based on STAP et al. (2016) with indication of relevant warm (orange bands) and cold (blue bands) climatic periods. b: Inferred global sea-level and ice volume based on Mallorcan POS, which are shown as black markers and include the uncertainties related to their age and GMSL estimation (see explanations within the text). The sample code for each POS is indicated on the grey band between panels. Colored curves correspond to three different GMSL reconstructions: blue, ROHLING et al. (2014); red, LISIECKI & RAYMO (2005); and yellow, DE BOER et al. (2010).

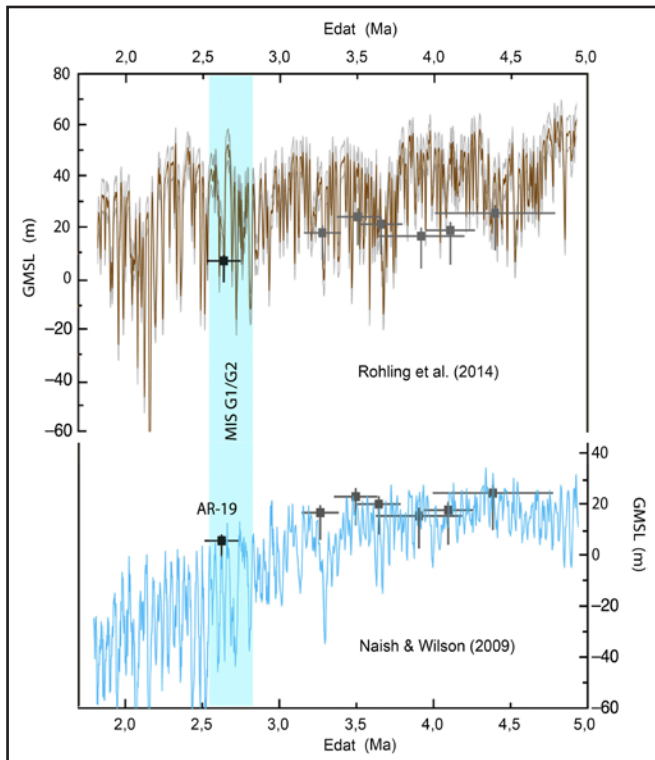


Figura 14: Dues estimacions del nivell marí global (GMSL) durant el pliocè i el pleistocè inferior, on s'han representat les dades procedents dels POS de les Coves d'Artà (modificat a partir de DUMITRU et al., 2021). A més de les mostres que ja apareixen a la Figura 13 s'inclou ara en aquesta gràfica la mostra AR-19, recollida recentment, la qual correspon a la transició pliocè-pleistocè.

Figure 14: Two Pliocene-Early Pleistocene global mean sea level (GMSL) curves on which data from the POS of Coves d'Artà are depicted (modified from DUMITRU et al., 2021). In addition to the samples documented in Figure 13, this graph includes the recently collected sample AR-19, which corresponds to the Pliocene-Pleistocene transition.

es pot calcular l'edat absoluta de la seva formació; per altre costat, aporten dades altimètriques precises sobre la posició del nivell de la mar en el període o esdeveniment geològic quan es varen dipositar (Figura 15). Val a dir que aquest segon paràmetre no és pot considerar com una magnitud absoluta, ja que ens informa sobre l'altitud del nivell marí, *relativa* a l'elevació actual de les aigües marines dins l'entorn geogràfic concret en el que s'està treballant.

Així doncs, l'altitud dels paleonivells d'espeleotemes freàtics no s'ha d'entendre com un indicador del nivell marí eustàtic a escala del conjunt del planeta –el que en la bibliografia internacional es coneix com a *Global Mean Sea Level*, o GMSL–, sinó que es tracta d'un registre *relatiu* del nivell de la mar (*Relative Sea Level*, RSL), també referit sovint a la literatura com a nivell marí *local* (*Local Sea Level*, LSL). Cal recordar que el nivell de les aigües marines, en un lloc i en un moment donat, està afectat per nombrosos condicionants de caràcter local i/o regional (tectònica recent, isostàsia, dinàmica topogràfica del mantell terraquí, etc.), tal com s'exposa de forma molt clara i didàctica al treball de ROVERE et al. (2016). Un resum de totes aquestes qüestions relacionades amb les variacions del nivell de la mar es pot consultar, així mateix, a un recent treball publicat sobre els POS del pleistocè superior de Mallorca (GINÉS et al., 2020).

### ***El nivell marí global: metodologia aplicada per al seu càlcul***

Com a resultat del que s'ha exposat abans, els esforços actuals de les investigacions paleoclimàtiques es dirigeixen en la línia de conèixer els valors del nivell marí mitjà global (GMSL) en un període geològic concret, a partir de les evidències observables i mesurables a nivells local o regional. En conseqüència,

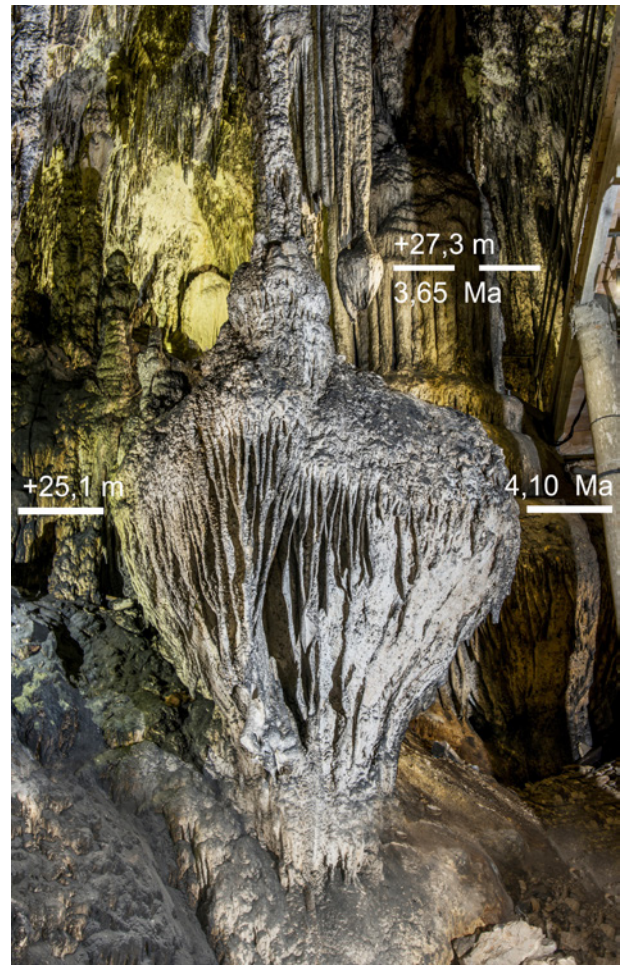


Figura 15: Imatge on s'observen dos dels paleonivells d'espeleotemes freàtics que es troben representats al *Purgatori*. En la foto s'han indicat expressament els dos paràmetres substancials d'aquestes investigacions: les edats obtingudes pel mètode U-Pb i l'altitud actual sobre el nivell de la mar d'aquests paleonivells, dades que serviran per a calcular el nivell marí global en el moment de la seva formació (Foto: M.À. Gual).

Figure 15: Picture showing two different POS paleolevels present in the *Purgatori* chamber. Within the photo, two important parameters of this research have been labeled: the ages obtained by the U-Pb method and the elevation above sea level of these POS horizons, which are used to calculate the GMSL at the moment of their formation (Photo: M.À. Gual).

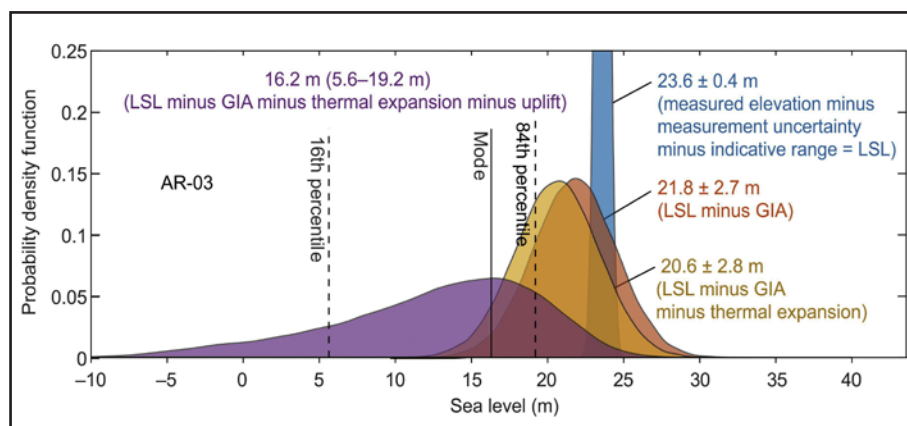


Figura 16: Correccions aplicades a l'altitud dels paleonivells de POS –mesurada dins la cavitat– per tal de determinar el nivell marí relatiu o local (LSL) i després poder estimar el nivell marí global (GMSL) en el moment de la seva deposició (segons DUMITRU et al., 2019). La gràfica recull les correccions aplicades en el cas de la mostra AR-03; veure explicacions addicionals al text.

Figure 16: Corrections applied to the elevation of POS –measured within the cave– in order to determine the local sea level (LSL), from which was then estimated the global sea level (GMSL) at the time of its deposition (from DUMITRU et al., 2019). The graph shows the case of sample AR-03; see additional explanations in the text.

les informacions altimètriques procedents dels POS hauran de ser convenientment tractades per tal d'intentar establir l'alçària del nivell marí eustàtic global corresponent al moment en que es varen generar.

Així doncs, les altituds dels POS mesurades a les Coves d'Artà han estat corregides amb la finalitat de transformar-les en valors de nivell marí a escala global (GMSL), segons la metodologia descrita en detall a DUMITRU et al. (2019). A més de quantificar les possibles incerteses lligades a les característiques intrínseques de les mostres i de les tècniques de mostreig, s'han avaluat les correccions relacionades

amb els ajustaments isostàtics glacials (*Glacial Isostatic Adjustments*, o GIA), l'expansió de les aigües oceàniques en funció de la temperatura, i finalment els moviments verticals associats a fluxos dinàmics verticals del mantell terraquí (*Mantle Dynamic Topography*, o DT). Tots aquests ajustaments es realitzen d'acord amb modelitzacions geofísiques molt complexes que tenen graus elevats d'incertesa, fet que es fa més patent en mostres d'elevada antiguitat.

La Figura 16 és un exemple representatiu de les correccions aplicades a la mostra AR-03 en les investigacions publicades per DUMITRU et al. (2019). En aquesta gràfica es poden veure les incerteses associades al mostreig i a les característiques dels POS, que són molt baixes ( $\pm 0,4$  m, franja blava de la Figura 16), així com la major magnitud dels errors associats a les altres correccions; en destaca la incertesa lligada a la topografia dinàmica del mantell terraquí (DT, corba morada), que presenta una distribució asimètrica molt àmplia, en la que la *moda* es considera el valor més probable i els percentils 16 i 84 de la distribució serien el rang d'incertesa. D'aquesta manera, el nivell marí local (LSL) mesurat per a la mostra AR-03 en +23,6 m, correspondria a un nivell marí global (GMSL) de +16,2 m, amb un rang d'incertesa que va de +5,6 a +19,2 m (Figura 16, Taula 1).

### ***Els paleonivells de POS pertanyents al miocè superior***

Cal deixar constància que, en el cas dels paleonivells més antics corresponents al miocè superior, es va optar al treball publicat per DUMITRU et al. (2021) per no aplicar cap tipus de correcció a les altituds sobre el nivell actual de la mar mesurades dins la cavitat. Aquest fet es deu als problemes que presenta l'estimació del nivell marí global durant aquest període geològic, per mor tant de les implicacions hidro-isostàtiques de la crisi de salinitat del messinià (MSC) com del limitat coneixement de la magnitud i distribució de la càrrega sedimentària evaporítica associada a aquest esdeveniment geològic (RYAN, 2009; MASCLE & MASCLE, 2019).

Tot això dificulta notablement els intents de fer estimacions acurades sobre els GMSL fini-miocens, de tal manera que les dades d'altitud reportades a la Taula 1 per a les mostres AR-02i i CP-04 (+31,8 i +33,3 m s.n.m., respectivament) corresponen a nivells de la mar relatius o locals, sense aplicar cap correcció altimètrica. En tot cas la cronologia d'ambdues mostres se situa clarament dins el messinià, molt propera a la MSC en el cas de la mostra AR-02i ( $5,86 \pm 0,60$  Ma). En general, el nivell marí previ a la MSC es considera que fou similar als nivells més elevats que es donaran durant el pliocè (RAYMO et al., 2011).

És necessari afegir que, mentre la cronologia de la crisi messiniana està bastant bé establerta (MAS et al., 2018), el paleoclima durant el miocè superior no és suficientment conegut, encara que existeixen evidències de que les fluctuacions glacio-eustàtiques poden haver controlat, al manco en part, la dessecació parcial i la reinundació de la conca del Mediterrani occidental (PÉREZ-ASENSIO et al., 2013; OHNEISER et al., 2015).

### El nivell marí global (GMSL) durant el pliocè, a partir dels POS de les Coves d'Artà

Pel que respecta als horitzons d'espeleotemes freàtics d'edat pliocena, a la Taula 1 –així com a les Figures 13 i 14– es recullen els nivells marins globals calculats per a cada una de les set mostres dipositades dins la cova al llarg d'aquest període geològic (DUMITRU et al., 2019, 2021). Cal recordar que el pliocè abraça el lapse de temps comprès entre 5,33 i 2,58 Ma, tractant-se d'un període en general càlid el qual precedeix a l'acusada variabilitat climàtica que caracteritza el pleistocè.

Començant pel paleonivell més antic, la mostra AR-02 (4,39 Ma) ha permès calcular un GMSL de +23,5 m per sobre de l'actual nivell de la mar –estimació que és més de 8 m inferior a l'altitud real mesurada a la cavitat–, durant el que es coneix com a l'òptim climàtic pliocè (*Pliocene Climatic Optimum*, o PCO) ocorregut al zanclià (Figura 13). Es tracta del període més càlid del pliocè, en el qual previsiblement la temperatura era al manco 4°C més elevada que la de l'època pre-industrial, amb uns nivells atmosfèrics elevats de CO<sub>2</sub> que es calcula eren superiors als 400 ppm (FEDOROV et al., 2013; ROHLING et al., 2014; STAP et al., 2016).

Els espectaculars sobrecreixements freàtics del *Baptisteri* i de la zona superior de l'*Infern* (Figures 5 i 7) correspondrien a un perllongada estabilització del nivell de la mar previ a l'estadi fred MIS Gi22/Gi20 (DE SCHEPPER et al., 2014); el GMSL calculat per a aquest paleonivell se situa en +16,9 m (mostra AR-05; 4,10 Ma).

Per altra banda, les mostres AR-11, AR-15 i AR-09 documenten diverses estabilitzacions del nivell de la mar ocorregudes em el rang d'edat de 3,91 i 3,50 Ma, que inclou la transició entre el pliocè inferior i el superior; els GMSL estimats per a aquests tres paleonivells estan entre +14,7 i +22,5 m (Figura 13). En particular, la mostra AR-15 (3,65 Ma) podria correspondre a l'estadi fred MIS MG12 –amb un GMSL estimat de +19,5 m– el qual representa la transició entre el zanclià i el piacenzià (LISIECKI & RAYMO, 2005); altres registres suggereixen que unes condicions climàtiques relativament càlides predominaren fins als 3,5 Ma (WILLIAMS et al., 2010). Aquesta darrera observació està recolzada per les dades de la mostra AR-09, que documenta un GMSL de +22,5 amb una cronologia de 3,50 Ma.

Atenent a la seva cronologia (3,27 Ma) la mostra AR-03 s'hauria dipositat durant l'esdeveniment que es coneix amb les sigles MPWP (*Mid-Piacenzian Warm Period*). Es tracta d'un període càlid ocorregut al piacenzià (pliocè superior), al qual presumiblement es donaren temperatures de 2 a

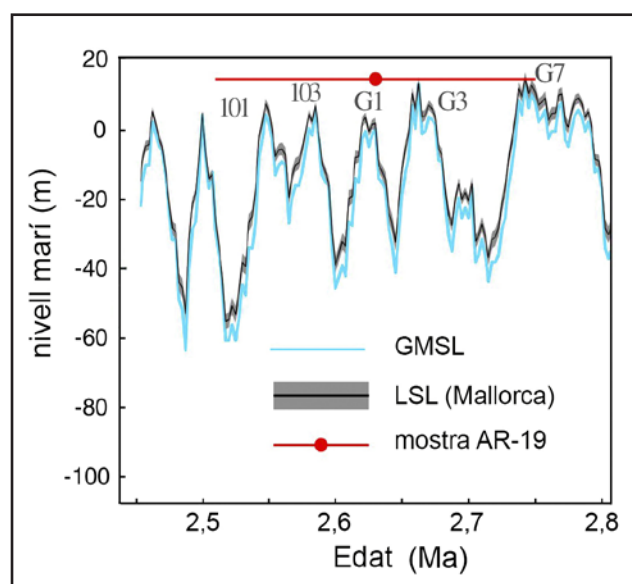


Figura 17: El nivell marí a Mallorca en la transició pliocè-pleistocè (modificat a partir de DUMITRU et al., 2021). La corba blava representa el GMSL segons les dades de LISIECKI & RAYMO (2005); la corba negra seria el nivell marí local a l'illa (LSL); el símbol vermell representa la cronologia i el nivell marí local subministrats per la mostra AR-19. Els números corresponen als estadis isotòpics marins (MIS).

Figure 17: Sea level at Mallorca throughout the Pliocene-Pleistocene transition (modified from DUMITRU et al., 2021). The blue curve represents the GMSL according to data from LISIECKI & RAYMO (2005); the black curve would be the resulting local sea level (LSL) in Mallorca; the red symbol represents the age and local sea level provided by the AR-19 sample. The numbers correspond to marine isotopic stages (MIS).

3°C superiors als valors pre-industrials, i amb nivells de CO<sub>2</sub> al voltant dels 400 ppm (HAYWOOD et al., 2013; PAGANI et al., 2010). El GMSL calculat per a aquest paleonivell de POS és de +16,2 m (Figura 13), xifra bastant inferior a les estimacions de ROHLING et al. (2014), però en la línia d'altres modelitzacions disponibles (LISIECKI & RAYMO, 2005; WINNICK & CAVES, 2015). Aquest valor de GMSL implicaria el col·lapse de la massa glacial de Groenlàndia així com contribucions procedents de la fusió, al manco, d'una part substancial de la massa glacial de la Antàrtida occidental, d'acord amb les estimacions de DE CONTO & POLLARD (2016).

Finalment, la mostra més jove (AR-19; 2,63 Ma) fou dipositada durant la transició pliocè-pleistocè (Figura 14), mentre a l'hemisferi nord es produïa un canvi notable cap a les condicions d'extensiu i repetitiu creixement de les masses glacials, que caracteritzarà al quaternari. Pel que fa a la seva cronologia, aquest paleonivell podria relacionar-se amb el límit entre els estadis MIS G1/G2 (Figura 17), encara que els errors associats a la datació no

exclouen la seva deposició durant altres esdeveniments, per exemple l'estadi MIS G3 o, fins i tot, algun interstadial de l'inici del pleistocè (LISIECKI & RAYMO, 2005). El GMSL estimat per a aquest paleonivell de POS és de +6,4 m, valor que evidencia la tendència descendent del nivell marí que es mantindrà al llarg del pleistocè, al temps que té lloc la intensificació de la glaciació a l'hemisferi nord.

Les investigacions tendents a conèixer el nivell marí global durant els moments càlids del pliocè –en particular el PCO i el MPWP– són considerades avui en dia crucials des del punt de vista de les tendències d'evolució del clima, per tal de poder predir i adaptar-se als efectes negatius de l'escalfament global actual. Cal tenir present que els citats esdeveniments es varen produir en un context climàtic marcat per unes temperatures entre 2 i 4°C superiors a les de l'era pre-industrial, i amb concentracions de CO<sub>2</sub> atmosfèric molt similars als valors d'avui en dia, tal i com ja s'ha comentat abans. Els períodes càlids del pliocè poden ser considerats situacions anàlogues a les que es poden produir en el futur, com a resultat del canvi climàtic induït per l'activitat antròpica i la conseqüent pujada del nivell marí.

## Conclusions

Les Coves d'Artà constitueixen una localitat excepcional des del punt de vista geoespeleològic: a més de l'abundància de formacions cristal·lines poc freqüents, com són els *discos*, els espeleotemes freàtics (POS) que conté constitueixen un registre gairebé únic dels nivells marins corresponents al miocè superior i pliocè. Tant és així, que aquesta cova mallorquina ha esdevingut una de les localitats clau a escala mundial per al coneixement del nivell marí i el paleoclima en aquells períodes geològics (ROVERE et al., 2020).

A les sales d'aquesta important cova turística s'han documentat i estudiat 7 paleonivells d'espeleotemes freàtics, localitzats a altituds compreses entre els +14,3 i +31,8 m s.n.m. La datació radiomètrica d'aquests espeleotemes ha estat possible mitjançant el mètode U-Pb, obtenint-se unes edats que abracen des dels 5,86 Ma –cronologia que es correspon amb els moments inicials de la crisi de salinitat messiniana– fins arribar als 2,63 Ma, ja en la transició pliocè-pleistocè.

L'altitud dels paleonivells de POS d'edat pliocena ha estat corregida per tal d'estimar el nivell marí global (GMSL) en el moment de la precipitació d'aquests espeleotemes. Concretament, a l'esdeveniment més càlid del zanclià, conegut com l'òptim climàtic pliocè (*Pliocene Climatic Optimum*), el nivell marí global calculat seria devers +23,5 m superior a l'actual, amb una edat U-Pb de 4,39 Ma. Per altra banda, al període càlid del pliocè superior o piacenziana (*Mid-Piacenzian Warm Period*) s'ha estimat un GMSL de +16,2 m, amb una cronologia de 3,27 Ma. Ambdós períodes càlids pliocens es caracteritzen per temperatures entre 2 i 4°C superiors a les de l'era pre-industrial, amb concentracions de CO<sub>2</sub> atmosfèric superiors als 400 ppm; tot això fa que es considerin aquests esdeveniments com a anàlegs excepcionals per a la predicció de les conseqüències de l'escalfament global actual.

Les datacions realitzades a partir dels espeleotemes freàtics de les Coves d'Artà aporten interessants dades espeleocronològiques, que permeten reconstruir els grans trets de l'evolució morfogenètica de la cavitat (GINÉS et al., 2019). Per una banda, es posa de manifest la gran antiguitat dels processos espeleogenètics que donaren origen a la cova, els quals s'han de remuntar al manco fins als finals del miocè mitjà. Per altre costat, queda també palesa l'existència de diverses generacions d'espeleotemes vadosos, algunes d'elles clarament anteriors a la deposició dels espeleotemes freàtics estudiats, que com ja s'ha vist es dipositaren a partir del final del miocè i sobretot durant el pliocè. No obstant això, una bona part de la rica decoració d'espeleotemes que s'observa a la cova pot tenir una cronologia pleistocènica, des del moment que no es troba afectada per la deposició dels espeleotemes freàtics d'edat pliocena.

Les investigacions desenvolupades durant els darrers anys han permès constatar el caràcter excepcional de les Coves d'Artà, en la qual destaquen les informacions geocronològiques i paleoclimàtiques subministrades pels espeleotemes freàtics que abunden a les seves sales. Aquesta rellevància dins l'àmbit geològic revaloritza encara més els aspectes culturals d'aquesta cova turística, en la que es conjunquen aspectes històrics, estètics i científics, que poden ser qualificats de molt remarcables.

## Agraïments

Abans de tot cal agrair a la propietat de la Coves d'Artà, en les persones de Tomàs Zaforteza i Javier Enseñat, les facilitats de tot tipus que ens han dispensat per a la realització d'aquestes investigacions. Així mateix, hem de deixar constància de les amabilitats i el suport rebuts del personal i gestors d'aquesta important cova turística, en especial de Miquel Ginard així com d'Andreu Genovart, qui fou el seu predecessor en les tasques de gestió de la cavitat.

El present treball s'emmarca dins del projecte d'investigació finançat pel MINECO, CGL2016-79246-P (AEI-FEDER, UE), i recull els resultats obtinguts a d'altres campanyes d'investigació també finançades pel MICINN, així com per la National Science Foundation (USA) concretament els projectes AGS 1602670 i 1602685. Les activitats de camp han comptat amb la col·laboració de diversos companys de la Societat Espeleològica Balear, entre els quals esmentarem a Juanjo Enseñat, Miquel Àngel Gual, Vicenç Pla i Gabriel Santandreu. En la documentació fotogràfica de la cova han contribuït eficaçment els col·legues Miquel Àngel Gual i Antoni Merino. La topografia simplificada de les Coves d'Artà ha estat gentilment elaborada per Juanjo Enseñat.

## Bibliografia

- CABRER, A. (1840): *Viaje á la famosa gruta llamada Cueva de la Hermita en el distrito de la villa de Artá de la isla de Mallorca*. Imprenta de Pedro José Gelabert. 87 pàgs. Palma.
- CUERDA, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Diputación Provincial de Baleares. Instituto de Estudios Baleáricos. 304 pàgs. Palma.
- DE BOER, B.; VAN DE WAL, R.S.W.; BINTANJA, R.; LOURENS, L.J. & TUENTER, E. (2010): Cenozoic global ice-volume and temperature simulations with 1-D ice-sheet models for benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Annals of Glaciology*, 51: 23-33.
- DE CONTO, R.M. & POLLARD, D. (2016): Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531: 591-597.
- DE SCHEPPER, S.; GIBBARD, P.L.; SALZMANN, U. & EHLERS, J. (2014): A global synthesis of the marine and terrestrial evidence for glaciation during the Pliocene epoch. *Earth-Science Reviews*, 135: 83-102.
- DICKIN, A.P. (2018): *Radiogenic Isotope Geology (third edition)*. Cambridge University Press. 550 pàgs. Cambridge.
- 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.
- 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: 233-236 + 12 pàgs supl.
- 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.
- DUTTON, A. (2013): Use of cave data in sea-level reconstructions. In: ELIAS, S.A. & MOCK, C.J. (eds.) *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier. Vol. 4: 460-466.
- FEDOROV, A.V.; BRIERLEY, C.M.; LAWRENCE, K.T.; LIU, Z.; DEKENS, P.S. & RAVELO, A.C. (2013): Patterns and mechanisms of early Pliocene warmth. *Nature*, 496: 43-49.
- 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. (1973): Sobre el posible hallazgo de formaciones de edad Milazziense en ses Coves Petites (Canyamel). *III Simposium Espeleologia*. Escola Catalana d'Espeleologia - Agrupació Científico Excursionista de Mataró. 87-91. Mataró, 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 Congreso Nacional de Espeleología*. Com. nº 13. 16 pàgs. Oviedo.

- 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. (1989): Absolute dating of phreatic speleothems from coastal caves of Mallorca (Spain). *Proc. 10th Int. Congress Speleol.*, 1: 191-193. Budapest.
- 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, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 595 pàgs + 29 làms. Inèdit.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1987): Datos espeleocronológicos sobre el karst de la isla de Mallorca. *Revista de Ciència*, 1: 81-92. Palma.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993a): Dataciones isotópicas de espeleotemas freáticos recolectados en cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 19: 9-15. Palma.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993b): Speleochronological approach to some coastal caves from Cap Vermell area in Mallorca island (Spain). *Proc. 11th Int. Congress Speleol.* 56-59. Beijing.
- 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.; FORNÓS, J.J. & GUAL, M.À. (2019): *Cuevas de Artà. Canyamel (Mallorca)*. Cuevas de Artà. 32 pàgs. Capdepera, Mallorca. (versions en: castellà, anglès, alemany i català)
- 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.
- HAYWOOD, A.M. et al. (2013): Large-scale features of Pliocene climate: results from the Pliocene Model Intercomparison Project. *Climate of the Past*, 9: 191-209.
- LISIECKI, L.E. & RAYMO, M.E. (2005): A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanography*, 20 (1): PA1003. 17 pàgs.
- MAS, G & FORNÓS, J.J. (2020): The Messinian Salinity Crisis in Mallorca: New insights for a Western Mediterranean stratigraphic scenario. *Marine and Petroleum Geology*, 122: 104656.
- MAS, G.; MAILLARD, A.; ALCOVER, J.A.; FORNÓS, J.J.; BOVER, P. & TORRES-ROIG, E. (2018): Terrestrial colonization of the Balearic Islands: new evidence for the Mediterranean sea-level drawdown during the Messinian Salinity Crisis. *Geology*, 46 (6): 527-530.
- MASCLE, G. & MASCLE, J. (2019): The Messinian salinity legacy: 50 years later. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 1: 5-15.
- NAISH, T.R. & WILSON, G.S. (2009): Constraints on the amplitude of Mid-Pliocene (3.6-2.4 Ma) eustatic sea-level fluctuations from the New Zealand shallow-marine sediment record. *Philos. Trans. R. Soc.*, 367: 169-187.
- OHNEISER, C.; FLORINDO, F.; STOCCHI, P.; ROBERTS, A.P.; DE CONTO, R.M. & POLLARD, D. (2015): Antarctic glacio-eustatic contributions to late Miocene Mediterranean dessiccation and reflooding. *Nature Communications*, 6: article n° 8765. 10 pàgs.
- PAGANI, M.; LIU, Z.H.; LARIVIERE, J. & RAVELO, A.C. (2019): High Earth-system climate sensitivity determined from Pliocene carbon dioxide concentrations. *Nature Geoscience*, 3 (1): 27-30.
- 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: 860-864 + 20 pàgs supl.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiauáticos. *Endins*, 5-6: 3-17. Palma.
- RAYMO, M.E.; MITROVICA, J.X.; O'LEARY, M.J.; DE CONTO, R.M. & HEARTY, P.J. (2011): Departures from eustasy in Pliocene sea-level records. *Nature Geoscience*, 4: 328-332.
- ROHLING, E.J.; FOSTER, G.L.; GRANT, K.M.; MARINO, G.; ROBERTS, A.P.; TAMISIEA, M.E. & WILLIAMS, F. (2014): Sea-level and deep-sea-temperature variability over the past 5.3 million years. *Nature*, 508: 477-482.
- ROVERE, A.; STOCCHI, P. & VACCHI, M. (2016): Eustatic and relative sea level changes. *Current Climate Change Reports*, 2: 221-231.
- ROVERE, A.; PAPPALARDO, M.; RICHIANO, S.; AGUIRRE, M.; SANDSTROM, M.R.; HEARTY, P.J.; AUSTERMANN, J.; CASTELLANOS, I. & RAYMO, M.E. (2020): Higher than present global mean sea level recorded by an Early Pliocene intertidal unit in Patagonia (Argentina). *Communications Earth & Environment*, 1: article n° 68. 10 pàgs.

- RYAN, W.B.F. (2009): Decoding the Mediterranean salinity crisis. *Sedimentology*, 56 (1): 95-136.
- SCHOENE, B. (2014): 4.10. U-Th-Pb Geochronology. In: RUDNICK, R.L. (ed.) *Treatise on Geochemistry (second edition)*. Elsevier. Volum 4: 341-378.
- STAP, L.B.; DE BOER, B.; ZIEGLER, M.; BINTANJA, R.; LOURENS, L.J. & VAN DE WAL, R.S.W. (2016): CO<sub>2</sub> over the past 5 million years: continuous simulation and new δ<sup>11</sup>B-based proxy data. *Earth and Planetary Science Letters*, 439: 1-10.
- 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.; 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.
- 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*. John Wiley & Sons, Ltd. 83-103. Chichester, U.K.
- WILLIAMS, T.; VAN DE FLIERDT, T.; HEMMING, S.R.; CHUNG, E.; ROY, M. & GOLDSTEIN, S.L. (2010): Evidence for iceberg armadas from East Antarctica in the Southern Ocean during the late Miocene and early Pliocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 290: 351-361.
- WINNICK, M.J. & CAVES, J.K. (2015): Oxygen isotope mass-balance constraints on Pliocene sea level and East Antarctica Ice Sheet stability. *Geology*, 43 (10): 879-882.



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>