

El nivell marí a Mallorca durant el darrer interglacial (MIS-5): estat de la qüestió basat en les datacions d'espeleotemes freàtics

Joaquín GINÉS ^{1,2}, Angel GINÉS ^{1,2}, Joan J. FORNÓS ^{1,2}, Francesc GRÀCIA ^{1,2}, Paola TUCCIMEI ³, Michele SOLIGO ³, Bogdan P. ONAC ^{2,4} i Victor J. POLYAK ⁵

¹ Societat Espeleològica Balear. Palma. Email: jginesgracia@yahoo.es

² Grup de Recerca de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma.

³ Dipartimento di Scienze. Università Roma Tre. Roma.

⁴ School of Geosciences. University of South Florida. Tampa, FL, USA.

⁵ Earth & Planetary Sciences. University of New Mexico. Albuquerque, NM, USA.

Abstract

Among the specialized studies on the Quaternary of Mallorca, the knowledge of the sea paleolevels in the western Mediterranean basin has a significant body of research, developed during the second half of the last century by authors such as Karl W. Butzer and Joan Cuerda. The classic paleontological and geomorphological record, based on the study of the island's fossil beaches, was supplemented from the 70s with a new register that offered great geochronological possibilities: the study of the phreatic overgrowths on speleothems (POS) of Mallorcan coastal caves. These crystalline precipitates record the sea level with extraordinary resolution, and are also capable of being accurately dated using radiometric techniques based on the Uranium series (mainly U/Th). In the following pages, a review of the available knowledge about the sea level in Mallorca during the last interglacial stage (MIS-5) is made, starting from the classic vision based on the malacological study of the "raised beaches", to the data from numerous recently published radiometric datings of phreatic overgrowths on speleothems. This peculiar register provided by our littoral caves reliably documents that the sea level remained relatively stable, at an altitude of 2.15 ± 0.75 m, during the time span from 126.6 to 116 ka BP (MIS-5e), which would correspond to the Eemian (the very late Eutyrrhenian, according to the terminology used by Joan Cuerda); it is also documented a high sea level (+1 m approx.) between 82 and 80 ka BP (MIS-5a), which would be equivalent to the Neotyrrhenian stage of the same author.

Resumen

Entre los estudios especializados sobre el Cuaternario de Mallorca, el conocimiento de los paleoniveles del Mediterráneo occidental cuenta con un importante acervo de investigaciones, desarrolladas durante la segunda mitad del siglo pasado por autores como Karl W. Butzer y Joan Cuerda, entre otros. El registro paleontológico y geomorfológico clásico, basado en el estudio de las playas fósiles de la isla, se vio complementado a partir de los años 70 con un nuevo registro que ofrecía grandes posibilidades geocronológicas: el estudio de los espeleotemas freáticos (POS) de las cuevas costeras mallorquinas. Estos precipitados cristalinos registran con extraordinaria resolución el nivel marino, y además son susceptibles de ser datados con precisión mediante técnicas radiométricas basadas en las series del Uranio (U/Th principalmente). En las siguientes páginas se hace una revisión de los conocimientos disponibles sobre el nivel marino en Mallorca durante el último estadio interglacial (MIS-5), partiendo desde la visión clásica basada en el estudio malacológico de las "playas levantadas", hasta los datos procedentes de numerosas dataciones de espeleotemas freáticos publicadas recientemente. Este peculiar registro que proporcionan nuestras cuevas litorales documenta de forma fehaciente que el nivel marino se mantuvo relativamente estable, a una altitud de $2,15 \pm 0,75$ m, durante el lapso de tiempo comprendido desde 126,6 a 116 ka BP (MIS-5e), que correspondería al Eemiense (el Eutirreniense más reciente de Joan Cuerda); también se registra un nivel marino elevado (+1 m aprox.) entre 82 y 80 ka BP (MIS-5a), el cual equivaldría al piso Neotirreniense del mismo autor.

Ginés, J. et al. (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. ISSN 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.

Rebut: 4 novembre 2020; Revisat: 8 desembre 2020; Acceptat: 10 desembre 2020.

Publicat online: 21 desembre 2020.

Introducció

A part de les investigacions sobre la fauna plio-quatèrnària de les Balears (ALCOVER et al., 1981; BOVER et al., 2008), la major part dels estudis sobre el quatèrnari de Mallorca s'han centrat principalment en les restes de platges elevades del litoral illenc com a eina per a la reconstrucció de la història del nivell marí en el nostre entorn geogràfic. Aquestes tasques començaren a la dècada dels 50 del passat segle, donant com a resultat alguns treballs clau com són les publicacions de BUTZER & CUERDA (1962), CUERDA (1975) o BUTZER (1975).

Altres vessants de l'estudi del quaternari han estat bastant manco treballades –entre les quals citarem per exemple les morfologies i dipòsits associats a climes freds pleistocènics–, mentre que són prou nombrosos els aspectes geocronològics que es deriven d'un seguit d'investigacions relativament recents sobre el carst i les coves de l'illa; una revisió general de tots aquests temes es pot consultar a la monografia editada per GINÉS et al. (2012a). Nogensmenys, i sense abandonar la geomorfologia litoral, cal esmentar també alguns treballs posteriors sobre ventalls al·luvials, que es presenten interdigitats amb sediments costaners eòlics i/o de platges (POMAR et al., 2018).

Al llarg dels anys 70 s'inaugura una nova línia de recerca sobre la història del nivell de la Mediterrània a Mallorca, basada en l'estudi dels espeleotemes freàtics de les coves costaneres de l'illa (GINÉS & GINÉS, 1974; POMAR et al., 1976, 1979; GINÉS et al., 1981a, 1981b). Aquesta línia de treball ofereix resultats encoratjadors durant les dècades dels 80 i 90, des del moment en que es comencen a realitzar datacions radiomètriques U/Th d'aquests dipòsits cristal·lins (HENNIG et al., 1981; GINÉS & GINÉS, 1989, 1993; GINÉS et al., 1999; TUCCIMEI et al., 1997, 1998, 2000). Tot aquest important corpus de publicacions ha permès establir una corba detallada del nivell marí a Mallorca durant el pleistocè superior i l'holocè, que s'ha anat complementant i refinant al llarg del temps (GINÉS, 2000; VESICA et al., 2000; FORNÓS et al., 2002; TUCCIMEI et al., 2006, 2010, 2012; GINÉS et al., 2012b).

Al present treball es pretén fer una revisió exhaustiva dels coneixements sobre el nivell marí a Mallorca durant el darrer interglacial, considerat aquest en sentit ampli –*Marine Isotope Stage* (MIS) 5–, començant des de les aportacions rellevants inicials de fa gairebé 60 anys fins a incorporar els darrers treballs sobre espeleotemes freàtics, fruit de diverses col·laboracions internacionals (DORALE et al., 2010; POLYAK et al., 2018). Aquesta revisió també inclou diverses contribucions més o manco recents sobre la matèria, provinents de l'estudi de les platges fòssils de l'illa (HEARTY et al., 1986; HILLAIRE-MARCEL et al., 1996; MUHS et al., 2015; ROVERE et al., 2016a; LORSCHIED et al., 2017; STOCCHI et al., 2018). Tot aquest conjunt de dades permet construir un panorama a bastament acurat sobre el nivell marí durant el pleistocè superior (emià), a la nostra àrea geogràfica.

Alguns conceptes bàsics

En aquest apartat es procura establir diversos conceptes que considerem fonamentals per tal de poder desenvolupar correctament la matèria que ens ocupa. Aquests aspectes se centren sobretot en qüestions paleoclimàtiques i geocronològiques, així com en alguns dels mecanismes geofísics que controlen la posició del nivell marí.

Variabilitat climàtica i geocronologia

És ben conegut que el clima durant el quaternari (els darrers 2,59 milions d'anys) ha estat marcat per l'alternança de glaciacions i d'episodis interglacials, amb una ciclicitat variable però propera als 100.000 anys (100 ka). Aquesta acusada variabilitat climàtica està ocasionada per causes diverses relacionades majoritàriament amb paràmetres orbitals de la Terra al voltant del Sol: excentricitat de l'òrbita, variacions en la inclinació de l'eix de la Terra, precessió i altres moviments de l'eix, així com d'altres causes degudes a sobtades reorganitzacions del sistema oceà-atmosfera (MILANKOVITCH, 1941; MARTINSON et al., 1987; BROECKER & DENTON, 1989). Els factors esmentats propiciaren, durant les glaciacions, l'acumulació d'ingents masses d'aigua immobilitzades sobre els continents en forma de gel, amb la conseqüent davallada del nivell de les aigües oceàniques, fins i tot més del centenar de metres; en contraposició, els esdeveniments interglacials es caracteritzaren per pujades del nivell oceànic global, que assolí en diferents ocasions cotes superiors al nivell d'avui en dia (TOOLEY & SHENNAN, 1987).

Als treballs més antics, aquestes variacions del nivell de les aigües oceàniques –o *eustàsia*– foren ubicades, a la conca mediterrània, dins del marc geocronològic de les cinc grans glaciacions alpines: Donau, Gunz, Mindel, Riss i Würm, de més antic a més recent (FAIRBRIDGE, 1961; GUILCHER, 1969); dins d'aquest context, el terme tirrenià (actualment obsolet) fou encunyat a començaments del segle XX, per fer referència a l'interval de temps comprès entre el final del pleistocè mitjà –sicilià– i l'holocè (CITA et al., 2005). Amb posterioritat, aquest esquema cronològic dels temps quaternaris s'ha vist substituït per l'ús dels estadis isotòpics establerts a partir del registre sedimentari marí (*Marine Isotope Stages*, MIS), ús que fou introduït primerament per EMILIANI (1955) i generalitzat amb els

treballs de SHACKLETON & OPDYKE (1973). Aquest registre està basat en les paleotemperatures deduïdes a partir dels isòtops de l'oxigen de les closques de foraminífers presents a la sedimentació marina profunda; tot això, sustentat per una cronologia cada vegada més acurada (LISIECKI & RAYMO, 2005). Actualment es distingeixen més de cent estadis isotòpics al llarg del quaternari, que van numerats començant per l'estadi 1, que correspon a l'holocè, fins arribar al 104 ja als inicis del pliocè. Dins d'aquest esquema general, els estadis senars corresponen a esdeveniments relativament càlids, mentre que els parells representen estadis de signe fred. El darrer període interglacial (MIS-5), que serà el nostre objecte d'atenció, comprèn més o manco dels 130 als 80 ka BP, i normalment és divideix en cinc subestadis que van del 5a (el més recent) fins al 5e, el més antic, que representa el màxim tèrmic d'aquest interglacial.

Causas que influeixen en la posició del nivell marí

Les variacions eustàtiques del nivell marí són un tema que presenta una notable complexitat. Alguns autors, com per exemple MÖRNER (1983), distingeixen diversos tipus de variacions eustàtiques amb molt diferents amplituds mètriques i freqüències temporals que, de major a menor, serien: la *tectono-eustàsia*, que es referiria a les modificacions en el volum de les conques oceàniques; la *glacio-eustàsia* i la *hidro-eustàsia*, que operen mitjançant la variació del volum de les aigües oceàniques, a causa de l'alternança entre glaciacions i períodes interglacials; i la *eustàsia geoidal*, que implica la redistribució irregular de les aigües oceàniques com a conseqüència de l'equilibri entre forces gravitacionals i rotacionals de la Terra. La primera d'elles actuaria amb freqüències de fins a milions d'anys, mentre que la *glacio-eustàsia* operaria en cicles al voltant dels 100 ka, amb amplituds de les variacions superiors als 100 m; la *eustàsia geoidal*, pot implicar diferències en el nivell marí superiors als 100 m, amb una freqüència normalment inferior als 10 ka (MÖRNER, 1983). A tot això, caldria afegir encara el diferent volum de les masses oceàniques en funció de la seva temperatura.

La visió general que hem descrit fins ara, de fet encara assoleix major complexitat degut a la intervenció de tota una sèrie de variables de caràcter més local, que són descrites de manera molt didàctica al treball de ROVERE et al. (2016b). Entre els factors que determinen la posició del nivell marí a un punt concret del planeta, a part de les variacions eustàtiques pròpiament dites, cal tenir en compte tota una sèrie de variables, entre les que esmentarem: els ajustaments isostàtics produïts per la redistribució de les càrregues de masses glacials i oceàniques, a causa de l'alternança climàtica (*Glacial Isostatic Adjustment*, GIA); els moviments verticals deguts a fluxos dinàmics regionals al mantell de la Terra (*Mantle Dynamic Topography*, DT); o, finalment, fenòmens molt més localitzats d'elevació o subsidència tectònica.

Nivell marí relatiu (RSL - Relative Sea Level) i nivell marí eustàtic (GMSL - Global Mean Sea Level)

L'actuació conjunta de totes les causes i factors esmentats ens dona origen a un registre de la posició del nivell marí –per exemple, una platja fòssil aixecada– corresponent a un moment determinat i a una àrea concreta. Es tractaria del que es denomina un *nivell marí relatiu* (*Relative Sea Level*, RSL), ja que aquest nivell no obeeix exclusivament a causes eustàtiques, sinó que incorpora variables d'altres factors com, per exemple, elevació neotectònica, ajustaments isostàtics, etc. (ROVERE et al., 2016b).

Per altra banda, als investigadors que treballen en paleoclima els resulta de gran interès conèixer la dinàmica global del sistema atmosfera-hidrosfera, per tal de poder establir prediccions sobre aspectes com el canvi climàtic i les seves conseqüències. Així, les investigacions recents tendeixen a aportar dades que intenten depurar els registres de *nivells marins relatius* (RSL), eliminant la contribució d'aspectes que no estan lligats estrictament a l'eustàsia, com són per exemple els ajustaments isostàtics glacials (GIA). Aquestes correccions, per tal d'eliminar la contribució del GIA en el registre de paleonivells marins, es fa mitjançant models matemàtics que avaluen el comportament visco-elàstic de l'astenosfera. D'aquesta manera s'arriba al concepte de *nivell marí mitjà global* (*Global Mean Sea Level*, GMSL), o *nivell marí eustàtic* (*Eustatic Sea Level*, ESL), que correspondria a les variacions del nivell del conjunt dels oceans produïdes per causes exclusivament eustàtiques.

A tall de conclusió, quan observem un indicador d'un paleonivell marí –per exemple, uns sediments de platja fòssil, o una alineació d'espeleotemes freàtics litorals– situat a una cota concreta, hem de tenir present que es tracta d'un RSL ja que la seva posició està determinada per l'eustàsia, però afectada per factors locals no eustàtics. És a dir, la seva altitud no implica l'existència d'un nivell marí global d'aquesta mateixa magnitud.

Els treballs clàssics (J. Cuerda i K.W. Butzer)

Les investigacions modernes sobre el quaternari marí de Mallorca comencen a la dècada dels 50 del segle passat, de la mà dels treballs realitzats pels naturalistes locals Andreu Muntaner Darder i Joan Cuerda Barceló (VICENS et al., 2012; VICENS, 2015); alguns anys més tard s'afegeix a aquestes tasques el geomorfòleg nord-americà Karl W. Butzer, que complementarà de manera eficaç les recol·leccions malacològiques de Joan Cuerda.

Fruit de les diverses campanyes realitzades per aquests dos autors, es publicà un treball clau que aporta una visió completa de les seves investigacions sobre la cronoestratigrafia del pleistocè superior i mitjà al sud de Mallorca (BUTZER & CUERDA, 1962). En aquest treball es mostra una corba dels nivells marins relatius, deduïts dels dipòsits pleistocènics de la zona meridional de l'illa (Figura 1). L'escala cronològica d'aquesta corba inclou tan sols la posició de les dues darreres glaciacions alpines (Riss i Würm), sense aportar cap estimació sobre edats absolutes. Pel que fa a la terminologia, distingeix tres grups de dipòsits tirrenians: el *Tyrrhenian I*, que correspon als jaciments anteriors al Riss; el *Tyrrhenian II* amb fauna termòfila que es relaciona, de manera àmplia i ambigua, amb l'interglacial Riss-Würm; i finalment el *Tyrrhenian III*, que designa els dipòsits immediatament anteriors a la glaciació Würm, amb fauna termòfila empobrada. Per tal d'anar situant l'àmbit cronològic objecte de la nostra atenció, podem intentar avançar que els jaciments corresponents al MIS-5 serien previsiblement els pertanyents als estadis *TIIb* i *TIII* (Figura 1), amb alçades que oscil·larien entre els +2 i els +9 m s.n.m.; els dipòsits atribuïts a l'estadi *TIIa* haurien de correspondre, amb bastant probabilitat, com a mínim al MIS-7.

Al llarg dels anys 60 i 70, l'activitat investigadora de Joan Cuerda cristal·litza en la publicació d'una important monografia sobre la matèria, titulada *Los tiempos Cuaternarios en Baleares* (CUERDA, 1975), que aglutina les observacions efectuades anteriorment amb Karl W. Butzer, juntament amb les dades procedents de jaciments emblemàtics del pleistocè superior de la badia de Palma, com és el cas del Camp de Tir situat a la zona d'es Carnatge (VICENS et al., 2012). La monografia en qüestió aporta una nova corba del nivell marí, basada en els dipòsits estudiats per Joan Cuerda a Mallorca (Figura 2); aquesta corba, a més de situar els jaciments en el marc de les dues darreres glaciacions alpines, proporciona una escala absoluta d'edats, basades en les datacions radiomètriques de mol·luscs efectuades en el seu moment per STEARNS & THURBER (1965). La terminologia emprada per CUERDA (1975) difereix de la utilitzada anys abans per BUTZER & CUERDA (1962): el *TIII* és designat ara amb el terme *Eutyrrheniense* (o eutirrenià), mentre que el *TIIb* és referit com el *Neotyrrheniense* (o neotirrenià). De bell nou el significat cronoestratigràfic de l'eutirrenià és molt ambigu, donat que abraça fins a tres paleonivells marins relativament antics (amb alçades entre +14 i +3 m) que probablement haurien de correspondre als estadis MIS-7 o 9. Els nivells marins que poden ser atribuïts al MIS-5 (Figura 2), se situen entre +1 i +3 m, de tal

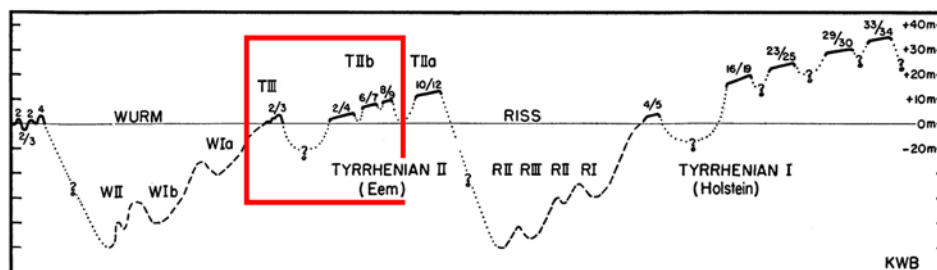


Figura 1: Corba generalitzada del nivell marí relatiu a Mallorca deduida a partir dels dipòsits quaternaris del sud de l'illa, segons BUTZER & CUERDA (1962); dibuix original sense escala temporal. El requadre vermell indica els paleonivells marins que presumiblement corresponen a l'estadi isotòpic MIS-5. Figure 1: Generalized curve of relative sea level deduced from Quaternary deposits of southern Mallorca, after BUTZER & CUERDA (1962); original sketch without time scale. The red box indicates the high sea stands presumably corresponding to stage MIS-5.

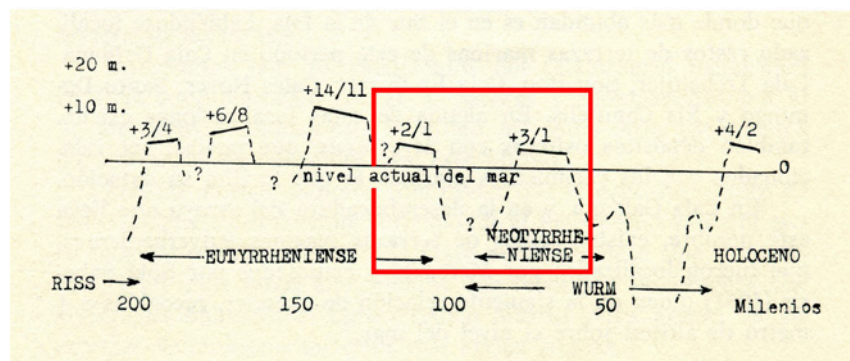


Figura 2: Els nivells marins del pleistocè superior a Mallorca, segons CUERDA (1975). El requadre vermell assenyalava els paleonivells marins que poden correspondre a l'estadi isotòpic MIS-5. Figure 2: The Upper Pleistocene sea levels in Mallorca, according to CUERDA (1975). The red box shows those high sea stands that would correspond to stage MIS-5.

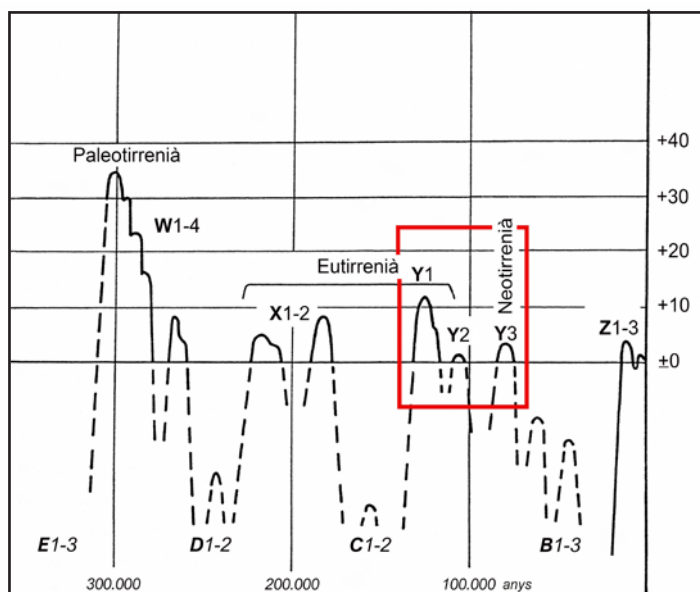


Figura 3: Cicles sedimentaris quaternaris i nivells marins relatius tal i com es troben enregistrats a Mallorca (modificat, a partir de BUTZER, 1975). El requadre vermell indica els hemicles marins que corresponen a l'estadi MIS-5.

Figure 3: Quaternary sedimentary cycles and relative sea levels, as recorded in Mallorca (modified from BUTZER, 1975). The red box indicates the marine hemicycles that would correspond to stage MIS-5.

representats no s'assignen a una successió geocronològica concreta, és a dir no es relacionen amb les glaciacions alpines clàssiques, ni amb els estadis isotòpics marins que ja començaven a estar en ús generalitzat. La corba del nivell marí proposada per BUTZER (1975) mostra una gran semblança

manera que l'eutirrenià recent (*TIIB* de BUTZER & CUERDA, 1962) correspondria al MIS-5e, mentre que el neotirrenià (*TIII*) podria referir-se als dipòsits del MIS-5a.

Els hemicles marins-continents (K.W. Butzer)

El mateix any que Joan Cuerda publicava la seva important monografia, el seu col·lega Karl W. Butzer va treure a la llum un interessant treball on reinterpretava les seves observacions sobre el quaternari litoral de Mallorca (BUTZER, 1975). En aquest article es plantejava una successió d'hemicles marins, amb nivells de la Mediterrània superiors a l'actual (designats amb lletres de la Z, l'holocè, fins a l'U ja en el pleistocè mitjà), separats per hemicles continentals regressius designats amb lletres de la B, la darrera glaciació, a la F (la lletra A designa els dipòsits terrestres subactuals).

La corba del nivell marí a Mallorca, presenta en aquesta ocasió una escala cronològica que arriba fins als 300 ka (Figura 3), però els hemicles amb la corba publicada per CUERDA (1975), emperò amb algunes diferències cronològiques substancials (Figura 3). En aquest sentit, Butzer col·loca el pic corresponent a l'hemicle Y1 en torn als 125 ka BP, mentre que Cuerda dibuixa un pic semblant però més tardà, a prop dels 150 ka BP. Aquesta interpretació de Butzer implicaria que durant l'hemicle Y1 –que es correspondria clarament amb el MIS-5e– el nivell marí a Mallorca hauria pujat per sobre dels +10 m s.n.m. Amb la intenció de clarificar les correspondències terminològiques i cronològiques entre els treballs clàssics de Butzer y de Cuerda, hem elaborat la Taula 1 on s'intenta, així mateix, una atribució dels diferents episodis que distingeixen aquests autors als estadis isotòpics marins (MIS) actualment utilitzats.

Cronologia (ka B.P.)	Estadis isotòpics	BUTZER & CUERDA (1962)	CUERDA (1975)	BUTZER (1975)
10	1	FLANDRIÀ	FLANDRIÀ	Z1-3
	2	WÜRM		B1-3
	3			
	4			
85	5 a	TIRRENIÀ III	NEOTIRRENIÀ	Y3
125	5 e	TIRRENIÀ IIb	EUTIRRENIÀ	Y2 Y1
	6			C1-2
	7	TIRRENIÀ IIa		X1-2
300	8	RISS		D1-2
	9	TIRRENIÀ I	PALEOTIRRENIÀ	W1-4
	10			E1-3
400	11	SICILIÀ II ?	SICILIÀ II ?	V1-2

Taula 1: Correspondència entre les nomenclatures utilitzades als treballs clàssics de Joan Cuerda i Karl W. Butzer, i l'escala cronològica basada en els estadis isotòpics marins (modificat a partir de GINÉS, 2000). El requadre vermell indica els paleonivells marins que presumiblement corresponen a l'estadi isotòpic MIS-5.

Table 1: Correspondence between the nomenclatures used in the classical papers of Joan Cuerda and Karl W. Butzer and the chronological scale based on marine isotopic stages (modified from GINÉS, 2000). The red box indicates the high sea stands presumably corresponding to stage MIS-5.

Els espeleotemes freàtics: primers resultats

L'any 1972 arran de l'exploració i topografia de la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia) es va inaugurar una profitosa línia d'investigació, que s'inicià aquell mateix any amb una comunicació presentada al *II Congreso Nacional de Espeleología*, celebrat a Oviedo, i que fou publicada dos anys després (GINÉS & GINÉS, 1974). A l'esmentat treball es relacionaven

els espeleotemes freàtics, observats en aquesta excepcional cavitat, amb els paleonivells marins del pleistocè mitjà i superior reconeguts al registre de línies de costa i platges fòssils de l'illa (BUTZER & CUERDA, 1962). Els espeleotemes freàtics consisteixen en bandes horitzontals de cristallitzacions de carbonats (calcita i/o aragonita) que es formen a la superfície dels llacs de les coves litorals, la posició al·timètrica dels quals està controlada en tot moment per les variacions actuals o pretèrites del nivell de les aigües marines. Aquests dipòsits constitueixen un excel·lent registre del nivell marí postglacial (Figura 4A), així com dels paleonivells marins que tingueren lloc en relació amb les fluctuacions glacio-eustàtiques del pleistocè (Figura 4B-E).

L'estudi d'aquest tipus d'espeleotemes es va veure complementat als anys següents amb observacions morfològiques, mineralògiques i cristal·logràfiques, tant dels dipòsits de la Cova de sa Bassa Blanca, com de precipitats similars subactuals, com els de la Cova de Cala Varques-A, a Manacor (POMAR et al., 1976, 1979). El potencial geocronològic dels espeleotemes freàtics resultava molt prometedor, i així fou divulgat a nivell internacional en dues comunicacions presentades al *Eighth International Congress of Speleology*, que tingué lloc a Bowling Green, USA (GINÉS et al., 1981a, 1981b).

Com a resultat de la projecció internacional d'aquest peculiar registre cronològic dels paleonivells marins a Mallorca, fou possible disposar ben aviat de les primeres datacions radiomètriques d'aquests dipòsits (HENNIG et al., 1981), efectuades mitjançant el mètode U/Th a l'Institut für Kernchemie der Universität zu Köln. Aquestes datacions, encara que molt preliminars i poc precises, confirmaven l'edat holocena dels dipòsits situats al voltant del nivell marí actual (Cova de Cala Varques-A) i, per altra banda, demostraven que alguns dels espeleotemes procedents de la Cova de sa Bassa Blanca corresponien a paleonivells de la Mediterrània ocorreguts durant el pleistocè mitjà.

Continuant amb aquesta darrera localitat alcudienca, també durant aquest mateix any 1981 comencen les activitats del *Projecte Hades*, el qual tenia com a objectiu la recollida de mostres d'espeleotemes freàtics mitjançant la perforació de les parets de la cova, per tal d'obtenir dades estratigràfiques i cronològiques detallades d'aquesta excepcional cavitat (HADES, 1985).

Per tal de donar una idea del grau d'acceptació que tingué a l'àmbit il·lenc aquest nou registre espeleològic de les variacions del nivell marí, bastarà comentar que al llibre *Los Tiempos Cuaternarios en Baleares* (CUERDA, 1975) el seu autor es fa ressò de les recents investigacions en la Cova de sa Bassa Blanca, incloent-hi els espeleotemes freàtics en un gràfic representatiu sobre els aspectes geomorfològics que permeten la identificació dels paleonivells marins (Figura 5).

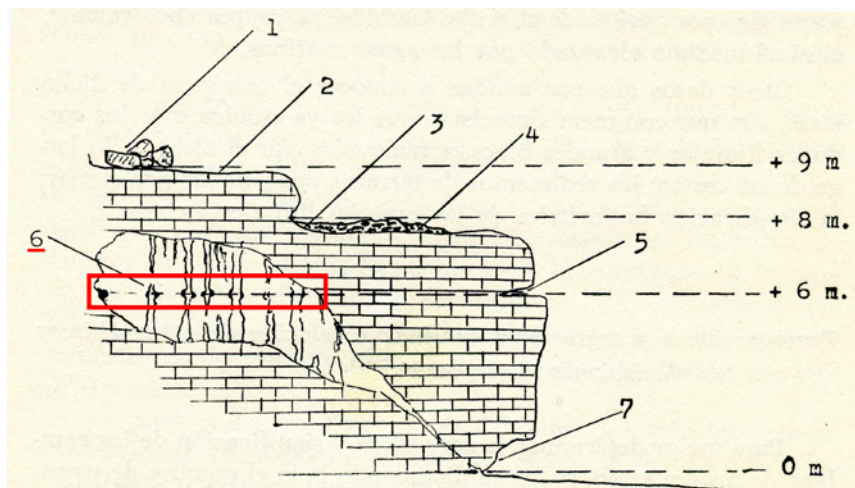


Figura 5: Representació esquemàtica de les conseqüències geomorfològiques dels paleonivells marins en les costes calcàries del sud i llevant de Mallorca (segons CUERDA, 1975). Dins el requadre vermell es representa una alineació horitzontal d'espeleotemes freàtics (POS), que enregistra un antic nivell marí superior a l'actual.

Figure 5: Schematic representation of the geomorphological consequences of ancient sea levels in the limestone coasts of the south and east of Mallorca (according to CUERDA, 1975). Inside the red box a horizontal alignment of phreatic overgrowths on speleothems (POS) is represented, which records an ancient sea level higher than the current one.

Algunes aportacions cronològiques sobre jaciments marins de l'illa

En les darreres dècades del segle XX cal comentar diverses aportacions sobre la cronologia d'alguns jaciments clàssics de Mallorca, com per exemple el Camp de Tir, situat a la zona coneguda com Es Carnatge. Per una banda, HEARTY et al. (1986) publicaren els resultats de datacions de mol·luscs de diversos jaciments quaternaris de la badia de Palma (Camp de Tir) i del sud de l'illa (Son Grauet, Cala Pi, Torre de s'Estalella), obtingudes mitjançant la racemització d'aminoàcids. Les datacions situaren bona part de les mostres analitzades dins del MIS-5e, amb edats al voltant dels 125 ka BP. En canvi, les dates obtingudes al jaciment del Camp de Tir foren bastant contradictòries i poc concloents ja que,

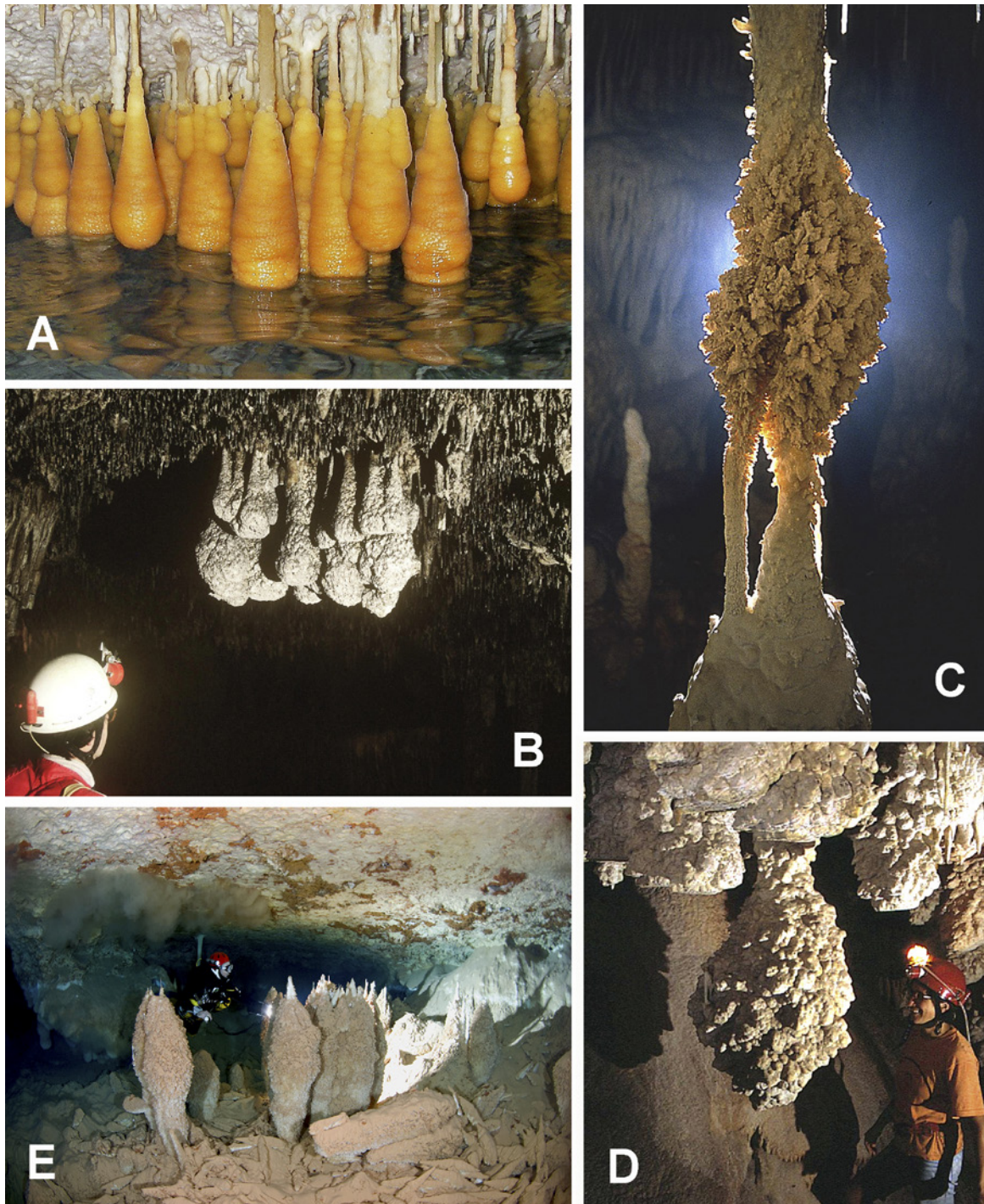


Figura 4: Algunes fotografies d'espeleotemes freàtics (POS) de diverses coves de Mallorca. A: sobrecreixements d'aragonita de singular bellesa que es desenvolupen al voltant del nivell freàtic actual a la Cova des Pas de Vallgornera, Lluçmajor (Foto: A. Merino). B: agrupació d'espeleotemes freàtics que enregistren un paleonivell marí a les Coves del Drac (Manacor), a una alçada de +4 m per sobre del present nivell de la mar (Foto: J. Ginés). C: espectacular sobrecreixement de calcita corresponent al subestadi MIS-5e dins la Cova des Pas de Vallgornera (Lluçmajor), localitzat a una alçada de +2,6 m s.n.m. (Foto: A. Merino). D: dipòsits boteruts d'espeleotemes freàtics de la Cova de na Mitjana (Capdepera), que enregistren un nivell marí pleistocènic a una alçada de +6 m s.n.m. (Foto: J. Ginés). E: banda horitzontal d'espeleotemes freàtics corresponent a un esdeveniment regressiu, submergida a la Cova de sa Gleda (Manacor) a una fondària de -15 m b.n.m. (Foto: A. Cirer).
 Figure 4: Some pictures of phreatic overgrowths on speleothems (POS) from several Mallorcan caves. A: nice aragonite encrustations growing at the current water table in Cova des Pas de Vallgornera, Lluçmajor (Photo: A. Merino). B: group of POS crystallizations that record an ancient sea stand in Coves del Drac (Manacor), at an elevation of +4 m above the present-day sea level (Photo: J. Ginés). C: spectacular calcite overgrowth corresponding to MIS-5e in Cova des Pas de Vallgornera (Lluçmajor), located at an elevation of +2.6 m a.s.l. (Photo: A. Merino). D: bulky macrocrystalline POS deposits from Cova de na Mitjana (Capdepera), recording a Pleistocene high sea-stand at +6 m a.s.l. (Photo: J. Ginés). E: band of POS deposits corresponding to a regressive event, submerged in Cova de sa Gleda (Manacor) at a depth of -15 m b.s.l. (Photo: A. Cirer).

mentre la fauna i l'estratigrafia apuntaven cap al MIS-5, les datacions aportaven edats corresponents al MIS-7, entorn als 200 ka BP.

Per altra banda, cal fer referència a les investigacions de HILLAIRE-MARCEL et al. (1996), que es centraren en el jaciment ja esmentat del Camp de Tir. Aquests autors distingeixen dipòsits corresponents a dues pulsacions transgressives del nivell marí, amb alçades entre +2,5 i +3 m, ocorregudes durant el MIS-5e amb unes edats al voltant de 135 i 117 ka BP. Aquesta interpretació, que situa un breu episodi regressiu dins el màxim tèrmic de l'últim interglacial (MIS-5e), està en la línia del que documentaria més tard HEARTY (1998) en estudiar el quaternari marí de l'illa d'Eleuthera, a les Bahames.

Els programes de datació sistemàtica dels espeleotemes freàtics

Al llarg dels anys 80 i 90 del segle passat es desenvolupen successius programes de datació radiomètrica dels espeleotemes freàtics, utilitzant el mètode U/Th. Primerament, i gràcies a la dedicació del desaparegut col·lega Gerd H. Hennig (Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Hannover) es continuà amb la datació de mostres de diverses localitats mallorquines, ja iniciades abans (HENNIG et al., 1981). Els resultats foren encoratjadors, encara que no massa concloents pel que fa al darrer interglacial, donat que bàsicament s'analitzaren mostres bastant antigues (Cova de sa Bassa Blanca, Coves Petites, Cova de na Mitjana), així com espeleotemes de l'holocè (Cova de Cala Varques-A); no obstant això, ja s'obtingué una primera edat pertanyent a l'últim interglacial, procedent de la Cova des Serral (Manacor), amb una cronologia de 105-113 ka BP corresponent a un paleonivell situat a +1,4 m s.n.m. (GINÉS & GINÉS, 1989, 1993).

A partir de 1994 s'emprèn una fructífera col·laboració amb Paola Tuccimei i altres investigadors del Dipartimento di Scienze Geologiche de la Università Roma III, gràcies al finançament inicial que va dotar el Museu Balear de Ciències Naturals (Sóller), i que després va tenir continuïtat amb finançament obtingut, per part de la Universitat de les Illes Balears, dels Ministeris pertinents. Aquesta línia de recerca encara roman activa i ha aportat interessants resultats. En una primera fase es dataren mostres procedents de 8 localitats del llevant de Mallorca, totes elles recol·lectades per sobre del nivell marí actual (TUCCIMEI et al., 1997, 1998). En una fase posterior, es varen datar mostres recol·lectades per davall del present nivell marí en 4 coves del llevant de l'illa, amb la finalitat de documentar els esdeveniments regressius que pogueren estar registrats per alineacions d'espeleotemes freàtics (GINÉS, 2000; TUCCIMEI et al., 2000). Durant aquests mateixos anys es publiquen els primers resultats en revistes internacionals (VESICA et al., 2000; FORNÓS et al., 2002), i es comença a generalitzar l'ús de l'acrònim POS (*Phreatic Overgrowths on Speleothems*) per a designar aquest dipòsits a la bibliografia en llengua anglesa. Cal deixar constància que, en aquestes primeres campanyes, les datacions U/Th eren realitzades mitjançant la tècnica d'espectrometria-alfa, la qual posteriorment va anar sent substituïda per diferents tècniques d'espectrometria de masses, molt més precises; una bona part de les datacions foren efectuades a l'Institut für Geologie, Universität Bern (Suïssa), on es va comptar amb la col·laboració del col·lega Igor M. Villa.

Els successius programes de datació donaren com a resultat una corba del nivell marí relatiu (RSL) a Mallorca, publicada per TUCCIMEI et al. (2006). Aquesta corba estava construïda a partir de 24 mostres d'espeleotemes freàtics, procedents de 11 cavitats del llevant de Mallorca, recol·lectades tant per damunt com per davall del nivell marí actual (Figura 6); el

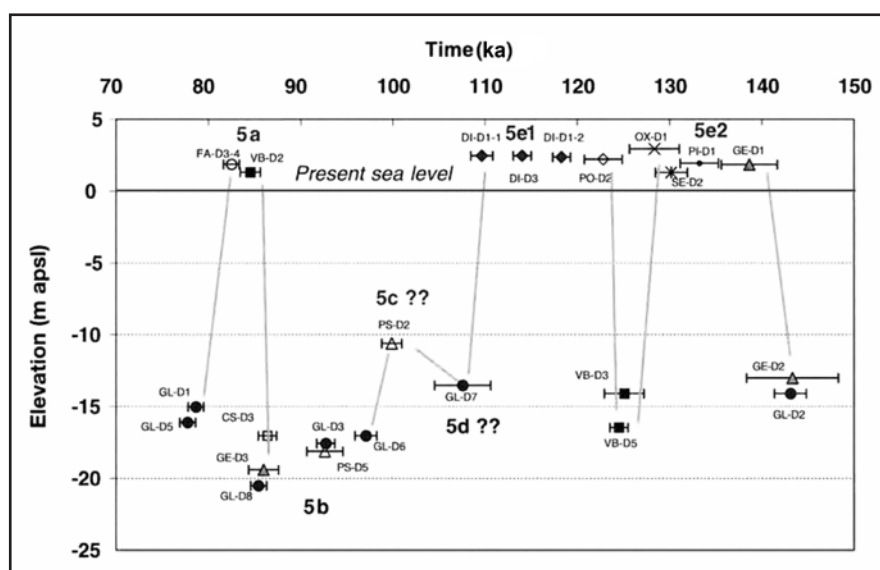


Figura 6: Corba del nivell marí relatiu a Mallorca durant l'estadi MIS-5, basada en les datacions U/Th d'espeleotemes freàtics (POS) publicada per TUCCIMEI et al. (2006).

Figure 6: Relative sea level curve in Mallorca based on U/Th ages of phreatic overgrowths on speleothems (POS), according to TUCCIMEI et al. (2006).

conjunt de les dades presentava en principi una robustesa major que els primers programes de datació, donat que les edats estaven obtingues per diferents tècniques d'espectrometria de masses (TIMS i MC-ICPMS). La corba obtinguda mostrava dos subestadis amb nivell marí superior a l'actual: el MIS-5e entre +2 i +3 m (de 138 a 110 ka BP) i el MIS-5a entre +1,4 i +1,9 m s.n.m. (al voltant dels 84-82 ka). Les datacions efectuades sobre mostres recollides per sota del nivell de la mar, documentaven diversos episodis regressius (MIS-5b, MIS-5d), entre els quals cal destacar una davallada del nivell marí al voltant de -15 m ocorreguda sobre els 125 ka BP, a mitjan del subestadi MIS-5e. Aquest breu episodi regressiu, coincidiria més o manco amb el que observava HILLAIRE-MARCEL (1996) en el jaciment del Camp de Tir. En qualsevol cas, cal comentar que les datacions procedents de mostres recollides per davall del nivell freàtic actual han mostrat algunes febleses, tal i com es comentarà més endavant.

Algunes informacions procedents de la datació d'espeleotemes vadosos

Malgrat que l'objectiu d'aquestes pàgines està focalitzat en les informacions obtingudes de l'estudi dels espeleotemes freàtics, convé també fer una ullada a algunes dades que es poden despendre de les datacions d'espeleotemes vadosos procedents de cavitats costaneres (estalagmites i colades, bàsicament). Aquest tipus d'espeleotemes convencionals són susceptibles de documentar també la posició dels paleonivells marins, donat que la deposició d'aquesta mena de dipòsits requereix que el nivell marí sigui inferior a la cota on ha tingut lloc la seva formació. En poques paraules, els espeleotemes vadosos poden permetre una reconstrucció indirecta dels nivells màxims assolits per les aigües marines durant les pulsacions de signe càlid, tal com s'assenyala a ONAC et al. (2012).

Les investigacions que aporten dades cronològiques d'aquest tipus de registre del nivell marí en Mallorca són escasses. Cal referir-se, d'una banda, a les datacions publicades per ANDREWS et al. (1989) referides a les colades estalagmítiques de la Cova de na Barxa (Capdepera) que suporten el jaciment-típus de *Myotragus balearicus*, bòvid del pleistocè i holocè de les Gimnèsies. El gruix de les datacions de les colades basals del jaciment subministren edats compreses entre 198 i 157 ka BP; és a dir, aquestes capes estalagmítiques es dipositaren durant el MIS-6, que és l'estadi de signe fred immediatament anterior al darrer interglacial. Òbviament, la deposició d'espeleotemes vadosos degué aturar-se durant el subestadi MIS-5e, degut a que aquests dipòsits es troben a una alçada inferior als +2 m. No obstant això, una datació de les capes superiors d'aquestes colades dona una edat de 119 ka que podria relacionar-se amb la finalització de la transgressió corresponent al darrer interglacial; però tampoc es pot descartar una relativa feblesa d'aquesta dada cronològica, deguda a contaminació detrítica de les capes superficials de la colada, a més de tractar-se de datacions relativament antigues i efectuades encara amb tècniques d'espectrometria-alfa.

Per altra banda, l'estudi d'una estalagmita procedent de la Cova de Cala Falcó (Manacor) documenta amb claredat l'existència d'un hiatus en el creixement d'aquest espeleotema vadós (HODGE et al., 2008), que els autors atribueixen a la seva immersió a causa d'una transgressió marina puntual i relativament breu. Les datacions de l'esmentada estalagmita situen el seu creixement entre els 112,2 fins al 48,5 ka BP, amb una clara interrupció ocorreguda dels 84,6 als 75,3 ka BP; aquestes dates confirmarien un nivell marí elevat (aprox. +2 m) corresponent al MIS-5a (el neotirrenià, de Cuerda), compatible amb el paleonivell d'aquesta cronologia que apareix enregistrat en aquesta mateixa localitat i en altres coves del llevant de l'illa (TUCCIMEI et al., 2006).

Noves datacions d'espeleotemes freàtics del subestadi MIS-5a

Una nova remesa de datacions d'espeleotemes freàtics efectuades gràcies a la col·laboració amb Bogdan P. Onac, de la University of South Florida (Tampa, USA), i Jeffrey A. Dorale, de la University of Iowa (USA), aportaren interessants precisions sobre el nivell marí durant els moments més recents del MIS-5, publicades en una prestigiosa revista internacional (DORALE et al., 2010). En aquesta nova campanya de datacions U/Th s'analitzaren 12 mostres d'espeleotemes freàtics provinents de 5 coves del llevant i sud de Mallorca. Un total de 10 de les datacions efectuades documentaven un nivell marí situat entre +1,25 i +1,6 m s.n.m., amb una cronologia de 80,1 a 81,9 ka BP, que es correspon amb claredat amb el MIS-5a; aquestes datacions vindrien a confirmar l'existència d'un episodi

transgressiu ocorregut al voltant dels 81 ka BP –ja detectat a la corba aportada per TUCCIMEI et al. (2006)– que correspondria al pis neotirrenià, segons la terminologia de CUERDA (1975). En la publicació de DORALE et al. (2010) també s'aportaven 2 datacions de POS procedents de la Cova des Pas de Vallgornera, que documentaven un paleonivell relatiu marí situat a +2,6 m, amb unes edats de 116,2 i 120,6 ka BP; òbviament es tracta de mostres atribuïbles al màxim tèrmic del darrer interglacial, és a dir al MIS-5e.

A la Figura 7 es pot observar la corba del nivell marí a Mallorca proposada per DORALE et al. (2010), juntament amb la corba del nivell oceànic global deduïda per SHACKLETON (2000) a partir del registre marí d'isòtops de l'oxigen (part superior de la figura). Els esdeveniments regressius que apareixen reflectits a la meitat inferior de la Figura 7 (signes blaus) reproduïxen les dades publicades prèviament per TUCCIMEI et al. (2006).

Un aspecte a ressaltar dins la publicació de DORALE et al. (2010) consisteix en el fet que es discuteix la possible influència dels ajustaments isostàtics glacials (GIA), en el nivell marí relatiu documentat a Mallorca en correspondència amb el subestadi MIS-5a. Els autors proposen la possibilitat de que l'illa es trobi, a efectes del GIA, en una estreta zona de transició entre regions d'emersiò o d'immersiò, de tal manera que el nivell marí al nostre entorn geogràfic segueix amb bastant fidelitat la corba eustàtica global. D'aquesta forma, un nivell oceànic global (GMSL) de devers +1 m per sobre del present nivell marí, implicaria que durant el MIS-5a el conjunt del planeta presentava menys massa glacial que l'existent avui en dia.

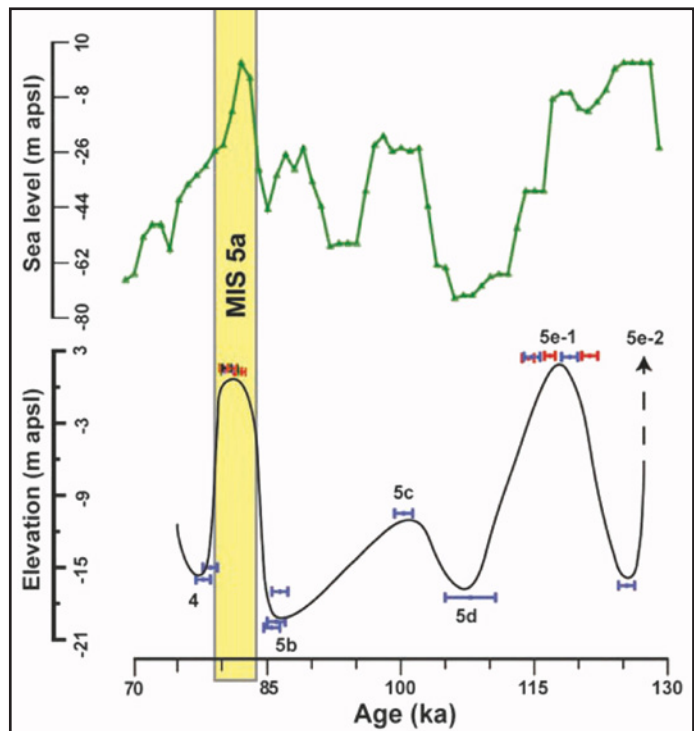


Figura 7: Reconstrucció del nivell marí a Mallorca durant l'estadi MIS-5 (corba inferior) incloent, dins la columna groga, les datacions d'espeleotemes freàtics corresponents al MIS-5a (modificat, a partir de DORALE et al., 2010). La corba verda de la part superior representa una estimació del volum global de les aigües oceàniques, en base al registre marí profund (SHACKLETON, 2000).

Figure 7: Sea level reconstruction of MIS-5 in Mallorca (lower curve) including, inside the yellow column, the datings of MIS-5a POS samples (modified from DORALE et al., 2010). The green curve in the upper part of the figure represents an estimation of oceanic global water volume, deduced from the deep marine record (SHACKLETON, 2000).

Workshop “Sea level changes into MIS-5” (Palma, 2012)

L'abril de 2012 es va desenvolupar a Palma una trobada internacional sobre els canvis del nivell marí durant el darrer interglacial, impulsada per la National Science Foundation (USA), la Universitat de les Illes Balears i la Societat d'Història Natural de les Balears, esdeveniment que comptà amb el suport del MINECO. En ocasió d'aquest *workshop* es va publicar una monografia sobre el quaternari de Mallorca, que feia a més les funcions de llibre-guia per als participants a la trobada (GINÉS et al., 2012a).

L'esmentada monografia inclou un treball que s'ocupa d'actualitzar els coneixements derivats de 40 anys d'investigacions sobre els espeleotemes freàtics de Mallorca (GINÉS et al., 2012b). Centrant-nos en el pleistocè superior, se subministren dades de 36 mostres de POS procedents de 13 cavitats del llevant i sud de l'illa. La corba actualitzada del nivell marí que s'aporta (Figura 8) és molt semblant a la prèviament publicada a TUCCIMEI et al. (2006); les diferències més significatives serien, per una banda, la documentació més robusta del nivell marí durant el MIS-5a (aprox. +1 m s.n.m., entre 80 i 82 ka BP) en incorporar les datacions efectuades per DORALE et al. (2010) i, per altra banda, el fet que l'episodi regressiu dibuixat a mitjan MIS-5e (aprox. 125 ka BP) es planteja amb un clar interrogant. En aquest sentit, cal tenir present que aquesta davallada del nivell marí està documentada només per dues datacions d'una sola localitat. A més a més, en aquells moments es començaren a aixecar dubtes raonables sobre la bondat d'algunes de les datacions d'espeleotemes freàtics recollits per davall del present nivell marí. Això es deu a que molts d'aquests POS, que es troben actualment

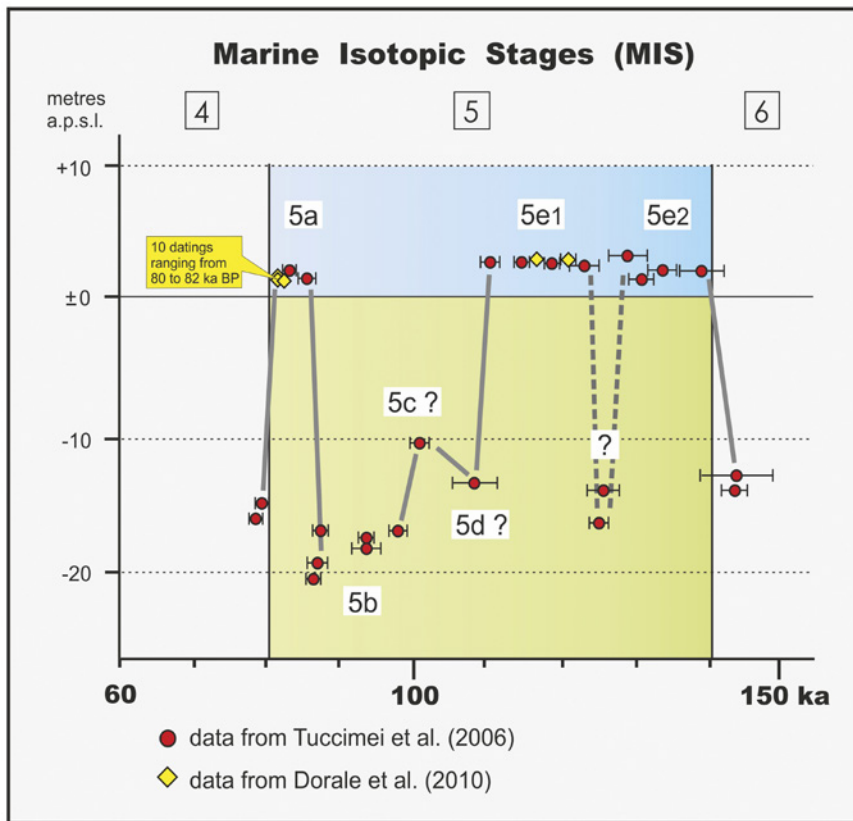


Figura 8: Corba del nivell marí relatiu a Mallorca al llarg de l'estadi MIS-5, basada en les datacions U/Th d'espeleotemes freàtics (POS), segons GINÉS et al. (2012b). Els resultats corresponents als subestadis MIS-5e i MIS-5a han estat refinats recentment, tal i com es pot consultar a les Figures 10 i 12.

Figure 8: Relative sea level curve during MIS 5 in Mallorca, deduced on the basis of U/Th ages of phreatic overgrowths on speleothems (POS), according to GINÉS et al. (2012b). The results corresponding to the MIS-5e and MIS-5a high sea stands have been improved recently, and the refined data are shown in Figures 10 and 12.

submergits sota les aigües salabroses freàtiques, han estat afectats per importants processos de corrosió que poden haver ocasionat pèrdues post-deposicionals d'urani, de tal manera que algunes mostres es poden considerar com a sistemes isotòpics oberts.

En aquest mateix any es publica un treball on es discuteixen les alçades relatives del nivell marí a Mallorca i a Sardenya durant el MIS-5e i l'holocè, en base a les datacions d'espeleotemes freàtics d'ambdues illes (TUCCIMEI et al., 2012). Pel que fa al subestadi MIS-5e, les diferències altimètriques observades són relativament notòries: +2,5 m d'alçada en el cas de Mallorca, en front dels +4,3 m s.n.m. de l'illa de Sardenya. Aquestes diferències són analitzades a la llum dels models usualment emprats per avaluar la incidència dels ajustaments isostàtics glaciars (GIA) i les alteracions del geoide, de tal manera que s'observa un comportament diferencial ben clar, el qual pareix denotar que la participació del GIA està possiblement sobreestimada en el cas de Mallorca, on el nivell marí local pareix seguir de bastant a prop el nivell eustàtic global (GMSL).

Aquest comportament diferenciat de Mallorca, en termes dels ajustaments atribuïbles al GIA a la conca Mediterrània occidental, està també documentat en els dipòsits holocènics de l'illa (VACCHI et al., 2016), el que fa argumentar als autors que els ajustaments isostàtics post-glaciars han estat mínims.

Altres aportacions recents sobre jaciments marins

En un article publicat per MUHS et al. (2015), els autors s'ocupen de la cronologia del neotirrenià basant-se en la datació U/Th d'exemplars de coralls recol·lectats en dipòsits considerats neotirrenians, procedents sobretot de jaciments com el Camp de Tir - Es Carnatge. Les datacions radiomètriques efectuades sobre aquestes bioconstruccions coral·lines donen edats compreses entre 126 i 118 ka BP, dates que situarien clarament els dipòsits analitzats dins del subestadi MIS-5e.

Amb les dades cronològiques obtingudes, aquest treball qüestiona la presència de dipòsits del neotirrenià –tant a Mallorca, com a l'àrea mediterrània en general– considerant-los com una fàcies lleugerament diferenciada (*beachrock*) del conjunt de sediments corresponents a l'eutirrenià (MIS-5e). Val a dir que aquesta proposta cal considerar-la massa agosarada, tenint en compte les majors incerteses que presenten les reconstruccions del nivell marí basades en la datació dels coralls, en comparació amb els molt precisos paleonivells marins documentats pels espeleotemes freàtics de Mallorca (DORALE et al., 2010), amb edats corresponents amb claredat al MIS-5a, és a dir al neotirrenià.

Unes de les últimes aportacions sobre aquestes matèries són els articles de ROVERE et al. (2016a) i de LORSCHIED et al. (2017), liderats per investigadors de la Universitat Bremen (Alemanya). Fent referència a la darrera publicació esmentada, es pot dir que el plantejament d'aquest treball és bastant singular: s'utilitzen tècniques de GPS diferencial per a determinar l'altimetria (amb precisions de l'ordre

del decímetre) de vestigis d'antigues línies de costa, atribuïdes al darrer interglacial, les quals tenen unes elevades incerteses tant posicionals com cronològiques.

Els principals resultats obtinguts per LORSCHIED et al. (2017) es poden visualitzar a la Figura 9, on els autors es permeten individualitzar dos grups d'indicadors de paleonivells marins atribuïts en principi al MIS-5e, situats a alçades ben disperses: $+2,9 \pm 0,8$ m i $+11,3 \pm 1$ m. Emperò, els autors no presenten arguments sòlids que justifiquin l'existència d'aquests dos nivells marins tan diferents dins del darrer interglacial, encara que atribueixen el nivell més elevat a una màxima pulsació de fusió glacial ocorreguda al començament del MIS-5e. Per altra banda, la modelització aportada en el treball sobre els possibles ajustaments deguts al GIA tampoc justifica de cap manera aquesta dualitat d'altimetria força dispar. En aquest sentit, cal consignar que els propis autors suggereixen que les línies de costa més elevades que s'han estudiat ($+11,3$ m) probablement tenen una cronologia molt més antiga i corresponen al MIS-11. Uns resultats i enfocaments similars es poden trobar al treball de STOCCHI et al. (2018).

Centrant-nos en els dipòsits i morfologies que pertanyen de manera inequívoca al MIS-5e, els models de GIA utilitzats per LORSCHIED et al. (2017) suggereixen que els indicadors geomorfològics i paleontològics que trobem al voltant dels $+2,9 \pm 0,8$ m, podrien correspondre a un nivell oceànic global (GMSL) situat entorn als $+8$ m als inicis de l'interglacial; malgrat això, les dades aportades no confirmen ni desmenteixen aquesta possible subsidència associada al GIA. En el treball que estem comentant no s'aporta cap dada referent al nivell marí durant el subestadi MIS-5a.

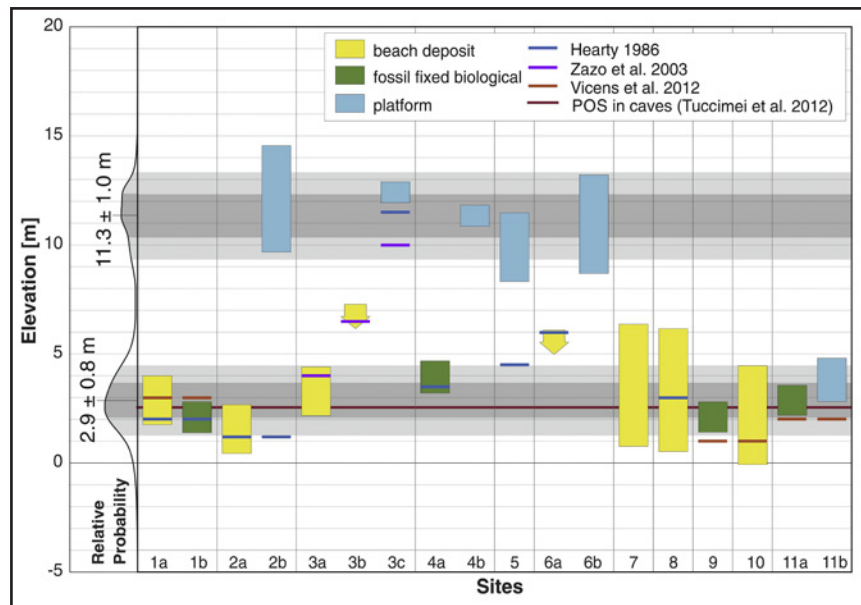


Figura 9: El nivell marí relatiu a Mallorca durant el subestadi MIS-5e, segons les dades publicades per LORSCHIED et al. (2017). Les paleoformes d'erosió representades a la franja superior, a una alçària de $+11,3$ m, corresponen presumiblement a antigues línies de costa prèvies a l'estadi MIS-5. Les xifres que figuren a l'eix d'abscisses identifiquen les diferents localitats estudiades en el citat treball.
 Figure 9: Relative sea levels in Mallorca during the substage MIS-5e, according to the data published by LORSCHIED et al. (2017). The upper band erosional forms, recorded at an elevation of $+11.3$ m, presumably corresponds to ancient shore-lines previous to MIS-5. The numbers in the X-axis identify the different sites investigated in that paper.

Les darreres investigacions sobre els espeleotemes freàtics

El treball més recent sobre la temàtica que ens ocupa, se centra exclusivament en el subestadi MIS-5e i es troba sustentat per la realització de 48 datacions U/Th, efectuades al *Radiogenic Isotope Laboratory* de la University of New Mexico amb les tècniques i metodologies més rigoroses aplicades avui en dia a aquest tipus d'espeleotemes (POLYAK et al., 2018). Aquestes datacions s'efectuaren sobre un total de 11 mostres, de 8 localitats diferents, de les quals es dataren les successives capes de creixement dels espeleotemes estudiats.

Els resultats obtinguts (Figura 10) apunten a que el nivell marí relatiu (RSL) a Mallorca es va mantenir relativament estable a una alçada de $+2,15 \pm 0,75$ m s.n.m. entre els $126,6 \pm 0,4$ ka i els $116,0 \pm 0,8$ ka BP. Els autors argumenten que els resultats de les investigacions no donen suport a l'existència de ràpides fluctuacions regressives dins del MIS-5e, donada la continuïtat cronològica que aporten les datacions obtingudes (POLYAK et al., 2018). En aquest article també s'inclouen unes poques datacions que surten fora del marc cronològic del MIS-5e. Per una banda, s'aporta una edat de 130 ka BP per a una estalactita recol·lectada a -13 m en les Coves del Drac (Manacor), que va créixer immediatament abans de la pujada del nivell marí corresponent al darrer interglacial; per altra banda, la datació d'un POS recol·lectat a la Cova del Dimoni (Manacor), a $+1,1$ m s.n.m., subministra una edat de 326,7 a 331,8 ka BP, que correspondria a un nivell marí elevat ocorregut previsiblement durant el MIS-9.

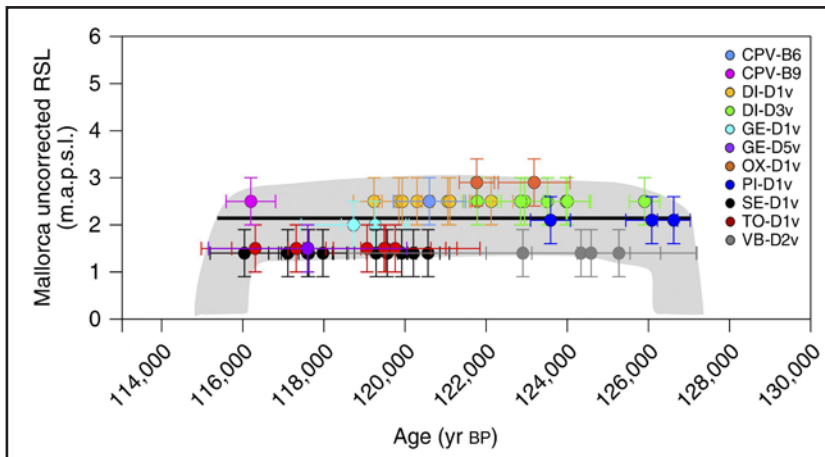


Figura 10: El nivell marí relatiu a Mallorca durant el subestadi isotòpic MIS-5e, segons les datacions d'espeleotemes freàtics publicades per POLYAK et al. (2018).
 Figure 10: The relative sea level during the MIS-5e high stand in Mallorca, based on POS datings published by POLYAK et al. (2018).

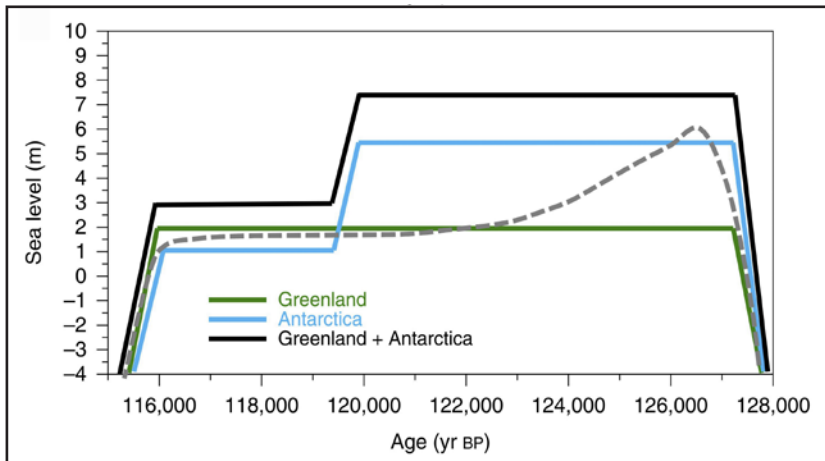


Figura 11: Possible escenari explicatiu del nivell marí mitjà global (GMSL) durant el subestadi MIS-5e a Mallorca, segons POLYAK et al. (2018). En aquest escenari es contempla una important contribució inicial procedent de la fusió del gel antàrtic; la línia discontinua representa el nivell marí eustàtic a Mallorca, d'acord amb els models de GIA utilitzats a aquest treball.
 Figure 11: Possible scenario of global mean sea level (GMSL) during MIS-5e in Mallorca, as reported by POLYAK et al. (2018). In this scenario, an early important contribution from Antarctica melting is envisaged; the dashed line represents the eustatic sea level in Mallorca, according to the GIA models used in the mentioned paper.

Sobre la base dels diversos models d'ajustament isostàtic (GIA) emprats, els autors proposen una fusió glacial molt ràpida i important durant el començament del MIS-5e, seguida d'una gradual recuperació dels casquets glacials cap a les darreries d'aquest subestadi isotòpic. D'entre els models de GIA utilitzats, els escenaris que millor s'adapten als resultats obtinguts es troben propers al model proposat per WAELBROECK et al. (2002), estimant-se un nivell eustàtic global (GMSL) entre +6 i +7 m superior a l'actual als inicis del subestadi MIS-5e (Figura 11), que s'explicaria per una important fusió del gel antàrtic, a més del retrocés del gel a Groenlàndia, menys rellevant en termes absoluts; s'estima que durant la part final del MIS-5e, aproximadament a partir de 122 ka BP, el nivell eustàtic global es podria situar al voltant dels +2 m s.n.m. No s'observen evidències que sustentin l'existència de dos pics elevats del nivell marí al llarg del MIS-5e.

Finalment cal consignar les datacions, encara pendents de publicació, que s'han portat a terme els darrers anys sobre mostres d'espeleotemes freàtics recollits per davall del nivell marí (POLYAK et al., treballs en curs). Aquestes noves dades, obtingudes amb tècniques més recents i acurades, permetran precisar millor els paleonivells marins corresponents a esdeveniments de relatiu signe fred.

El MIS-5: els coneixements actuals a Mallorca

Els treballs més antics que tractaven de la història del nivell marí a Mallorca es basaven en criteris geomorfològics, estratigràfics i paleontològics de les restes d'antigues línies de costa, i estaven referits a escales geocronològiques menys sòlides que les actuals i emmarcades dins de les glaciacions clàssiques alpines (BUTZER & CUERDA, 1962; BUTZER, 1975; CUERDA, 1975; POMAR & CUERDA, 1982). La terminologia utilitzada per a definir els diversos pisos individualitzats era força ambigua, ja que restaven agrupats en diversos nivells del que es qualificaven com a dipòsits *tirrenians* (amb la utilització d'una nomenclatura avui ja desfasada o en un ús molt marginal); aquesta ambigüitat és molt patent en els dipòsits atribuïts per CUERDA (1975) a l'eutirrenià (Figura 2), denominació que inclouria tot un ample ventall d'antics nivells marins clarament anteriors al MIS-5. En aquest sentit, les platges amb fauna termòfila plena serien exclusivament les de l'eutirrenià més recent, corresponents per tant al MIS-5e (GINÉS, 2000; VICENS et al., 2012; VICENS, 2015), mentre que altres dipòsits de major antiguitat es relacionarien amb esdeveniments transgressius previs al darrer interglacial (estadi MIS-7, o anteriors). Per altra banda, el que CUERDA (1975) denomina com a neotirrenià (o *TIII*

de BUTZER & CUERDA, 1962) correspon amb claredat al subestadi isotòpic MIS-5a (Taula 1), el qual suposa un nivell marí elevat immediatament previ a la important regressió associada a la darrera glaciació. Avui en dia, i a nivell internacional, el terme tirrenià s'aplica exclusivament al pleistocè superior, comprnent l'espai de temps entre la transició MIS-6/MIS-5 i el començament de l'holocè, que correspon a la transició MIS-2/MIS-1 (CITA et al., 2005).

Els anys 70 i 80 del segle passat s'inicien les investigacions sobre els espeleotemes freàtics (POS) de les coves costaneres de l'illa, amb uns resultats força destacables. Des dels primers treballs que aporten datacions absolutes (HENNIG et al., 1981; GINÉS & GINÉS, 1989, 1993), l'escala geocronològica emprada es basa en els estadis isotòpics marins, quedant del tot ben delimitat l'abast temporal del darrer esdeveniment interglacial, considerat en un sentit ample, és a dir el MIS-5 que abraça més o manco dels 130 als 80 ka BP. En comparació amb el registre basat en l'estratigrafia i la paleontologia dels sediments associats a antigues línies de costa, els espeleotemes freàtics presenten avantatges força importants: delimiten amb molta precisió els nivells d'estabilització del nivell marí, a més de ser susceptibles de datacions radiomètriques precises utilitzant el mètode U/Th; concretament, la datació absoluta d'aquest tipus d'espeleotemes presenta moltes menys febleses que les datacions realitzades sobre conquilles de mol·luscs o coralls. Les observacions sobre el nivell marí relatiu (RSL) a l'illa de Mallorca, que s'han anat publicant, han estat cada vegada més nombroses i detallades (VESICA et al., 2000; FORNÓS et al., 2002; TUCCIMEI et al., 2006; GINÉS et al., 2012b), incorporant també dades sobre els episodis regressius associats a esdeveniments de signe relativament fred. Avui en dia, el reconeixement internacional del gran potencial geocronològic que ofereixen els espeleotemes freàtics és inqüestionable, tal i com queda patent, per exemple, als recents treballs de síntesi sobre carst litoral publicats per DUTTON (2013) i VAN HENGSTUM et al. (2015).

Per altra banda, les recerques portades a terme en platges fòssils i altres restes d'antigues línies de costa han anat subministrant informacions que en cap cas resulten a bastament concloents. Per exemple, els treballs de HEARTY et al. (1986) i de MUHS et al. (2015) no han aconseguit millorar el marc cronoestratigràfic dels jaciments del pleistocè superior de Mallorca, i les investigacions de LORSCHIED et al. (2017) han aportat dades bastant qüestionables sobre els nivells marins a l'illa durant el MIS-5e. Centrat també en el darrer interglacial, HILLAIRE-MARCEL et al. (1996) proposen l'existència de dos nivells marins elevats corresponents al subestadi MIS-5e i separats per un breu episodi regressiu, fet que no resulta confirmat per investigacions posteriors.

En canvi, les publicacions recents més rellevants sobre els espeleotemes freàtics han permès establir amb claredat dos aspectes destacables. Per una part, DORALE et al. (2010) deixaren ben documentada la presència d'un nivell marí superior a l'actual durant el MIS-5a (+1 m aprox., entre 80 i 82 ka BP), que es correspondria amb el neotirrenià de CUERDA (1975). D'altra banda, a la publicació de POLYAK et al. (2018) es fixa amb precisió la durada del subestadi MIS-5e –l'últim interglacial pròpiament dit– que abraçaria el lapse de temps comprès entre els 126,6 i els 116 ka BP, amb un nivell marí relatiu molt estable, situat al voltant dels $+2,15 \pm 0,75$ m s.n.m.

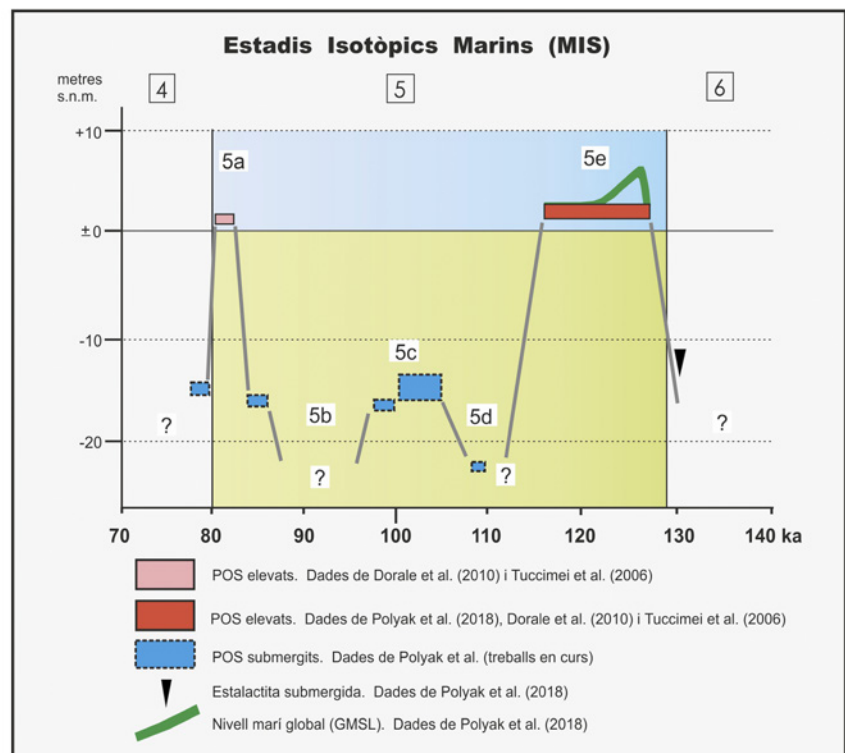


Figura 12: El nivell marí a Mallorca al llarg de l'estadi isotòpic MIS-5, en base als coneixements actuals procedents de la datació radiomètrica (U/Th) d'espeleotemes freàtics (POS) de les coves litorals de l'illa. Els requadres de colors representen els rangs d'elevació i d'edat dels paleonivells d'espeleotemes freàtics que han estat datats.

Figure 12: The sea level history during isotopic stage MIS-5 in Mallorca. Reconstruction based on the current knowledge supplied by the radiometric dating (U/Th) of phreatic overgrowths on speleothems (POS) from littoral caves of the island. The colored boxes represent the elevation and age ranges of the dated POS paleolevels.

Per tal de posar en clar la situació dels coneixements sobre el nivell marí a Mallorca al llarg del conjunt de l'estadi MIS-5, s'ha elaborat una gràfica que intenta reunir les dades més actuals subministrades pel registre d'espeleotemes freàtics (Figura 12). Aquesta gràfica incorpora bàsicament les informacions aportades als treballs de TUCCIMEI et al. (2006), DORALE et al. (2010), GINÉS et al. (2012b) i POLYAK et al. (2018). Cal reconèixer que, mentre les dades corresponents als pics transgressius (MIS-5e, 126,6 a 116 ka BP; MIS-5a, 82 a 80 ka BP) se sustenten sobre datacions molt sòlides i precises (DORALE et al., 2010; POLYAK et al., 2018), les dades obtingudes sobre els nivells marins regressius mostren unes incerteses majors (TUCCIMEI et al., 2006; GINÉS et al., 2012b), degudes als processos geoquímics que han afectat els espeleotemes freàtics en romandre submergits a la zona de mescla costanera. Concretament, a més d'una estalactita vadosa recol·lectada a -13 m (datada en 130 ka BP) que es va formar cap al final de l'esdeveniment regressiu del MIS-6 (POLYAK et al., 2018), nombroses alineacions de POS submergits enregistren estabilitzacions del nivell marí entre -13 i -23 m, corresponents als subestadis MIS-5d, 5c i 5b (entre 109 i 82 ka BP); una bona part de les mostres, recollides a profunditats d'entre -13 i -16 m, se situen en el rang d'edat de 101 a 106 ka BP, i correspondrien presumiblement als nivells més elevats del subestadi MIS-5c (POLYAK et al., treballs en curs). Finalment, algunes mostres recol·lectades a una profunditat de devers -15 m enregistren la davallada del nivell marí al començament del MIS-4 (aprox. 78 ka BP).

Les investigacions més actuals sobre els espeleotemes freàtics de Mallorca han intentat avaluar la participació dels ajustaments isostàtics (GIA) en el registre de nivells marins relatius de les nostres coves litorals. Per una part, DORALE et al. (2010) en donar precisions sobre els precipitats corresponents al MIS-5a suggerien que l'illa es trobava en una zona de transició entre regions d'emersió i immersió, de tal forma que el nivell marí en el nostre entorn segueix amb bastant fidelitat la corba eustàtica global. Altres treballs han posat de manifest el comportament isostàtic diferencial de la conca Mediterrània occidental, amb unes discrepàncies notables dels ajustaments atribuïbles al GIA entre les illes de Mallorca i Sardenya, tant en l'últim interglacial com en la pujada marina post-glacial (TUCCIMEI et al., 2012; VACCHI et al., 2016). Finalment, POLYAK et al. (2018) proposen diversos escenaris per a modelitzar la incidència del GIA durant el MIS-5e, deduint un probable nivell eustàtic global (GMSL) situat entre +6 i +7 m al començament del darrer interglacial (Figura 12), que es veuria compensat per una gradual subsidència isostàtica que originaria un nivell marí relatiu (RSL) bastant estable entorn a $+2,15 \pm 0,75$ m, al llarg del rang d'edat dels 126,6 als 116 ka BP.

Agraïments

El present treball s'emmarca dins del projecte d'investigació finançat pel MINECO, CGL2016-79246-P (AEI-FEDER, UE), i és el resultat de la informació obtinguda en molts d'altres projectes també finançats pel MICINN així com per la *National Science Foundation* (USA). El Museu Balear de Ciències Naturals (Sóller) va aportar també ajut econòmic per a les primeres campanyes de datació. Els autors desitgen agrair la implicació en aquestes investigacions d'altres col·legues, entre els que esmentarem: Yemane Asmerom (New Mexico, USA), Maria Cristina Delitala (Roma), Jeffrey A. Dorale (Iowa, USA), Carling Hay (Massachusetts, USA), Lluís Pomar (Palma), Adriano Taddeucci (Roma), Pier Luigi Vesica (Roma) i Igor M. Villa (Berna). Els mostres a les cavitats subaquàtiques han estat possibles gràcies a la participació del col·lectiu d'espeleobussejadors illencs, bona part d'ells integrats actualment a la Societat Espeleològica Balear. Cal expressar també el nostre agraïment als gestors de les Coves del Drac (Manacor) per les facilitats dispensades durant les tasques d'investigació a aquesta cova turística. Les activitats desenvolupades a determinades cavitats han comptat amb el suport administratiu de la Conselleria de Medi Ambient i Territori del Govern Balear.

Bibliografia

- ALCOVER, J.A.; MOYÀ-SOLÀ, S. & PONS-MOYÀ, J. (1981): *Les quimeres del passat. Els vertebrats fòssils del Plio-Quaternari de les Balears i Pitiüses*. Editorial Moll. Monografies Científiques, 1. 261 pàgs. Palma.
- ANDREWS, J.N.; GINÉS, A.; PONS-MOYÀ, J.; SMART, P.L. & TRIAS, M. (1989): Noves dades sobre el jaciment paleontològic de la Cova de na Barxa (Capdepera, Mallorca). *Endins*, 14-15: 17-25. Palma.
- BOVER, P.; QUINTANA, J. & ALCOVER, J.A. (2008): Three islands, three worlds: paleogeography and evolution of the vertebrate fauna from the Balearic Islands. *Quaternary International*, 182: 135-144.

- BROECKER, W.S. & DENTON, G.H. (1989): The role of Ocean-Atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 (10): 2465-2501.
- BUTZER, K.W. (1975): Pleistocene littoral-sedimentary cycles of the Mediterranean basin: a Mallorquin view. In: BUTZER, K.W. & ISAAC, G.L. (eds.) *After the Australopithecines: stratigraphy, ecology and culture change in the Middle Pleistocene*. 25-71. Chicago.
- BUTZER, K.W. & CUERDA, J. (1962): Coastal stratigraphy of southern Mallorca and its implications for the Pleistocene chronology of the Mediterranean sea. *Journal of Geology*, 70 (4): 398-416. Chicago.
- CITA, M.B.; CAPOTONDI, L. & ASIOLI, A. (2005): The Tyrrhenian stage in the Mediterranean: definition, usage and recognition in the deep-sea record. A proposal. *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 9 (16): 297-310.
- CUERDA, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Diputación Provincial de Baleares. Instituto de Estudios Baleáricos. 304 pàgs. Palma.
- DORALE, J.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; TUCCIMEI, P. & PEATE, D.W. (2010): Sea-level highstand 81,000 years ago in Mallorca. *Science*, 327: 860-863 + 4 pàgs supl. Washington.
- DUTTON, A. (2013): Use of cave data in sea-level reconstructions. *Encyclopedia of Quaternary Science*. 2nd edition. Elsevier. 460-466.
- EMILIANI, C. (1955): Pleistocene temperatures. *The Journal of Geology*, 63 (6): 538-578. Chicago.
- FAIRBRIDGE, R.W. (1961): Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4: 99-185.
- FORNÓS, J.J.; GELABERT, B.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; TUCCIMEI, P. & VESICA, P.L. (2002): Phreatic overgrowths on speleothems: a useful tool in structural geology in littoral karstic landscapes. The example of eastern Mallorca (Balearic islands). *Geodinamica Acta*, 15: 113-125.
- 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. & 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, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J. & TUCCIMEI, P. (1999): Dataciones isotópicas de espeleotemas procedentes de cuevas costeras de Mallorca. Estado actual de las investigaciones. In: ANDREO, B.; CARRASCO, F. & DURÁN, J.J. (eds.) *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja. 143-152. Nerja, Màlaga.
- GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) (2012a): *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18. 219 pàgs. Palma.
- GINÉS, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesi Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 595 pàgs + 29 làms. Inèdit.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993): Dataciones isotópicas de espeleotemas freáticos recolectados en cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 19: 9-15. Palma.
- GINÉS, J.; GINÉS, A. & 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. (2012b): 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.
- GUILCHER, A. (1969): Pleistocene and Holocene sea level changes. *Earth-Science Reviews*, 5: 69-97. Àmsterdam.
- HADES, Equipo (1985): Los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras de Mallorca: estado actual de las investigaciones. *Geomorfología litoral y Cuaternario. Homenaje a Juan Cuerva*. Universidad de València. 103-122. València.
- HEARTY, P.J. (1998): The geology of Eleuthera Island, Bahamas: a Rosetta stone of Quaternary stratigraphy and sea-level history. *Quaternary Science Reviews*, 17: 333-355.
- HEARTY, P.J.; MILLER, G.H.; STEARNS, C.E. & SZABO, B.J. (1986): Aminostratigraphy of Quaternary shorelines in the Mediterranean basin. *Geological Society of America Bulletin*, 97: 850-858.
- 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.
- HILLAIRE-MARCEL, C.; GARIÉPY, C.; GHALEB, B.; GOY, J.L.; ZAZO, C. & CUERDA, J. (1996): U-Series measurements in Tyrrhenian deposits from Mallorca. Further evidence for two last-interglacial high sea levels in the Balearic Islands. *Quaternary Science Reviews*, 15: 53-62. Oxford, U.K.
- HODGE, E.J.; RICHARDS, D.A.; SMART, P.L.; GINÉS, A. & MATTEY, D.P. (2008): Sub-millennial climate shifts in the western Mediterranean during the last glacial period recorded in a speleothem from Mallorca, Spain. *Journal of Quaternary Science*, 23 (8): 713-718.

- LISIECKI, L.E. & RAYMO, M.E. (2005): A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20 (1): 1-17.
- LORSCHIED, T.; STOCCHI, P.; CASELLA, E.; GÓMEZ-PUJOL, L.; VACCHI, M.; MANN, T. & ROVERE, A. (2017): Paleo sea-level changes and relative sea-level indicators: precise measurements, indicative meaning and glacial isostatic adjustment perspectives from Mallorca (Western Mediterranean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 473: 94-107.
- MARTINSON, D.G.; PISIAS, N.G.; HAYS, J.D.; IMBRIE, J.; MOORE, T.C. & SHACKLETON, N.J. (1987): Age dating and the orbital theory of the ice ages; development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27: 1-29.
- MILANKOVITCH, M. (1941): *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Roy. Serb. Acad. Sp. Publ. 133. 633 pàgs. Belgrad.
- MÖRNER, N.A. (1983): Sea Levels. In: GARDNER, R. & SCOGING, H. (eds.) *Mega-Geomorphology*. Clarendon Press. 73-91. Oxford.
- MUHS, D.R.; SIMMONS, K.R.; MECO, J. & PORAT, N. (2015): Uranium-series ages of fossil corals from Mallorca, Spain: The "Neotyrhenian" high stand of the Mediterranean Sea revisited. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 438: 408-424.
- 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.
- 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, F.; DEL VALLE, L.; FORNÓS, J.J. & GÓMEZ-PUJOL, L. (2018): Late Pleistocene dune-sourced alluvial fans in coastal settings: sedimentary facies and related processes. *Sedimentary Geology*, 367: 48-68.
- POMAR, L. & CUERDA, J. (1982): Los depósitos marinos pleistocénicos en Mallorca. *Acta Geológica Hispánica. Homenatge a Lluís Solé Sabarís*. 14: 505-513. Barcelona.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & FONTARNAU, R. (1976): Las cristalizaciones freáticas. *Endins*, 3: 3-25. Palma.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. *Endins*, 5-6: 3-17. Palma.
- 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.
- SHACKLETON, N.J. (2000): The 100,000-year Ice-Age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 289: 1897-1902. Washington.
- SHACKLETON, N.J. & OPDYKE, N.D. (1973): Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 year to 10^6 year scale. *Quaternary Research*, 3: 39-55. Washington.
- STEARNS, C.E. & THURBER, D.L. (1965): $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dates of late Pleistocene marine fossils from the Mediterranean and Moroccan littorals. *Quaternaria*, 7: 29-42.
- STOCCHI, P.; VACCHI, M.; LORSCHIED, T.; DE BOER, B.; SIMMS, A.R.; VAN DE WAL, R.S.W.; VERMEERSEN, B.L.A.; PAPPALARDO, M. & ROVERE, A. (2018): MIS 5e relative sea-level changes in the Mediterranean Sea: contribution of isostatic disequilibrium. *Quaternary Science Reviews*, 185: 122-134.
- TOOLEY, M.J. & SHENNAN, I. (eds.) (1987): *Sea-level changes*. Basil Blackwell Ltd. 397 pàgs. Londres.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & FORNÓS, J.J. (1997): Th/U dating of sea level-controlled phreatic speleothems from coastal caves of Mallorca (Western Mediterranean). *Proc. 12th Int. Congress Speleol.*, 1: 37-40. La Chaux-de-Fonds, Suïssa.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J. & VESICA, P.L. (1998): Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos controlados por el nivel marino, procedentes de cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 22: 99-107. Palma.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; DELITALA, C.; PAZZELLI, L.; TADDEUCCI, A.; CLAMOR, B.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GRÀCIA, F. (2000): Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos recolectados a cotas inferiores al actual nivel marino en cuevas costeras de Mallorca (España). Aportaciones a la construcción de una curva eustática detallada de los últimos 300 ka para el Mediterráneo occidental. *Endins*, 23: 59-71. Palma.
- 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.
- TUCCIMEI, P.; ONAC, B.P.; DORALE, J.A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; SPADA, G.; RUGGIERI, G. & MUCEDDA, M. (2012): Decoding last interglacial sea-level variations in the western Mediterranean using speleothem encrustations from coastal caves in Mallorca and Sardinia: a field data - model comparison. *Quaternary International*, 262: 56-64.
- 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.
- 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.
- VESICA, P.L.; TUCCIMEI, P.; TURI, B.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2000): Late Pleistocene paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca, Spain. *Quaternary Science Reviews*, 19: 865-879. Oxford, U.K.
- VICENS, D. (2015): *El registre paleontològic dels dipòsits litorals quaternaris a l'illa de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània occidental)*. Tesi Doctoral. Programa de Doctorat de Geografia, Universitat de les Illes Balears. 985 pàgs. Inèdit.
- VICENS, D.; GRÀCIA, F. & GINÉS, A. (2012): Quaternary beach deposits in Mallorca: paleontological and geomorphological data. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJÓL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 55-83. Palma.
- WAELEBROECK, C.; LABEYRIE, L.; MICHEL, E.; DUPLESSY, J.C.; McMANUS, J.F.; LAMBECK, K.; BALBON, E. & LABRACHERIE, M. (2002): Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 21: 295-305.



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>