

Los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras de Mallorca: su contribución al estudio del Cuaternario

JOAQUÍN GINÉS 1, 2, PAOLA TUCCIMEI 3, 4, JOAN J. FORNÓS 1, ANGEL GINÉS 2, 5, FRANCESC GRÀCIA 6 Y PIERLUIGI VESICA 7

Els espeleotemes freàtics de les coves costaneres de Mallorca: la seva contribució a l'estudi del Quaternari

INTRODUCCIÓ

La riquesa de l'endocarst de Mallorca no es limita a l'abundància de cavitats subterrànies i als seus destacables trets morfològics, sinó que s'esten així mateix a interessants qüestions relacionades amb l'àmbit de la geocronolo-

gia dels temps quaternaris. L'actuació de la morfogènesi pròpia dels terrenys calcaris, interferint-se i solapant-se amb la dinàmica associada a la línia de costa, origina peculiars registres d'esdeveniments geomòrfics, els quals han resultat condicionats de manera decisiva per les fluctuacions del nivell marí ocorregudes durant el Pleistocè i l'Holocè.

Ens ocuparem en aquestes pàgines d'un particular registre cronoestratigràfic i paleoclimàtic, totalment específic de les coves litorals. Es tracta dels espeleotemes freàtics existents a l'endocarst costaner de Mallorca, dipòsits que proporcionen valuoses informacions sobre la història del nivell de la Mediterrània i el clima al llarg del Quaternari. D'aquesta forma, l'interès de les cavitats càrstiques transcendeix més enllà del camp estrictament geomorfològic, per assolir de ple qüestions de major actualitat tals com la variabilitat climàtica natural, anterior a les influències antròpiques actuals.

- 1 Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca.
- 2 Grup Espeleològic EST, Palma de Mallorca.
- 3 Dipartimento di Scienze Geologiche, Università "Roma Tre", Roma, Italia.
- 4 C.S. Quaternario ed Evoluzione Ambientale, CNR, Università "La Sapienza", Roma, Italia.
- 5 Museu Balear de Ciències Naturals, Sóller, Mallorca.
- 6 Grup Nord de Mallorca, Pollença, Mallorca.
- 7 Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali, CNR, Roma, Italia.

Cueva	Muestra	Altimetria (m)
Cueva de la Cruz	1001	+10
	1002	+10
Cueva de la Cruz	1003	+10
	1004	+10
Cueva de la Cruz	1005	+10
	1006	+10
Cueva de la Cruz	1007	+10
	1008	+10
Cueva de la Cruz	1009	+10
	1010	+10
Cueva de la Cruz	1011	+10
	1012	+10
Cueva de la Cruz	1013	+10
	1014	+10
Cueva de la Cruz	1015	+10
	1016	+10
Cueva de la Cruz	1017	+10
	1018	+10
Cueva de la Cruz	1019	+10
	1020	+10
Cueva de la Cruz	1021	+10
	1022	+10
Cueva de la Cruz	1023	+10
	1024	+10
Cueva de la Cruz	1025	+10
	1026	+10
Cueva de la Cruz	1027	+10
	1028	+10
Cueva de la Cruz	1029	+10
	1030	+10
Cueva de la Cruz	1031	+10
	1032	+10
Cueva de la Cruz	1033	+10
	1034	+10
Cueva de la Cruz	1035	+10
	1036	+10
Cueva de la Cruz	1037	+10
	1038	+10
Cueva de la Cruz	1039	+10
	1040	+10
Cueva de la Cruz	1041	+10
	1042	+10
Cueva de la Cruz	1043	+10
	1044	+10
Cueva de la Cruz	1045	+10
	1046	+10
Cueva de la Cruz	1047	+10
	1048	+10
Cueva de la Cruz	1049	+10
	1050	+10
Cueva de la Cruz	1051	+10
	1052	+10
Cueva de la Cruz	1053	+10
	1054	+10
Cueva de la Cruz	1055	+10
	1056	+10
Cueva de la Cruz	1057	+10
	1058	+10
Cueva de la Cruz	1059	+10
	1060	+10
Cueva de la Cruz	1061	+10
	1062	+10
Cueva de la Cruz	1063	+10
	1064	+10
Cueva de la Cruz	1065	+10
	1066	+10
Cueva de la Cruz	1067	+10
	1068	+10
Cueva de la Cruz	1069	+10
	1070	+10
Cueva de la Cruz	1071	+10
	1072	+10
Cueva de la Cruz	1073	+10
	1074	+10
Cueva de la Cruz	1075	+10
	1076	+10
Cueva de la Cruz	1077	+10
	1078	+10
Cueva de la Cruz	1079	+10
	1080	+10
Cueva de la Cruz	1081	+10
	1082	+10
Cueva de la Cruz	1083	+10
	1084	+10
Cueva de la Cruz	1085	+10
	1086	+10
Cueva de la Cruz	1087	+10
	1088	+10
Cueva de la Cruz	1089	+10
	1090	+10
Cueva de la Cruz	1091	+10
	1092	+10
Cueva de la Cruz	1093	+10
	1094	+10
Cueva de la Cruz	1095	+10
	1096	+10
Cueva de la Cruz	1097	+10
	1098	+10
Cueva de la Cruz	1099	+10
	1100	+10

ABSTRACT

In coastal caves of Mallorca, phreatic speleothems represent a very valuable source of information for a better knowledge of recent sea-level history. Several high paleosea-levels corresponding to interglacial events are recorded as conspicuous alignments of phreatic speleothems, perched at different heights inside littoral caves of the island. In the same way, some regressive episodes of the Mediterranean Sea appear documented as deposits of these characteristics located at various depths below the present sea-level.

Abundant samples of phreatic speleothems, collected between +40 metres above and -23 metres below the current sea-level, have been dated by means of Th/U method. Ages obtained range from 3.9 ka to more than 350 ka BP, accurately reflecting a complex succession of shifts in the sea-level occurred during Middle and Upper Pleistocene and Holocene. Recorded high sea-stands clearly correspond to warm isotopic stages 1, 5 and 7; on the other hand, regressive stabilizations associated to cold stages

Tabla I: Resultados de las dataciones absolutas, efectuadas mediante el método Th/U, de espeleotemas freáticos procedentes de cuevas costeras del levante de Mallorca. Se indica asimismo la altimetría a la cual ha sido recolectada cada una de las muestras.

Taula I: Resultats de les datacions absolutes, efectuades mitjançant el mètode Th/U, d'espeleotemes freàtics procedents de coves costaneres del llevant de Mallorca. S'indica així mateix l'altimetria a la qual ha estat recolectada cadascuna de les mostres.

Table I: Results of Th/U absolute datings corresponding to phreatic speleothems from coastal caves in eastern Mallorca. The elevation at which each sample was collected is also indicated in this table.

ELS ESPELEOTEMES FREÀTICS MALLORQUINS

Un dels trets més definitoris de l'endocarst costaner de Mallorca (GINÉS & GINÉS, 1987; GINÉS, 1995b) està constituït per l'abundància de llacs d'aigües salabroses, que inunden les cotes inferiors de les cavitats (Foto 1) en correspondència altimètrica i hidrodinàmica amb el present nivell de la Mediterrània. El control marí de la disposició i del comportament hidrològic d'aquests llacs és fa ben palès, ja que experimenten fluctuacions en el seu nivell, de periodicitat diària, corresponents a oscil·lacions menors d'origen mareal i/o baromètric.

Dins aquest particular ambient geoquímic de caràcter freàtic, caracteritzat per un més o manco elevat contingut en clorurs, avui en dia es pot constatar la generació de precipitats de carbonats (revestiments cristal·lins en bandes horitzontals, làmines de calcita flotant, etc.) associats a la superfície dels esmentats llacs subterranis (POMAR et al., 1976, 1979). De la mateixa manera que aquests espeleotemes freàtics subactuals evidencien la present posició del

nivell marí, antigues cristal·litzacions similars —situades a cotes diverses, tant positives com negatives— resulten un excel·lent registre de l'altimetria de pretèrits línies de costa (GINÉS & GINÉS, 1974; GINÉS et al., 1981a; POMAR et al., 1987; GINÉS, 2000; TUCCIMEI et al., 2000), relacionades amb les fluctuacions glacioeustàtiques pleistocèniques (Figura 1).

En termes generals els espeleotemes freàtics existents en les coves de Mallorca es presenten com sobrecreixements cristal·lins, estrictament horitzontals, desenvolupats sobre les parets de les cavitats o qualsevol altre suport (espeleotemes aeris...) que penetri per davall de la superfície dels llacs subterranis litorals, actuals o pretèrits (Foto 2). La morfologia d'aquests revestiments és boteruda, corresponent la seva màxima gruixa al nivell més freqüent de la superfície freàtica; l'esmentat engrossiment màxim documenta de manera precisa el nivell mitjà de les aigües marines en el moment de la seva formació. La varietat morfològica d'aquesta categoria d'espeleotemes és enorme (GINÉS et al., 1981b; GINÉS, 1995a), resultant força influenciada per la geometria del substrat que actua com a suport al sobrecreixement freàtic. En aquest sentit, són

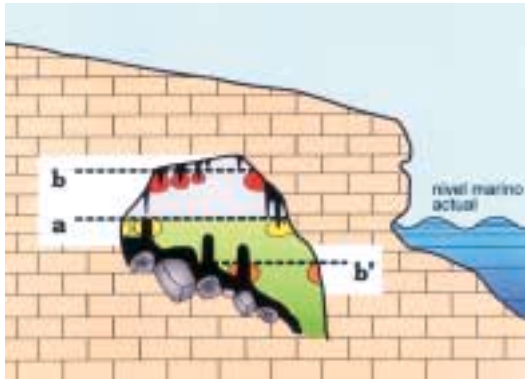


Figura 1: Representación esquemática idealizada del endokarst litoral en el levante de Mallorca. Obsérvese la presencia de espeleotemas freáticos relacionados con el presente nivel marino (a), así como con antiguos niveles transgresivos del Mediterráneo (b). Se han estudiado también abundantes ejemplares de este tipo de cristalizaciones sumergidas hoy en día por debajo de la superficie de los lagos subterráneos (b'), correspondientes a eventos regresivos de signo frío.

Figura 1: Representació esquemàtica idealitzada de l'endokarst litoral en el llevant de Mallorca. Observi's la presència d'espeleotemes freàtics relacionats amb el present nivell marí (a), així com amb antics nivells transgressius de la Mediterrània (b). S'han estudiat també abundants exemplars d'aquest tipus de cristallitzacions submergides avui en dia per sota la superfície dels llacs subterranis (b'), corresponents a episodis regressius de signe fred.

Figure 1: Schematic representation of littoral endokarst in eastern Mallorca outlined in an ideal cross-section. Note the presence of phreatic speleothems related to present Mediterranean sea-level (a) as well as to higher interglacial paleosea-levels (b). Abundant samples of phreatic crystallizations submerged nowadays below the water-plane of cave ponds have also been investigated (b'), these ones corresponding to cold regressive events.

4, 6 and 8 have been recognized, together with several abrupt sea-lowerings intercalated within isotopic stage 5 (last interglacial).

The geochronological data obtained allow us to attempt the reconstruction of an eustatic curve for the last 300 ka, valid for the Western Mediterranean basin. This curve shows significant information between 60 ka and 150 ka BP (isotopic stages 4 and 5) and reveals the existence of sea-level fluctuations greater than 18 metres in amplitude within time spans less than 10 ka. The main results of investigations already published by the authors on this subject are summarized along this paper.

INTRODUCCIÓN

La riqueza del endokarst de Mallorca no se limita a la abundancia de cavidades subterráneas y a lo destacable de sus rasgos morfológicos, sino que se extiende a su vez a interesantes cuestiones relacionadas con el ámbito de la geocronología de los tiempos cuaternarios. La actuación de la morfogénesis propia de los terrenos calcáreos, solapándose e interfiriéndose con la dinámica asociada a la línea de costa, origina peculiares registros de acontecimientos geomórficos, los cuales han resultado condicionados de manera decisiva por las fluctuaciones del nivel marino ocurridas durante el Pleistoceno y Holoceno.

Nos ocuparemos en estas páginas de un particular registro cronoestratigráfico y paleoclimático, que sólo se encuentra representado en cuevas litorales. Se trata de los espeleotemas freáticos existentes en el endokarst costero de Mallorca, depósitos que proporcionan valiosas informaciones sobre la historia del nivel del Mediterráneo y el clima a lo largo del Cuaternario. De esta forma, el interés de las cavidades kársticas trasciende más allá del campo estrictamente geomorfológico para alcanzar de lleno cuestiones de mucha actualidad, tales como la variabilidad climática natural anterior a las influencias antrópicas actuales.

molt abundants i cridaneres les formes zenitals d'aspecte globular (Foto 3), consistents en fines estalactites vadoses aegenerades en els episodis de signe regressiuæ recobertes per precipitats freàtics de carbonats, originats durant les pujades relatives del nivell marí. Els molt variats sobrecreixements al·ludits delimiten, de manera en general ben evident, bandes rigorosament horitzontals de cristallitzacions, la correspondència altimètrica de les quals amb el nivell marí contemporani a la gènesi dels dipòsits és la clau d'aquestes investigacions (GINÉS & GINÉS, 1974, 1995; GINÉS et al., 1981a).

Fins al moment s'han reconegut almanco 30 paleonivells d'espeleotemes freàtics situats a cotes molt diverses, incloses entre +46 metres s.n.m. i -23 metres per sota el ±0 actual. Les alineacions d'aquest tipus d'espeleotemes localitzades a cotes positives enregistren pics transgressius associats a esdeveniments de signe càlid, mentre que els especimens recol·lectats per davall del present nivell marí (Foto 4) corresponen a episodis regressius de relatiu caràcter fred. La recol·lecció de mostres, en les zones submergides de determinades cavitats litorals, ha estat possible gràcies a la importància assolida actualment per les explora-

cions dels espeleobussejadors mallorquins (GRÀCIA et al., 1998a, 1998b, 2000); aquestes activitats han permès tenir accés a un vessant poc conegut dins l'estudi de les fluctuacions eustàtiques de la Mediterrània, com són les pulsacions negatives lligades a esdeveniments climàtics de signe fred.

Fent referència breument als aspectes mineralògics i cristal·logràfics dels espeleotemes freàtics, es pot afirmar que la calcita i, en segon terme, l'aragonita són les mineralogies dominants en aquests dipòsits. En particular, les cristallitzacions d'aragonita no resulten rares en els dipòsits situats per damunt de l'actual nivell de la mar; amb tota probabilitat, la mineralogia aragonítica podria tenir un clar significat paleoclimàtic (GINÉS et al., 1981b; POMAR et al., 1987), essent freqüent en espeleotemes pertanyents a l'últim interglacial (estadi isotòpic 5) considerat en un sentit ample. L'estructura cristal·lina d'aquests espeleotemes és bastant variada i es tradueix en aparences morfològiques externes molt diverses, condicionades per la mida i l'hàbit dels cristalls així com per les diferents fàbriques en que apareixen organitzats (POMAR et al., 1976; GINÉS, 2000). En general, les cristallitzacions aragonítiques es caracterit-

LOS ESPELEOTEMAS FREÁTICOS MALLORQUINES

Uno de los rasgos más definitorios del endokarst costero de Mallorca (GINÉS & GINÉS, 1987; GINÉS, 1995b) está constituido por la abundancia de lagos de aguas salobres, que inundan las cotas inferiores de las cavidades (Foto 1) en correspondencia altimétrica e hidrodinámica con el presente nivel del Mediterráneo. El control marino de la posición y del comportamiento hidrológico de estos lagos es bien patente, ya que experimentan fluctuaciones en su nivel periódicamente, correspondientes a oscilaciones menores de origen mareal y/o barométrico.

En este particular ambiente geoquímico de carácter freático, caracterizado por un más o menos elevado contenido en cloruros, se puede constatar hoy en día la generación de precipitados de carbonatos (revestimientos cristalinos en bandas horizontales, láminas de calcita flotante, etc.) asociados a la superficie de los mencionados lagos subterráneos (POMAR et al., 1976, 1979). Del mismo modo que estos espeleotemas freáticos subactuales evidencian la presente posición del nivel marino, antiguas cristalizaciones similares —situadas a cotas diversas, tanto positivas como negativas (Figura 1)— resultan un excelente registro de la altimetría de pretéritas líneas de costa, relacionadas con las fluctuaciones glacioeustáticas pleistocénicas (GINÉS & GINÉS, 1974; GINÉS et al., 1981a; POMAR et al., 1987; GINÉS, 2000; TUCCIMEI et al., 2000).

En términos generales los espeleotemas freáticos existentes en las cuevas de Mallorca se presentan como sobrecrecimientos cristalinos, estrictamente horizontales, desarrollados sobre las paredes de las cavidades o cualquier otro soporte (espeleotemas aéreos...) que penetre por debajo de la superficie de los lagos subterráneos litorales, actuales o pretéritos (Foto 2). La morfología de estos revestimientos es abultada, correspondiendo su máximo grosor al nivel más frecuente de la superficie freática; dicho engrosamiento máximo documenta de manera precisa el nivel medio de las aguas marinas en el momento de su formación. La variedad morfológica de esta categoría de espeleotemas es enorme (GINÉS et al., 1981b; GINÉS, 1995a), resultando bastante influenciada por la geometría del sustrato que actúa de soporte al sobrecrecimiento freático. En este sentido, son muy abundantes y llamativas las formas cenitales de aspecto globular (Foto 3), consistentes en finas estalactitas vadosas —generadas en



Figura 2: Mapa de situación de las cuevas investigadas que albergan espeleotemas freáticos.

Figura 2: Mapa de localització de les coves investigades que contenen espeleotemes freàtics.

Figure 2: Location map of the caves containing the investigated phreatic speleothems.

BA: Cova de na Barxa; MI: Cova de na Mitjana; PE: Coves Petites; DI: Cova del Dimoni; DR: Coves del Drac; PO: Cova des Pont; PI: Coves del Pirata; FA: Cova de Cala Falcó; VA: Cova de Cala Varques "A"; VB: Cova de Cala Varques "B"; GL: Cova de sa Gleda; SE: Cova des Serral; PS: Cova den Passol; CS: Cova des Drac de Cala Santanyi.

zen per presentar superfícies arrodonides i llises, associades a l'hàbit acicular sovint observable en aquesta mineralogia (Foto 5); contràriament, els espeleotemes de calcita són molt més heterogenis, amb textures que abracen des de superfícies rugoses fins morfologies externes macrocristal·línies (Foto 6), passant per espeleotemes constituïts per delicades projeccions d'aspecte coral·loide.

LES DATACIONS TH/U: APORTACIONS AL CONEIXEMENT DE L'EUSTÀSIA PLEISTOCÈNICA A LA MEDITERRÀNIA OCCIDENTAL

El nucli de les investigacions exposades en aquestes pàgines està constituït per diversos programes de datacions radiomètriques (mètode Th/U), empresos des del començament de la dècada dels anys 80 (HENNIG et al., 1981; GINÉS & GINÉS, 1993; GINÉS, 2000; TUCCIMEI et al.,

1998, 2000; VESICA et al., 2000). La consecució de cronologies absolutes fiables, dels espeleotemes freàtics mostrejats, serviria de base per a reconstruir en detall la història del nivell de la Mediterrània durant els darrers 350 ka, lapse de temps que es correspon al rang d'aplicabilitat de la tècnica radiomètrica emprada.

Es varen seleccionar per a la seva datació 38 mostres d'espeleotemes freàtics, procedents de 14 coves costaneres del llevant de Mallorca, relacionats tots ells amb antigues estabilitzacions de la Mediterrània a cotes tant superiors com inferiors a l'actual nivell marí (des de +40 metres per sobre, fins a -23 metres de profunditat). La majoria de les cavitats investigades es desenvolupen en les calcarenites postorogèniques del Miocè superior que conformen la plataforma del Migjorn, la qual s'estén al llarg del sud i sud-est de l'illa. Tan sols tres de les cavernes visitades —Cova de na Barxa, Cova de na Mitjana i Coves Petites— es localitzen en les calcàries juràsiques plegades, que integren l'àrea muntanyenca de les Serres de Llevant (Figura 2). Les dades referents a les coves estudiades, les mostres recol·lectades i les cotes dels paleonivells marins representats en cada localitat, apareixen reflectides a la Taula I.

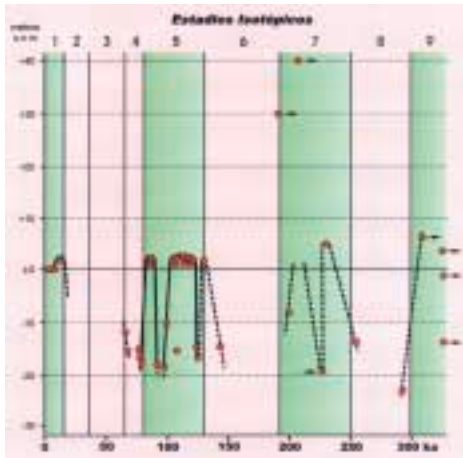


Figura 3: Corba eustàtica simplificada del Mediterràneo occidental, corresponent a los últims 300 ka, deduïda a partir de las dataciones Th/U de espeleotemas freàtics de la costa oriental de Mallorca. Una interpretació detallada del últim interglacial se inclueix en la Figura 4. En ordenades apareix representada l'altitud a la qual se troben els diferents paleonivells muestreados. Las àrees coloreades en verd señalan aquells estadi isotòpic que constitueixen esdeveniments climàtics de signe càlid.

Figura 3: Corba eustàtica simplificada de la Mediterrània occidental, corresponent als últims 300 ka, deduïda a partir de les datacions Th/U d'espeleotemes freàtics de la costa oriental de Mallorca. Una interpretació detallada de l'últim interglacial s'inclou en la Figura 4. En ordenades es representa l'altitud a la qual es troben els diferents paleonivells mostrejats. S'han graficat acolorides en verd aquells estadi isotòpic que constitueixen esdeveniments climàtics de signe càlid.

Figure 3: Simplified eustatic curve of western Mediterranean, corresponding to the last 300 ka, deduced from Th/U datings of phreatic speleothems collected on the eastern coast of Mallorca. A detailed interpretation of last interglacial is included in

Figure 4. The y-axis represents the elevations at which the different paleolevel samples were collected. Green areas correspond to warm climate isotopic stages.

los episodios de signo regresivoæ recubiertas por precipitados freàtics de carbonatos, originados durante ascensos relativos del nivel marino. Los sobrecrecimientos variopintos aludidos delimitan, de manera por lo general bien evidente, bandas rigurosamente horizontales de cristalizaciones, cuya correspondencia altimétrica con respecto al nivel marino contemporáneo a su génesis es la clave de estas investigaciones (GINÉS & GINÉS, 1974, 1995; GINÉS et al., 1981a).

Por el momento se han reconocido al menos 30 paleoniveles de espeleotemas freàtics situados a cotas muy diversas, que van desde +46 metros s.n.m. hasta -23 metros por debajo del ±0 actual. Las alineaciones de este tipo de espeleotemas localizadas a cotas positivas registran picos transgresivos asociados a eventos de signo càlid, mientras que los especímenes recolectados bajo el presente nivel marino (Foto 4) corresponden a episodios regresivos de relativo carácter frío. La recolección de muestras, en las zonas sumergidas de determinadas cavidades litorales, ha sido posible gracias a la importancia alcanzada en la actualidad por las exploraciones de los espeleobuceadores mallorquines (GRÀCIA et al., 1998a, 1998b, 2000); estas actividades han permitido tener acceso a una vertiente poco conocida dentro del estudio de las fluctuaciones eustáticas del Mediterràneo, como son las pulsaciones negativas ligadas a acontecimientos climàtics de signo frío.

Haciendo referencia brevemente a los aspectos mineralógicos y cristalográficos de los espeleotemas freàtics, se puede afirmar que la calcita y, en segundo término, el aragonito son las mineralogías dominantes en estos depósitos. En particular, las cristalizaciones de aragonito no son raras en los depósitos situados por encima del actual nivel del mar; con toda probabilidad, la mineralogía aragonítica podría tener un claro significado paleoclimàtico (GINÉS et al., 1981b; POMAR et al., 1987), siendo frecuente en espeleotemas pertenecientes al último interglacial (estadio isotòpic 5) considerado en un sentido amplio. La estructura cristalina de estos espeleotemas es bastante variada y se traduce en apariencias morfológicas externas muy diversas, condicionadas por el tamaño y el hábito de los cristales así como por las diferentes fábricas en que éstos aparecen organizados (POMAR et al., 1976; GINÉS, 2000). En general, las cristalizaciones aragoníticas se caracterizan por presentar superficies redondeadas y lisas, asociadas al hábito acicular observable con frecuencia en esta mineralogía (Foto 5); por el contrario, los espeleotemas de calcita son mucho más hete-

Les datacions de les mostres s'han realitzat mitjançant el mètode de les sèries de l'Urani (Th/U), utilitzant tècniques tant d'espectrometria alfa com d'espectrometria de massa. Les edats absolutes calculades a partir dels resultats analítics es troben també recopilades a la Taula 1. Les edats obtingudes van des de 3,9 ka BP, es tracta d'una cristallització clarament subactual, fins >350 ka BP, arribant ja als límits de resolució del mètode (estadi isotòpic 9, com a mínim).

Observant els resultats més en detall, podem constatar que estan ben representades (amb un total de 10 datacions) diverses estabilitzacions marines altes a edats de 83 ka, 107 ka i 117-130 ka BP, cronologies que es correlacionen molt bé amb les edats usualment assignades als subestadis càlids 5a, 5c i 5e del registre isotòpic marí (SHACKLETON & OPDYKE, 1973). Aquestes dades documenten almanco tres estabilitzacions transgressives de la Mediterrània a altures compreses entre +1,4 i +2,5 metres s.n.m., integrades dins l'últim gran esdeveniment interglacial, de les quals ens ocuparem més endavant amb certa extensió.

La resta de mostres relacionades amb episodis climà-

tics de signe càlid aporten informacions bastant fragmentàries i no massa determinants, podent ser assignades als estadi isotòpic 7, 9 i fins i tot anteriors (GINÉS & GINÉS, 1993). Cal ressenyar l'existència de 3 mostres de cronologia postglacial (estadi 1), que donen edats sempre inferiors als 6,6 ka BP.

Són abundants (17 mostres) les datacions portades a terme a partir d'espeleotemes freàtics relacionats amb pulsacions regressives del nivell marí, atribuïbles des del punt de vista cronològic als estadi 4, 6 i 8, de signe fred, del registre d'isòtops d'oxigen. En particular, estan ben representats diversos paleonivells regressius associats a l'estadi isotòpic 4, el qual suposaria ja la transició cap a unes condicions climàtiques que marcaran a la llarga l'inici de la darrera glaciació. També es constaten un bon nombre de datacions que documenten l'existència de pulsacions negatives corresponents a diversos subestadis, de relatiu carácter fred, que es distingeixen habitualment dins del darrer interglacial (estadi 5).

La integració de totes les informacions cronològiques aportades pels espeleotemes freàtics, que han estat datats fins el dia d'avui, fa possible assajar la construcció d'una

rogéneos, con texturas que abarcan desde superficies rugosas hasta morfologías externas macrocristalinas (Foto 6), pasando por espeleotemas constituidos por delicadas proyecciones de aspecto coraloides.

LAS DATACIONES TH/U: APORTACIONES AL CONOCIMIENTO DE LA EUSTASIA PLEISTOCÉNICA EN EL MEDITERRÁNEO OCCIDENTAL

El núcleo de las investigaciones expuestas en estas páginas está constituido por diversos programas de dataciones radiométricas (método Th/U), emprendidos desde comienzos de la década de los años 80 (HENNIG et al., 1981; GINÉS & GINÉS, 1993; GINÉS, 2000; TUCCIMEI et al., 1998, 2000; VESICA et al., 2000). La consecución de cronologías absolutas fiables, de los espeleotemas freáticos muestreados, serviría de base para reconstruir en detalle la historia del nivel del Mediterráneo durante los últimos 350 ka, lapso de tiempo que corresponde al rango de aplicabilidad de la técnica radiométrica empleada.

Se seleccionaron para su datación 38 muestras de espeleotemas freáticos, procedentes de 14 cuevas costeras del levante de Mallorca, relacionados todos ellos con antiguas estabilizaciones del Mediterráneo a cotas tanto superiores como inferiores al actual del mar (desde +40 metros por encima, hasta -23 metros de profundidad). La mayoría de las cavidades investigadas se desarrollan en las calcarenitas postorogénicas del Mioceno superior que conforman la plataforma del Migjorn, la cual se extiende a lo largo del sur y sureste de la isla. Tan sólo tres de las cavernas visitadas —Cova de na Barxa, Cova de na Mitjana y Coves Petites— están localizadas en las calizas jurásicas plegadas, que integran el área montañosa de las Serres de Llevant (Figura 2). Los datos referentes a las cuevas estudiadas, las muestras obtenidas y las cotas de los paleoniveles marinos representados en cada localidad, aparecen reflejados en la Tabla I.

Las dataciones de las muestras han sido realizadas mediante el método de las series del Uranio (Th/U), utilizando técnicas tanto de espectrometría alfa

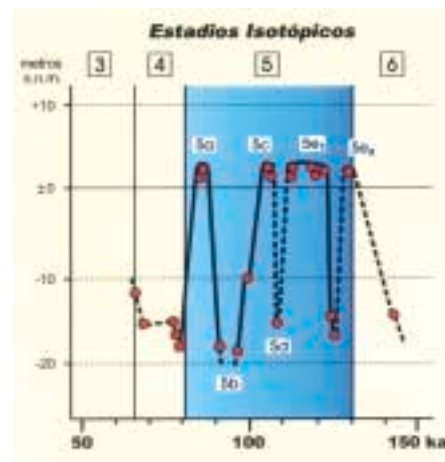


Figura 4: Curva eustática para el último interglacial, deducida a partir de las dataciones Th/U de espeleotemas freáticos de cuevas costeras de Mallorca. En ordenadas aparece representada la altitud a la cual se encuentran los distintos paleoniveles muestreados. El área coloreada en azul señala el estadio climático correspondiente al último gran evento interglacial.

Figura 4: Corba eustàtica per a l'últim interglacial, deducida a partir de les datacions Th/U d'espeleotemes freàtics de coves costaneres mallorquines. En ordenades es representa l'altitud a la qual es troben els diferents paleonivells mostrejats. S'ha acolorit en blau l'estadi climàtic corresponent a l'últim gran esdeveniment interglacial.

Figure 4: Eustatic curve of the last interglacial period, deduced from Th/U datings of phreatic speleothems from Mallorcan coastal caves. The y-axis represents the elevations at which the different paleolevel samples were collected. Blue area corresponds to the last interglacial climatic event.

corba eustàtica detallada vàlida per al Pleistocè mitjà i superior de Mallorca. Amb aquesta finalitat, i per tal de facilitar un primer apropament a la qüestió, s'ha confeccionat la Figura 3; aquesta gràfica aglutina les dades altimètriques i cronològiques subministrades per totes les mostres estudiades, dins dels diferents programes de datació que hem portat a terme en cavitats del litoral oriental de l'illa. L'esmentada figura posa de manifest una complicada successió de paleoniveles marins enregistrats a cotes negatives, en correspondència amb estadis isotòpics de caràcter fred (estadis 4, 6 i 8), alternant-se amb altres antics nivells de la mar, a cotes superiors a l'actual ± 0 , associats a esdeveniments climàtics de signe càlid (estadis 1, 5, 7 i 9). No obstant això, aquesta pauta general es veu interferida per la presència (a l'estadi isotòpic 5) de diverses pulsacions regressives, relacionades amb alguns dels subestadis que avui en dia es distingeixen al llarg de l'últim interglacial. Es descriuen a continuació els trets destacables de la corba eustàtica aportada (Figura 3).

Tot seguint un ordre d'antiguitat creixent, tenim documentat un nivell de la Mediterrània similar a l'actual entre 3,9 i 5,4 ka, al qual seguiria un màxim postglacial a +2,1

metres en torn als 6,6 ka BP. Aquest màxim es correspondria amb la transgressió del Versilià, també conegut com a Flandrià (estadi 1).

Dels moments àlgids de la glaciació més recent no es disposa de dades, ja que les pròximes mostres analitzades se situen a l'estadi 4 —amb edats compreses entre 63,7 i 79,6 ka— enregistrant fins a cinc estabilitzacions de la mar a diferents profunditats entre -12 i -17 metres (veure Figura 4). S'arriba així al darrer i complex gran esdeveniment interglacial (estadi 5), en el qual és factible distingir almanco tres pics transgressius juntament amb un mínim de dues pulsacions regressives; aquest episodi s'associaria amb els pisos característics del Tirrenià, entès en un sentit ample que inclouria els dipòsits amb fauna termòfila de l'Eutirrenià i Neotirrenià (CUERDA, 1975). Donada la complexitat i l'interès d'aquest esdeveniment climàtic, ens ocuparem d'ell més endavant, procedint a una discussió detallada dels subestadis individualitzables.

A l'estadi 6, que representa un episodi de signe fred, es troba documentada una regressió d'un mínim de 14 metres amb una edat de 147,4 ka. Aquesta mostra es podria relacionar amb la fase final d'aquest esdeveniment fred, i la



Foto 1: Aspecto de uno de los lagos salobres existentes en las Coves del Drac (Manacor). Obsérvese la presencia de una alineación de espeleotemas freáticos antiguos asituados a +1,2 metros por encima de la superficie del lago, así como un sobrecrecimiento cristalino subactual visible algo por debajo del plano de las aguas (pequeña columna en la mitad derecha de la imagen).

Foto 1: Aspecte d'un dels llacs salabrosos existents a les Coves del Drac (Manacor). Observi's la presència d'una alineació d'espeleotemes freàtics antics asituats a +1,2 metres per sobre de la superfície del llac, així com un sobrecreixement cristal·lí subactual visible lleugerament per sota del pla de les aigües (petita columna a la meitat dreta de la imatge).

Photo 1: One of the numerous brackish ponds existing in Coves del Drac (Manacor). A phreatic speleothems paleolevel is to be worth observed at +1,2 metres above the pool surface, as well as a subactual crystalline overgrowth visible slightly below the water-table (small column in the right half of the photo).

como de espectrometría de masa. Las edades absolutas calculadas a partir de los resultados analíticos se encuentran también recopiladas en la mencionada Tabla I. Las edades obtenidas van desde 3,9 ka BP a se trata de una cristalización claramente subactual hasta >350 ka BP, alcanzando ya los límites de resolución del método (estadio isotópico 9, como mínimo).

Observando los resultados más en detalle, podemos constatar que están bien representadas (con un total de 10 dataciones) diversas estabilizaciones marinas altas a edades de 83 ka, 107 ka y 117-130 ka BP, cronologías que se correlacionan muy bien con las edades usualmente asignadas a los subestadios cálidos 5a, 5c y 5e del registro isotópico marino (SHACKLETON & OPDYKE, 1973). Estos datos documentan al menos tres estabilizaciones transgresivas del Mediterráneo a alturas comprendidas entre +1,4 y +2,5 metros s.n.m., integradas dentro del último gran acontecimiento interglacial, de las cuales nos ocuparemos más adelante con cierta extensión.

El resto de muestras relacionadas con episodios climáticos de signo cálido aportan informaciones bastante fragmentarias y no demasiado determinantes, pudiendo ser asignadas a los estadios isotópicos 7, 9 e incluso anteriores (GINÉS & GINÉS, 1993). Es necesario reseñar la existencia de 3 muestras de cronología postglacial (estadio 1), que dan edades siempre inferiores a los 6,6 ka BP.

Son abundantes (17 muestras) las dataciones llevadas a cabo a partir de espeleotemas freáticos relacionados con pulsaciones regresivas del nivel marino, atribuibles desde el punto de vista cronológico a los estadios 4, 6 y 8 del signo frío del registro de isótopos de oxígeno. En particular, están bien representados diversos paleoniveles regresivos asociados al estadio isotópico 4, el cual supone ya la transición hacia unas condiciones climáticas que marcarán a la larga el inicio de la última glaciación. También se constatan un buen número de dataciones que documentan la existencia de pulsaciones negativas correspondientes a varios subestadios de relativo carácter frío, que se distinguen habitualmente dentro del último interglacial (estadio 5).

La integración de todas las informaciones cronológicas aportadas por los espeleotemas freáticos, que han sido datados hasta el día de hoy, hace posible ensayar la construcción de una curva eustática detallada válida para el Pleistoceno medio y superior de Mallorca. Con esta finalidad, y con la intención de faci-

seva transició cap a les condicions climàtiques interglacials pròpies del subestadi 5e.

El següent episodi interglacial (estadi 7) està representat amb claredat tan sols per una mostra, localitzada a +4,9 metres, amb una edat de 231,9 ka; aquesta cronologia podria permetre adscriure-la a un màxim transgressiu corresponent al subestadi 7c (ZAZO, 1999). Les altres dues mostres pertanyents a aquest estadi isotòpic estan situades a cotes inferiors al nivell marí present, donant informacions menys consistents amb el caràcter càlid d'aquest estadi climàtic. La datació de 201,4 ka segurament enregistra el final del subestadi 7a, assenyalant una tendència regressiva que va deixar un paleonivell a -8 metres.

Del començament i del final de l'estadi 8 es disposa de dues datacions (260 i 288 ka BP) que denoten almenys un episodi regressiu de 23 metres de magnitud, el qual va tenir lloc durant l'esmentat estadi fred.

L'existència de set mostres amb relacions isotòpiques properes a la unitat, per a la majoria de les quals tan sols es pot indicar una edat mínima, impedeix extreure dades vàlides sobre les estabilitzacions marines que tingueren lloc amb anterioritat a l'estadi 8. L'altimetria de dos dels espele-

otemes freàtics analitzats (superior als +30 metres s.n.m.) suggereix que poguessin estar lligats a paleonivells de la mar assolits durant els estadis 9 o 11, o fins i tot en temps encara més remots del Pleistocè mitjà.

Convé ocupar-nos ara amb major deteniment de les vicissituds reflectides per la corba eustàtica en el que fa referència al complex estadi isotòpic 5, el qual representa l'últim gran esdeveniment interglacial. En la Figura 4 queda molt ben individualitzat un pic transgressiu sobre els 83 ka BP, d'un màxim de +2 metres amb respecte a l'actual nivell marí, relacionable amb el subestadi 5a que equivaldria a l'estatge conegut com a Neotirrenià o Tirrenià III (BUTZER & CUERDA, 1962; CUERDA, 1975). A l'esmentat pic l'hauria precedit una regressió d'almanco 18 metres, ocorreguda entre 91 i 100 ka, atribuïble sense problemes al subestadi 5b. Entre els 107 i 124 ka nombroses mostres enregistren un nivell marí pròxim als +2 metres s.n.m., interromput per una possible regressió de 15 metres amb una cronologia de 108,3 ka, la qual es pot assignar tentativament al subestadi 5d, estant documentada per només una datació; d'aquesta manera, les dues mostres d'antiguitat menor que la citada pulsació regressiva podrien ésser atribuïdes al subestadi

litar un primer acercamiento a la cuestión, se ha confeccionado la Figura 3; esta gráfica aglutina los datos altimétricos y cronológicos suministrados por todas las muestras estudiadas dentro de los diferentes programas de datación, que hemos llevado a término en cavidades del litoral oriental de la isla. La citada figura pone de manifiesto una complicada sucesión de paleoniveles marinos registrados a cotas negativas, en correspondencia con estadios isotópicos de carácter frío (estadios 4, 6 y 8), alternándose con otros antiguos niveles del mar, a cotas superiores al actual ± 0 , asociados a acontecimientos climáticos de signo cálido (estadios 1, 5, 7 y 9). No obstante, esta pauta general se ve interferida por la presencia (en el estadio isotópico 5) de diversas pulsaciones regresivas, relacionadas con algunos de los subestadios que hoy en día se distinguen a lo largo del último interglacial. Se describirán a continuación los rasgos destacables de la curva eustática aportada (Figura 3).

Siguiendo un orden de antigüedad creciente, tenemos documentado un nivel del Mediterráneo similar al actual entre 3,9 y 5,4 ka, al cual seguiría un máximo postglacial a +2,1 metros en torno a los 6,6 ka BP. Este máximo se correspondería con la transgresión Versiliense, también conocida como Flandriense (estadio 1).

De los momentos álgidos de la glaciación más reciente no se dispone de datos, ya que las próximas muestras analizadas se sitúan en el estadio 4 edades comprendidas entre 63,7 y 79,6 ka registrando hasta cinco estabilizaciones del mar a diferentes profundidades entre -12 y -17 metros (ver Figura 4). Se llega así al último y complejo gran evento interglacial (estadio 5), en el cual es factible distinguir al menos tres picos transgresivos junto con un mínimo de dos pulsaciones regresivas; este episodio se asociaría con los pisos característicos del Tirreniense, entendido en un sentido amplio que incluiría los depósitos con fauna termófila del Eutirreniense y Neotirreniense (CUERDA, 1975). Dada la complejidad e interés de este acontecimiento climático, nos ocuparemos de él más adelante, procediendo a una discusión detallada de los subestadios individualizables.

En el estadio 6, que representa un episodio de signo frío, se encuentra documentado un descenso del nivel marino de al menos 14 metros con una edad de 137,4 ka. Esta muestra se podría relacionar con la fase final de este evento frío, y su transición hacia las condiciones climáticas interglaciales pro-

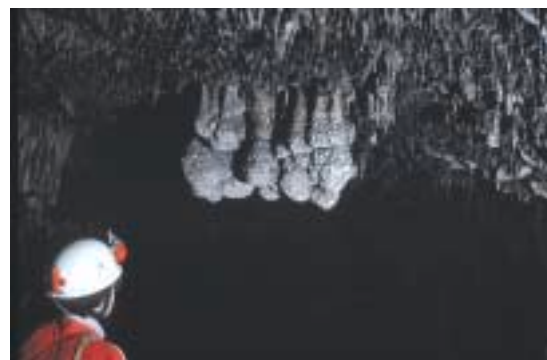


Foto 2: Espeleotemas freáticos observables en las Coves del Drac (Manacor), que registran un paleonivel del Mediterráneo a una altura aproximada de +4 metros snm.

Foto 2: Espeleotemes freàtics que s'observen a les Coves del Drac (Manacor), els quals enregistren un paleonivell de la Mediterrània a una alçada aproximada de +4 metres snm.

Photo 2: Phreatic speleothems located in Coves del Drac (Manacor) that record an ancient Mediterranean sea-stand about +4 metres asl.

5c, mentre que les datacions d'edats superiors als 110 ka entrarien ja en el subestadi 5e, que s'associa amb l'òptim climàtic del darrer interglacial.

Dins de l'últim episodi citat (subestadi 5e), al qual s'adscriuen mostres amb edats compreses entre 111 i 130 ka recol·lectades a altituds màximes de +2,5 metres s.n.m., s'observa una pulsació regressiva de 16,5 metres de magnitud esdevinguda en torn als 125 ka i documentada per dues mostres de la mateixa localitat. Es tractaria d'un descens brusc del nivell marí succeït en ple subestadi 5e, possibilitat que ja es constata en el jaciment marí mallorquí del Camp de Tir (HILLAIRE-MARCEL et al., 1996) i en altres àrees geogràfiques (NEUMANN & HEARTY, 1996; HEARTY, 1998; ZAZO, 1999); d'aquesta forma, el subestadi 5e romandria dividit en dos pics transgressius situats al voltant de 110-120 ka i 130 ka BP (que s'han assenyalat en la Figura 4 amb les etiquetes 5e1 i 5e2) separats per un breu episodi regressiu. Al voltant dels 147 ka es troba documentat un paleonivell marí, 14 metres inferior a l'actual, corresponent ja a l'acabament de l'episodi fred que antecedeix el darrer interglacial.

Les majors diferències entre les corbes eustàtiques

construïdes ara i el registre clàssic del Quaternari marí de Mallorca (CUERDA, 1975; POMAR & CUERDA, 1979) radiquen en el gran detall obtingut, sobretot pel que fa a les vicissituds experimentades pel nivell de la mar entre 60 i 150 ka BP. Així mateix, el registre estudiat no ha aportat evidències que sustentin la possibilitat d'un nivell marí superior als +2,5 metres durant l'últim interglacial.

ALGUNES DADES

PALEOCLIMÀTIQUES ADDICIONALS

Tenint en consideració que el registre constituït pels espeleotemes freàtics de les coves litorals del llevant de Mallorca es mostra extraordinàriament complet i detallat, tal i com s'ha vist en l'apartat anterior, és possible intentar establir algunes de les implicacions paleoclimàtiques que es poden desprendre de l'estudi d'aquestes peculiars i valuoses cristallitzacions de carbonats.

En aquest sentit, unes primeres informacions interessants venen proporcionades per les taxes d'ascens o des-



Foto 3: Secció longitudinal d'un espeleotema freàtic procedent de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). Consisteix en una fina estalactita aèria que se troba revestida per un precipitat aragonític d'origen freàtic. Escala gràfica = 4 cm.

Foto 3: Secció longitudinal d'un espeleotema freàtic procedent de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). Consisteix en una fina estalactita aèria que es troba revestida per un precipitat aragonític d'origen freàtic. Escala gràfica = 4 cm.

Photo 3: Longitudinal section of a phreatic speleothem from Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). It consists in a delicate aerial stalactite, coated by an aragonitic precipitate of phreatic origin. Graphic scale = 4 cm.

pias del subestadio 5e.

El siguiente episodio interglacial (estadio 7) está representado con claridad tan sólo por una muestra, localizada a +4,9 metros, con una edad de 231,9 ka; esta cronología podría permitir adscribirla a un máximo transgresivo correspondiente al subestadio 7c (ZAZO, 1999). Las otras dos muestras pertenecientes a este estadio isotópico están situadas a cotas inferiores al presente nivel marino, dando informaciones menos consistentes con el carácter cálido de este estadio climático. La datación de 201,4 ka seguramente registra el final del subestadio 7a, marcando una tendencia regresiva que dejó un paleonivel a -8 metros.

Del comienzo y del final del estadio 8 se dispone de dos dataciones (260 y 288 ka BP) que denotan al menos un episodio regresivo de 23 metros de magnitud, que tuvo lugar durante el citado estadio frío.

La existencia de siete muestras con relaciones isotópicas cercanas a la unidad, para la mayoría de las cuales sólo es posible indicar una edad mínima, impide extraer datos válidos sobre las estabilizaciones marinas que acontecieron con anterioridad al estadio 8. La altimetría de dos de los espeleotemas freáticos analizados (superior a los +30 metros s.n.m.) sugiere que pudiesen estar ligados a paleoniveles del mar alcanzados durante los estadios 9 ó 11, e incluso en tiempos todavía más remotos del Pleistoceno medio.

Conviene ocuparnos ahora con mayor detenimiento de las vicisitudes reflejadas por la curva eustática en lo que hace referencia al complejo estadio isotópico 5, que representa el último gran acontecimiento interglacial. En la Figura 4 queda muy bien individualizado un pico transgresivo sobre los 83 ka BP, de un máximo de +2 metros con respecto al actual nivel marino, relacionable con el subestadio 5a que equivaldría al piso conocido como Neotirreniense o Tirreniense III (BUTZER & CUERDA, 1962; CUERDA, 1975). El citado pico habría estado precedido por una regresión de al menos 18 metros, ocurrida entre 91 y 100 ka, atribuible sin problemas al subestadio 5b. Entre los 107 y 124 ka, numerosas muestras registran un nivel marino cercano a los +2 metros s.n.m., interrumpido por una posible regresión de 15 metros con una cronología de 108,3 ka, la cual se podría asignar de forma tentativa al subestadio 5d, estando documentada tan sólo por una datación; de esta manera, las dos muestras de antigüedad menor que la referida pulsación regresiva podrían ser atribuidas al subestadio 5c, mientras que las dataciones de edades superiores a los 110 ka entrarían ya en el

cens del nivell marí, que és possible calcular en base a les datacions dels pics transgressius i regressius recollits a la corba eustàtica detallada de la Figura 4 (veure dades numèriques a la Taula I). La quantificació del citat paràmetre dona xifres mínimes de variació del nivell marí de l'ordre de 1,5 m/ka, durant els episodis d'ascens i descens lligats a les brusques vicissituds climàtiques documentades en el nostre registre; aquesta xifra assoleix valors mitjans molt superiors, els quals se situen al voltant dels 4 m/ka. Els valors obtinguts signifiquen que importants fluctuacions del nivell de la Mediterrània, d'aproximadament 20 metres d'amplitud, han tingut lloc en lapsos de temps bastant inferiors als 10 ka. Aquestes magnituds estan en concordança amb les calculades per HARMON (1980) a les Bahames i les Bermudes, on s'han deduït valors de 3,5 a 6 m/ka, i fins i tot més alts, per a les variacions eustàtiques del Pleistocè superior en aquells arxipèlags. Per altra banda, es poden avaluar taxes d'ascens marí postglacial de l'ordre de 7,8 m/ka (DOUGLAS et al., 2001), quantia semblant als valor màxims subministrats per les datacions realitzades en les nostres campanyes.

Malgrat la rapidesa de la tendència fluctuant representa-

da pels valors exposats, els quals suposen taxes mitjanes d'ascens-descens en torn als 4 mm per any, la formació de paleonivells d'espeleotemes freàtics implica l'existència d'estabilitzacions del nivell de la mar, a una determinada cota, de durada suficient per a la deposició d'un sobrecreixement subaquàtic apreciable; la durada d'aquests episodis d'estabilitat pensam que ha de ser, almanco, d'un o uns pocs milers d'anys (TUCCIMEI et al., 2000). La pauta postulada de fluctuacions-estabilitzacions ve recolzada per la presència continuada d'un nivell marí similar al present, des de 5,4 ka BP fins el moment actual (HENNIG et al., 1981; GINÉS & GINÉS, 1993), que ha donat origen a un espectacular sobrecreixement de cristallitzacions freàtiques de gruixa decimètrica. Paleonivells semblants de morfologies boterudes —situats tant a cotes positives com negatives— requereixen doncs, per a la seva deposició, l'existència d'estabilitzacions del nivell marí que esglaonen la tendència general fluctuant descrita amb anterioritat.

Les dades disponibles sobre els estadis isotòpics 4 i 5 (recollides a la Figura 4) il·lustren molt bé el fet que la corba eustàtica, deduïble per al Pleistocè superior de Mallorca, posa de relleu un seguit de canvis paleoambientals radicals

subestadio 5e, que se associa con el óptimo climático del último interglacial.

Dentro del último episodio citado (subestadio 5e), al cual se adscriben muestras con edades comprendidas entre 111 y 130 ka recolectadas a altitudes máximas de +2,5 metros s.n.m., se observa una pulsación regresiva de 16,5 metros de magnitud ocurrida en torno a los 125 ka y documentada por dos muestras de la misma localidad. Se trataría de un descenso brusco del nivel marino sucedido en pleno subestadio 5e, posibilidad que ya se constataba en el yacimiento marino mallorquín del Camp de Tir (HILLAIRE-MARCEL et al., 1996) y en otras áreas geográficas (NEUMANN & HEARTY, 1996; HEARTY, 1998; ZAZO, 1999); de esta manera, el subestadio 5e quedaría dividido en dos picos transgresivos situados en torno de 110-120 ka y 130 ka BP (que se han señalado en la Figura 4 con las etiquetas 5e1 y 5e2) separados por un breve episodio regresivo. Alrededor de los 147 ka se encuentra documentado un paleonivel marino, 14 metros inferior al actual, correspondiente ya al final del episodio frío que antecede el último interglacial.

Las mayores diferencias entre las curvas eustáticas construidas ahora y el registro clásico del Cuaternario marino de Mallorca (CUERDA, 1975; POMAR & CUERDA, 1979) radican en el gran detalle obtenido, sobre todo en lo que concierne a las vicisitudes experimentadas por el nivel del mar entre 60 y 150 ka BP. Asimismo, el registro estudiado no aporta hasta ahora evidencias que sustenten la posibilidad de un nivel marino superior a los +2,5 metros durante el último interglacial.

ALGUNOS DATOS PALEOCLIMÁTICOS

ADICIONALES

Teniendo en consideración que el registro constituido por los espeleotemas freáticos de las cuevas litorales del levante de Mallorca se muestra tan completo y detallado —tal como se ha visto en el apartado anterior— es oportuno intentar establecer algunas implicaciones paleoclimáticas, que se pueden desprender del estudio de estas peculiares y valiosas cristalizaciones de carbonatos.

explicables en base a alternancias climáticas extraordinariamente abruptas. El bon ajustament que presenten els pics continguts en la corba eustàtica aportada, en relació amb els estadis isotòpics reconeguts en el registre marí profund (SHACKLETON & OPDYKE, 1973), confirma el caràcter glacioeustàtic de les oscil·lacions detectades al nivell de la Mediterrània —entre els 60 i els 150 ka BP— mitjançant l'estudi dels espeleotemes freàtics mallorquins.

L'amplitud de les variacions tèrmiques al llarg del lapse de temps analitzat (ROSE et al., 1999; MULLER & MacDONALD, 2000), és sens dubte prou gran (entre 8 i 12°C) per a explicar de forma satisfactòria pulsacions regressives d'almanco una vintena de metres, com les detectades en les coves litorals de l'illa; tot i això, sense excloure que en alguns dels períodes freds —en particular els estadis 4 i 5b— puguin haver-se donat regressions encara més importants que les detectades en els nostres programes de datació. El fet que no s'hagin pogut efectuar anàlisis d'isòtops estables de les mostres recol·lectades per sota del nivell marí present, impedeix donar més precisions sobre les condicions ambientals de deposició durant els episodis freds del Pleistocè superior.

Fent referència ara als espeleotemes freàtics corresponents als pics transgressius, en aquest cas sí que ha estat possible realitzar anàlisis d'isòtops estables de l'Oxigen ($\delta^{18}O$) i del Carboni ($\delta^{13}C$). Les dades analítiques obtingudes, a partir de les bandes de creixement de mostres pertanyents a l'últim interglacial, posen de manifest una evolució cap a composicions isotòpiques pesades al llarg dels subestadis de signe càlid 5a i 5e. La citada tendència és interpretada (VESICA et al., 2000) com el resultat d'una major intrusió marina en el sistema geoquímic, associada a condicions climàtiques d'aridesa creixent. Aquesta inferència paleoclimàtica qüestionaria l'assumpció habitual que relaciona —en el nostre entorn geogràfic— els moments interglacials amb esdeveniments de signe marcadament humit.

CONCLUSIONS

L'estudi dels espeleotemes freàtics es ratifica com una molt bona eina per a la investigació precisa de les variacions del nivell de la mar en el Quaternari. A més, l'obtenció



Foto 4: Espeleotemas freàtics sumergits a una profunditat de -15 metres por debajo del actual nivel marino, en la Cova des Drac de Cala Santanyi.

Foto: Robert Landreth.

Foto 4: Espeleotemes freàtics submergits a una profunditat de -15 metres per sota l'actual nivell marí, a la Cova des Drac de Cala Santanyi.

Foto: Robert Landreth.

Photo 4: Submerged phreatic speleothems in Cova des Drac de Cala Santanyi, localized -15 metres below the current sea-level.

Photo: Robert Landreth.

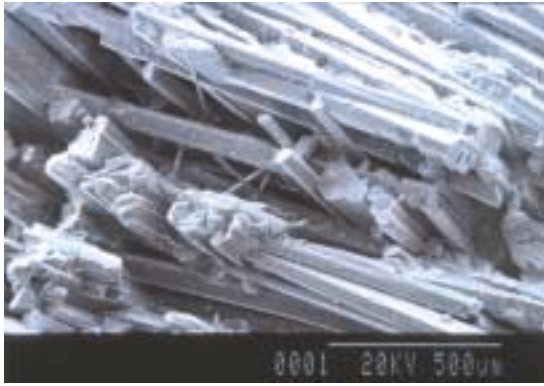


Foto 5: Electromicrofotografia SEM de un espeleotema freàtic, de mineralogia aragonítica, procedent de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor).
Foto 5: Electromicrofotografia SEM d'un espeleotema freàtic d'aragonita, recollida a la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor).
 Photo 5: SEM image of an aragonite phreatic speleothem collected in Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor).

En este sentido, unas primeras informaciones interesantes vienen proporcionadas por las tasas de ascenso o descenso del nivel marino, que pueden calcularse en base a las dataciones de los picos transgresivos y regresivos recogidos en la curva eustática detallada de la Figura 4 (ver los datos numéricos en la Tabla I). La cuantificación del citado parámetro da cifras mínimas de variación del nivel marino del orden de 1,5 m/ka, durante los episodios de ascenso y descenso ligados a las bruscas vicisitudes climáticas documentadas en nuestro registro; esta cifra alcanza valores medios mucho más altos, los cuales se sitúan alrededor de los 4 m/ka. Los valores obtenidos significan que importantes fluctuaciones del nivel del Mediterráneo, de aproximadamente 20 metros de amplitud, han tenido lugar en lapsos de tiempo bastante inferiores a los 10 ka. Estas magnitudes concuerdan con las calculadas por HARMON (1980) en las Bahamas y las Bermudas, donde se han deducido valores de 3,5 a 6 m/ka, e incluso más elevados, para las variaciones eustáticas del Pleistoceno superior en aquellos archipiélagos. Por otro lado, se pueden evaluar tasas de ascenso marino postglacial del orden de 7,8 m/ka (DOUGLAS et al., 2001), cuantía similar a los magnitudes máximas suministradas por las dataciones realizadas en nuestras campañas.

A pesar de la rapidez de la tendencia fluctuante representada por los valores expuestos —que suponen tasas medias de ascenso-descenso en torno a los 4 mm por año—, la formación de paleoniveles de espeleotemas freáticos implica la existencia de estabilizaciones del nivel del mar, a una determinada cota, de suficiente duración como para permitir la deposición de un sobrecrecimiento subacuático apreciable; la duración de estos episodios de estabilidad pensamos que ha de ser, al menos, de uno o unos pocos miles de años (TUCCIMEI et al., 2000). La pauta postulada de fluctuaciones-estabilizaciones viene apoyada por la presencia continuada de un nivel marino similar al presente, desde 5,4 ka BP hasta el momento actual (HENNIG et al., 1981; GINÉS & GINÉS, 1993), que ha dado origen a un espectacular sobrecrecimiento de cristalizaciones freáticas de grosor decimétrico. Paleoniveles similares de morfologías abultadas (situados tanto a cotas positivas como negativas) requieren pues, para su deposición, la existencia de estabilizaciones del nivel marino que escalonan la tendencia general fluctuante descrita con anterioridad.

Los datos disponibles sobre los estadios isotópicos 4 y 5 (recogidos en la

de dades sobre les cristallitzacions d'aquest tipus que es troben avui en dia submergides en els llacs de les coves litorals, subministra evidències relatives a les pulsacions marines lligades a episodis climàtics de signe fred, el coneixement de les quals era fins el moment negligible a escala de Mallorca.

La integració de les informacions cronològiques aportades pels espeleotemes freàtics —datats en successives campanyes, i ubicats tant per sobre com per sota del present nivell de les aigües marines— ha permès assajar la reconstrucció d'una corba eustàtica afinada, per al rang d'edat de 60 a 150 ka BP, de validesa plausible per a la conca de la Mediterrània occidental. En concret, la història del nivell marí durant l'últim període interglacial (estadi 5) es presenta en extrem complexa, evidenciant una possible successió de fins a set pics transgressiu-regressius, relacionables amb els subestadis habitualment distingits dins aquest gran esdeveniment climàtic. S'han constatat en aquest estadi fluctuacions glacioeustàtiques de més de 20 metres de magnitud, les quals han tingut lloc en lapsos de temps bastant inferiors als 10 ka; les taxes mitjanes de variació eustàtica deduïdes són de l'ordre de 4 m/ka.

Les informacions subministrades per les coves litorals del llevant de Mallorca aporten una nova perspectiva — complementària en relació als altres registres disponibles— al coneixement del paleoclima pleistocènic dins l'àmbit balear. L'aprofundiment en aquest tipus d'investigacions permetrà una millor interpretació de la variabilitat climàtica natural que ha singularitzat els temps quaternaris.

AGRAÏMENTS

Aquestes tasques s'han beneficiat de dues ajudes econòmiques del Museu Balear de Ciències Naturals (Sóller, Mallorca), concedides durant els anys 1994 i 1995. Per altra banda, la present línia d'investigació s'emmarca dins l'acord de col·laboració establert, a partir del curs 1998-99, entre la Universitat "Roma Tre" (Roma, Itàlia) i la Universitat de les Illes Balears (Palma de Mallorca, Espanya). Així mateix aquest treball forma part dels projectes d'investigació de la DGICYT n° PB94-1175 i de la DGEIC n° PB98-0132.

Figura 4) ilustran muy bien el hecho de que la curva eustática, deducible para el Pleistoceno superior de Mallorca, pone de manifiesto un suceso de cambios paleoambientales radicales explicables en base a alternancias climáticas extraordinariamente abruptas. El buen ajuste que presentan los picos contenidos en la curva eustática aportada, en relación con los estadios isotópicos reconocidos en el registro marino profundo (SHACKLETON & OPDYKE, 1973), confirma el carácter glacioeustático de las oscilaciones detectadas en el nivel del Mediterráneo entre los 60 y los 150 ka BP mediante el estudio de los espeleotemas freáticos mallorquines.

La amplitud de las variaciones térmicas a lo largo del lapso de tiempo analizado (ROSE et al., 1999; MULLER & MacDONALD, 2000) es sin duda lo suficientemente grande (entre 8 y 12°C) como para explicar de forma satisfactoria pulsaciones regresivas de al menos una veintena de metros, como las detectadas en las cuevas litorales de la isla; por otra parte, no debe excluirse la posibilidad de que en algunos de los períodos fríos (en particular los estadios 4 y 5b) puedan haberse dado regresiones todavía más importantes que las detectadas en nuestros programas de datación. El hecho de no haber podido efectuar análisis de isótopos estables de las muestras recolectadas por debajo del nivel marino presente, impide dar más precisiones sobre las condiciones ambientales de deposición durante los episodios fríos del Pleistoceno superior.

Haciendo referencia ahora a los espeleotemas freáticos correspondientes a los picos transgresivos, en este caso sí que ha sido posible realizar análisis de isótopos estables del Oxígeno ($\delta^{18}O$) y del Carbono ($\delta^{13}C$). Los datos analíticos obtenidos, a partir de las bandas de crecimiento de muestras pertenecientes al último interglacial, ponen de manifiesto una evolución hacia composiciones isotópicas pesadas a lo largo de los subestadios de signo cálido 5a y 5e. La citada tendencia es interpretada (VESICA et al., 2000) como el resultado de una mayor intrusión marina en el sistema geoquímico, asociada a condiciones climáticas de aridez creciente. Esta inferencia paleoclimática cuestionaría la asunción habitual que relaciona en nuestro entorno geográfico los momentos interglaciales con acontecimientos de signo marcadamente húmedo.

CONCLUSIONES

El estudio de los espeleotemas freáticos se ratifica como una herramienta muy buena para la investigación precisa de las variaciones del nivel del mar en el Cuaternario. Además, la obtención de datos sobre las cristalizaciones de este tipo que se encuentran hoy en día sumergidas en los lagos de las cuevas litorales, suministra evidencias relativas a las pulsaciones marinas ligadas a episodios climáticos de signo frío, cuyo conocimiento era hasta ahora negligible a escala de Mallorca.

La integración de las informaciones cronológicas aportadas por los espeleotemas freáticos (datados en sucesivas campañas, y ubicados tanto por encima como por debajo del presente nivel de las aguas marinas) ha permitido ensayar la reconstrucción de una curva eustática detallada, para el rango de edad de 60 a 150 ka BP, de validez plausible para la cuenca del Mediterráneo occidental. En concreto, la historia del nivel marino durante el último período interglacial (estadio 5) se presenta en extremo compleja, evidenciando una posible sucesión de hasta siete picos transgresivo-regresivos, relacionables con los subestadios distinguidos habitualmente dentro de este gran evento climático. Se han constatado en este estadio fluctuaciones glacioeustáticas de más de 20 metros de magnitud, las cuales han tenido lugar en lapsos de tiempo bastante inferiores a los 10 ka; las tasas medias de variación eustática deducidas son del orden de 4 m/ka.

Las informaciones suministradas por las cuevas litorales del levante de Mallorca aportan una nueva perspectiva (complementaria en relación a los otros registros disponibles) al conocimiento del paleoclima pleistocénico en el ámbito balear. La profundización en este tipo de investigaciones permitirá una



Foto 6: Espectacular conjunto de espeleotemas freáticos existentes en la Cova de na Mitjana (Capdepera). Corresponden a una antigua estabilización del Mediterráneo observable a unos 5 metros por encima del actual nivel del mar.

Foto 6: Espectacular conjunt d'espeleotemes freàtics existents a la Cova de na Mitjana (Capdepera). Corresponden a una antiga estabilització de la Mediterrània observable uns 5 metres per sobre de l'actual nivell de la mar.

Photo 6: Impressive assemblage of phreatic speleothems existing in Cova de na Mitjana (Capdepera). They are related to a Mediterranean paleosea-level about 5 metres higher than the present-day one.

mejor interpretación de la variabilidad climática natural que ha singularizado los tiempos cuaternarios.

AGRADECIMIENTOS

Estas investigaciones se han beneficiado de dos ayudas económicas del Museu Balear de Ciències Naturals (Sóller, Mallorca), concedidas durante los años 1994 y 1995. Por otra parte, la presente línea de investigación se enmarca en el acuerdo de colaboración suscrito, a partir del curso 1998-99, entre la Università "Roma Tre" (Roma, Italia) y la Universitat de les Illes Balears (Palma de Mallorca, España). Asimismo este trabajo forma parte de los proyectos de investigación de la DGICYT nº PB94-1175 y de la DGEIC nº PB98-0132.

Bibliografía

- 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.
- CUERDA, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Instituto de Estudios Baleáricos. 304 pp. Palma de Mallorca.
- DOUGLAS, B.C.; KEARNEY, M.S. & LEATHERMAN, S.P. (Eds.) (2001): *Sea level rise. History and consequences*. Academic Press. 228 pp.
- GINÉS, A. (1995a): *Els espeleotemes de les coves de Mallorca / The speleothems of Majorcan caves*. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (Eds.): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 87-97. Palma de Mallorca.
- 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 de Mallorca.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1987): *Características espeleológicas del karst de Mallorca*. Endins, 13: 3-19. Palma de Mallorca.
- 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.
- GINÉS, J. (1995b): *L'endocarst de Mallorca: els mecanismes espeleogenètics / Mallorca's endokarst: the speleogenetic mechanisms*. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (Eds.): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 71-86. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Universitat de les Illes Balears. 595 pp. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993): *Datacions isotòpicas de espeleotemas freàtics recolectados en cuevas costeras de Mallorca (España)*. Endins, 19: 9-15. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1995): *Aspectes espeleocronològics del karst de Mallorca / Speleochronological aspects of karst in Mallorca*. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (Eds.): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 99-112. Palma de Mallorca.
- 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.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B. & WATKINSON, P. (1998a): *La Cova d'en Passol i altres cavitats litorals situades entre Cala sa Nau i Cala Mitjana (Felanitx, Mallorca)*. Endins, 22: 5-18. Palma de Mallorca.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; AGUILÓ, C. & WATKINSON, P. (1998b): *La Cova des Drac de Cala Santanyí (Santanyí, Mallorca)*. Endins, 22: 55-66. Palma de Mallorca.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B. & LAVERGNE, J.J. (2000): *Les coves de Cala Varques (Manacor, Mallorca)*. Endins, 23: 41-57. Palma de Mallorca.
- HARMON, R. S. (1980): *Paleoclimatic information from isotopic studies in speleothems: a review*. In: Mahaney, W. C. (Ed.): *Quaternary Paleoclimate*. Geo Abstracts Ltd. 299-318. Norwich.
- 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.
- 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 de Mallorca.
- 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.
- MULLER, R.A. & MacDONALD, G.J. (2000): *Ice ages and astronomical causes. Data, spectral analysis and mechanisms*. Praxis Publishing, Springer Verlag. 318 pp. Chichester.
- NEUMANN, A.C. & HEARTY, P.J. (1996): *Rapid sea-level changes at the close of the last interglacial (substage 5e) recorded in Bahamian island geology*. Geology, 24 (9): 775-778.
- POMAR, L. & CUERDA, J. (1979): *Los depósitos marinos pleistocénicos en Mallorca*. Acta Geológica Hispánica. Homenatge a Lluís Solé i Sabarís. 14: 505-513. Barcelona.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & FONTARNAU, R. (1976): *Las cristalizaciones freáticas*. Endins, 3: 3-25. Palma de Mallorca.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): *Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos*. Endins, 5-6: 3-17. Palma de Mallorca.

• POMAR, L.; RODRÍGUEZ, A.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; FONT, A. & MORA, A. (1987): *Phreatic speleothems in coastal caves: a new method to determine sea-level fluctuations*. In: ZAZO, C. (Ed.): *Late Quaternary sea-level changes in Spain*. Museo Nacional de Ciencias Naturales C.S.I.C. Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario, 10: 197-224. Madrid.

• ROSE, J.; MENG, X. & WATSON, C. (1999): *Palaeoclimate and palaeoenvironmental responses in the western Mediterranean over the last 140 ka: evidence from Mallorca, Spain*. Journal of the Geological Society, 156 : 435-448. Londres.

• 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 105 year and 106 year scale*. Quaternary Research, 3: 39-55.

• 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 de Mallorca.

• 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 de Mallorca.

• 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.

ZAZO, C. (1999): *Interglacial sea levels*. Quaternary International, 55: 101-113.

