

Els espeleotemes freàtics de les coves litorals de Mallorca: canvis del nivell de la Mediterrània i paleoclima en el Pleistocè Superior

Joaquín GINÉS, Joan J. FORNÓS, Àngel GINÉS, Francesc GRÀCIA,
Cristina DELITALA, Adriano TADDEUCCI, Paola TUCCIMEI i Pier Luigi VESICA

SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES BALEARS

Ginés, J., Fornós, J.J., Ginés, A., Gràcia, F., Delitala, C., Taddeucci, A., Tuccimeì, P. i Vesica, P.L. 2001. Els espeleotemes freàtics de les coves litorals de Mallorca: canvis del nivell de la Mediterrània i paleoclima en el Pleistocè superior. In: Pons, G.X. i Guijarro, J.A. (Eds.): *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Mon. Soc. Hist. Hist. Nat. Balears, 9: 33-52. ISBN: 84-87818-34-X. Palma de Mallorca.

Els espeleotemes freàtics de les coves costaneres de Mallorca són una molt bona font d'informació per al millor coneixement de la història recent del nivell de la mar. Diversos paleonivells marins alts —corresponents a esdeveniments interglacials— es troben enregistrats mitjançant espectaculars alineacions d'espeleotemes freàtics, penjats a diferents altures a coves litorals de Mallorca. De la mateixa manera, alguns episodis regressius de la Mediterrània apareixen també documentats sota la forma de dipòsits d'aquestes característiques situats a cotes inferiors al present nivell de la mar. S'han datat, utilitzant el mètode Th/U, un total de 38 mostres d'espeleotemes freàtics, recol·lectats entre +40 metres per damunt i -23 metres per davall de l'actual nivell marí. Aquestes cristallitzacions es relacionen amb estabilitzacions positives i negatives de la superfície de les aigües marines, vinculades a les fluctuacions glacio-eustàtiques ocorregudes al llarg del Quaternari. Les edats obtingudes abracen des de 3,9 ka fins a més de 350 ka BP, registrant amb bastant detall una complexa successió de canvis del nivell de la mar durant el Pleistocè Mitjà i Superior i l'Holocè. Les estabilitzacions marines altes que apareixen enregistrades corresponen als estadis isotòpics càlids 1, 5 i 7; per altra banda, es troben documentades diverses estabilitzacions regressives associades als estadis freds 4, 6 i 8, així com alguns abruptes descensos del nivell de la mar intercalats dintre de l'últim interglacial (estadi isotòpic 5). Les dades obtingudes permeten intentar la reconstrucció d'una corba eustàtica dels últims 300 ka, vàlida per a la Mediterrània Occidental. Aquesta corba resulta especialment detallada entre els 60 ka i els 150 ka BP (estadis isotòpics 4 i 5), posant de manifest l'existència de fluctuacions marines de més de 18 metres d'amplitud ocorregudes en lapsos de temps inferiors als 10 ka. Aquest treball representa una contribució novedosa al coneixement de la variabilitat climàtica natural prèvia a les actuals influències antròpiques, resumint-se en ell els resultats principals d'investigacions ja publicades pels autors així com algunes noves dades sobre aquestes qüestions.

Paraules clau: Pleistocè, canvis del nivell de la mar, espeleotemes freàtics, coves litorals, Mediterrània occidental.

PHREATIC SPELEOTHEMS FROM LITTORAL CAVES OF MALLORCA: MEDITERRANEAN SEA LEVEL HISTORY AND PALAEOCLIMATIC CHANGES DURING THE UPPER PLEISTOCENE. Phreatic speleothems from coastal caves of Mallorca are a very good 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 also appear documented as deposits of these characteristics located at various depths below present sea-level. Thirty eight samples of phreatic speleothems, collected between +40 metres above and -23 metres below present sea-level, have been dated by means of Th/U method. They record positive and negative sea-level stands related to Quaternary glacio-eustatic fluctuations. 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 4, 6 and 8 have been recognized, together with several abrupt sea-lowerings intercalated within isotopic stage 5 (last interglacial). The 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 a remarkable accuracy 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 lower than 10 ka. This paper represents a new contribution to the knowledge of natural climatic variability, previous to the current anthropic influences, summarizing the main results of investigations already published by the authors together with some additional data on the subject.

Keywords: Pleistocene, sea-level changes, phreatic speleothems, littoral caves, Western Mediterranean.

Joaquín GINÉS i Joan J. FORNÓS: Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca; Àngel GINÉS: Museu Balear de Ciències Naturals, Sóller, Mallorca; Francesc GRÀCIA: Grup Nord de Mallorca, Pollença, Mallorca; Cristina DELITALA i Adriano TADDEUCCI: Dip. Scienze Geologiche, Università "Roma Tre", Roma, Italia; Paola TUCCIMEI: Dip. Scienze Geologiche, Università "Roma Tre", Roma, Italia i C.S. per il Quaternario e l'Evoluzione Ambientale C.N.R., Dip. Scienze della Terra, Università "La Sapienza", Roma, Italia; Pier Luigi VESICA: Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali, CNR, Roma, Italia.

Introducció

Mallorca és una illa, constituïda de forma majoritària per materials calcaris, que mostra fenòmens càrstico-costaners molt interessants en cadascuna de les seves regions naturals. Es localitzen nombroses coves litorals en tota l'illa, essent particularment abundants al llarg de la seva costa oriental, des del Cap de ses Salines (Santanyí) fins al Cap des

Freu (Capdepera). Aquestes cavitats càrstiques han sofert una complexa evolució morfològica, durant el Pleistocè, i presenten dipòsits variats que inclouen bretxes amb restes paleontològics així com tot tipus d'espeleotemes; en general els dipòsits de les coves costaneres resulten de gran interès cronològic i paleoclimàtic (Ginés i Ginés, 1986; 1995), a

causa del fet que la seva deposició va veure's afectada, amb freqüència, per les oscil·lacions del nivell de la mar ocorregudes al llarg del Quaternari.

Una de les peculiaritats morfològiques més rellevants —de les coves litorals del llevant de Mallorca— és l'existència d'espeleotemes d'origen subaquàtic, relacionats amb antigues cotes d'estabilització de la superfície de les aigües freàtiques, les quals han estat al seu torn controlades per les fluctuacions eustàtiques de la Mediterrània. Aquests *espeleotemes freàtics* suposen un excel·lent registre de la història del nivell marí en el Pleistocè i Holocè, tal com ja s'ha posat de manifest en nombrosos treballs que s'han anat publicant des de fa més de dues dècades (Ginés i Ginés, 1974; 1987; 1993a; Ginés *et al.*, 1981a; 1981b; 1999; Pomar *et al.*, 1987).

A partir del 1981 fou possible realitzar successives campanyes de datació isotòpica (mètode Th/U) dels espeleotemes freàtics de les coves de Mallorca, començant per l'anàlisi de les mostres situades a cotes iguals o superiors al present nivell marí (Hennig *et al.*, 1981; Ginés i Ginés, 1989, 1993b; Tuccimei *et al.*, 1997, 1998; Vesica *et al.*, 2000). Molt recentment ha estat possible la datació d'espeleotemes freàtics recol·lectats per sota de l'actual nivell de la mar (Ginés, 2000; Tuccimei *et al.*, 2000), gràcies a les metòdiques activitats desenvolupades pels espeleobusjadors Francesc Gràcia i Bernat Clamor (Gràcia *et al.*, 1998a; 1998b; 2000). Aquestes activitats han obert una prometedora línia d'investigació, que aporta informacions inèdites sobre les fluctuacions marines regressives associades a pulsacions climàtiques de caràcter fred.

Les presents pàgines exposen l'estat de la qüestió, pel que fa al coneixement dels paleonivells marins pleistocènics mitjançant la investigació dels espeleotemes freàtics de les coves litorals de Mallorca. En aquest sentit, els programes d'estudis isotòpics desenvolupats fins ara permeten aportar —a l'estudi del Quaternari marí de l'illa— una corba eustàtica bastant detallada corresponent al rang d'edat de 60 a 150 ka BP. Els resultats

obtinguts fan possible afirmar que la rellevància d'aquestes investigacions ultrapassa el camp merament espeleocronològic, per entrar de ple en l'àmbit del coneixement del paleoclima i la cronoestratigrafia del Pleistocè a la Mediterrània occidental. Les dades que se subministren ara, sobre la història del nivell marí durant el Pleistocè Superior, contribueixen clarament a una millor valoració de la variabilitat climàtica prèvia a les actuals influències antròpiques.

Els espeleotemes freàtics de les coves de Mallorca

Les àrees càrstiques de la nostra illa presenten moltes coves parcialment anegades per aigües salabroses (Ginés, 1995b), com a conseqüència de la pujada postglacial del nivell de la Mediterrània. La inundació parcial d'aquestes coves costaneres origina llacs subterranis, que de vegades assoleixen grans dimensions. Els esmentats llacs salabrosos suposen un medi freàtic litoral —controlat pel nivell marí— on tenen lloc oscil·lacions periòdiques de la superfície de les seves aigües, ajustades a fluctuacions marines menors (marees, oscil·lacions baromètriques).

Una gran varietat de tipologies d'espeleotemes freàtics estan associades amb aquest singular ambient geoquímic. Avui en dia, és freqüent la formació de làmines de calcita molt primes, que floten sobre la superfície dels llacs subterranis; al mateix temps, s'observen espectaculars sobrecreixements de carbonats a les voreres dels esmentats llacs (Pomar *et al.*, 1979), així com al voltant d'aquelles estalagmites —o d'altres espeleotemes aeris— situades dins del present rang de fluctuació del pla de les aigües freàtiques litorals (Fig. 1a). També és comú trobar cristallitzacions freàtiques similars, de calcita i/o d'aragonita, localitzades alguns metres per damunt dels actuals llacs salabrosos; mitjançant les bandes d'espeleotemes que formen aquestes cristallitzacions (Fig. 2), dins algunes cavitats costaneres de Mallorca es pot generar un detallat registre dels paleonivells

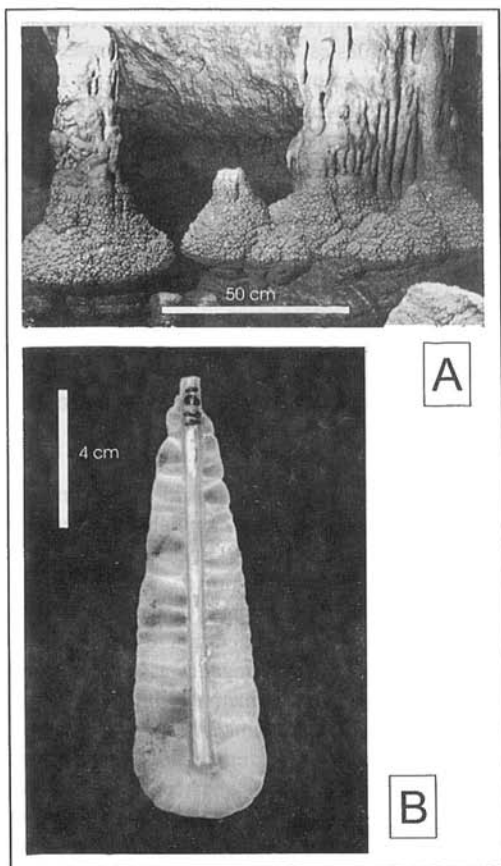


Fig. 1. A: espeleotemes freàtics subactuals observables en la superfície dels llacs salabrosos de la Cova de Cala Varques "A" (Manacor, Mallorca). B: secció longitudinal d'un espeleotema freàtic, procedent de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca). Consisteix en una fina estalactita aèria que es troba revestida per un precipitat d'aragonita d'origen freàtic.

Fig. 1. A: subactual phreatic speleothems existing at the surface of the brackish pools in Cova de Cala Varques "A" (Manacor, Mallorca). B: longitudinal section of a phreatic speleothem from Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca). It consists in a delicate aerial stalactite, coated by an aragonitic precipitate of phreatic origin.

marins, corresponents a les fluctuacions d'origen glacioeustàtic ocorregudes durant el Quaternari.

Bona part de les cristal·litzacions freàtiques —tant les subactuals com les antigues— es desenvolupen sobre espeleotemes vadosos preexistents, adoptant morfologies generalment gruixades i globulars (Fig. 3). De vegades aquests sobrecreixements de carbonats formen prominents bandes horitzontals que envolten estalagmites i columnes; en bastants casos, en especial quan el revestiment freàtic afecta l'extrem inferior de fines estalactites, la morfologia original de l'espeleotema pot veure's molt modificada (Fig. 1b). Ocasionalment, làmines de calcita flotant poden quedar atrapades entre les capes de creixement d'aquests recobriments cristal·lins.

Els espeleotemes freàtics de les coves de Mallorca ofereixen una gran varietat morfològica, textural i mineralògica, tal com ja s'ha posat de relleu en diverses publicacions (Ginés, 1995a; 2000; Ginés *et al.*, 1981b; Pomar *et al.*, 1976). Aquests treballs apunten el possible significat paleoclimàtic de la seva mineralogia, relacionant la presència d'aragonita amb events càlids que, en els sediments de les platges pleistocèniques, coincideixen amb l'aparició de la fauna malacològica termòfila típica de l'Eutirrenià (Cuerda, 1975), pis que es correspon amb el darrer interglacial.

L'interès principal d'aquests processos de precipitació freàtica de carbonats és el següent: antigues fluctuacions positives del nivell marí han quedat enregistrades, dins

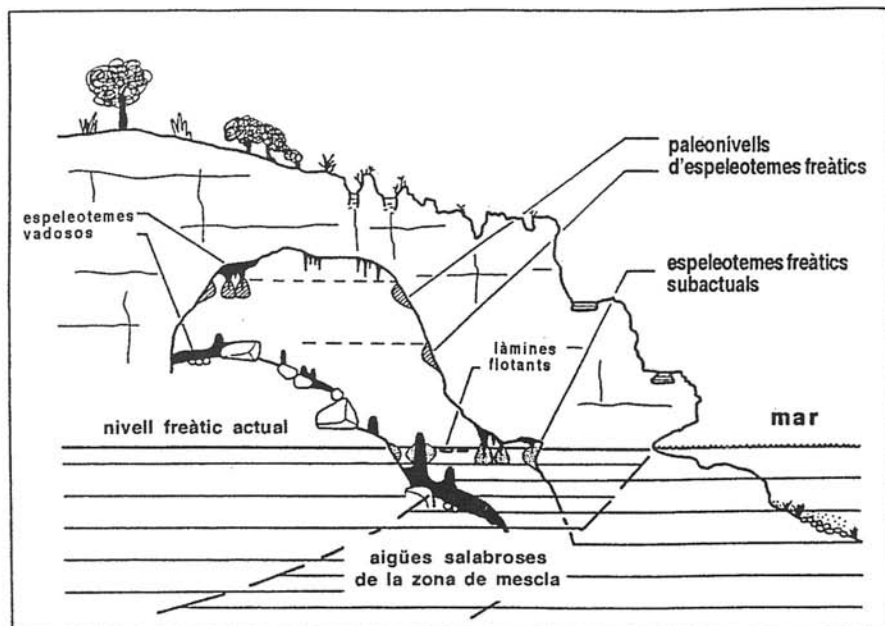


Fig. 2. Representació esquemàtica idealitzada del carst litoral en el llevant de Mallorca. Observi's la presència d'espeleotemes freàtics, relacionats amb el present nivell mari així com amb antics nivells de la Mediterrània; encara que no apareguin representades a la figura, s'han estudiat també abundants exemplars d'aquest tipus de cristallitzacions submergides avui en dia per sota la superfície dels llacs subterranis.

Fig. 2. Schematic representation of littoral karst in eastern Mallorca outlined in an ideal cross-section. Note the presence of phreatic speleothems related to past- and present Mediterranean sea-levels; although they are not represented in this figure, abundant samples of phreatic crystallizations submerged nowadays below the water-plane of cave ponds have also been investigated.

nombroses coves costaneres, mitjançant alineacions estrictament horitzontals d'espeleotemes freàtics, situades a altures diverses per damunt dels actuals llacs subterranis. La formació d'aquests dipòsits cristal·lins està relacionada amb paleonivells transgressius (períodes interglacials), assolits per la capa freàtica com a resultat de les oscil·lacions marines glacioeustàtiques (Ginés *et al.*, 1981a; Pomar *et al.*, 1987). De la mateixa manera, l'estudi dels espeleotemes freàtics situats per sota del present nivell de la mar representa una línia d'investigació prometedora, la qual ha aportat ja informacions valuoses sobre les pulsacions regressives de la Mediterrània (Ginés, 2000; Tuccimei *et al.*, 2000).

Fent referència en concret a les cavitats del llevant de Mallorca, s'han observat almenys 30 paleonivells de cristallitzacions freàtiques, distribuïts a altures que abracen des de la cota +46 metres fins -23 metres per davall del ± 0 actual (Fig. 4). Pel que fa a la qüestió de l'altimetria d'aquest tipus de dipòsits, en algunes publicacions (Ginés i Ginés, 1974; Pomar *et al.*, 1987) s'ha considerat la possibilitat de correlacionar l'altura de les alineacions d'espeleotemes freàtics amb les cotes d'antigues línies de costa corresponents al Pleistocè Mitjà i Superior. Les esmentades morfologies litorals han estat identificades mitjançant l'estudi estratigràfic i paleontològic de les platges fòssils pleistocèniques de l'illa, les quals són ben conegudes gràcies a



Fig. 3. Espectacular conjunt d'espeleotemes freàtics existents a la Cova de na Mitjana (Capdepera). Corresponen a una antiga estabilització de la Mediterrània observable uns 5 metres per sobre de l'actual nivell de la mar.

Fig. 3. 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.

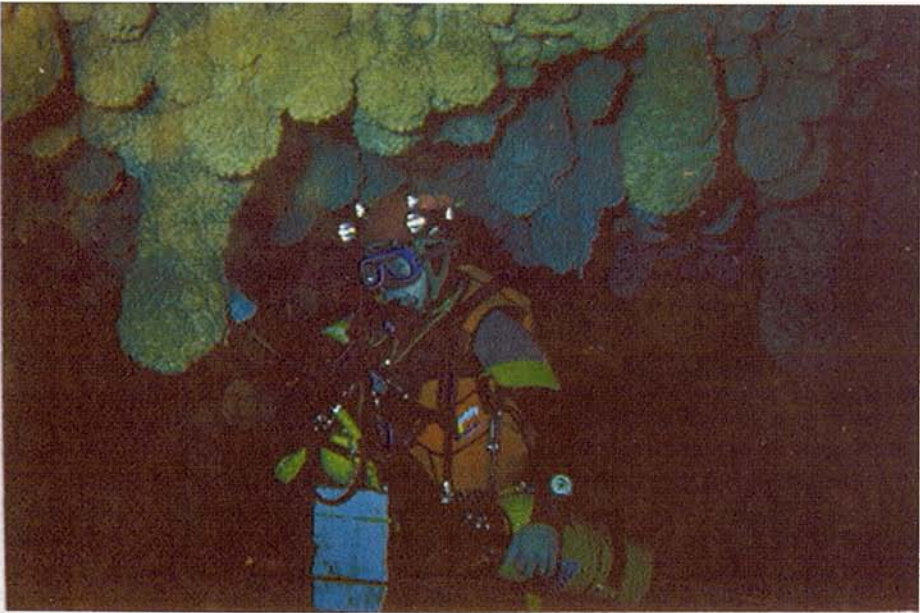


Fig. 4. Espeleotemes freàtics submergits a una profunditat de -15 metres per sota l'actual nivell mari, a la Cova des Drac de Cala Santanyi. Foto Robert Landreth.

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

les investigacions sobre el Quaternari portades a terme per diversos autors (Butzer i Cuerda, 1962; Butzer, 1975; Cuerda, 1975; Pomar i Cuerda, 1979). Basant-se en aquesta interpretació geomorfològica, Ginés i Ginés (1974) suggeriren ja fa temps que les cristal·litzacions freàtiques situades a més de 30 metres per sobre de l'actual nivell de la mar haurien de remuntar-se almanco al Paleotirrenià (interglacial Mindel-Riss), és a dir als estadis isotòpics 9 o 11 com a mínim.

Un primer programa de datacions isotòpiques, efectuades utilitzant el mètode de les sèries del Urani (Hennig *et al.*, 1981; Ginés i Ginés, 1989; 1993a; 1993b), va confirmar el model cronològic prèviament establert, basat en les correlacions altimètriques entre espeleotemes freàtics i dipòsits de platja pleistocènics. Les edats obtingudes apunten que les mostres recol·lectades a altures superiors als +30 metres s.n.m. han de ser assignades, com a mínim, als estadis 9 o 11 del registre marí d'isòtops d'oxigen establert per Shackleton i Opdyke (1973).

El 1994 vàrem tenir ocasió d'emprendre un nou programa de datacions isotòpiques d'espeleotemes freàtics de les coves de Mallorca, els resultats del qual han estat publicats en Ginés (2000), Tuccimei *et al.* (1997; 1998) i Vesica *et al.* (2000). La interpretació de les dades aconseguides els darrers anys —com a conseqüència d'aquestes campanyes de datacions radiomètriques— permet assolir una visió bastant detallada de les vicissituds experimentades pel nivell de la mar durant els últims 300 ka, tal com s'exposarà al llarg dels apartats següents.

Les datacions Th/U

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. La majoria de les cavitats investigades es desenvolupen en les calcarenites postorogèni-

ques 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 juràssiques plegades, que integren l'àrea muntanyenca de les Serres de Llevant (Fig. 5).

Les dades referents a les coves estudiades, les mostres obtingudes i les cotes dels paleonivells marins representats en cada localitat, apareixen reflectides a la Taula 1. Pel que fa als espeleotemes corresponents a episodis transgressius, han estat molt abundants les mostres recol·lectades a altures inferiors als +3 metres s.n.m.; per altra banda, i referint-nos a les pulsacions marines regressives, són nombrosos els paleonivells d'espeleotemes freàtics reconeguts i mostrejats en torn dels -15 metres per sota del present nivell marí. Una descripció morfològica detallada de la majoria de les mostres es pot consultar a Tuccimei *et al.* (1998; 2000), mentre que els aspectes mineralògics i cristal·logràfics estan disponibles a Ginés (2000).

Les datacions absolutes 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. Els resultats analítics obtinguts, i les edats que aquestes dades subministren, es troben també recopilats a la Taula 1. Les edats calculades van des de 3,9 ka BP, es tracta d'una cristal·lització 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 i 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

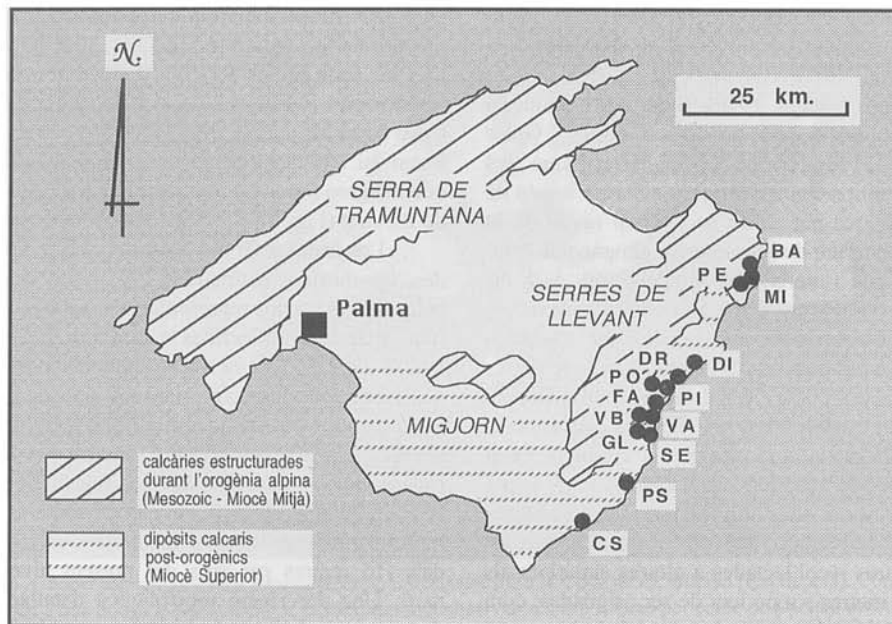


Fig. 5. Mapa de localització de les coves amb espeleotemes freàtics investigades. BA: Cova de na Barxa; MI: Cova de na Mitjana; PE: Coves Petites; DI: Cova del Dimoni; DR: Coves del Drac; PO: Cova des Pont; PI: Coves del Pirata; FA: Cova de Cala Falcó; VA: Cova de Cala Varques "A"; VB: Cova de Cala Varques "B"; GL: Cova de sa Gleda; SE: Cova des Serral; PS: Cova den Passol; CS: Cova des Drac de Cala Santanyi.

Fig. 5. Location map of the caves containing the investigated phreatic speleothems.

gran esdeveniment interglacial, de les quals ens ocuparem més endavant amb certa extensió.

La resta de mostres relacionades amb episodis climàtics de signe càlid aporten informacions bastant fragmentàries i no massa determinants, podent ser assignades als estadis isotòpics 7, 9 i fins i tot anteriors (Ginés i Ginés, 1993b). Cal ressenyar l'existència de 3 mostres de cronologia postglacial (estadi isotòpic 1), que donen edats sempre inferiors als 6,6 ka BP.

Tal com ja s'ha avançat, 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 estadis 4, 6 i 8, de signe fred, del registre d'isòtops d'oxigen. En particular, estan ben repre-

sentats diversos paleonivells regressius associats a l'estadi isotòpic 4 (edats entre 63,7 i 79,6 ka), 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 caràcter més fred, que es distingeixen habitualment dins del darrer interglacial (estadi isotòpic 5); els principals esdeveniments regressius reconeguts restarien situats en torn a edats de 91,4-100 ka (subestadi 5b) i de 125 ka (en ple subestadi 5e).

En general els espeleotemes freàtics que han donat edats inferiors a 200 ka BP (Fig. 6) es concentren en dos grans grups altimètrics: el primer d'ells es localitza fins a un màxim de +2,5 metres per sobre de l'actual

Taula 1. Resultats analítics de les datacions, efectuades mitjançant el mètode Th/U, d'espeleotemes freàtics recol·lectats en coves de la costa oriental de Mallorca.

Table 1. Analytical results of Th/U datings corresponding to phreatic speleothems collected in coastal caves from eastern Mallorca.

localitat	mostra	altura s.n.m. (m)	U (ppb)	234U/238U	(234U/238U) ₀	230Th/232Th	230Th/234U	edat (ka)
Cova de na Barxa	BA-D3 *	+2,4	423±19	1,430±0,070	1,612±0,103	∞	0,715±0,045	124,7 ± 14 (2)
Cova de na Mitjana	MI-D2 *	+4,9	146±4	1,057±0,019	1,110±0,037	46,85±5,29	0,894±0,024	231,9 ± 28 (2)
	MI-D3 *	+5,6	169±1	0,972±0,026	0,937±0,035	51±2	0,972±0,035	> 300,7
	Mitj7a *	+3,9	48±1	1,065±0,026	—	8,54±1,89	0,946±0,057	> 275 ?
	Mitj7b *	+3,9	189±3	1,022±0,015	—	41,42±5,04	0,563±0,014	88,0 ± 4,0 (1)
Coves Pelites	Pel5 *	+40	46±3	1,208±0,107	—	4,45±0,60	0,993±0,083	> 205
	Pel6 *	+30	130±8	1,118±0,081	—	14,88±4,00	1,039±0,090	> 187
Cova del Dimoni	DI-D1-1 *	+2,5	2640±77	1,185±0,013	1,255±0,018	257,3±25,4	0,660±0,020	112,9 ± 5,8 (2)
	DI-D1-2 *	+2,5	1273±48	1,090±0,018	1,126±0,025	∞	0,676±0,032	119,7 ± 10 (2)
	DI-D3 *	+2,5	1887±45	1,108±0,015	1,147±0,020	∞	0,638±0,020	107,9 ± 5,7 (2)
Coves del Drac	DR-D4 *	+3,3	2889±84	1,039±0,016	—	∞	1,038±0,040	> 350
Coves del Pirata	PI-D1 *	+2,1	262±9	1,663±0,062	1,959±0,092	∞	0,745±0,035	130,4 ± 14 (2)
Cova des Pont	Pont9 *	+2,1	278±6	1,456±0,029	—	13,7±2,1	0,064±0,002	6,6 ± 0,3 (1)
Cv. de Cala Falcó	FA-D3-4 #	+1,9	542±5	1,378±0,003	1,528±0,037	112,3±0,2	0,554±0,023	83,9 ± 5,0 (2)
Cova de Cala Varques A	Varla *	±0	380±10	1,503±0,049	—	—	0,035±0,004	3,9 ± 0,5 (1)
	Varlb *	+0	460±10	1,689±0,051	—	—	0,048±0,004	5,4 ± 0,5 (1)
Cova de Cala Varques B	VB-D1-2#	+1,4	252±4	1,519±0,081	1,71±0,08	∞	0,632±0,020	111,9 ± 5,7 (2)
	VB-D2 #	+1,4	228±10	2,113±0,099	2,41±0,13	∞	0,567±0,025	83,4 ± 5,1 (2)
	VB-D3 *	-14	690±18	1,892±0,034	2,271±0,055	300±77	0,735±0,028	125 ± 8 (1)
	VB-D5 *	-16,5	743±12	1,613±0,022	1,875±0,032	854±211	0,727±0,014	125,6 ± 4,2 (1)
Cova des Serral	Serr10 *	+1,5	233±5	1,487±0,025	—	733,3±733,3	0,663±0,015	109,0 ± 4,0 (1)
	SE-D2 *	+1,5	200±4	1,453±0,032	1,639±0,046	240±45	0,705±0,019	121,3 ± 5,6 (2)
Cova de sa Gleda	GL-D1 *	-15	409±5	2,021±0,020	2,267±0,025	876±227	0,530±0,009	76,2 ± 1,8 (1)
	GL-D2 *	-14	342±10	1,586±0,040	1,890±0,067	250±80	0,793±0,035	147,4 ± 12 (1)
	GL-D3 *	-17,5	438±6	1,960±0,022	2,244±0,029	42±2	0,602±0,011	91,4 ± 2,4 (1)
	GL-D4 *	-1,5	80±2	1,154±0,038	> 1,554	∞	1,035±0,065	> 350
	GL-D5 *	-16	380±10	2,105±0,051	2,384±0,065	201±47	0,540±0,018	78 ± 3,6 (1)
Cova den Passol	PS-D1 *	-8	278±6	1,203±0,034	1,359±0,059	139±31	0,877±0,028	201,4 ± 16 (1)
	PS-D2 *	-10,5	210±7	1,630±0,064	1,835±0,085	29±4	0,632±0,028	100 ± 7 (1)
	PS-D3 *	-12	91±3	1,510±0,061	1,612±0,073	10±1	0,456±0,020	63,7 ± 3,7 (1)
	PS-D4 *	-13,5	354±8	1,173±0,023	> 1,1483	216±34	1,014±0,027	> 350
	PS-D5 *	-18	155±4	1,708±0,047	1,935±0,063	1948±2168	0,627±0,025	98 ± 6 (1)
	PS-D6 *	-23	278±7	1,594±0,035	2,342±0,170	156±23	1,035±0,030	288 ± 41 (1)
	PS-D7 *	-15,5	138±2	1,902±0,030	2,092±0,037	199±39	0,483±0,010	67,6 ± 1,8 (1)
Cova des Drac de Cala Santanyi	CS-D1 *	-13,5	234±7	1,128±0,044	1,267±0,110	22±3	0,938±0,044	260 ± 90 (1)
	CS-D2 *	-15	187±3	1,297±0,021	1,404±0,029	53±9	0,651±0,019	108,3 ± 5 (1)
	CS-D3 *	-17	292±6	1,337±0,028	1,422±0,035	62±7	0,534±0,014	79,6 ± 3 (1)
	CS-D4 *	-19	283±10	1,271±0,050	1,516±0,110	6,6±0,4	0,925±0,038	< 227

espectrometria de massa * espectrometria alfa
(1) ± 1 σ (2) ± 2 σ

nivell marí, mentre el segon agrupa mostres pertanyents a paleonivells situats a profunditats entre -13 i -17 metres per sota del nivell de la mar. Resulta ben patent, doncs, la complexitat de la història recent de les oscil·lacions glacioeustàtiques de la Mediterrània. La combinació de dades d'altimetria i edats absolutes —obtingudes a partir de les mostres d'espeleotemes freàtics— permet assajar la reconstrucció d'una corba eustàtica detallada per al període de 60 ka a 150 ka BP, que s'exposarà i discutirà tot seguit.

Aportacions a la construcció d'una corba eustàtica per a l'últim interglacial

Les datacions Th/U portades a terme recentment, a partir de paleonivells d'espeleotemes freàtics situats a cotes inferiors a l'actual superfície de les aigües marines, suposen una nova font d'informació sobre un aspecte molt poc conegut de la història del nivell de la mar a la Mediterrània Occidental. De fet el registre marí clàssic (platges fòssils, plataformes d'abrasió...) no és susceptible de subministrar, en les situacions més habituals, informacions a propòsit dels esdeveniments regressius, excepció feta de les costes sotmeses a una intensa elevació tectònica; en litorals tectònicament estables les restes d'aquestes antigues línies de costa, corresponents a pulsacions de caràcter fred, es troben submergides i, en conseqüència, resulten de molt difícil estudi. En el cas de les coves càrstiques litorals, persisteix la dificultat tècnica inherent a l'observació i recol·lecció dels espeleotemes freàtics submergits però, en canvi, aquestes cristal·litacions representen un excel·lent registre de les vicissituds sofertes pel nivell marí, aliè a l'emascament o a la interferència ocasionats per altres processos geodinàmics litorals posteriors. La disponibilitat d'abundants datacions radiomètriques d'aquesta classe d'espeleotemes —tant de les mostres recollides per damunt com per davall del present nivell de la mar— suposa un valuós bagatge, el qual permetrà tenir accés al

gran potencial cronoestratigràfic d'aquest peculiar registre paleoambiental.

És convenient deixar constància ara del següent fet: encara que està citada l'existència de deformacions tectòniques recents en àrees litorals de Mallorca (Del Olmo i Alvaro, 1984; Gelabert *et al.*, 1992), la seva escassa rellevància no resta vàlida a les informacions sobre la història del nivell marí que s'extrauran més endavant. Així, les evidències subministrades per l'estudi d'espeleotemes freàtics localitzats per damunt del present nivell de la mar (Tuccimei *et al.*, 1998), suggereixen basculaments neotectònics tan sols lleugerament superiors al metre de desnivell, pel que fa a bona part de la costa oriental de l'illa.

D'acord amb la línia de raonament que estem descabdellant, 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 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 Fig. 6; la citada 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 (Hennig *et al.*, 1981; Ginés i Ginés, 1993b; Tuccimei *et al.*, 1998, 2000; Ginés *et al.*, 1999; Ginés, 2000). Aquesta figura posa de manifest una complicada successió de paleonivells 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 (Fig. 6).

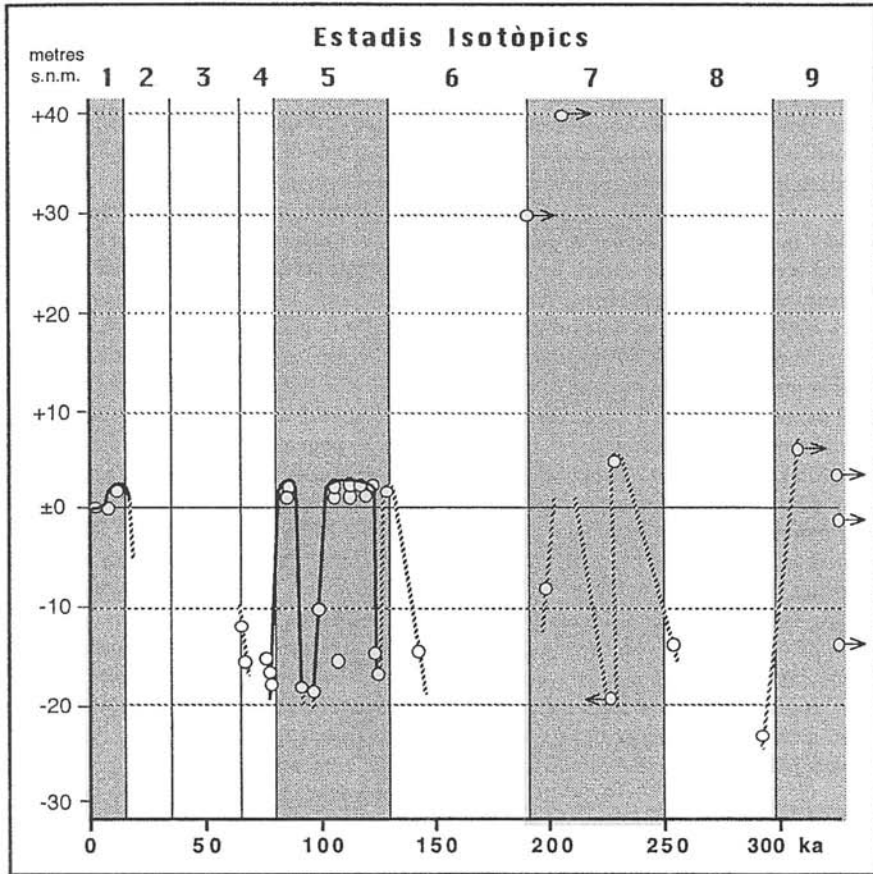


Fig. 6. Corba eustàtica simplificada de la Mediterrània occidental, corresponent als últims 300 ka, deduïda a partir de les datacions Th/U d'espeleotemes freàtics de la costa oriental de Mallorca. Es recullen les tendències generals del nivell marí, definint mitjançant traços continus els esdeveniments documentats per més d'una datació; una interpretació detallada de l'últim interglacial s'inclou en la Fig. 7. Consultar discussió pomenoritzada en el text. En ordenades es representa l'altitud a la qual es troben els diferents paleonivells mostrejats. Les fletxes a dreta o esquerra indiquen edats mínimes o màximes respectivament. S'han grafiat ombrejats aquells estadis isotòpics que impliquen esdeveniments climàtics de signe càlid.

Fig. 6. 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. The general sea-level trends are reflected, the events documented by means of more than one dating being defined with unbroken lines; a detailed interpretation of last interglacial is included in Fig. 7. See text for a detailed discussion. The y-axis represents the elevations at which the different paleolevel samples were collected. The right and left pointing arrows indicate minimum and maximum ages respectively. Dashed areas correspond to warm climate isotopic stages.

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 isotòpic 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 Fig. 7). 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 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 registra 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 espeleotemes 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 Fig. 7 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 al pis conegut com a Neotirrenià o Tirrenià III (Butzer i Cuerda, 1962; Cuerda, 1975). A l'esmentat pic l'hauria precedit una regressió d'almanco 18 metres, ocorreguda entre 90 i 100 ka, atribuïble sense problemes al subestadi 5b. Entre els 107 i 124 ka nombroses mostres registren 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 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 a altituds màxi-

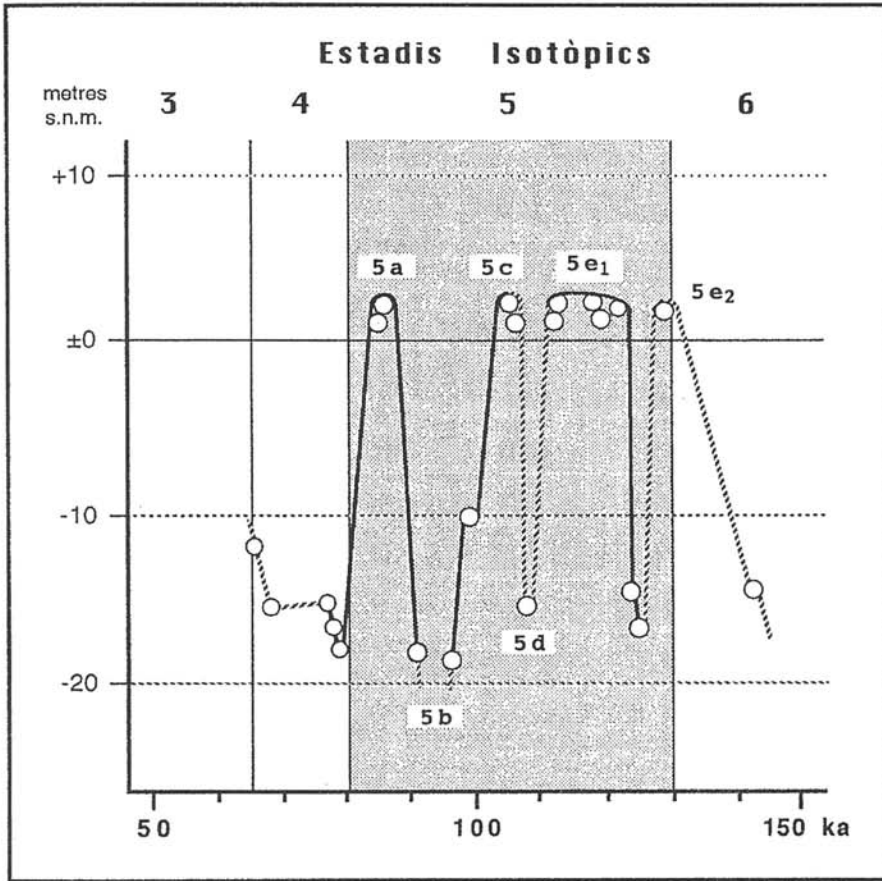


Fig. 7. Corba eustàtica per a l'últim interglacial, deduïda a partir de les datacions Th/U d'espeleotemes freàtics de coves costaneres mallorquines. Amb traç continu s'han representat aquelles vicissituds del nivell marí documentades per més d'una datació. Consultar discussió pormenoritzada en el text. En ordenades es representa l'altitud a la qual es troben els distints paleonivells mostrats. S'ha grafiat ombrat l'estadi climàtic corresponent a l'últim esdeveniment interglacial.

Fig. 7. Eustatic curve of the last interglacial period, deduced from Th/U datings of phreatic speleothems from Mallorcan coastal caves. Unbroken lines represent sea-level fluctuations documented by means of more than one dating. See text for a detailed discussion. The y-axis represents the elevations at which the different paleolevel samples were collected. Dashed area corresponds to the last interglacial climatic event.

mes de +2,5 metres s.n.m., es constata 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 constatava en el jaciment marí mallorquí del Camp de Tir (Hillaire-Marcel *et*

al., 1996) i en altres àrees geogràfiques (Neumann i 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 Fig. 7 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 i 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. Aquesta corba detallada (Fig. 7) ens ofereix una nova perspectiva de l'últim interglacial —considerat en un sentit ampli (estadi isotòpic 5)— amb els bruscos canvis paleoclimàtics que hi tingueren lloc i les molt abruptes fluctuacions eustàtiques associades a ells; 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. Per altra banda apareix ben documentada, amb paleonivells regressius localitzats fins a -17 metres, la transició cap a unes condicions climàtiques de caràcter bastant més fred (estadi 4), que marquen l'inici del darrer cicle glacial. Obviament la major precisió obtinguda en la reconstrucció de la història del nivell de la Mediterrània al llarg del Quaternari es concreta, de manera molt particular, en la novetat que suposa el coneixement dels paleonivells de la mar situats a altituds inferiors a la present cota d'estabilització de les aigües marines.

Implicacions paleoclimàtiques

Els resultats que s'han exposat més a dalt, en relació amb les fluctuacions eustàtiques ocorregudes al llarg del Pleistocè Superior a l'àmbit del mar balear, resulten ben concordants amb les dades de paleotemperatures publicades per Rose *et al.* (1999) en ocupar-se del litoral nordoccidental de les muntanyes d'Artà. Aquests autors reconeixen, en la seva zona de treball, episodis càlids corresponents als subestadis 5a, 5c i 5e —amb nivells marins superiors o propers a l'actual—, separats per pulsacions regressives relacionables

amb els subestadis freds 5b i 5d, moments en els quals constaten un increment en l'activitat dels sistemes fluvials. Resulta molt il·lustratiu el fet que dos registres ben diferents dins la nostra àrea geogràfica —com són els espeleotemes freàtics de les coves costaneres i els sediments epigeus litorals— documentin de manera consistent la mateixa successió de canvis climàtics, amb posicions cronoestratigràfiques ben concordants dins el rang d'edat que ens interessa contrastar (60-150 ka BP).

Tota vegada que el registre constituït pels espeleotemes freàtics de les coves litorals del llevant de Mallorca posseeix una vàlida demostrada, com s'ha vist en el paràgraf anterior, no resulta aventurat intentar establir 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 descens 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 Fig. 7 (veure dades numèriques a la Taula 1). 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 lapses de temps bastant inferiors als 10 ka. Aquestes magnituds estan en concordança amb les calculades per Harmon (1980; 1985) 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 representada 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 freàtic apreciable. 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 i Ginés, 1989; 1993b), que ha donat origen a un espectacular sobrecreixement de cristallitzacions freàtiques de escala 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; la durada d'aquests episodis d'estabilitat pensam que ha de ser, almanco, d'un o uns pocs milers d'anys (Tucicmei *et al.*, 2000).

Les dades disponibles sobre els estadis isotòpics 4 i 5 (recollides a la Fig. 7) il·lustren molt bé el fet que la corba eustàtica, deduïble per al Pleistocè Superior de Mallorca, enregistra un seguit de canvis paleoambientals radicals explicables en base a alternàncies climàtiques extraordinàriament abruptes. 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 i 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'explicació causal de l'acusada variabilitat climàtica quaternària ha estat objecte de molta atenció, argumentant-se sobretot causes orbitals (Muller i Macdonald, 2000; Pirazzoli, 1996) les quals serien les principals responsables de la ciclicitat observable en l'alternança de màxims i mínims d'insolació en l'hemisferi nord terrestre. Dins les ciclici-

tats lligades a variacions en l'òrbita traslacional de la Terra, destaquen com a més importants les relacionades amb l'excentricitat i/o la inclinació de l'òrbita, que tenen un període aproximat de 100 ka i explicarien els màxims glacials i interglacials; a aquestes ciclicitats se superposen altres menors lligades a l'obliquïtat (41 ka) i la precessió (23 ka) de l'eix del planeta. Als esmentats factors astronòmics s'afegeixen altres, relacionats tant amb reorganitzacions del sistema atmosfera-oceà (Broecker i Denton, 1989), que afecten en particular a la circulació profunda de les aigües oceàniques, com amb l'existència de canvis periòdics de l'activitat solar que es tradueixen en fluctuacions del flux energètic que arriba al nostre planeta (Shopov *et al.*, 1999). Malgrat la participació de nombrosos factors explicatius, les causes orbitals justifiquen, per a alguns autors, aproximadament el 75 % de les variacions tèrmiques deduïbles dels registres marins d'isòtops d'oxigen (Imbrie *et al.*, 1984).

Encara que s'accepti un control orbital majoritari per a la ciclicitat climàtica pleistocena, la resposta del nivell marí no és necessàriament sincrònica amb aquest factor causal principal. Així, Fairbanks i Matthews (1978) reconeixen, a l'illa de Barbados, regressions d'algunes desenes de metres, prèvies a l'inici del descens local de la temperatura a les aigües superficials de les latituds baixes. Per altra banda, les variacions eustàtiques no estan condicionades tan sols pels canvis en el volum de les aigües oceàniques —la glacioeustàsia— sinó que participen també altres mecanismes com, per exemple, la eustàsia geoidal (Mörner, 1987) que actua mitjançant canvis en la distribució espacial de les aigües marines. Tot el que s'acaba d'exposar configura un complex entramat de factors, cíclics o no (causes astronòmiques, dinàmica del sistema atmosfera-oceà, moviments tectònics, eustàsia geoidal...), que es materialitzen en una molt complicada història de fluctuacions del nivell marí, per a la qual és extremadament difícil establir una correlació ben afinada —i vàlida a escala global— amb els diversos registres climàtics detallats disponibles per al Pleistocè.

Deixant de banda aquestes consideracions de caire general, que hem intercalat abans a manera d'incís, serà oportú ocupar-se ara amb deteniment de les informacions disponibles sobre les paleotemperatures en el nostre àmbit geogràfic, al llarg dels últims 150 ka. En les seves investigacions desenvolupades a l'illa de Mallorca, Rose *et al.* (1999) assenyalen una temperatura mitjana anual de 19,2° C per al màxim termomètric del darrer interglacial (subestadi 5e), la qual seria gairebé 2° C superior al valor mitjà actual. Quant als episodis freds, aquests autors aporten dades de l'ordre de 8,1° C de temperatures mitjanes anuals per als moments àlgids de l'última glaciació (estadi isotòpic 2); les xifres indicades són del tot concordants amb els valors usualment admesos, que atribueixen al darrer cicle glacial temperatures mitjanes anuals entre 8° i 12° C inferiors a les d'avui en dia (Muller i MacDonald, 2000).

Centrant-nos en el rang d'edat que es troba recollit a la corba eustàtica proposada (estadis 4 i 5) les temperatures es mourien així mateix —sempre segons Rose *et al.* (1999)— en un ordre de magnitud similar a l'esmentat abans: els valors serien semblants o lleugerament superiors a la mitjana anual present durant els pics càlids (subestadis 5a, 5c i 5e), mentre que descendrien almenys 8-10° C en determinades pulsacions de signe fred (estadis 4, 5b i 5d). Els episodis regressius grafats a la Fig. 7, enregistrats mitjançant els espeleotemes freàtics del llevant de Mallorca, són fortament consistents amb les informacions paleotermomètriques que acabem de comentar.

L'amplitud de les variacions tèrmiques al llarg del lapse de temps analitzat (60-150 ka BP), és sens dubte prou gran 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 mari present, impedeix donar més precisions sobre les condicions ambientals de deposició corresponents als 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 ($\delta^{18}\text{O}$) i del Carboni ($\delta^{13}\text{C}$). 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. Una situació paleoambiental, il·lustrativa en aquest sentit, ha estat estudiada per Durán i López (1999), en l'endocarst de la serra de Líbar (Màlaga); els citats autors posen de relleu l'existència d'una notable fase d'al·luvionament, que tingué lloc durant l'estadi isotòpic 4 (de signe fred), la qual va estar precedida i succeïda per sengles episodis de deposició d'espeleotemes, corresponents als estadis càlids 5 i 3 respectivament. En aquest cas, queda també documentat el caràcter de relativa aridesa de l'últim interglacial, en contraposició a la important activitat hídrica subterrània (amb potent al·luvionament, indicatiu de pluges intenses) ocorreguda a l'estadi isotòpic 4, de clar signe fred.

El que s'acaba d'exposar entra en conflicte amb una part de les observacions paleoambientals postulades per Rose *et al.* (1999). Per als citats investigadors els esdeveniments càlids es caracteritzarien per condicions relativament humides, però de escassa efectivitat geomòrfica per mor de l'estabilitat de la coberta vegetal i de l'edafogènesi activa; per contra, els episodis de signe fred serien de caràcter més àrid, però la degradació de la

coberta vegetal propiciaria una major taxa d'activitat dels processos geomorfològics. Com ja s'ha argumentat, les informacions procedents tant de coves del sud de la península Ibèrica (Durán i López, 1999) com dels espeleotemes freàtics de Mallorca (Vesica *et al.*, 2000), apunten la possibilitat que almanco l'últim interglacial (estadi 5) es caracteritzés per una marcada aridesa, mentre que les pulsacions fredes podrien anar acompanyades d'un règim pluviomètric quantitativament més important.

Resta molta feina per fer encara, per tal d'interpretar de manera adequada el registre paleoclimàtic constituït pels espeleotemes freàtics de les cavitats litorals de la nostra illa. No obstant això, els resultats aconseguits fins al present permeten obtenir una perspectiva nova, i complementària, de l'acusada variabilitat climàtica prehumana que ha singularitzat els temps quaternaris.

Conclusions

Els resultats de les investigacions desenvolupades sobre els espeleotemes freàtics de la costa oriental de Mallorca, es poden sistematitzar de la següent manera:

-La datació radiomètrica, pel mètode Th/U, de mostres d'aquestes cristal·litzacions ha aportat edats que abracen des de 3,9 ka (mostra de cronologia postglacial) fins a >350 ka BP, ja en el límit de resolució del mètode (estadi isotòpic 9, com a mínim).

-Els espeleotemes recol·lectats per sobre del nivell marí actual, que presenten edats inferiors als 250 ka, es correlacionen molt bé amb els estadis 1, 5 i 7 del registre d'isòtops d'oxigen, els quals consisteixen períodes càlids amb un nivell associat de la mar similar o superior al present.

-Estan particularment ben documentats alguns esdeveniments transgressius menors dins l'estadi isotòpic 5, el darrer episodi interglacial; les edats aportades de 83 ka, 107 ka i 117-130 ka corresponen respectivament als subestadis 5a, 5c i 5e. En cap cas s'han trobat evidències d'un nivell marí superior als +2,5

metres, durant els pics transgressius de l'últim interglacial.

-Bona part de les mostres obtingudes per sota de la present cota ± 0 metres es correlacionen a la perfecció amb els estadis 4, 6 i 8, els quals representen esdeveniments climàtics de clar signe fred. També han estat datats paleonivells d'espeleotemes freàtics que enregistren diverses pulsacions regressives, ocoregudes al llarg de l'estadi isotòpic 5.

-En concret, la història del nivell de la Mediterrània 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 del nivell de la mar de fins a 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 anàlisis d'isòtops estables de l'Oxigen i del Carboni, portades a terme sobre algunes de les mostres pertanyents a l'estadi 5, pareixen evidenciar durant l'últim interglacial una notable intrusió marina en el sistema geoquímic litoral, associada a condicions climàtiques de marcada aridesa. Aquest fet qüestionaria l'assumpció habitual que relaciona, en el nostre entorn geogràfic, els moments interglacials amb episodis climàtics de caràcter humídit.

-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. L'obtenció de dades sobre les cristal·litzacions 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 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.

—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 a l'àrea mediterrània.

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 nº PB94-1175 i de la DGEIC nº PB98-0132.

Bibliografia

- Broecker, W.S. i 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. i Isaac, G.L. (Ed.): *After the Australopithecines: stratigraphy, ecology and culture change in the Middle Pleistocene*, 25-71. Chicago.
- Butzer, K. W. i 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.
- Del Olmo, P. i Álvaro, M. 1984. Control estructural de la sedimentación neógena y cuaternaria de Mallorca. *I Congreso Español de Geología*, 3: 219-228.
- Douglas, B.C., Kearney, M.S. i Leatherman, S.P. (Eds.) 2001. *Sea level rise. History and consequences*. Academic Press. 228 pp.
- Durán, J.J. i López, J. 1999. Datación e interpretación paleoambiental de una secuencia endokárstica pleistocena del sur de la península Ibérica. In: Pallí, L. i Roqué, C. (Eds.): *Avances en el estudio del Cuaternario Español*. Universitat de Girona. 59-164. Girona.
- Fairbanks, R. G. i Matthews, R. K. 1978. The marine oxygen isotope record in pleistocene coral, Barbados, West Indies. *Quaternary Research*, 10: 181-196.
- Gelabert, B., Sàbat, F. i Rodríguez-Perea, A. 1992. An structural outline of the Serra de Tramuntana of Mallorca (Balearic Islands). *Tectonophysics*, 203: 167-183.
- Ginés, A. 1995a. Els espeleotemes de les coves de Mallorca / The speleothems of Majorcan caves. In: Ginés, A. i Ginés, J. (Ed.): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 87-97.
- Ginés, A. i 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.
- Ginés, A. i Ginés, J. 1986. On the interest of speleochronological studies in karstified islands. The case of Mallorca (Spain). *Com. 9ª Cong. Int. Espeleol.*, 1: 297-300. Barcelona.
- Ginés, A. i 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. i Pomar, L. 1981a. Phreatic speleothems in coastal caves of Majorca (Spain) as indicators of Mediterranean Pleistocene paleo-levels. *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 533-536. Bowling Green.
- Ginés, A., Ginés, J., Fornós, J.J. i Tuccimei, P. 1999. Dataciones isotópicas de espeleotemas procedentes de cuevas costeras de Mallorca. Estado actual de las investigaciones. In: Andreo, B., Carrasco, F. i Durán, J.J. (Ed.): *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*.

- Patronato de la Cueva de Nerja. 143-152. Nerja (Málaga).
- Ginés, J. 1995b. L'endocars de Mallorca: els mecanismes espeleogenètics / Mallorca's endokarst: the speleogenetic mechanisms. In: Ginés, A. i Ginés, J. (Ed.): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 71-86.
- Ginés, J. 2000. *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximació al coneixement de su morfogènesis y cronologia*. Tesi Doctoral. Universitat de les Illes Balears. 595 pp. Palma de Mallorca.
- Ginés, J. i Ginés, A. 1987. Datos espeleocronológicos sobre el karst de la isla de Mallorca. *Revista de Ciència. Institut d'Estudis Balearics*. 1: 81-92.
- Ginés, J. i Ginés, A. 1993a. Speleochronological approach to some coastal caves from "Cap Vermell" area in Mallorca island (Spain). *Proc. XI Int. Congress Speleol.*, 56-59. Beijing.
- Ginés, J. i Ginés, A. 1993b. Dataciones isotópicas de espeleotemas freáticos recolectados en cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 19: 9-15.
- Ginés, J. i Ginés, A. 1995. Aspectes espeleocronològics del carst de Mallorca / Speleochronological aspects of karst in Mallorca. In: Ginés, A. i Ginés, J. (Ed.): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 99-112.
- Ginés, J., Ginés, A. i 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. i 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.
- Gràcia, F., Clamor, B., Aguiló, C. i Watkinson, P. 1998b. La Cova des Drac de Cala Santanyi (Santanyi, Mallorca). *Endins*, 22: 55-66.
- Gràcia, F., Clamor, B. i Laverne, J.J. 2000. Les coves de Cala Varques (Manacor, Mallorca). *Endins*, 23: 41-57.
- 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.
- Harmon, R.S. 1985. Late Pleistocene sea level history of Bermuda: a review. In: *Geomorfologia litoral y Cuaternario. Homenaje a Juan Cuerda*. Universidad de Valencia. 53-60. Valencia.
- 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. i Pomar, L. 1981. Avance de los resultados obtenidos mediante datación isotópica de algunos espeleotemas subacuáticos mallorquines. *Endins*, 8: 91-93.
- Hillaire-Marcel, C., Gariépy, C., Ghaleb, B., Goy, J.L., Zazo, C. i 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.
- Imbrie, J., Hays, J.D., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Morley, J.J., Pisias, N.G., Prell, W. L. i Shackleton, N.J. 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine ^{18}O record. In: Berger, A. I. et al. (Eds.): *Milankovitch and Climate*. 1: 269-305.
- Mörner, N. A. 1987. Models of global sea-level changes. In: Tooley, M.J. i Shennan, I. (Eds.): *Sea-Level Changes*. Basil Blackwell Ltd. 332-355. Londres.
- Muller, R.A. i MacDonald, G.J. 2000. *Ice ages and astronomical causes. Data, spectral analysis and mechanisms*. Praxis Publishing, Springer Verlag. 318 pp. Chichester.
- Neumann, A.C. i 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.
- Pirazzoli, P.A. 1996. *Sea-level changes. The last 20,000 years*. John Wiley i Sons Ltd. 211 pp.
- Pomar, L. i Cuerda, J. 1979. Los depósitos marinos pleistocénicos en Mallorca. *Acta Geológica Hispánica*. Homenatge a Lluís Solé i Sabaris. 14: 505-513. Barcelona.
- Pomar, L., Ginés, A. i Fontarnau, R. 1976. Las cristalizaciones freáticas. *Endins*, 3: 3-25.
- Pomar, L., Ginés, A. i Ginés, J. 1979. Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. *Endins*, 5-6: 3-17.
- Pomar, L., Rodríguez, A., Fornós, J.J., Ginés, A., Ginés, J., Font, A. i 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. i 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.
- Shackleton, N.J. i 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 and 10^6 year scale. *Quaternary Research*, 3: 39-55.
- Shopov, Y.Y., Stoykova, D., Sanambria, M., Tsankov, L., Ford, D.C., Georgiev, L. i Georgieva, D. 1999. Significance of luminescent speleothem records for determination of orbital variations, glaciations and timing of Termination-II. In: Andreo, B., Carrasco, F. i Durán, J.J. (Eds.): *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja. 135-142. Nerja (Málaga).
- Tuccimei, P., Ginés, J., Ginés, A. i Fornós, J.J. 1997. Th/U dating of sea level-controlled phreatic speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Proc. 12th Int. Congress Speleol.*, 1: 37-40. La Chaux-de-Fonds.
- Tuccimei, P., Ginés, J., Ginés, A., Fornós, J.J. i 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.
- Tuccimei, P., Ginés, J., Delitala, C., Pazzelli, L., Taddeucci, A., Clamor, B., Fornós, J.J., Ginés, A. i 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.
- Vesica, P.L., Tuccimei, P., Turi, B., Fornós, J.J., Ginés, A. i 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.