

Els col·lapses paleocàrstics del miocè superior de Mallorca: estructura, origen i reconeixement als perfils sísmics

Joan J. FORNÓS^{1,2}, Bernadí GELABERT¹, Francesc X. ROIG-MUNAR¹ i Jordi GIMÉNEZ^{1,3}

¹ Grup de Recerca Ciències de la Terra. Facultat de Ciències. Universitat de les Illes Balears. Palma (Illes Balears). Email: joan.fornos@uib.cat

² Societat Espeleològica Balear. Palma (Illes Balears)

³ Direcció General de Recursos Hídrics. Conselleria de la Mar i del Cicle de l'Aigua. Palma (Illes Balears)

Abstract

Based on the geometry and the stratigraphic relationships between the two Upper Miocene units of the SE of Mallorca (from base to top, the Reefal Unit and the Santanyí Limestone Unit) a series of sinsedimentary karst paleocollapse formation models are presented. The karstic paleocollapses of the study area are formed when a void is created due to the dissolution of the limestone levels of the Reefal Unit, when some layers of the Santanyí Limestone Unit had already been deposited. The void causes synclinal bending of the upper limestones, which may or may not be accompanied by breccia formation in the central part of the fold and also filling the solution void. Karst collapses have been studied both in the cliffs of the coast of Santanyí and in seismic reflection profiles carried out in 1998 during an oceanographic campaign in the coastal area of Santanyí. The results show that the karst collapses are also below the seabed and have the same dimensions and morphologies as those observed in the coastal cliffs of SE Mallorca. Finally, the sedimentological and geomorphological evolution of this area of SE Mallorca, from the Upper Miocene to the present day, is shown.

Resum

A partir de la geometria i de les relacions estratigràfiques entre les dues unitats del miocè superior del Llevant de Mallorca (de base a sostre, Unitat d'Esculls i Unitat Calcàries de Santanyí) es presenten una sèrie de models de formació de paleocol·lapses càrstics sinsedimentaris. Els paleocol·lapses càrstics de la zona d'estudi es formen quan es produeix un buit per dissolució dels nivells de calcàries de la Unitat d'Esculls, quan ja s'havien dipositat algunes capes de la Unitat Calcàries de Santanyí. El buit provoca la flexió sinclinal de les calcàries superiors, la qual pot anar acompanyada, o no, de bretxes a la part central del plec o també reomplint el buit generat per la dissolució. Els paleocol·lapses càrstics s'han estudiat tant als penya-segats del litoral de Santanyí com a uns perfils de sísmica de reflexió realitzats l'any 1998 a una campanya oceanogràfica de la zona costanera de Santanyí. Els resultats mostren que els paleocol·lapses càrstics també es troben per sota del fons de la mar i tenen les mateixes dimensions i morfologies que els observats als penya-segats litorals del SE de Mallorca. Finalment, es mostra l'evolució sedimentològica i geomorfològica d'aquesta zona del SE mallorquí, des del miocè superior fins a l'actualitat.

Fornós, J.J.; Gelabert, B.; Roig-Munar, F.X. i Giménez, J. (2024): Els col·lapses paleocàrstics del miocè superior de Mallorca: estructura, origen i reconeixement als perfils sísmics. Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 151-163. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear. Rebut: 9 octubre 2024; Revisat: 19 octubre 2024; Acceptat: 22 octubre 2024. Publicat online: 12 novembre 2024.

Introducció

L'aspecte més pràctic dels estudis relacionats amb el carst està associat amb la porositat que es produeix durant el procés de carstificació (o dissolució), la qual pot ser emplenada d'aigua (FORD & WILLIAMS, 2007; KLIMCHOUK et al., 2000) o bé de petroli (POPENHOE et al., 1984; DANIELS et al., 2020). La recerca d'aquesta porositat, o dit d'altra manera, d'aquests reservoris de petroli o d'aigua, és l'objectiu principal de la indústria petrolera i de les companyies d'explotació dels recursos hídrics.

Els perfils de sísmica de reflexió permeten interpretar el subsòl d'una manera acurada i són, per tant, una eina primordial en la investigació geològica. FORD & WILLIAMS (2007) constataren que hi ha una notable absència d'interpretacions del relleu càrstic als perfils sísmics. Si bé els grans relleus càrstics són mals d'interpretar en els perfils sísmics, especialment les típiques torres càrstiques o els pinacles (ja que poden ser erosionades en zones aixecades), algunes morfologies puntuals i negatives en quant a relleu associades al carst, com ara els col·lapses càrstics, poden ser identificades amb facilitat (STEEPLES et al., 1984; POPENOE et al., 1984; SNYDER et al., 1989; CHEN & BECK, 1989; BERTONI & CARTWRIGHT, 2005; BROUGHTON, 2017; DANIELS et al., 2020).

Els dipòsits carbonatats, disposats horitzontalment, del miocè superior que formen part de l'illa de Mallorca (Figura 1) són una magnífica base sobre la qual es poden observar fenòmens paleocàrstics. Així, els processos geològics que afectaren la Mediterrània occidental durant els darrers episodis del miocè superior provocaren esdeveniments d'emersiò d'aquestes zones carbonatades, tot donant pas al desenvolupament d'importants fenòmens càrstics i coincidint amb la sedimentació dels nivells superiors de miocè. Entre aquests, la presència de morfologies de col·lapse càrstic és un dels trets a destacar.

En el present article es presenten per primera vegada imatges de paleocol·lapses càrstics a partir de la interpretació dels perfils sísmics realitzats al litoral marí de la zona del Parc Natural de Mondragó a Santanyí, al SE de l'illa de Mallorca (Figura 1), així com també imatges (juntament amb l'explicació del seu desenvolupament) dels paleocol·lapses càrstics que apareixen als penya-segats litorals de la costa de Santanyí descrits anteriorment per altres autors (FORNÓS et al., 1989; FORNÓS, 1999; GINÉS, 2000; ROBLEDO & POMAR, 2000; entre d'altres).

Context geològic

Des d'un punt de vista morfoestructural, l'illa de Mallorca està formada per tres serres (Tramuntana, Centrals i Llevant, de NO a SE - Figura 1-) que es formaren durant el miocè inferior i mig, formant un cinturó de plecs i encavalcaments. A les serres hi trobem roques d'un rang d'edat comprès entre el paleozoic superior i el miocè mig, totes elles involucrades en la compressió.

Una vegada formades les serres, durant el miocè superior es produeix un període d'estabilitat tectònica dominat per la sedimentació al voltant del cinturó de plecs i encavalcaments. Aquesta sedimentació pren forma en una plataforma escullosa, la qual té, a gran escala, una disposició horitzontal. De fet, aquesta plataforma escullosa és la que conforma unes zones topogràficament planes i que corresponen, des d'un punt de vista topogràfic, als planells de Lluçmajor (Marina de Lluçmajor al Sud de l'illa), Llevant (Marina de Llevant a l'Est de l'illa) i o Llubí-Muro (la Marineta al N de l'illa). És en aquestes zones on es troben els col·lapses càrstics que es presenten a continuació. Simultàniament a la sedimentació de la plataforma escullosa, i també amb posterioritat, l'illa restà sotmesa a extensió, la qual donà lloc a les principals conques de l'illa: de SO a NE, la conca de Palma, la conca d'Inca i la conca de Sa Pobla (Figura 1).

La columna estratigràfica del miocè superior (Figura 2) consisteix en calcarenites i calcisiltites que alternen a la base, evolucionant cap a calcàries i calcarenites d'escull massives (Unitat d'Esculls) que

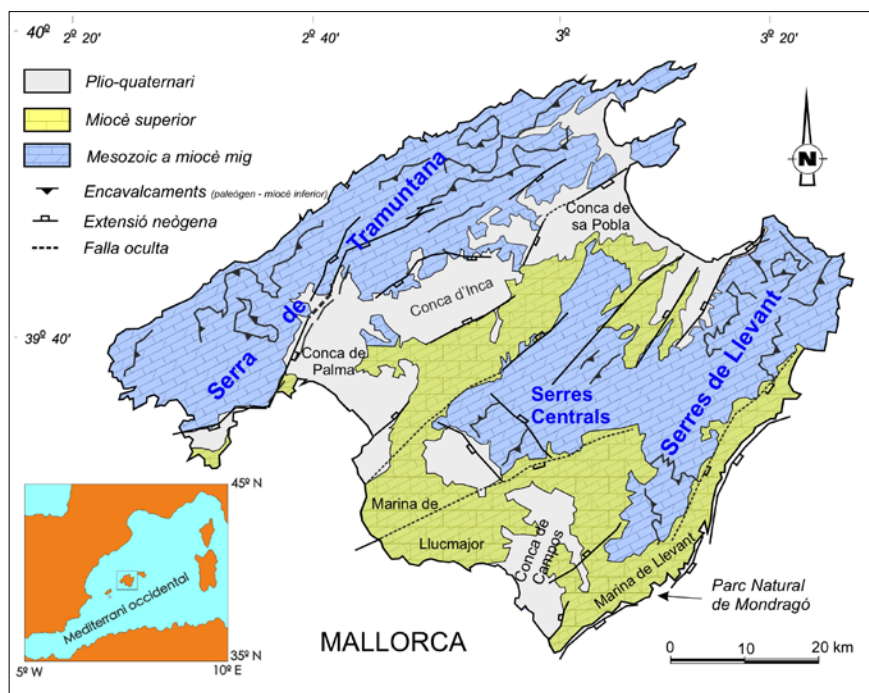


Figura 1: Mapa geològic simplificat de l'illa de Mallorca (modificat de GINÉS et al., 2014).
Figure 1: Simplified geological map of the island of Mallorca (modified from GINÉS et al., 2014).

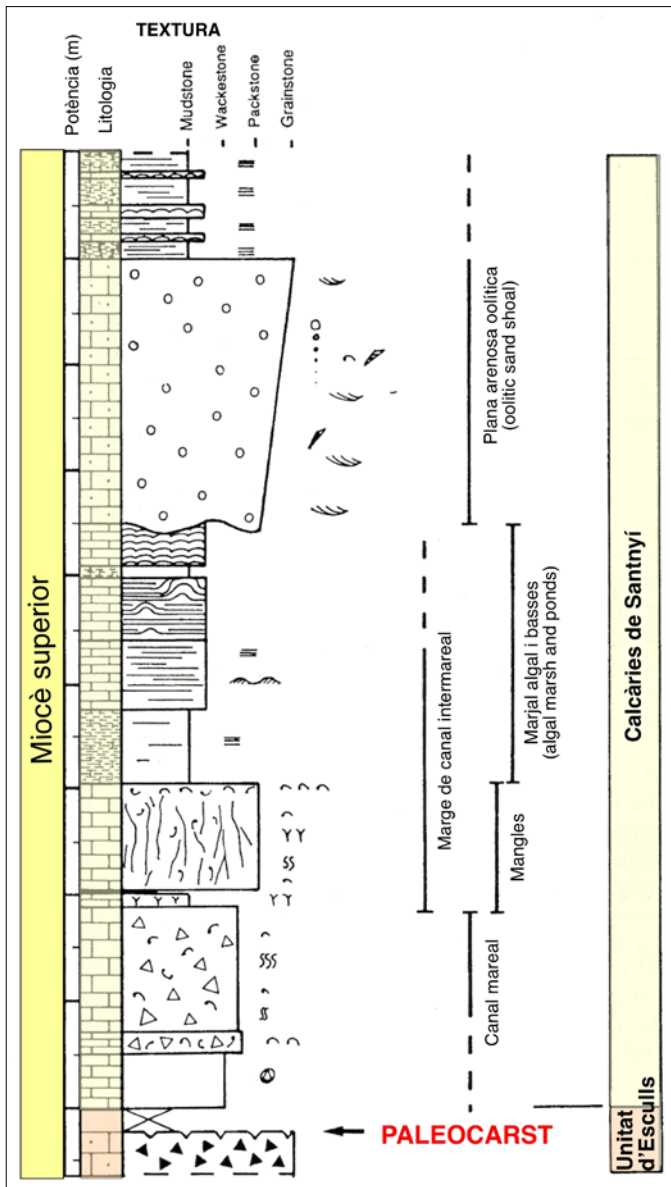


Figura 2: Columna estratigràfica del miocè superior de Mallorca (modificat de FORNÓS, 1999).
Figure 2: Stratigraphic column of the Upper Miocene of Mallorca (modified from FORNÓS, 1999).

acaben amb calcàries oolítiques i estromatolítiques (la Unitat Calcàries de Santanyí de POMAR et al., 1983). El ben desenvolupat episodi dels esculls del miocè superior de Mallorca, amb equivalents i seqüències molt semblants a moltes d'altres zones de la Mediterrània, fou descrit per primera vegada per ESTEBAN (1979/80). Està compost per calcarenites bioclàstiques i esculls de corall i correspon al desenvolupament d'un escull de corall de tipus barrera amb àmplies llacunes de rere-escull. Una superfície erosiva és visible a la part superior de la unitat on s'observa clarament la carstificació amb fenòmens de col·lapse.

A les zones sud i est de Mallorca aquesta formació d'esculls està coberta per la "Unitat Calcàries de Santanyí" –l'anomenat Complex Terminal– (FORNÓS & POMAR, 1984). Aquest està format per dipòsits carbonatats de tipus litoral que impliquen una gran varietat de facies, com ara facies de manglars, calcàries oolítiques i calcàries estromatolítiques als nivells superiors (Figura 2). La part superior de la unitat sembla truncada per una marcada superfície d'erosió coberta per dipòsits d'edat pliocènica que amb prou feines afloren a les "marines", i per dipòsits del plio-quadernari i quadernari, bàsicament formats per eolianites, corresponents als episodis dunars que se relacionen amb els esdeveniments de signe fred del pleistocè (BUTZER & CUERDA, 1962; CUERDA, 1975; FORNÓS et al., 2012).

Aquests afloraments tabulars dels sediments del miocè superior es presenten al llarg dels penya-segats de la costa sud i est. Els penya-segats tenen una acusada continuïtat lateral i la seva façana pot arribar a superar els 30 m d'alçada. Els planells que componen aquests dipòsits postorogènics estan solcats per torrents que condicionats en el seu traçat per la fracturació, en arribar a la línia de costa tenen el caixer inundat per la mar, tot bastint les clàssiques macroformes del modelat de les costes rocoses que es coneixen com a cales en un sentit geomòrfic estricte (ROSSELLÓ, 2005;

GÓMEZ-PUJOL et al., 2013). La continuïtat i la mida dels afloraments costaners permeten estudis sedimentològics i paleocàrstics acurats.

Mètodes

L'octubre de 1998, en el marc d'una campanya de geofísica marina a bord del vaixell Walkyria, es realitzaren 21 línies de sísmica de reflexió perpendiculars a la costa de Santanyí, entre Cala Figuera i la punta des Pont a Portopetre, i una línia de sísmica de reflexió de forma paral·lela a la mateixa costa (Figura 3). Les línies sísmiques suposen talls d'informació geològica submarina amb una longitud total d'aproximadament 50 kilòmetres i representen un recurs important per conèixer quina és l'estructura geològica de la zona. Els perfils sísmics perpendiculars a la costa (de direcció NO-SE) estan separats entre si una distància de 200 m i tots comencen a la menor distància possible de la costa, a partir dels 3 m de profunditat i fins als 50 m de fondària. El perfil longitudinal, de direcció NE-SO, té una longitud de 4,2 km i va paral·lel a la costa, seguint aproximadament la isòbata dels 35 m.

Les dades digitals batimètriques s'obtingueren mitjançant una ecosonda Echotrac DF-3200 bi-freqüència amb funcionament simultani (24 i 200 kHz) i una resolució de 5 cm. Les dades

batimètriques es corregiren mitjançant les sèries temporals del mareògraf del Centre Oceanogràfic de Balears (IEO). Les dades es referien al nivell mitjà del mar al port de Palma on resta instal·lat el mareògraf.

Totes les dades s'emmagatzemaren digitalment mitjançant un sistema de navegació i adquisició de dades Hypack (Coastal Oceanographics) amb posicionament de latitud i longitud obtingut per un GPS diferencial Trimble AgGPS 132 amb l'estació de ràdio de referència via satèl·lit Racal-LandStar. Finalment, els perfils sísmics s'escanejaren digitalment i després es processaren per a la seva interpretació.

Els paleocol·lapses càrstics: geometria i model genètic

A la zona d'estudi, els paleocol·lapses càrstics afecten a les facies carbonatades del miocè superior i engloben tant la Unitat d'Esculls basal com la Unitat Calcàries de Santanyí superior (FORNÓS et al., 1989, 1995; GINÉS, 2000; GINÉS et al., 2011). Es veuen especialment bé a la part de la Marina de Llevant que pertany al terme municipal de Santanyí i, en concret, als penya-segats litorals que es troben entre

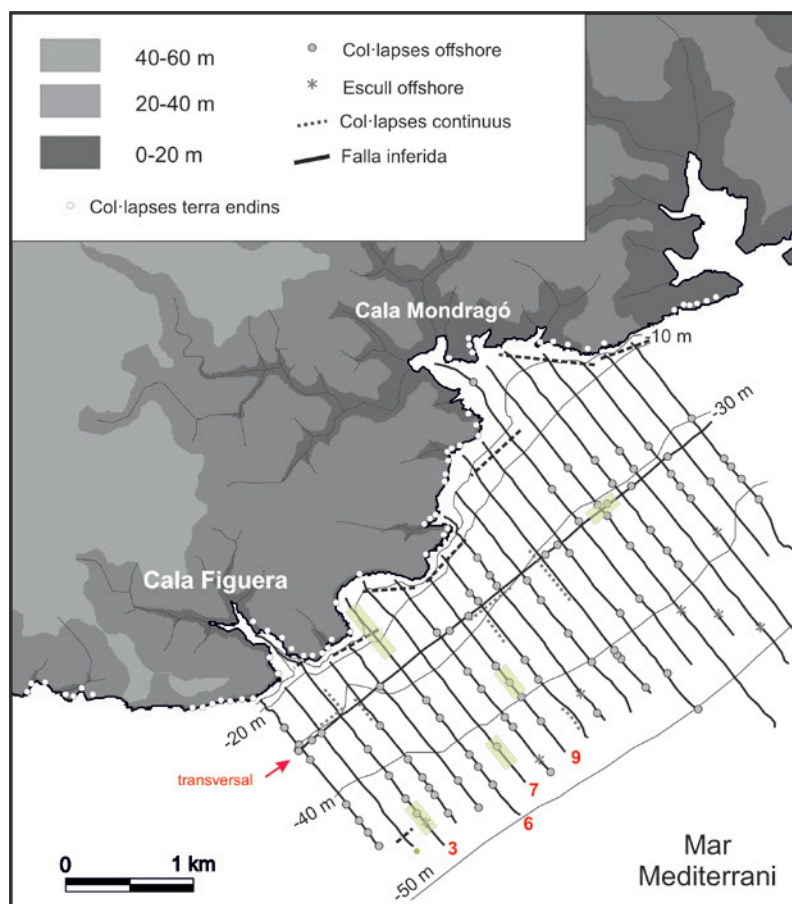


Figura 3: Localització de la zona d'estudi i situació dels perfils sísmics.
Figure 3: Location of the study area and location of the seismic profiles.

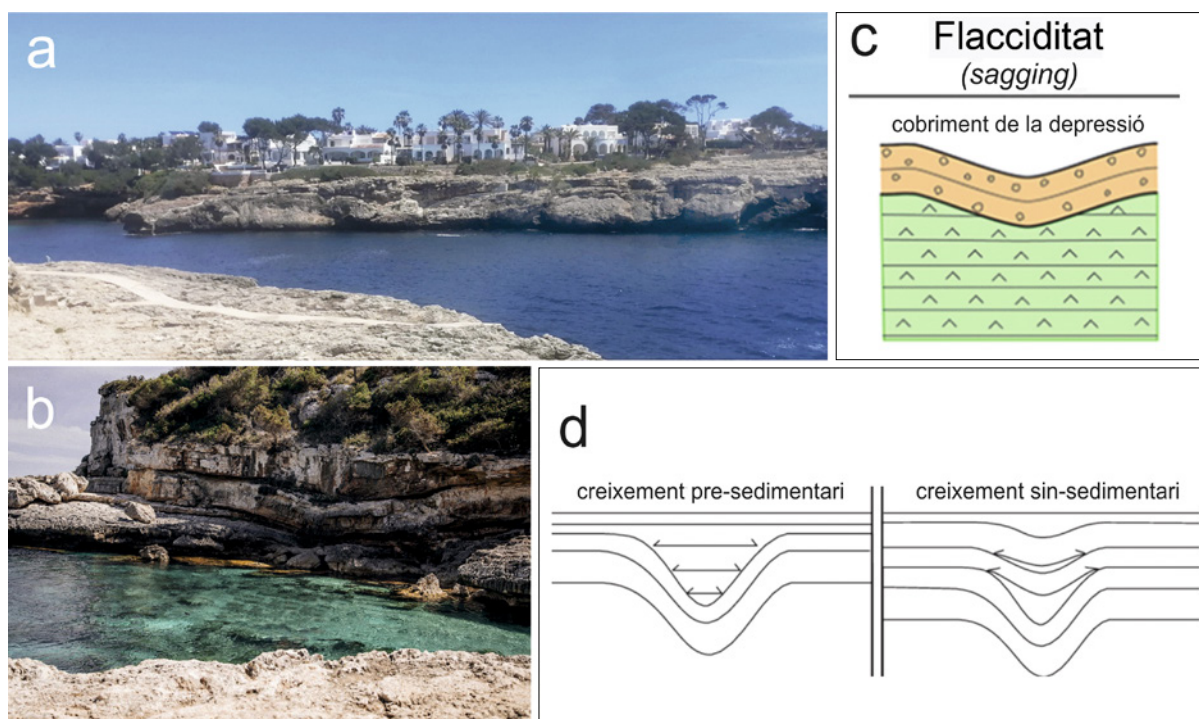


Figura 4. Col·lapses càrstics a Caló de Ses Egos (a) i Caló des Macs (b). A la dreta, esquemes d'un "cover sagging sinkhole".
Figure 4: Karst collapses in Caló de Ses Egos (a) and Caló des Macs (b). On the right, diagrams of a "cover sagging sinkhole".

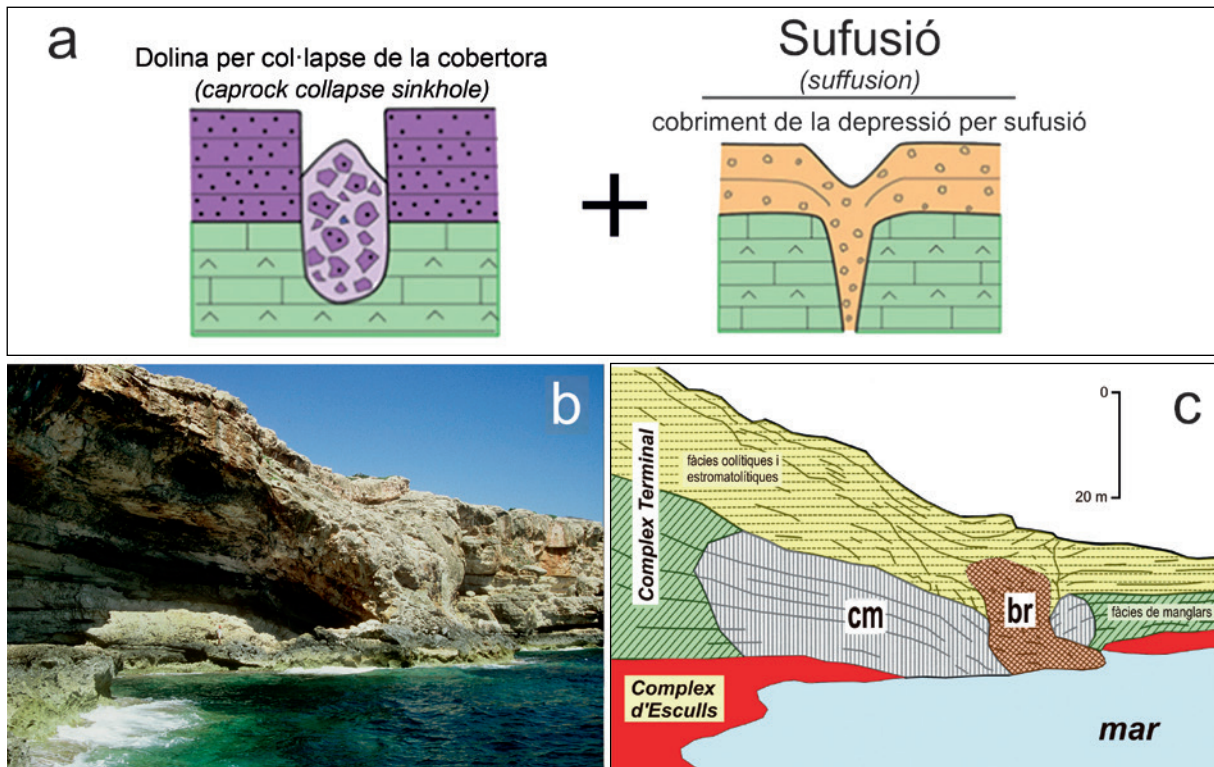


Figura 5: a) Una estructura pot ser el resultat d'un col·lapse amb formació de bretxes (*caprock collapse*) i una deformació en sinclinal (*cover suffusion*). b) Col·lapse càrstic al Niu de s'Àguila. c) A la dreta hi ha l'esquema de la fotografia (GINÉS, 2000).
 Figure 5: a) A structure can be the result of a collapse with the formation of breccias (*caprock collapse*) and a syncline deformation (*cover suffusion*). b) Karst collapse in Niu de s'Àguila. c) On the right is the outline of the photograph (GINÉS, 2000).

Cala Llombards i Cala Santanyí. Si es ressegueix el contacte entre les dues unitats esmentades, és possible identificar a les parets dels penya-segats unes inflexions en forma còncaua laxa que afecten a la geometria horitzontal dels estrats dels materials del Complex Terminal, i d'altres vegades, estructures més complexes en què la concavitat laxa adquireix una forma d'embut o rellotge d'arena, on els elements inferiors de l'accident l'integren materials bretxoides.

Des d'un punt de vista genètic, els paleocol·lapses càrstics de la zona d'estudi es formen quan es produeix un buit per dissolució dels nivells de les calcàries de la Unitat d'Esculls. En el moment en què es generà aquest buit, la Unitat Calcàries de Santanyí ja s'havia dipositat atès que les calcàries estan plegades degut al buit, tot i que encara els nivells no devien estar del tot cimentats, ja que presentaren certa plasticitat. El buit o zona de dissolució, pot manifestar-se en un espectre molt ampli de formes en funció de diferents factors producte de la fracturació, la geometria dels cossos sedimentaris així com de la naturalesa dels materials. Tanmateix, a grans trets, es poden simplificar les tipologies de buit en dues categories bàsiques: aquells que tenen una disposició bàsicament horitzontal i els que tenen una disposició vertical. Si el buit a la Unitat d'Esculls té una disposició horitzontal, els nivells superiors de la Unitat Calcàries de Santanyí es pleguen formant un sinclinal lax (*Cover sagging sinkhole*, d'acord amb GUTIÉRREZ, 2016) just per sobre del buit (Figura 4). Si el buit a la Unitat d'Esculls té una disposició vertical es poden donar dos fenòmens, tant per separat com a la vegada: 1) un enfonsament i caiguda dels materials superiors (i també de les parets adjacents) que reomplen parcialment el buit en forma de bretxes (*cover collapse sinkhole* i *caprock collapse sinkhole* de GUTIÉRREZ, 2016 –Figura 5–), i 2) un plegament, en forma de sinclinal, dels nivells que estan per sobre del buit (Figures 6 i 7). En aquest últim cas, es tracta dels nivells superiors que pertanyen a la Unitat Calcàries de Santanyí i que tenen continuïtat amb les bretxes que reomplen part del buit (*cover suffusion sinkhole* –GUTIÉRREZ, 2016–). Cal remarcar que aquests dos fenòmens es poden donar a la vegada, com succeeix al col·lapse del Niu de s'Àguila (Figura 5) o bé per separat, com per exemple es pot apreciar als col·lapses d'es Savinar i al caló d'es Savinar (Figura 6).

Si els buits creats per dissolució a la Unitat d'Esculls no queden buits, la porositat secundària o l'espai generat s'omple amb bretxes compostes per fragments angulosos i subangulosos de rocam tant de la Unitat d'Esculls, com de la unitat Calcàries de Santanyí. També és freqüent la participació de llms vermells reomplint els espais que deixa la carcassa de la bretxa. Aquests llms procedeixen

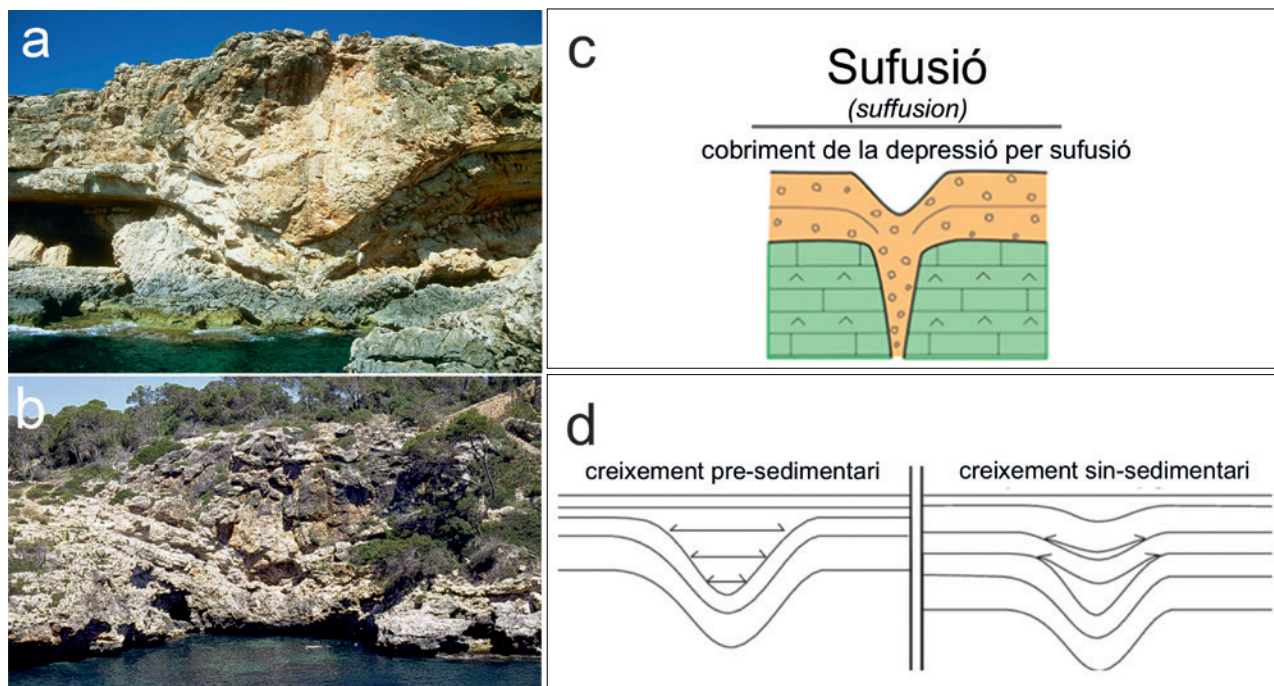


Figura 6: a) Col·lapse càrstic a n'Es Savinar. b) Col·lapse càrstic al Caló des Savinar. c) L'estructura superior és un sinclinal on els flancs tenen un cabussament alt. d) Dues formes distintes de rebliment del sinclinal.

Figure 6: a) Karst collapse in Es Savinar. b) Karst collapse in Caló des Savinar. c) The upper structure is a syncline where the limbs have a high dip. d) Two different forms of filling the syncline.

de diferents rebliments que no estan relacionats amb el fenomen del col·lapse (Figura 8) i que corresponen a l'última etapa dels rebliments dels buits (porositat intraclast).

En els casos en què el buit creat per dissolució és vertical, connectant la part inferior amb la superior del col·lapse, hi ha un estret conducte en forma de xemeneia les parets del qual són rectilínies i gairebé verticals (FORNÓS, 1999). Aquest conducte sol estar reblert per bretxes i blocs caiguts provinents tant de la Unitat d'Esculls com de la Unitat Calcàries de Santanyí. Les bretxes es fusionen cap a la part superior de la xemeneia amb la depressió sinclinal que es formà per deformació plàstica dels nivells inferiors de la calcària de Santanyí.

Els tipus de bretxes més evidents són les generades pel col·lapse del sostre i les parets laterals del rocam on s'ha format el buit, així com pel rebliment de roques i clasts procedents de la Unitat Calcàries de Santanyí. La porositat entre bretxes s'emplena amb ciment carbonatat de diversos tipus, freàtic i/o vadós depenent de la situació diagenètica i temporal. En els casos en què les bretxes impliquen els nivells inferiors de la Unitat Calcàries de Santanyí (fàcies de manglar), les bretxes suportades amb matriu contenen clasts de subangulosos a subarrodonits, de mida menor (centimètrica) i una matriu composta per calcarenites i calcisiltites. Quan també es veuen implicats en l'enfonsament els nivells superiors de les Calcàries de Santanyí –formats per grans oolítics–, els dipòsits de bretxes resultants són oligomíctics i contenen clasts angulosos, de mides que van des d'uns pocs centímetres, fins a més d'un metre, sense matriu. En alguns casos els clasts mostren deformació plàstica.

Les dades morfomètriques d'aquestes estructures de col·lapse són variables. Tanmateix, a partir de la població de col·lapses identificats a la zona d'estudi (18 paleocol·lapses) (Figura 3), en termes estadístics el diàmetre màxim de la forma de l'embut (sinclinal) superior oscil·la entre 25 i 90 m, encara que també es poden trobar xemeneies molt reduïdes (<5 m de diàmetre). La seva profunditat màxima oscil·la entre 3,5 i 14 m; l'angle de les parets de les depressions és d'entre 20° i 30°. L'angle pot superar els 45° a la xemeneia on també s'hi observen parets verticals. El diàmetre de la xemeneia, en els escassos casos en què s'ha pogut observar, pot oscil·lar entre un i uns pocs metres.



Figura 7: Àngel Ginés al peu del col·lapse càrstic de la Figura 6a.
Figure 7: Àngel Ginés at the foot of the karst collapse of Figure 6a.

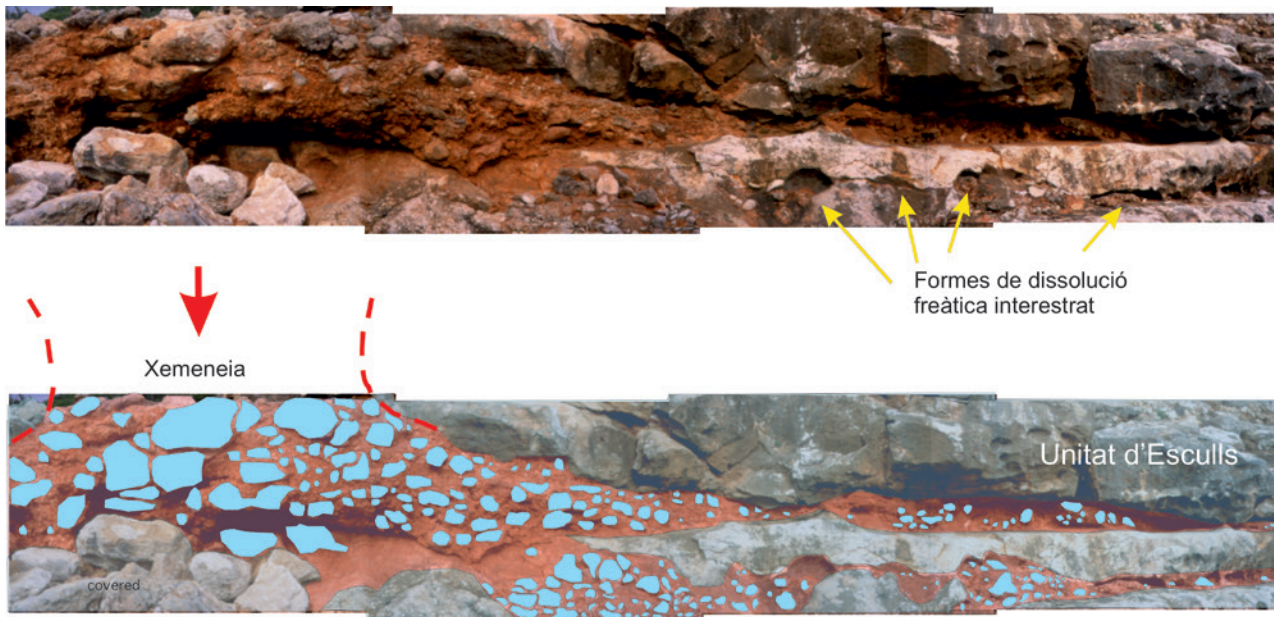


Figura 8: Rebliment de bretxes i llims vermellosos.
Figure 8: Filling of breccias and reddish silts.

Caracterització sísmica dels paleocol·lapses càrstics

Tot i que no és habitual en la bibliografia geològica, diversos autors han identificat estructures de col·lapse a perfils de sísmica de reflexió (DE BATIST & VERSTEEG, 1999; BERTONI & CARTWRIGHT, 2005; BROUGHTON, 2017; DANIELS et al., 2020; entre d'altres), bé siguin col·lapses d'origen càrstic –principalment relacionats amb plataformes carbonatades– o col·lapses d'origen evaporític –relacionats amb guixos o doms salins–, normalment associats a grans llacs.

Els mètodes de reflexió sísmica són, així, capaços de delinear l'estructura geològica dels col·lapses a algunes localitats. Als perfils sísmics de la nostra zona d'estudi, és a dir, la plataforma carbonatada del miocè superior dels voltants de Cala Mondragó (Figura 3) s'han pogut identificar alguns casos de col·lapse a partir dels reflectors. L'èxit d'aquestes tècniques depèn de l'existència de contrastos de velocitat i/o densitat en els materials geològics dins i al voltant dels col·lapses. En el cas estudiat, la variació litològica i textural entre les unitats és escassa, però encara que les dues unitats involucrades en els col·lapses són de naturalesa calcària, les calcàries de la Unitat Calcàries de Santanyí són més margoses i amb una marcada estratificació, mentre que la Unitat d'Esculls es caracteritza per la seva alta porositat i estratificació massiva.

Malgrat la uniformitat litològica, als perfils sísmics són fàcils de definir uns reflectors superiors molt continus, d'alta amplitud i baixa freqüència, amb un pendent molt suau cap a l'est, sense deformacions, que es corresponen amb els materials del plio-quadernari. Per sota d'aquesta unitat, els reflectors perden continuïtat, l'amplitud és un poc més baixa encara que la freqüència es manté respecte a la unitat superior. No obstant això, la diferència més notable és que aquests reflectors inferiors estan plegats. S'interpreten aquests reflectors com corresponents als materials del miocè superior, degut al caràcter sísmic discontinu propi dels bancs carbonatats d'alta velocitat que emmascaren els reflectors subjacents. Observats en detall, alguns reflectors presenten una flexió i/o plegament que caracteritzen la proximitat del col·lapse.

Els trets que defineixen més clarament un col·lapse als perfils sísmics són: 1) la interrupció de la continuïtat dels reflectors d'amplitud més baixa i alta freqüència (corresponent a la Unitat Calcàries de Santanyí); 2) la flexió dels reflectors en les proximitats de les interrupcions, equivalent, respecte dels col·lapses que es poden veure a les façanes dels penya-segats per sobre del nivell marí, a la flexió de les capes de la Unitat Calcàries de Santanyí, i 3) el canvi de fàcies sísmica a l'altre costat de la flexió, on els reflectors tenen una estructura completament desordenada, els quals correspondrien a la zona de bretxes central del col·lapse, les xemeneies abans descrites. Les Figures 9, 10, 11 i 12 mostren exemples de col·lapses interpretats als perfils sísmics, els quals presenten les 3 característiques anteriors.

Així, a la Figura 9 es mostra un fragment del perfil sísmic 3 (Figura 3). S'hi observen, per sota d'uns reflectors superiors molt continus de baixa freqüència i alta amplitud, uns reflectors, no tan

continus però també de baixa freqüència i alta amplitud, plegats en forma sinclinal. Al centre del sinclinal els reflectors perden continuïtat i tenen un aspecte desordenat. L'amplitud del sinclinal és de l'ordre de 90 m, mentre que l'amplada de la zona central, interpretada com a zona de bretxes, és aproximadament de 10 m.

El col·lapse càrstic de la Figura 10 presenta la mateixa geometria que el de la Figura 9, però l'amplada de la zona de bretxes central és més gran (30 m). El col·lapse es formà en el lapse de temps que va des de la capa que correspon al reflector blau superior i a la capa corresponent al reflector inferior horitzontal groc. Les Figures 11 i 12 també mostren la interpretació que s'ha fet dels paleocol·lapses càrstics als perfils sísmics. La morfologia general és la mateixa; la diferència és l'amplada de la zona de bretxes, la qual és de 25 m a la Figura 11 i de 15 m a la Figura 12.

Discussió

Els paleocol·lapses càrstics de la zona d'estudi es formaren principalment en condicions submarines, encara que a molt poca profunditat, tal com s'intueix pels nivells sinsedimentaris observats durant la deposició de la Unitat Calcàries de Santanyí. Efectivament, la creació dels buits degut a la dissolució de la calcària provoca una flexió dels nivells superiors formant una estructura sinclinal. Si els materials que reomplen els sinclinals es dipositen horitzontals, vol dir que el rebliment és posterior al col·lapse (Figura 4d). En canvi, si les capes del rebliment es disposen formant un sinclinal progressivament més lax cap al sostre, indiquen que els materials del rebliment són sincrònics amb el col·lapse (Figura 4d). En el camp s'observa com les capes del rebliment solen formar un sinclinal progressivament més lax cap al sostre, com succeeix, per exemple, al Caló de Ses Egos (Figura 4a), al Caló des Macs (Figura 4b) i al Savinar (Figura 6). En canvi, als perfils sísmics el rebliment dels col·lapses interpretats sembla disposar-se de manera horitzontal a les Figures 9 i 10, indicant que el col·lapse és anterior al rebliment, mentre que als col·lapses de les Figures 11 i 12 sembla un rebliment formant un sinclinal progressivament més lax cap al sostre. En qualsevol cas no es pot descartar que hi hagi col·lapses que s'han desenvolupat sincrònicament amb el rebliment,

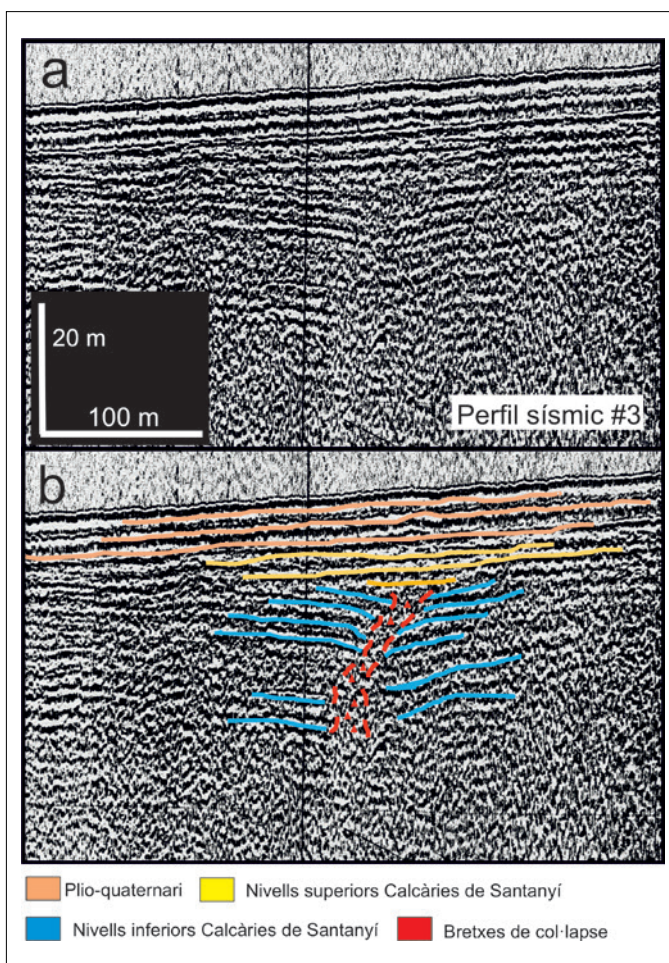


Figura 9: Col·lapse càrstic interpretat al perfil sísmic 3 (situació a la Figura 3).
Figure 9: Karst collapse interpreted in seismic profile 3 (situation in Figure 3).

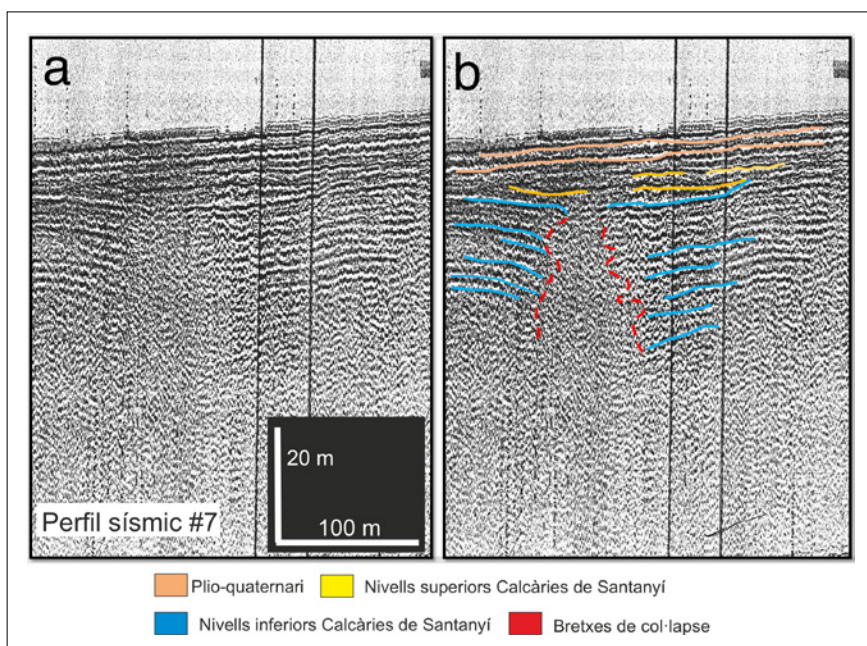


Figura 10: Col·lapse càrstic interpretat al perfil sísmic 7 (situació a la Figura 3).
Figure 10: Karst collapse interpreted in seismic profile 7 (situation in Figure 3).

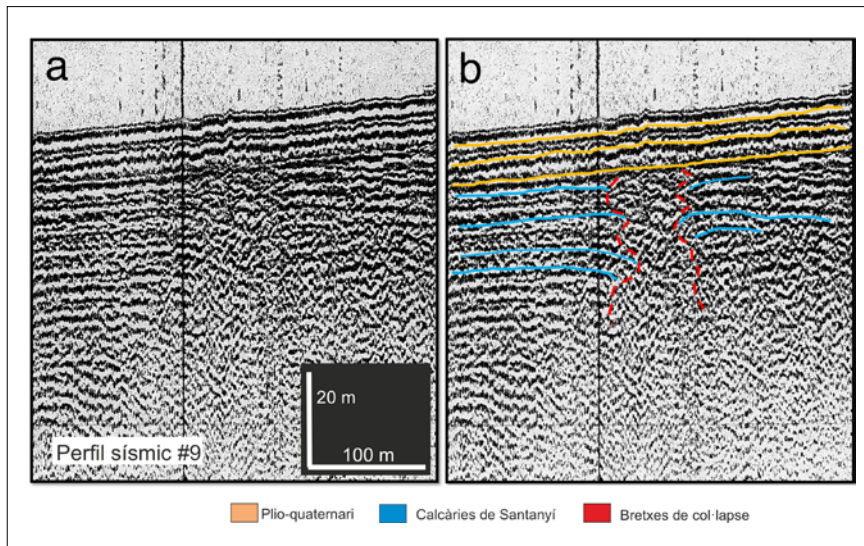


Figura 11: Col·lapse càrstic interpretat al perfil sísmic 9 (situació a la Figura 3).
Figure 11: Karst collapse interpreted in seismic profile 9 (situation in Figure 3).

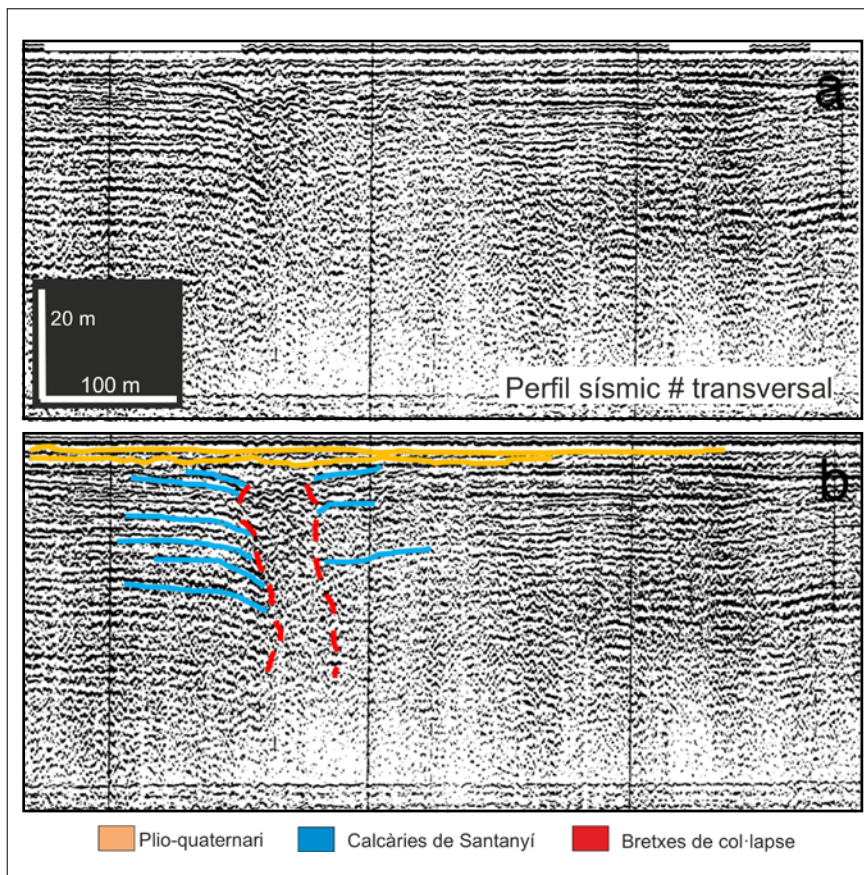


Figura 12: Col·lapse càrstic interpretat al perfil sísmic transversal (situació a la Figura 3).
Figure 12: Karst collapse interpreted in the transversal seismic profile (situation in Figure 3).

és a dir, durant la sedimentació de la Unitat Calcàries de Santanyí i col·lapses que s'hagin format abans del rebliment horitzontal, és a dir, abans de la deposició dels nivells més alts de la Unitat Calcàries de Santanyí.

Tots els col·lapses càrstics observats semblen ser el producte de la dissolució de les calcàries de la Unitat d'Esculls a través del flux subterrani dins de l'aquífer del miocè superior en condicions freàtiques (Figura 8). A causa de les condicions costaneres durant la deposició de la Unitat d'Esculls i la Unitat Calcàries de Santanyí, el flux subterrani des de les Serres de Llevant adjacents cap a l'aquífer del miocè superior pot haver tingut un paper important. Els carbonats de la Unitat d'Esculls no estaven coberts per una capa impermeable i haurien estat sotmesos al moviment descendent de l'aigua de pluja per percolació. Aquest fet pot haver dissolt els carbonats menys resistents (FORNÓS, 1999; ROBLEDO & POMAR, 2000) o bé zones on hi hagués fracturació. En altres paraules, és fàcil pensar que la dissolució i la formació de cavitats més pronunciades poden haver tingut lloc, inicialment, durant el nivell del mar baix del miocè superior (HARDENBOL et al., 1998) quan la plataforma calcària de l'escull restà exposada aèriament. Així doncs, les evidències donades per l'estratigrafia, el rebliment i la morfologia dels col·lapses, suggereixen que la dissolució major inicial es produí en condicions subaèries relacionada en gran part amb la denominada crisi de salinitat miocena durant l'època messiniana (MAS-GORNALS, 2018) i segurament, la dissolució menor i el col·lapse es produïren en condicions submarines però de poca profunditat. No s'ha d'obviar

tampoc el paper que pugui haver tingut la zona de mescla d'aigües meteòriques i marines tenint en compte les característiques paleoambientals litorals dels tipus de dipòsits carbonatats presents, així com el pes de la càrrega dels materials que es superposen a la Unitat d'Esculls.

La variabilitat dimensional és una de les característiques d'aquest tipus de col·lapse. Les obertures molt petites a la superfície de la roca calcària poden crear depressions, desenes de vegades més grans, si hi ha prou espai buit dins de la roca calcària per acceptar el sediment subsident (CHEN & BECK, 1989). No hi ha una relació directa entre les dimensions de la secció de l'eix i el col·lapse de la superfície. Així,

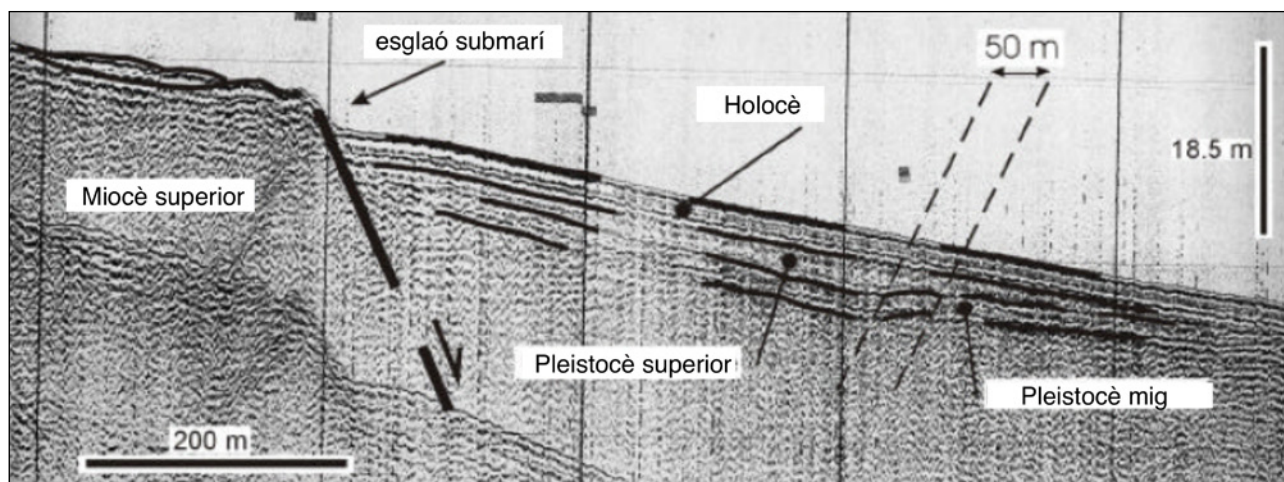


Figura 13: Falla normal, origen del penya-segat costaner de la zona d'estudi, interpretada al perfil sísmic 6 (situació a la Figura 3).
 Figure 13: Normal fault, origin of the coastal cliff of the study area, interpreted in seismic profile 6 (situation in Figure 3).

com demostraren CHEN & BECK (1989) en el modelatge de dolines, el col·lapse superficial es produeix més ràpidament i és més gran si l'obertura a la roca calcària és més gran. La depressió superficial pot ser moltes vegades més gran que l'obertura a la roca calcària. Les dimensions dels col·lapses estudiats en superfície són molt semblants a les dimensions dels col·lapses submarins interpretats als perfils sísmics i oscil·len entre els 25 i els 90 m de diàmetre.

Seguint una secció perpendicular a la línia de costa de terra a mar, el pas dels col·lapses observables al penya-segat als col·lapses submarins es fa mitjançant una falla normal (FORNÓS et al., 2006) que enfonsa el bloc marí respecte el bloc terrestre (Figura 13). El perfil sísmic de la Figura 13 és una part del perfil sísmic 6 de la Figura 3. Aquest perfil sísmic mostra un esglaó clar al fons del mar. Aquest esglaó delimita dues àrees amb diferents atributs de reflexió. Al nord-oest de l'esglaó, els reflectors inferiors tenen una geometria desordenada, els reflectors superiors són paral·lels i tenen una baixa freqüència i una amplitud elevada, i els reflectors més superficials (també de baixa freqüència i alta amplitud) se sobreposen als reflectors que tenen a sota. Al sud-est de l'esglaó es poden diferenciar quatre unitats diferents, de la base a la part superior: 1) la unitat més baixa té uns reflectors desordenats; 2) la segona unitat consta de reflectors molt continus, d'alta amplitud i baixa freqüència; aquesta unitat s'enfonsa cap al SE i es plega suauement; 3) la tercera unitat té una facies sísmica transparent i, 4) la unitat superior consta d'uns reflectors de gran amplitud i baixa freqüència cabussant suauement cap al SE mostrant una gran continuïtat.

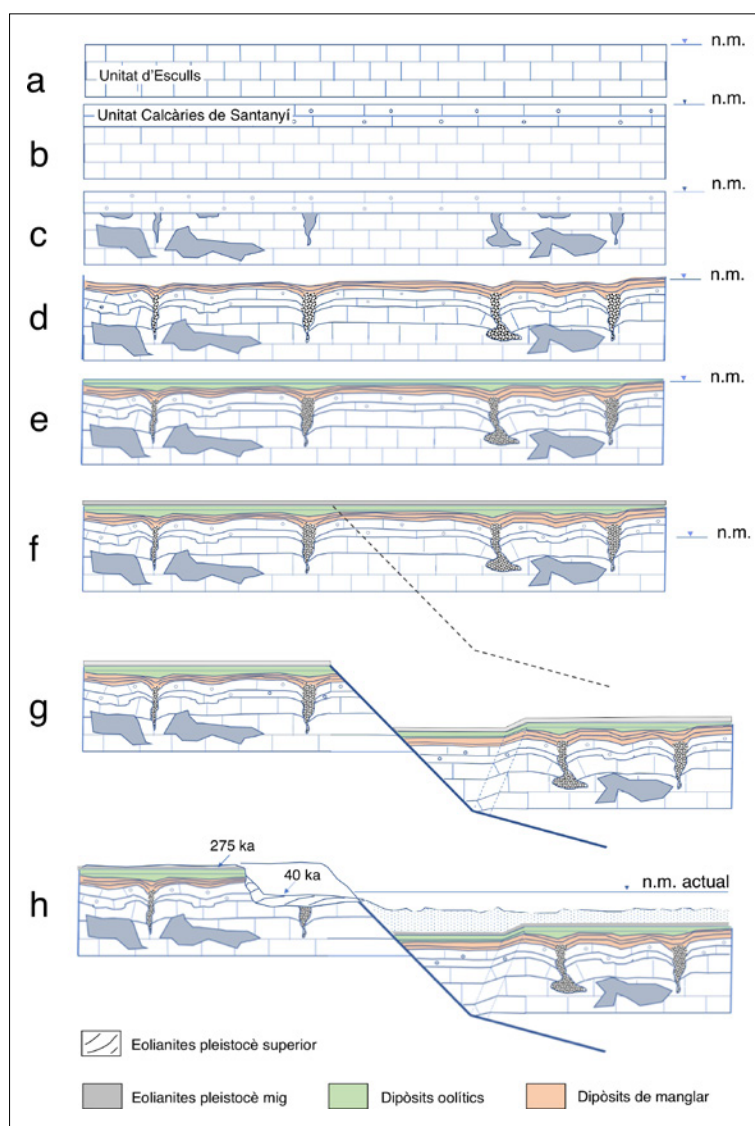


Figura 14: Evolució geodinàmica del litoral de Santanyí.
 Figure 14: Geodynamic evolution of the coast of Santanyí.

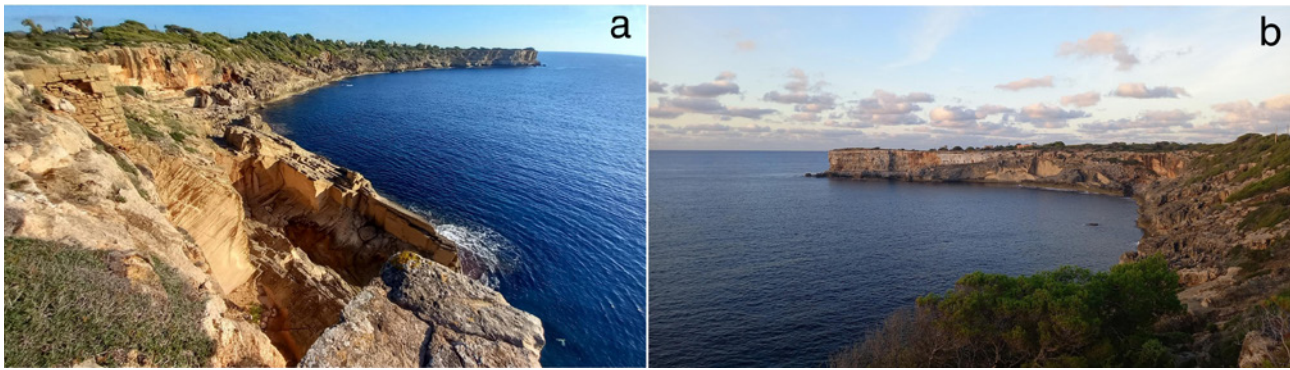


Figura 15: Dunes adossades al penya-segat format per la Unitat Calcàries de Santanyí a s'Estret del Temps.
Figure 15: Dunes attached to the cliff formed by the Calcàries de Santanyí Unit in s'Estret del Temps.

Interpretem l'esglaó al fons del mar com una falla extensional que cabussa cap al SE i que esdevé més horitzontal en fondària. S'aplica el model de XIAO & SUPPE (1992) per interpretar l'estructura de la falla observada al perfil sísmic. L'enfonsament del bloc SE produeix un espai d'acomodació que s'omple amb les unitats transparents i superiors. Els reflectors de la unitat plegada corresponen a materials anteriors al moviment de la falla. L'amplada del planell plegat (50 m) ens dona el salt de la falla, la qual es considera com l'origen del penya-segat que delimita la part subaèria de la part submarina.

Per tal de datar de forma relativa la formació i desplaçament de la falla, així com per tal de justificar el motiu pel qual apareixen els paleocol·lapses càrstics als reflectors de la zona submergida, es presenta la Figura 14 que mostra l'evolució geodinàmica del litoral de Santanyí, tant de la part subaèria com de la part submarina. La història geològica comença amb la sedimentació de la Unitat d'Esculls del miocè superior (Figura 14a). Posteriorment, es dipositen els nivells inferiors de la Unitat Calcàries de Santanyí (Figura 14b) la qual és seguida per un procés de carstificació de les calcàries esculloses que dona lloc a buits que deixen "penjats" els nivells inferiors de la Unitat Calcàries de Santanyí (Figura 14c). Tant els buits verticals com els horitzontals provoquen una flexió sinclinal dels nivells inferiors d'aquesta unitat (Figura 14d). Els nivells entremitjos d'aquesta unitat poden tenir dues disposicions: 1) es dipositen horitzontals, fossilitzant el col·lapse, o bé 2) poden tenir una disposició en sinclinal més laxa cap al nucli del sinclinal indicant que el col·lapse se segueix formant durant la deposició d'aquests nivells entremitjos (Figura 14e). Els buits verticals solen dur associats, a més de la flexió sinclinal, una zona central de bretxes (Figura 14d). La següent seqüència (Figura 14e) és el dipòsit dels nivells superiors de la Unitat Calcàries de Santanyí, horitzontals segellant tots els col·lapses. A sobre d'aquesta unitat (Figura 14f) es troba una seqüència d'eolianites del pleistocè mig (275 ka, segons NIELSEN et al., 2004). Amb posterioritat a la deposició de les eolianites es mou la falla deixant un bloc enfonsat (el bloc de la part del mar) i un bloc aixecat (el bloc de la part de terra) creant un penya-segat (Figura 14g), el qual ha anat retrocedint fins que unes dunes adossades al penya-segat (Figures 14h i 15), amb una antiguitat de 40 ka (CLEMMENSEN et al., 2001), l'han fossilitzat.

Conclusions

Dues unitats deposicionals del miocè superior de Mallorca estan involucrades en les estructures de col·lapse càrstic que s'observen en els penya-segats costaners del terme municipal de Santanyí. De la base a la part superior: la Unitat d'Esculls i la Unitat de Calcàries de Santanyí. La Unitat de Calcàries de Santanyí està formada per facies d'estromatòlits i oolites i es troba sobre una àmplia plataforma d'esculls coral·lins del tortonià tardà-messinià. Es formà en una plataforma carbonatada marina poc profunda dominada per les barres d'arena, els estromatòlits i els manglars.

Els col·lapses paleocàrstics es formaren a partir de la dissolució de nivells de la Unitat d'Esculls en el moment en que ja s'havien dipositat nivells inferiors de la Unitat Calcàries de Santanyí, els quals actuen com una cobertora plàstica. Una vegada creat el buit a la Unitat d'Esculls, els nivells inferiors de la Unitat de Calcàries de Santanyí col·lapsaren deformant-se en forma de sinclinal, vist en dues dimensions, i en forma d'embut, vist en tres dimensions. En el mateix buit, o en les seves proximitats, s'hi dipositaren bretxes formades a partir del col·lapse de nivells superiors parcialment consolidats. Els buits entre bretxes estan recoberts de ciment carbonatat amb diversos episodis de creixement. En alguns casos, llims i argiles vermelles constitueixen el rebliment final de la cavitat, que no és necessàriament contemporani amb la formació de bretxes.

Els col·lapses paleocàrstics identificats al litoral de Santanyí també s'han interpretat als perfils sísmics realitzats a la part marina de la costa de Santanyí. La geometria d'aquests col·lapses (ara submarins) és la d'uns reflectors inferiors plegats en forma de sinclinal, separats per una zona central de reflectors desordenats que corresponen a la zona de bretxes. Els reflectors superiors tenen una disposició horitzontal, fossilitzant el col·lapse. Fins ara no s'ha trobat cap evidència clara de connexió directa entre els col·lapses càrstics del miocè superior i les dolines actuals en sentit estricte encara que en alguns casos excepcionals els buits poden arribar a la superfície degut al col·lapse de les formes endocàrstiques subjacents. L'absència de morfologies d'exposició subaèria notables apunta a un model genètic estretament relacionat amb el concepte de subsidència càrstica subjacent.

Agraïments

Volem dedicar el present treball al nostre estimat amic Àngel Ginés, que ens va deixar a principis d'enguany amb qui vam tenir diversos intercanvis d'opinió sobre la formació dels paleocol·lapses càrstics. Gràcies també al Dr. Jorge Rey per la col·laboració en les campanyes oceanogràfiques i a la feina dels revisors de la Societat Espeleològica Balear que segur han fet millorar la redacció del treball.

La present contribució s'emmarca dins del projecte PID2020-112720GB-I00/ finançat per l'Agència Estatal de Investigación (MCINN).

Bibliografia

- BERTONI, C.; CARTWRIGHT, J. (2005): 3D seismic analysis of circular evaporite dissolution structures, Eastern Mediterranean. *Journal of the Geological Society*, 162 (6): 909-926.
- BROUGHTON, P.L. (2017): Breccia pipe and sinkhole linked fluidized beds and debris flows in the Athabasca Oil Sands: dynamics of evaporite karst collapse-induced fault block collisions. *Bulletin of Canadian Petroleum*, 65(1): 200-234.
- BUTZER, K.W. & CUERDA, J. (1962): Nuevos yacimientos marinos cuaternarios de las Baleares. *Notas y Comunicaciones del IGME*, 67: 25-70.
- CHEN, J. & BECK, B.F. (1989): Qualitative modelling of the cover-collapse process. *3rd Multidisciplinary Conference On Sinkholes*, St. Petersburg Beach, Florida, pp. 89-95.
- CLEMMENSEN, L.B.; LISBORG, T.; FORNÓS, J.J. & BROMLEY, R.G. (2001): Cliff-front aeolian and colluvial deposits, Mallorca, Western Mediterranean: a record of climatic and environmental change during the last glacial period. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 48: 217-232.
- CUERDA, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Institut d'Estudis Balearics. Diputació Provincial de Balears. Palma (Mallorca), 304 pp.
- DANIELS, S.E.; TUCKER, M.E.; MAWSON, J.; HOLDSWORTH, R.E.; LONG, J.J.; GLUYAS, J.G. & JONES, R.R. (2020): Nature and origin of collapse breccias in the Zechstein of NE England: local observations with cross-border petroleum exploration and production significance, across the North Sea. *Geological Society, London. Special Publications*, 494: 269-299.
- DE BATIST M. & VERSTEEG W.H. (1999): Seismic stratigraphy of the Mesozoic and Cenozoic in northern Belgium: main results of a high-resolution reflection seismic survey along rivers and canals. *Geologie en Mijnbouw*, 77: 17-37.
- ESTEBAN, M. (1979/80): Significance of the Upper Miocene reefs of the Western Mediterranean. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 29: 169-188.
- FORD, D. & WILLIAMS, P. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, 562 pp.
- FORNÓS, J.J. (1999): Karst collapse phenomena in the Upper Miocene of Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). *Acta Geologica Hungarica*, 42(2): 237-250.
- FORNÓS, J.J.; BALAGUER, P.; GELABERT, B. & GÓMEZ-PUJOL, LL. (2006): Pleistocene formation, evolution and retreat rates of a carbonate coastal cliff (Mallorca Island, Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research (Special Issue)*, 49: 15-21.
- FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (1995): Lithology and tectonics of the Majorcan karst. *Endins*, 20. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 27-43.
- FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS J. (1989): Paleokarst collapse features in the Uppermost Miocene of Mallorca Island (Spain). *Proceedings of the 10th International Congress of Speleology*, Budapest, 1: 46-48.
- FORNÓS, J.J.; CLEMMENSEN, L.B.; GÓMEZ-PUJOL, L.; GINÉS, A. & GINÉS J. (2012): Pleistocene eolianites and low sea levels. In: GINÉS, A., GINÉS, J., GÓMEZ-PUJOL, L., ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.). *Mallorca: A Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies*. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 18: 85-110.
- FORNÓS, J.J.; GINÉS, À.; GINÉS J. & RODRÍGUEZ-PÉREA, A. (1989): El paleocàrst a Mallorca. *Endins*, 20 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 113-124.

- FORNÓS, J.J. & POMAR, L. (1984): Facies, ambientes y secuencias de plataforma carbonatada somera (Formación Calizas de Santanyí) en el Mioceno Terminal de Mallorca (Islas Baleares). *Publicaciones de Geología (Homenaje a Luis Sánchez de la Torre)*, 20: 319-330.
- GINÉS, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 595 pp + 29 làms. Inèdita.
- GINÉS, J.; GINÉS, À. & FORNÓS, J.J. (2011): Dades sobre paleocarst i espeleocronologia de les Illes Balears. *Endins*, 35 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 17: 213-226.
- GINÉS J.; FORNÓS J.J.; GINÉS A.; MERINO A. & GRÀCIA F. (2014): Geologic constraints and speleogenesis of Cova des Pas de Vallgornera, a complex coastal cave from Mallorca Island (Western Mediterranean). *International Journal of Speleology*, 43 (2):105-124.
- GÓMEZ-PUJOL, L.; GELABERT, B.; FORNÓS, J.J.; PARDO-PASCUAL, J.E.; ROSSELLÓ, V.M.; SEGURA, F. & ONAC, B.P. (2013): Structural control on the presence and character of calas: Observations from Balearic Islands limestone rock coast macroforms. *Geomorphology*, 194: 1-15.
- GUTIÉRREZ, F. (2016): Sinkhole hazards. In: GUTIÉRREZ F. (ed.): *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. Oxford University Press.
- HARDENBOL, J.; THIERRY, J.; FARLEY, M.B.; JACQUIN, T.; DE GRACIANSKY, P.CH. & VAIL, P.R. (1998): Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European basins. *SEPM Special Publication*, 6: 3-13.
- KLIMCHOUK, A.B.; FORD, D.C.; PALMER, A.N. & DREYBRODT, W. (2000): *Speleogenesis. Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society, Huntsville, Alabama. 527 pp.
- MAS-GORNALS, G. (2018): *Quan la Mediterrània es va evaporar: Evidències de la Crisi de Salinitat Messiniana a l'illa de Mallorca*. Edicions UIB. Palma. 86 pp.
- NIELSEN, K.A.; CLEMMENSEN, L.B. & FORNÓS, J.J. (2004): Middle Pleistocene magnetostratigraphy and susceptibility stratigraphy: data from a carbonate aeolian system, Mallorca, Western Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*, 23: 1733-1756.
- POMAR, L.; ESTEBAN, M.; CALVET, F. & BARÓN, A. (1983): La Unidad Arrecifal del Mioceno Superior de Mallorca. In: *El Terciario de las Baleares. Libro Guía de las Excursiones del X Congreso Nacional de Sedimentología, Menorca*, pp. 139-179.
- POPENOE, P.; KOHOUT, F.A. & MANHEIM, F.T. (1984): Seismic-reflection studies of sinkholes and limestone dissolution features on the north-eastern Florida shelf. *Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes*, Orlando, Florida, pp. 43-57.
- PURDY, E.G. & WALTHAM, D. (1999): Reservoir implications of modern karst topography. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83 (11): 1774-1794.
- ROBLEDÓ, P. & POMAR, L. (2000): Upper Miocene karst collapse structures of the east coast, Mallorca, Spain. *Acta Carsologica*, 29 (2): 78-184.
- ROSSELLÓ, V.M. (2005): Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica. *Cuadernos de Geografía*, 77: 1-18.
- SNYDER, S.W.; EVANS, M.W.; HINE, A.C. & COMPTON, J.S. (1989): Seismic expression of solution collapse features from the Florida Platform. *Proceedings of the 3rd Multidisciplinary Conference On Sinkholes, St. Petersburg Beach, Florida*, pp. 281-298.
- STEEPLES, D.W.; KNAPP, R.W. & MILLER, R.D. (1984): Examination of sinkholes by seismic reflection. *Proceedings of the First Multidisciplinary Conference On Sinkholes, Orlando, Florida*, pp. 217-223.
- XIAO, H. & SUPPE, J. (1992): Origin of rollover. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76 (4): 509-529.



Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

