EL PALEOCARST A MALLORCA
PALEOKARST IN MALLORCA

Joan J. FORNÓS [1], Àngel GINÉS [2], Joaquín GINÉS [1] & Antonio RODRÍGUEZ-PEREA [1]

Resum

Els dipòsits que conformen l'illa de Mallorca són roques carbonatades en una proporció del tot majoritària, principalment calcàries i dolomies. La forta tectonització soferta per aquests materials dins de la complexa estructuració que ha afectat la Mediterrània occidental (com a part del Tethys) des dels inicis de l'era mesozoica, ha propiciat al llarg dels temps geològics diverses etapes d'emersió del materials carbonatats que han donat lloc al desenvolupament d'importants fenòmens paleocàrstics. Entre aquests períodes destaca —a part de puntuals emersions d'edat intrajuràssica— la fi del Cretaci i el començament del Paleogen, quan va tenir lloc la carstificació de bona part de les calcàries del Juràssic inferior. Aquest paleocarst desenvolupat bàsicament sobre el Lias, així com el desenvolupat al Miocè superior i que afecta les calcàries esculloses del Miocè terminal, són els exemples més espectaculars que poden ser estudiats a Mallorca.

Abstract

The deposits building up the island of Mallorca are nearly on the whole of limestone and dolomite lithologies. These materials underwent a strong tectonization due to the complex structuration that affected the western Mediterranean (as part of the Tethys) since the beginning of the Mesozoic era. These processes have propitiated, throughout the geological times, some events of emersion of the carbonate materials, which have given way to the development of important paleokarstic phenomena. Among these periods —apart from eventual emersions of intrajurassic age— the final Cretaceous and most of the Paleogene stand out, when great part of the Lower Jurassic limestones were karstified. Such paleokarsts developed basically on Lias deposits, as well as that formed during the Upper Miocene, which affected the reefal limestones from the terminal Miocene, are the most spectacular examples to be studied in Mallorca.

Introducció

Els estudis sobre el paleocarst a Mallorca són escassos, malgrat els abundants exemples que hi ha en la columna estratigràfica present a l'illa (Figura 1) així com els bons afloraments en què són representats. Es tracta tan sols d'estudis puntuals que no aborden la problemàtica regional més que d'una forma marginal. La falta de mineralitzacions de certa consideració, com puguin ser dipòsits de baritina, fluorita o bauxites associades al paleocarst, així com l'escàs interès petrolífer de Mallorca, expliquen en gran me-

1 Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Ctra de Valldemossa km 7,5. E-07071 Palma de Mallorca.
2 Museu Balear de Ciències Naturals. Ctra Palma - Port de Sóller km 30. E-07100 Sóller (Mallorca).

Introduction

Studies on Majorcan paleokarst are scarce considering both the abundant cases present in the stratigraphic column of the island (Figure 1) and the good outcrops represented in it. There are only isolated studies which merely deal with regional problematics. The absence of outstanding mineralizations, such as baritine, fluorite or bauxite deposits associated to paleokarst, as well as the low interest in the oil-bearing rocks of Mallorca, are certainly the main reasons for the scarcity of studies on the diverse karstification events.

The structuration that affected the Balearic archipelago provoked several periods of emersion that allowed successive karstification processes and karst fossilization phenomena to occur. The

sura aquesta manca d'estudis sobre els diversos episodis de carstificació que afecten els dipòsits que afloren a la major de les Illes Balears.

La forta estructuració tectònica que ha afectat l'arxipèlag Balear ha ocasionat diversos períodes d'emersió donant lloc a successius processos de carstificació i, fins i tot, de fossilització del carst. Les morfologies i els reompliments de les cavitats, així com les litologies i la geometria dels cossos sedimentaris relacionats, mostren un ampli ventall de fenòmens disposats al llarg de tota la seqüència sedimentària, en la qual les calcàries hi són àmpliament representades.

morphologies and fillings of the cavities as well as the lithologies and geometry of the related sedimentary bodies show a wide range of phenomena all along the sedimentary sequence, in which limestones are widely represented.

In the present paper we discuss two cases which have been studied more accurately. They are two representative examples of the paleokarstic phenomena involving the carbonate deposits of Mallorca. The first one is represented in the Jurassic limestones (FORNÓS et al., *1986/87) and the second one affects the reef deposits from the Upper Miocene (FORNÓS* et al., *1989).*

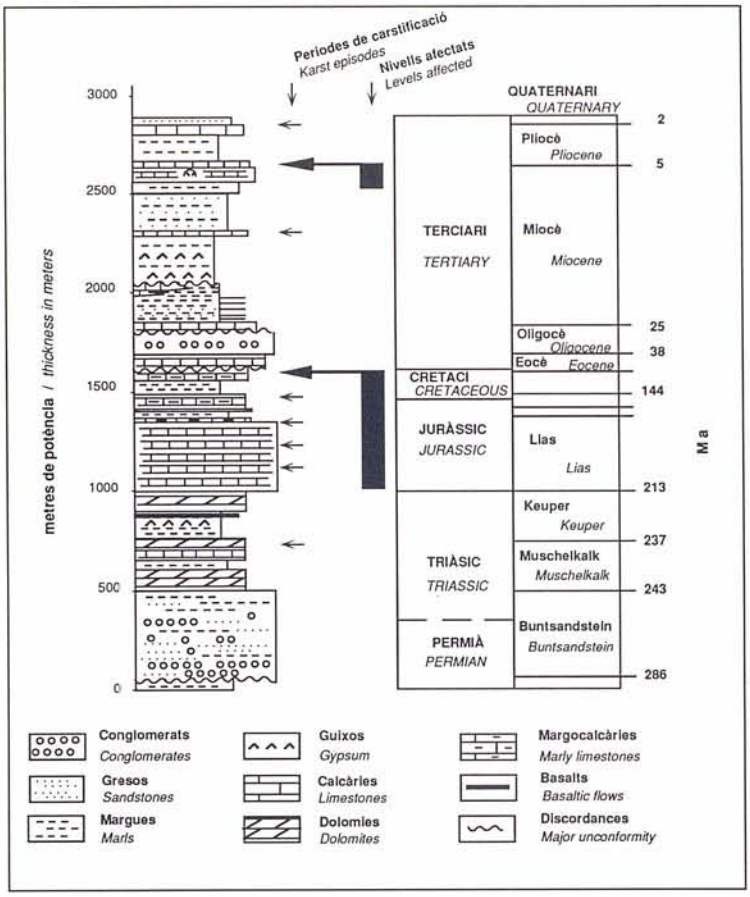

Figura 1:
Columna litoestratigràfica sintètica de Mallorca amb indicació (fletxes) dels principals episodis de carstificació i principals nivells afectats.

Figure1:
Synthetic lithostratigraphical column of Mallorca showing (arrows) the main karstification episodes and levels affected.

En el present treball es presenten dos casos que s'han estudiat amb més detall. Es tracta de dos exemples representatius dels fenòmens paleocàrstics que afecten els dipòsits carbonatats de Mallorca. El primer es troba representat a les calcàries corresponents al Juràssic (FORNÓS *et al.*, 1986/87), i el segon afecta els dipòsits escullosos del Miocè superior (FORNÓS *et al.*, 1989).

Mallorca, la més gran de les Illes Balears, es troba emmarcada dins de la complexa estructuració tectònica d'edat alpina que va afectar la Mediterrània occidental. Des d'un punt de vista geomorfològic s'hi diferencien dues serralades separades per una zona central deprimida. La més important, la Serra de Tramuntana amb elevacions superiors als 1.000 m, pre-

Mallorca, the biggest of the Balearic Islands, is immersed within the complex alpine tectonic structuration that once affected the western Mediterranean. From the geomorphological point of view, two mountain ranges and a flat area, El Pla, can be differentiated. The most important range, Serra de Tramuntana, with peaks over 1,000 m, shows a NE-SW direction and a rough relief which delimits the island on its NW edge. On the opposite side, in the SE, the Serres de Llevant display a smoother topography and lower heights in a NNE-SSW alignment. Both ranges are mostly composed of mesozoic deposits folded and thrusted towards the NW. They are separated but surrounded by the central plain, El Pla, whose structure is complex and

senta una direcció NE-SW i està formada per relleus abruptes que delimiten l'illa pel NW. A l'altra banda, al SE, les Serres de Llevant presenten uns relleus més suaus i una menor altura, amb una alineació similar NNE-SSW. Totes dues alineacions estan formades en la seva major part per dipòsits d'edat mesozoica, plegats i afectats per una tectònica d'encavalcaments amb una vergència general de moviments vers el NW. Estan separades i a la vegada envoltades per una plana central, coneguda com el Pla, d'estructura complexa i reomplerta en part per dipòsits tabulars post-orogènics que comprenen des del Miocè superior fins el Quaternari.

Paleocarst als dipòsits juràssics

ESBÓS ESTRATIGRÀFIC

El Juràssic de Mallorca amb una potència global de més de 500 m (Figura 2) presenta dues seqüències ben diferenciades (BARNOLAS, 1984; FORNÓS *et al.*, 1984). La inferior està formada per dolomies, calcàries i bretxes carbonatades que corresponen a dipòsits litorals i de plataforma interna. A la base presenta fàcies estromatolítiques i abundants evaporites que cap al sostre evolucionen a fàcies de plataforma oberta amb presència de margues amb braquiòpodes i ammonits. Aquestes margues estan recobertes per

which is partially filled by post-orogenic tabular deposits that comprise from the Upper Miocene to the Quaternary.

Paleokarst on Jurassic deposits

JURASSIC STRATIGRAPHY

The Jurassic from Mallorca, whose total thickness is over 500 m (Figure 2), presents two well-differentiated sequences (BARNOLAS, 1984; FORNÓS et al., *1984). The lower one is formed by dolomites, limestones and carbonate breccias corresponding to littoral and inner platform deposits. At the base they show stromatolite facies and evaporite moulds which, on the top, become facies of open platform containing marls with brachiopods and ammonites. These marls are covered by a level of reddish and well-rounded quartz sandstones. They constitute a key level which is attributed to the Toarcian (COLOM, 1975). The platform sedimentation ends with the development of a hard ground which gives way to a pelagic sedimentation. The pelagic deposits (the upper sequence) consist of an alternation of marls and marly limestones with levels of chert as well as with calcarenitic and oolite layers resulting from resedimentation processes. They started during the Dogger and gradually became more pelagic (with radiolaria, tintinnids,*

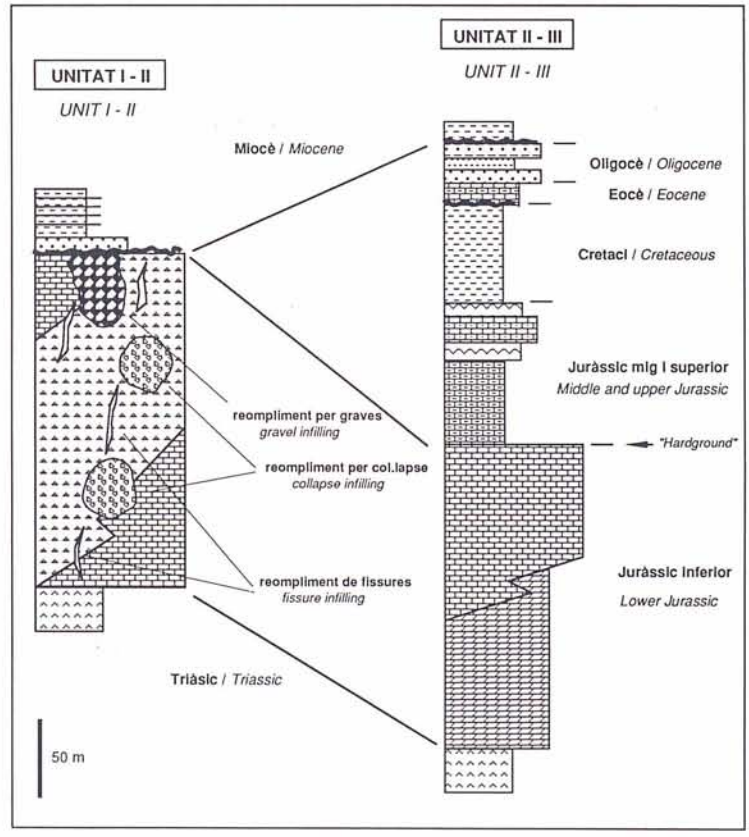

Figura 2:
Columnes sintètiques del Mesozoic mig i superior i del Terciari de la Serra de Tramuntana de Mallorca, amb indicació de les diverses manifestacions paleocàrstiques. Les Unitats I, II i III es refereixen a les principals unitats encavalcants descrites per FALLOT (1922) (SÀBAT, 1986). Veure llegenda a la Figura 1.

Figure 2:
Synthetic columns of the Middle and Upper Mesozoic and the Tertiary of the Majorcan Serra de Tramuntana showing the different paleokarstic features. Units I, II and III refer to the main thrust sheets described by FALLOT (1922) (SÀBAT, 1986). See caption of Figure 1.

un nivell de quarsarenites amb els grans de quars ben arrodonits i vermellosos, que constitueixen un bon nivell guia regional atribuït al Toarcià (COLOM, 1975). La sedimentació de plataforma acaba amb el desenvolupament d'un sòl endurit (*hard ground*) que donarà pas a una sedimentació pelàgica. Els dipòsits pelàgics (que corresponen a la seqüència superior) estan formats per una alternança de margues i margocalcàries amb nivells de sílex i indentacions calcarenítiques i oolítiques producte dels processos de resedimentació. Aquests dipòsits s'inicien al Dogger i segueixen de forma contínua amb fàcies cada cop més pelàgiques (nivells amb radiolaris, tintínids, presència de sèries condensades tipus *ammonitico rosso*, etc.) fins el Cretaci superior. En aquests moments el procés de formació de la serralada pirinenca produeix l'emersió de l'àrea balear i fins l'Eocè mitjà no hi tornam a trobar cap tipus de registre.

LES CAVITATS I ELS DIPÒSITS DE BRETXES ASSOCIATS

Les cavitats observades en el paleocarst desenvolupat sobre les calcàries juràssiques, bàsicament del Lias, són de tres tipus que endemés es caracteritzen per tipus de reompliment diferents.

Les més grosses, d'ordre decamètric, presenten una geometria irregular pseudo-cilíndrica, amb parets molt llises i netes (Figura 3). Estan reomplertes per bretxes oligomíctiques, heteromètriques (des de blocs d'ordre mètric a matriu llimosa), amb clastos de subarrodonits a subangulosos i sense cap tipus d'ordenació. Localment a la base hi són observables, amb geometria lenticular, calcarenites laminades vermelloses amb grans de quars i insolubles. Des del punt de vista petrogràfic les bretxes del reompliment estan formades per les mateixes litologies que els dipòsits encaixants, que localment poden estar també bretxats. El reompliment doncs es dóna principalment pel col·lapse d'aquestes cavitats.

Un segon tipus de cavitats (Figura 4) es troba situat principalment al sostre de la seqüència liàsica. Amb contactes amb la roca encaixant molt nets, presenta parets irregulars, amb geometries pseudocilíndriques de dimensions decamètriques, que al sostre mostren formes de volta relacionades amb les superfícies d'estratificació (*collapse dome*). Aquestes cavitats estan reomplertes de bretxes heteromètriques, encara que no tant com les descrites anteriorment, amb els clastos de subarrodonits a subangulosos. La composició és polimíctica essent reconeixibles materials procedents de la totalitat de la seqüència mesozoica, especialment Lias i Dogger. La matriu és micrítica amb abundància de grans de quars procedents especialment dels nivells de quarsarenites suprajacents del Toarcià.

El tercer tipus de cavitats correspon a fissures amb amplada d'ordre centimètric, allargades en la vertical (Figura 5), i amb geometries del tot irregulars.

presence of condensed Ammonitico Rosso *facies, etc.) until the Upper Cretaceous commenced. By that time, the emersion of the Balearic area had been produced, so that no deposits at all can be found till the Middle Eocene.*

CAVITIES AND ASSOCIATED BRECCIA DEPOSITS

Cavities developed on Jurassic limestones (Lower Jurassic in age) are of three types, characterized by different fillings and geometries.

The widest, of decametric scale, show an irregular pseudo-cylindrical geometry with very smooth and neat walls (Figure 3). They appear to be

Figura 3: Afloament de bretxes de col·lapse monomíctiques que reomplen una cavitat irregular pseudocilíndrica en les calcàries del Lias (sa Calobra, Escorca).

Figure 3: Outcrop of monomictic collapsing breccias filling an irregular pseudocylindrical cavity within the Lias limestones (Sa Calobra, Escorca).

filled by oligomictic breccias of heterogeneous sizes (from boulders of metric scale to silty matrix) containing the whole range from subrounded to subangular clasts and lacking any sorting. At the base, insoluble reddish laminated calcarenites of lenticular geometry with quartz grains can be locally observed. From the petrographical point of view, the

Figura 4: Cavitat al Lias superior reomplerta per materials polimíctics amb formes de volta relacionades amb les superfícies d'estratificació (sa Calobra, Escorca).

Figure 4: Cavity from the Upper Lias filled by polymictic dome-like materials related to stratification surfaces (Sa Calobra, Escorca).

Estan reomplertes d'arenes i llims vermells, localment amb microconglomerats, formats per grans de quars arrodonits vermells procedents també dels nivells toarcians. Localment presenten laminació i granoclassificació.

DESENVOLUPAMENT I EDAT DEL PALEOCARST

La geometria i el tipus de contactes encaixants de les bretxes dins de la formació carbonatada liàsica són clars indicadors de la seva relació amb cavitats càrstiques. La presència de micrites laminades a la base d'algunes bolsades i l'absència d'espeleotemes indiquen la formació de les cavitats per sota del nivell freàtic; encara que també poden explicar-se per la llarga diagènesi de tot el dipòsit, que en homogeneïtzar-se provoca la seva eventual dissolució. Els tres tipus de cavitats, així com els seus reompliments associats, corresponen a situacions diferents dins del sistema càrstic.

El reompliment per bretxes oligomíctiques que correspon a les cavitats més grans es donaria en les zones més allunyades i més mal comunicades amb l'exterior. La presència de grans blocs, juntament amb clastos de menor mida i arenes, abonaria una gènesi per col·lapse de la cavitat. Les cavitats més ben comunicades amb l'exterior presentarien les bretxes polimíctiques menys heteromètriques i amb un poc més de transport. Les fissures representarien els estadis inicials o juvenils de la porositat. El reduït flux de circulació a través de les fissures només pot donar lloc al reompliment per sediments fins residuals de la dissolució càrstica, així com per alguns elements insolubles procedents de l'exterior (quarsarenites del Toarcià).

El procés de desenvolupament del paleocarst en els dipòsits carbonatats juràssics, amb la important formació d'aquestes masses de bretxes, deu haver-

refilling breccias are composed of the same fitting deposits that can also be brecciated locally. Therefore, the filling is mainly due to the collapsing of such cavities.

*Cavities of the second type (Figure 4) are mainly placed on top of the Lias sequence. They show a very clean contact surface with the fitting rock as well as rather irregular walls with pseudocylindrical geometries of decametric dimensions, which on the top show dome-like forms related to the stratification surfaces (*collapse dome*). These cavities are filled with heterometric breccias, although not to the extent of those described above, composed by clasts of subrounded to subangular shape. Their composition is polymictic and materials from the whole mesozoic sequence, especially Lias and Dogger can be recognized. The matrix is micritic and contains abundant quartz grains which mainly come from Toarcian sandstones.*

The third type of cavities corresponds to fissures of centimetric width that appear to be enlarged very irregularly length wise (Figure 5). They are filled by

Figura 5: Reompliment de fissures a les calcàries del Lias per arenes i microconglomerats del Toarcià (sa Calobra, Escorca).

Figure 5: Fissure filling of the Lias limestones by sands and microconglomerates from the Toarcian (Sa Calobra, Escorca).

sands and red silts and, locally, there are microconglomerates formed by red rounded quartz sands coming also from the Toarcian levels. Locally, they present lamination and sorting.

DEVELOPMENT AND AGE OF THE PALEOKARST

Both the geometry and the fitting contacts of the breccias within the Lias carbonate formation clearly reveal their relation with karstic cavities. The presence of laminated micrites at the base of some pockets together with the absence of speleothems may prompt us to assume that the formation of cavities takes place below the phreatic level;

se donat amb posterioritat a la seqüència pelàgica mesozoica ja que són clars i abundants els clastos de materials pelàgics reomplint les cavitats càrstiques. Estudis petrològics de detall a la zona de Pollença (ADAMS, 1989) reconeixen dues etapes de carstificació. No obstant, a partir del coneixement regional sembla clar associar la formació del paleocarst amb el període d'emersió paleocena, ja que a la totalitat de les Balears no s'han trobat materials pertanyents a aquesta edat. Encara que també hi ha una discordança, de menor entitat, entre l'Oligocè i el Miocè, no s'han trobat materials d'edat eocena o oligocena associats als dipòsits de bretxes de reompliment del paleocarst.

Paleocarst al Miocè superior

ESBÓS ESTRATIGRÀFIC

El Miocè superior de Mallorca aflora àmpliament en forma d'una sèrie de plataformes tabulars al voltant dels relleus estructurats i donant un tipus de paisatges que localment es coneixen com a "marines". Aquests afloraments tabulars formen a la línia de costa penya-segats litorals abruptes que, encara que molt continus, rarament superen la trentena de metres d'altura (Figura 6). Les plataformes que aquests

Figura 6: Les calcàries del Miocè superior afloren al llarg del Migjorn de Mallorca, essent molt freqüents els fenòmens de col·lapse càrstic. Els nivells basals a ran de mar corresponen a la Unitat Escullosa, els nivells ben estratificats pertanyen a les Calcàries de Santanyí.

Figure 6: Limestones from the Upper Miocene outcrop all along the Migjorn region in Mallorca, where collapsing karstic phenomena took place. The basal materials at sea level correspond to the Reefal Unit, whereas the well-stratified levels correspond to the Santanyí Limestones Unit.

dipòsits post-orogènics configuren estan solcades per torrents que en arribar a la línia de costa formen les típiques morfologies litorals conegudes com a cales. La continuïtat i elevada qualitat dels afloraments costaners permeten l'estudi d'aquests dipòsits i dels processos que els han afectat, encara que en direc-

nevertheless, they could be also due to the long diagenesis undergone by the whole deposit which, when becoming homogeneous, might have provoked its own eventual dissolution. The three types of cavities as well as their associated fillings correspond to different situations regarding the karstic system.

The process of refilling with oligomictic breccias, which occurs in the biggest cavities, would take place in the deepest zones and in those hardly connected with the open air. The presence of big blocks mingled with sands and smaller clasts may indicate a cavity genesis through collapse. Those cavities best connected to the outside would show the least heterometric polymictic breccias and a slightly high transport rate. The fissures would then represent the initial or juvenile state of porosity. The low flux of circulation through them could only allow the filling by fine-grained sediments remaining from karstic dissolution, as well as the presence of insoluble elements coming from the outside (Toarcian quartz sands).

The development of paleokarst within the Jurassic carbonate deposits, involving the formation of such breccia masses, must have been formed after the Mesozoic pelagic sequence, so that clasts of pelagic materials are abundant in what concerns the filling of karstic cavities. Detailed petrological studies on the Pollença area (ADAMS, 1989) recognized two stages of karstification. Taking into account the knowledge on the region acquired to the present time, it seems reasonable to associate the formation of paleokarst with the Paleocene emersion period, as no materials from this age have been found at all in the Balearic Islands. Although there is also a less remarkable discordance between the Oligocene and the Miocene, no materials from these ages have been found in association with the breccia deposits refilling the paleokarst.

Paleokarst during the Upper Miocene

UPPER MIOCENE STRATIGRAPHY

The Upper Miocene outcrops widely in Mallorca as a series of tabular platforms surrounding the structured areas, which form a kind of landscape locally known as "marines". Such tabular outcrops produce, all along the sea-coast, rather continuous littoral cliffs which rarely exceed 30 m in height (Figure 6). The platforms fashioned by these post-orogenic deposits are furrowed by streams which, when reaching the coast line, form the typical littoral entrance morphologies known as "cales". The continuity and high quality of the coastal outcrops allow accurate studies on such deposits as well as on the processes that once affected them; nevertheless

ció cap a l'interior la qualitat dels afloraments baixa de forma exponencial.

El Miocè superior de Mallorca, així com el de la resta de l'àrea mediterrània, està format per fàcies de plataforma carbonatada amb esculls molt ben desenvolupats (ESTEBAN, 1979/80). A Mallorca, clàssicament, s'hi han definit tres unitats deposicionals (POMAR *et al.*, 1983; POMAR *et al.*, 1985) clarament diferenciades per la seva litologia i l'ambient de formació que representen (Figura 7). A la base, i disposada de forma discordant sobre els dipòsits pre- i sintectònics afectats per la tectònica alpina, hi ha la

their quality decreases exponentially as one advances inland.

The Upper Miocene of Mallorca, as in many Mediterranean areas, consists of facies of carbonate platforms with well-developed reefs (ESTEBAN, 1979/80). Classically, three depositional units have been defined for Mallorca (POMAR et al., *1983; POMAR* et al., *1985), all clearly differentiated through their lithology and the formation environment they represent to (Figure 7). At the base one can find a unit named "Calcisiltites with* Heterostegina*" which is placed discordantly over the pre- and sintectonic*

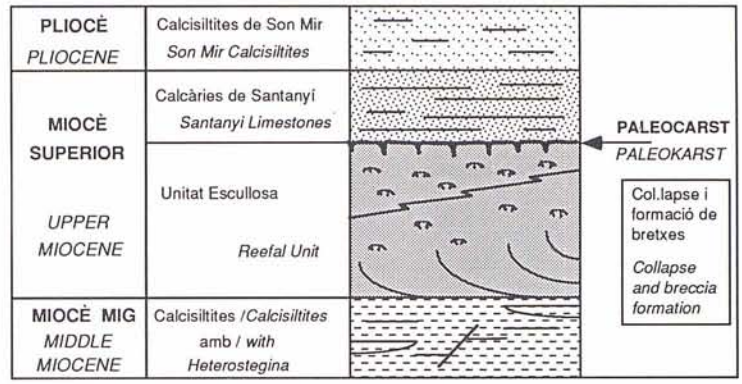

Figura 7:
Esquema estratigràfic del Miocè superior de Mallorca amb la disposició del paleocarst.

Figure 7:
Stratigraphical outline of the Upper Miocene from Mallorca showing paleokarst setting.

unitat anomenada "Calcisiltites amb *Heterostegina*". Aquesta unitat, que està formada per calcarenites i calcisiltites amb una abundant fauna d'equínids i que presenten una forta bioturbació, correspon a fàcies de plataforma carbonatada oberta. Per sobre d'aquests nivells, i de forma lleugerament discordant, es presenta la "Unitat Escullosa" (POMAR, 1991) afectada per un sistema de fracturació de tipus distensiu. Està formada per calcarenites bioclàstiques i esculls de corall amb nivells de calcàries oolítiques i estromatòlits. La unitat descrita correspon al desenvolupament d'esculls de corall tipus barrera amb amples *lagoons*. El sostre de la unitat escullosa presenta una superfície erosiva i parcialment carstificada. A la zona del sud i del llevant de Mallorca, aquesta superfície està recoberta per la "Unitat Calcàries de Santanyí" (FORNÓS & POMAR, 1984). Aquesta unitat està formada per dipòsits carbonatats de tipus litoral amb una gran varietat de fàcies (mangles, planes arenoses) on destaquen les calcàries oolítiques. Els nivells superiors d'aquesta unitat estan formats per calcàries estromatolítiques que enregistren un important event regressiu. El sostre està truncat per una important superfície d'erosió coberta per dipòsits d'edat pliocena.

MORFOLOGIES CÀRSTIQUES

Al Migjorn de Mallorca, en els penya-segats de les rodalies de Santanyí, són molt freqüents les morfologies relacionades amb fenòmens de subsidència ocasionats per processos de dissolució càrstica. Des

*deposits. This unit, formed by calcarenites and calcisiltites, contains an abundant fauna of foraminifers (*Heterostegina*) and echinids. It shows strong bioturbation and it corresponds to open carbonate platform facies. On top of this unit slightly unconformably outcrops the "Reefal Unit" (POMAR, 1991). It is composed of bioclastic calcarenites and coral reefs interlayered with levels of oolite limestones and stromatolites and it is affected by normal faults. It corresponds to the development of a coral reef of barrier type with wide lagoons. The top of the reefal unit presents an erosive surface partially karstified. On the southern and eastern zones of Mallorca that unit is coated by the "Santanyí Limestones Unit" (FORNÓS & POMAR, 1984). It is formed by carbonate deposits of a littoral type involving a great variety of facies including oolite limestones (mangroves, sand shoals). The uppermost levels are formed by stromatolite limestones which reveal an important regressive event. The top appears truncated by a relevant erosion surface covered by deposits of Pliocene age.*

KARSTIC MORPHOLOGIES

On the Migjorn region (southern Mallorca), in the cliffs surrounding Santanyí, features related to subsidence phenomena caused by karstic dissolution processes are frequently found. They can be observed from Cala Llombards, South of Santanyí, to the North of S'Algar, in Portocolom. A series of nearly continuous deformations in the form of sinkings follow

de Cala Llombards, al S de Santanyí, fins al N de s'Algar, a Portocolom, s'observen deformacions en forma d'enfonsament, de manera més o menys contínua, seguint el contacte entre la Unitat Escullosa i les Calcàries de Santanyí (Figura 6). En detall aquest tipus de deformació (col·lapses) afecta freqüentment a tot el paquet de les Calcàries de Santanyí, tant als nivells inferiors (els més plàstics), corresponents a nivells interpretats com a mangles (FORNÓS & POMAR, 1982), com als nivells superiors donats com de plana arenosa oolítica (*oolitic sand shoal*). La Unitat Escullosa està afectada tan sols en els seus nivells superiors.

Morfològicament aquestes deformacions paleocàrstiques presenten tres parts ben diferenciades des de la base al sostre (Figura 8). Així, la base, sempre localitzada dins de la Unitat Escullosa, presenta una cavitat amb una forma irregular i amb dimensions molt variables. Està reomplerta per fragments, d'angulosos a subangulosos, tant de la pròpia unitat com de la unitat superior. Al mig, un conducte en forma de xemeneia estreta amb parets força rectilínies i quasi verticals, posa en contacte la cavitat inferior amb una depressió sinusoidal molt marcada, que és el resultat de la deformació plàstica dels nivells inferiors de les Calcàries de Santanyí, els quals conflueixen cap a la xemeneia de forma concèntrica. Excepcionalment aquesta forma superior està representada per una àrea confinada de blocs caiguts corresponents als nivells superiors de les Calcàries de Santanyí. El diàmetre de la depressió oscil·la entre els 25 i 90 m encara que n'hi poden haver de molt petites (<5 m d'amplada), mentre que la seva profunditat màxima al centre va des de 3,5 a 14 m; les parets de la depressió presenten un pendent de 20° a 30°, inclinació que supera els 45° fins a la verticalitat en el punt d'inflexió que dóna pas a la xemeneia.

La morfologia general d'aquestes estructures de col·lapse sembla la d'un rellotge d'arena, però amb una forma asimètrica, en esser la cavitat superior més ampla i suau que la cavitat inferior (Figura 8).

CARACTERÍSTIQUES DELS DIPÒSITS CÀRSTICS I PROCESSOS DE FORMACIÓ

La formació, per dissolució, de cavitats i els ulteriors mecanismes de col·lapse que les afecten donen lloc a processos de formació de bretxes (Figura 9). Aquestes bretxes presenten característiques composicionals i texturals molt variades en funció del procés genètic, dels nivells del Miocè superior involucrats, i dels diferents estadis d'evolució del col·lapse càrstic.

Hi ha diversos tipus de bretxes amb petites variacions, essent les més evidents les bretxes de col·lapse generades per la caiguda i el reompliment per blocs i clastos. La porositat interpartícula, molt elevada, pot mostrar diversos episodis de creixement de ciment carbonatat. Sobretot llims vermells, i més

the contact between the Reefal Unit and the Santanyí Limestones (Figure 6). Such a type of deformations (collapses) often affect the whole assemblage of Santanyí Limestones. They are mostly located on the lower levels (the more plastic ones) corresponding to those which have been identified as mangrove-related sediments (FORNÓS & POMAR, 1982), but they also affect the upper levels considered as oolite sand shoal. The Reefal Unit has been only affected on its upper levels.

Regarding their morphology, these karstic deformations present three well-differentiated parts from the base to the top (Figure 8). Hence, the base

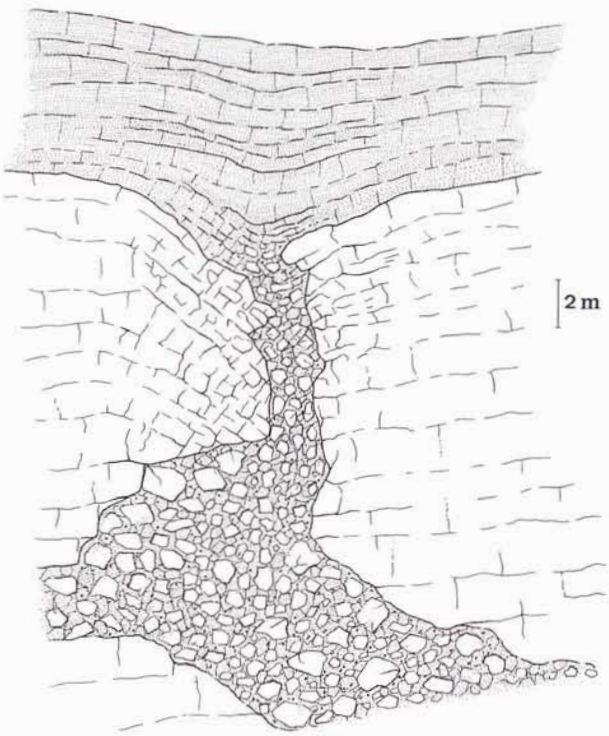

Figura 8: Esquema morfològic dels col·lapses que afecten el Miocè superior. La morfologia és assimilable a la d'un rellotge d'arena.

Figure 8: Morphological outline of the collapses affecting the Upper Miocene. Their morphology is similar to that of an hourglass.

which is always immersed within the Reefal Unit, shows an irregularly shaped cavity of heterogeneous dimensions. It is filled by angulous and subangulous fragments coming from both the Reefal Unit itself and the upper one. In the middle, there is a narrow chimney-like conduit whose walls are highly rectilinear and almost vertical, and which connect the lower cavity with a sinusoidal depression resulting from the plastic warping of the lower levels of the Santanyí Limestones. Such levels merge towards the chimney in a concentric way. Occasionally this upper structure appears to be represented by a confined area of fallen blocks corresponding to the upper-level

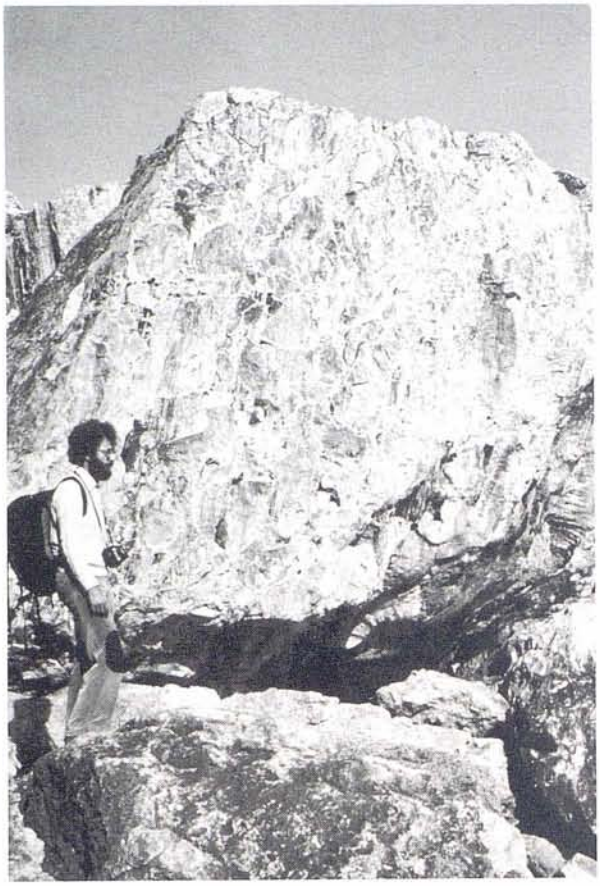

Figura 9: Bretxes de col·lapse formades per clastos angulosos de calcàries oolítiques pertanyents a les Calcàries de Santanyí que reomplen cavitats dins de la Unitat Escullosa.

Figure 9: Collapsing breccias formed by angular clasts of oolite limestones from the Santanyí Limestones, which fill Reefal Unit cavities.

rarament argiles, acompleixen el darrer estadi de reompliment de la cavitat, que no és necessàriament contemporània a la formació de les bretxes.

Quan els materials involucrats en el col·lapse arriben als nivells superiors de les Calcàries de Santanyí —les calcàries oolítiques (*grainstones*)— les bretxes formades són oligomíctiques i presenten clastos molt angulosos, amb una mida que va des de centímetres fins a més d'un metre, sense observar-se matriu. En canvi, si els materials involucrats només arriben als nivells inferiors (fàcies de mangles), els clastos de les bretxes són de subangulosos a subarrodonits, amb una mida d'ordre centimètric i amb una matriu formada per calcarenites i calcisiltites.

La cavitat basal, localitzada sempre dins de la Unitat Escullosa, es troba sempre reomplerta de bretxes polimíctiques amb clastos de mida molt variable (de cm a més d'un metre) d'angulosos a subarrodonits i amb una presència important de matriu calcarenítica.

Els diversos tipus de bretxes es corresponen als diversos estadis de desenvolupament dels col·lapses càrstics. La distribució espacial relacionada amb la

Santanyí Limestones. The diameter of such an upper depression ranges from 25 to 90 m, although very little ones (<5 m wide) can also be found, while its maximum depth to the centre ranges from 3.5 to 14 m; the depression walls present a slope of 20° to 30°, which can exceed 45° reaching even total verticality in the inflexion point opening to the chimney.

The general morphology of the collapsing structures resembles that of an hourglass, although with asymetric shape, as the upper cavity is wider and smoother than the lower one (Figure 8).

CHARACTERISTICS OF KARSTIC DEPOSITS AND FORMATION PROCESSES

Cavity formation by dissolution, as well as further collapsing mechanisms affecting them, give way to the formation of breccias (Figure 9). These display very varied compositional and textural characteristics depending on the genetic process, the involved Upper Miocene levels and the different evolutionary stages of the karstic collapse.

There are several types of breccias showing slight differences, the most obvious being the collapsing ones generated by the falling off and filling of rocks and clasts. The interparticle porosity, which is very abundant, may show diverse stages of the growth of carbonate cement . Not so frequently, clays and, mostly, reddish silts, conform the last stage of the cavity infilling which was not necessarily simultaneous with the formation of breccias.

When the materials involved in the collapse reach the upper levels of the Limestones of Santanyí —oolitic grainstones— the resulting breccia deposits are oligomictic, contain very sharp clasts of sizes ranging from a few centimeters to more than one meter, and lack any matrix. However, in cases where the materials just reached the lower levels (mangrove facies), the breccias contain subangulous to subrounded clasts of centimetric size and a matrix composed of calcarenites and calcisiltites.

The basal cavity, always set within the Reefal Unit, is filled by polymictic breccias with clasts of varied size (from 1 cm to over 1 m) and shape (from angular to subrounded) and with an important presence of a calcarenitic matrix.

Different types of breccias correspond to the diverse developing stages of karstic collapses. The spatial distribution related to the present facies correlates with the collapse growth stages, which begin with both the dissolution of the Reefal Unit and the filling through semi-plastic breaking of the basal levels of Santanyí Limestones, ending however with the fragile breaking of the upper deposits of oolite limestones.

PALEOKARST DEVELOPMENT

In the Migjorn area, the so-named Reefal Unit is mainly formed by lagoon facies with alternating

distribució de les fàcies es correlaciona amb les etapes de creixement del col·lapse, que s'inicia amb la dissolució de part de la Unitat Escullosa, el reompliment per trencament semi-plàstic dels nivells basals de les Calcàries de Santanyí, fins el trencament fràgil dels dipòsits superiors amb calcàries oolítiques.

DESENVOLUPAMENT DEL PALEOCARST

L'anomenada Unitat Escullosa està formada en aquesta zona del Migjorn mallorquí principalment per fàcies de *lagoon*, amb dipòsits alternants de calcarenites i calcisiltites, presentant un creixement puntual de coralls en forma de taques (*patch reef*). L'elevada porositat resultant de la dissolució de la massa aragonítica dels coralls provocaria el flux subsident de materials plàstics cap aquests forats, la qual cosa a la vegada ocasionaria un increment de la porositat en nivells superiors, que en darrer terme donaria lloc al trencament, la bretxificació i el col·lapse (amb el reompliment d'aquesta segona cavitat) (Figura 10). També les característiques texturals diferencials entre les fàcies descrites de la Unitat Escullosa i les Calcàries de Santanyí afavoririen clarament un drenatge subterrani a través de la Unitat Escullosa.

deposits of calcarenites and calcisiltites, and it presents isolated coral colonies as patch reefs. The high rate of porosity resulting from the preferent dissolution of coral aragonite might provoke the subsident flux of plastic materials towards those voids which, would consequently, increase the porosity of the upper levels so that, to a certain point, they would produce the breaking, the brecciation and the collapse (then causing also the filling of such a second cavity) (Figure 10). Moreover, the differential characteristics of the texture between the facies described from the Reefal Unit and the Santanyí Limestones would certainly favour a subterranean drainage throughout the Reefal Unit.

There is no clear evidence on the functioning of this kind of paleokarstic depressed subsidence-structures as real dolines, so that no direct connexion with the surface has been found, although the own development of the collapses could, in extreme cases, reach the surface. Clear morphologies of subaerial exposition have not been found either. Consequently, the model seems to be in accordance with the notion of subsidence in a subjacent karst assumed by JENNINGS (1985).

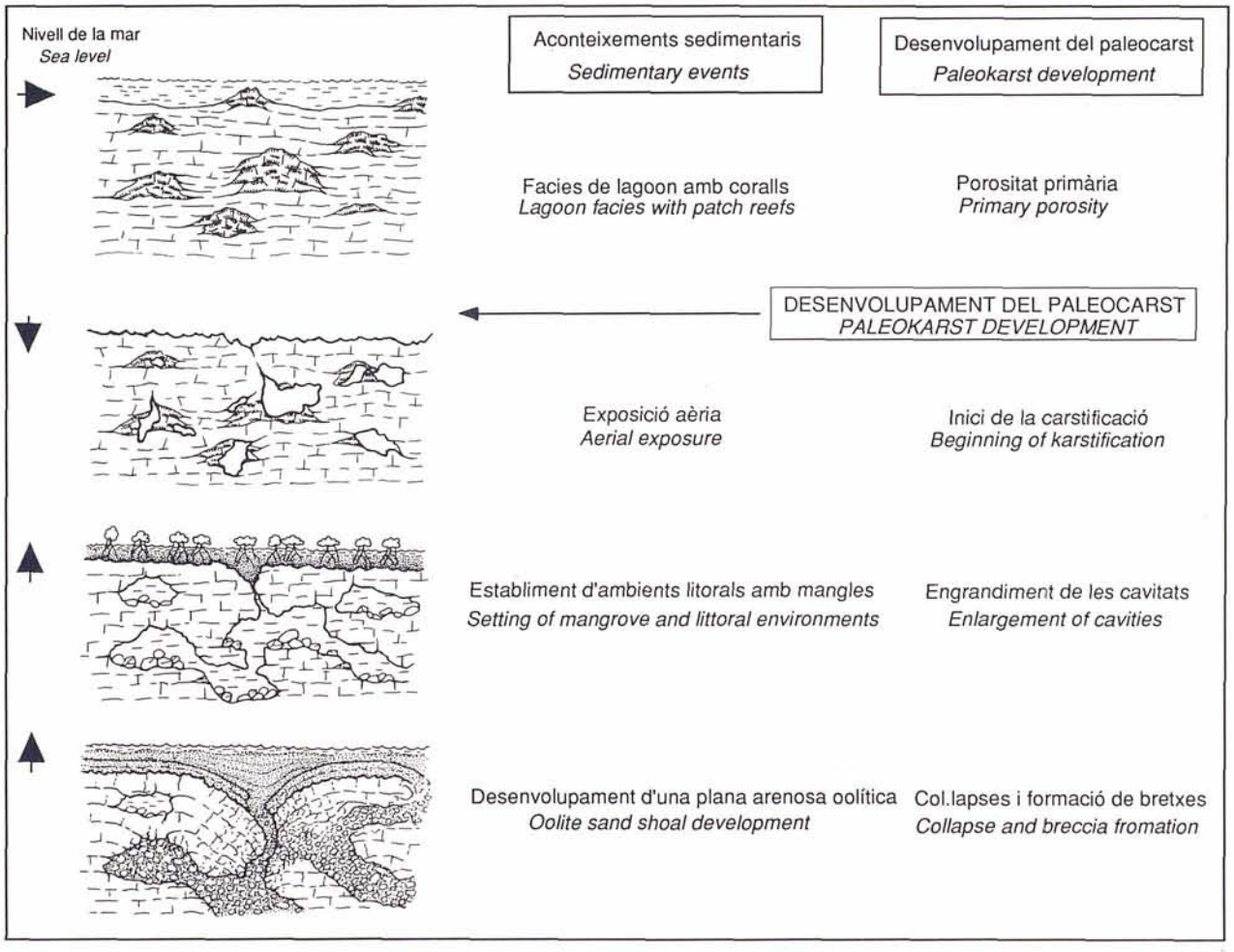

Figura 10: Esquema evolutiu del desenvolupament del paleocarst al Miocè superior de Mallorca.

Figure 10: Evolving outline of paleokarst development affecting the Upper Miocene of Mallorca.

No hi ha evidències clares d'un funcionament d'aquests enfonsaments paleocàrstics com a autèntiques dolines, ja que en cap cas no s'ha observat una connexió directa amb la superfície, encara que el propi desenvolupament dels col·lapses pugui, en darrer extrem, arribar-hi. Tampoc no s'han observat clares morfologies d'exposició subaèria; en conseqüència el model sembla apropar-se al concepte de subsidència en un carst subjacent tal com és recollit per JENNINGS (1985).

L'edat de desenvolupament del paleocarst és difícil de concretar. El seu inici sembla ser immediatament després de la deposició de la Unitat Escullosa. El creixement de les cavitats subjacents deu haver continuat durant la deposició de les Calcàries de Santanyí, almenys fins a la seva litificació, donat que la deformació o el trencament (bretxificació) dels seus nivells seria impossible amb sediments no consolidats. Així mateix el procés de carstificació pot haver continuat durant el Pliocè i, probablement, el Pleistocè.

Altres exemples de paleocarst

Els dos exemples comentats són els més espectaculars i àmpliament representats dels fenòmens paleocàrstics que es poden observar a Mallorca. Malgrat tot, al llarg de tota la sèrie estratigràfica representada a Mallorca, han estat molts els períodes d'emersió que han donat lloc als fenòmens de carstificació dels dipòsits carbonatats. Diversos episodis ocorreguts durant el Pleistocè, els trànsits Miocè-Pliocè i l'Oligocè-Miocè, i localment intrajuràssics, han permès el desenvolupament de morfologies i cavitats originades pels processos de dissolució de les roques carbonatades. Entre ells hi destaquen, especialment per les seves dimensions, les cavitats i els reompliments posats de manifest en ocasió dels sondatges realitzats per la investigació geològica del projecte de transvasament de sa Costera (Escorca). Corresponen probablement als dipòsits descrits en l'apartat que tracta del paleocarst als dipòsits juràssics, però representen cavitats de desenvolupament vertical, amb algunes desenes de metres de fondària, pocs metres d'amplada i rebliment polimíctic similar al de les cavitats del segon tipus descrites anteriorment. Les cavitats reblides s'encaixen dins bretxes oligomíctiques d'edat possiblement mesozoica, i es tractaria de rebliments produïts en l'emersió paleocena.

The time when paleokarst developed cannot be easily determined. Its beginning seems to take place just after the deposition of the Reefal Unit. The growth of the subjacent cavities must have continued during the deposition of the Santanyí Limestones, at least until they were lithified, because the deformation or breaking (brecciation) which its levels underwent would have been impossible if the sediments were non-consolidated. Nevertheless, the karstification processes might have continued in some places during the Pliocene and the Pleistocene ages.

Other examples of paleokarst

The two examples explained above happen to be among the most spectacular and best represented paleokarst phenomena observed in Mallorca. However, all along the stratigraphic series set in the island, there appear many periods of emersion likely to produce the karstification phenomena present in the Majorcan deposits. Several events which occurred during the Pleistocene, the Miocene-Pliocene and the Oligocene-Miocene transitions, and locally during the Jurassic, allowed the development of features and cavities originated by means of dissolution processes acting on carbonate rocks. Among them, the cavities and fillings brought to light by the drillings carried out by the geological research team at the piping works of Sa Costera spring (Sóller) are remarkable, especially due to their magnitude. They probably correspond to the deposits described above as paleokarst on Jurassic deposits, although the cavities show vertical development, a few tens of meters in depth, a few meters in width, as well as polymictic fillings similar to those of the second-type cavities also described above. The cavities are fitted within oligomictic breccias of supposedly Mesozoic age and it could be assumed that the filling was produced by the Paleocene emersion.

Agraïments

Els autors desitgen agrair a E. Descals, N. Llorente i G. Pons els comentaris i correccions efectuats sobre el primer manuscrit que de bon segur han fet millorar el text final i també, i molt especialment, a Lluís Fiol el dibuix de les figures. Aquest treball s'ha vist en part beneficiat pel projecte d'investigació de la DGICYT: PB94-1175.

Acknowledgements

The authors gratefully thank to E. Descals, N. Llorente and G. Pons for all the commentaries and corrections made on the first manuscript which have surely improved the final text; and we would especially like to thank Lluís Fiol for the drawings. This work has been partially supported by the DGICYT research project PB94-1175.

Bibliografia / *References*

ADAMS, A.E. (1989): Genesis of fragmental carbonate rocks in the Mesozoic and Tertiary of Mallorca, Spain. *Geological Journal.* 24 : 19-29.

BARNOLAS, A. (1984):*Sedimentología del Jurásico de Mallorca.* Libro Guía de la Excursión. Grupo Español del Mesozoico. I.G.M.E. - C.G.S. 263 pàgs.

COLOM, G. (1975): *Geología de Mallorca.* Institut d'Estudis Baleàrics. Dip. Prov. Balears. 2 vols. Palma de Mallorca.

ESTEBAN, M. (1979/80): Significance of the Upper Miocene reefs of the Western Mediterranean. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology.* 29 :169-188.

FALLOT, P. (1922): *Étude Géologique de la Sierra de Majorque.* Thèse, Libr. Polythechnique, Ch. Béranger, ed. 420 pàgs. París.

FORNÓS, J.J. & POMAR, L. (1982): El complejo de manglar del Mioceno terminal de la isla de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears.* 26 : 207-228.

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.

FORNÓS, J.J.; RODRÍGUEZ-PEREA, A. & SÀBAT, F. (1984): El Mesozoico de la Serra de Son Amoixa (Serres de Llevant, Mallorca). *I Congreso Español de Geología.* 1 : 173-185.

FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1989): Paleokarst collapse features in the Uppermost Miocene of Mallorca island (Spain). *Proceedings of the10th International Congress of Speleology.* 1 : 46-48. Budapest.

FORNÓS, J.J.; RODRÍGUEZ-PEREA, A. & ARBONA, J. (1986/87): Brechas y paleokarst en los depósitos jurásicos de la «Serra de Tramuntana» de Mallorca. *Acta Geològica Hispànica.* 21-22 : 459-468.

JENNINGS, J.N. (1985): *Karst Geomorphology.* Basil Blackwell. 293 pàgs. Oxford.

POMAR, L. (1991): Reef geometries, erosion surfaces and high-frequency sea-level changes, upper Miocene Reef Complex, Mallorca, Spain. *Sedimentology.* 38 :243-269.

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.* 139-179.

POMAR, L.; FORNÓS, J.J. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1985): Reef and shallow carbonate facies of the Upper Miocene of Mallorca. In: MILA, M.D. (Ed.) *6th IAS European Regional Meeting. Excursion Guidebook.* Excursion nº11 : 495-518. Lleida.

SÀBAT, F. (1986): *Estructura geològica de les Serres de Llevant de Mallorca.* Tesi Doctoral. Inèdita. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. 128 pàgs.