

LES MICROFORMES DE METEORITZACIÓ DEL LITORAL CALCARI DE MALLORCA: APROXIMACIÓ A LA SEVA SISTEMATITZACIÓ

per Lluís GÓMEZ-PUJOL¹ i Joan J. FORNÓS¹

Resum

El micromodelat de les costes calcàries no té una naturalesa estrictament càrstica en l'accepció d'aquest mot, ja que les formes que s'hi observen són el resultat de la interacció entre diferents processos i agents. Es revisa l'abast del terme *karren* costaner, alhora que es fa un inventari de les morfologies presents a les costes rocoses calcàries de Mallorca, així com se'n descriuen els mecanismes genètics i les principals característiques morfològiques.

Abstract

The micromodelling on Mallorcan limestone coasts does not have a karstic origin in the classic sense of the term, since the observed forms are the result of the interaction of different processes and agents. The scope of the term coastal karren is reviewed, and at the same time an inventory of the morphologies found on Mallorcan coastal limestones is given. Likewise, their genetic mechanisms as well as their chief geomorphologic features are described.

Introducció

El micromodelat de les costes calcàries resulta de la interacció entre diferents processos i agents, pel que les formes que s'hi observen no sempre tenen una naturalesa estrictament càrstica en l'accepció clàssica d'aquest mot (JENNINGS, 1985).

Sota els epígrafs de *karren* costaner, *karren* litoral, *karren* marí, carst litoral o carst marí, s'acostuma a agrupar el conjunt de microformes que apareixen des de la zona intermareal a la supralitoral de les costes rocoses, perllongant-se fins a l'àrea de declivi dels processos marins front als pròpiament terrestres. No obstant, aquesta definició no és suficientment acurada en el sentit que d'una banda engloba formes generades estrictament per l'acció física de l'onatge i els esbaldregalls, com podria ésser el cas d'una marmita o les depressions creades pel brosteig d'organismes com l'erigó de mar *Paracentrotus lividus*, o els gasteròpodes *Patella rustica*, *Monodonta turbinata* o *Melaraphe neritoides*.

Un altre problema apareix arran de la poca precisió en l'ús dels termes *karren* i carst litoral o costaner. Al

respecte, GINÉS (2000) en fa una acurada revisió. En sentit estricte, les formes càrstiques resulten de l'acció de l'aigua sobre una roca que reuneixi una alta solubilitat i una porositat (primària i/o secundària) ben desenvolupada. Aquest fenomen es tradueix en un tipus de terrenys amb una hidrologia i relleu força diferenciats d'altres sistemes (FORD & WILLIAMS, 1989). En funció de l'expressió subaèria o subterrània d'aquestes formes particulars de meteorització es distingeix entre exocarst i endocarst. El primer d'aquests termes fa referència a aquelles formes que es desenvolupen sobre la superfície de la roca nua o sota una petita potència de sòl; mentre que el terme endocarst queda restringit per a les formes i els processos que es donen en condicions subterrànies. Tanmateix el terme a l'ús per a designar formes que abasten diversos ordres de magnitud és el manlleu germànic *karren* (FORNÓS & GINÉS, 1995; FORNÓS, 2000). Així doncs el terme carst fa referència al sistema integrat per l'exo i endocarst, com a elements estretament interrelacionats, un és l'enllaç de l'altre a la superfície. Ara bé, atès que la vinculació entre les morfologies superficials del roquisar litoral no té perquè estar vinculada amb les formes i processos subterranis sembla poc apropiat emprar els

¹ Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Ctra. Valldemossa, km. 7,5. 07071 Palma.
E-mail: vdctlgp4@clust.uib.es

Localització	Litologia	Mida	Situació	Referència
La Jolla (Califòrnia, USA)	Arenisques calcàries cretàciques i eocenes	<i>Diàmetre:</i> 25 cm de mitjana al peu del penya-segat fins a 50 cm devora la mar. <i>Profunditat:</i> de 3 a 20 cm incrementant en direcció a la mar.	Plataforma litoral amb una amplada de 30 m des de la base del penya-segat fins el nivell del mar. Oscil·lació mareal de 1,1 m	Emery (1946)
Wakayama (Japó)	Arenisques calcàries miocenes	<i>Diàmetre:</i> de 20 a 40 cm de mitjana, augmentant la mida cap a terra. <i>Profunditat:</i> de 2 a 4 cm de mitjana seguint la mateixa tendència que el diàmetre.	Plataforma litoral de 35 m d'amplada. Lleugerament elevada i coberta en part per sediments de platja. L'oscil·lació mareal se situa a l'entorn d'1m	Mii (1962)
Costa de Morombe (Madagascar)	Eolianites calcàries plistocenes	<i>Diàmetre:</i> des de pocs cm fins a 10 m. Tot i que s'ha registrar màxims de 62 m.	Plataforma litoral de 2 a 4 m d'amplada	Battistini (1981)
Nord-Arnøy (Gideskaal, Noruega)	Marbre	<i>Diàmetre:</i> de 10 cm a 3 m. Forma ovalada seguint les línies de fractura. <i>Profunditat:</i> de 25 a 30 cm.	Domini supralitoral. Oscil·lació mareal de 2,3 m	Holbye (1989)
Livorno, Rosignano (Toscana, Itàlia)	Dipòsits de platja i eolianites calcàries del Plistocè (<i>beachrock</i>)	<i>Diàmetre:</i> màxim de 50 cm. La planta varia de circular a subcircular. <i>Profunditat:</i> màxima de 50 cm.	Rampa de 45 m de longitud. Oscil·lació mareal 30 cm	Mazzanti & Parea (1979)
Costa de Burren (Co. Clare, Irlanda)	Calcàries	<i>Diàmetre:</i> de 24 a 43 cm, en funció de la zonació biològica. <i>Profunditat:</i> de 8 a 40 cm, seguint el mateix patró.	Costa baixa esglaonada	Lundberg (1977)
Costa de Zululand (Sud-Àfrica)	Dipòsits de platja i eolianites del Plistocè i l'Holocè (<i>beachrock</i>)	<i>Diàmetre:</i> a la zona intermareal varien de 50 cm a 1,5 m; mentre que a la supralitoral ho fan de 10 cm a 6 m. <i>Profunditat:</i> 2 a 4 cm en el domini intermareal, i una rang de 10 cm a 2,4 m a la supralitoral.	Rampes i costes baixes esglaonades	Miller & Mason (1994)
Garzotto Point (Croàcia)	Calcàries	<i>Diàmetre:</i> 30 cm de mitjana. <i>Profunditat:</i> 10 a 15 cm de mitjana.	Costa baixa esglaonada. Oscil·lació mareal d'1 m	Schneider (1976)
Costa de Múrcia (Múrcia)	Calcàries i dolomies triàsiques. Calcàries pliocenes. Dipòsits de platja i eolianites del Plistocè (<i>beachrock</i>)	<i>Diàmetre:</i> 10 cm a 3 m en funció de la zonació. <i>Profunditat:</i> seguint el mateix patró que el diàmetre, de 50 cm a 1,5 metres.	Costa baixa esglaonada	López-Bermúdez (1979)
Costa Nord d'Alacant (País Valencià)	Dipòsits de platja i eolianites calcàries quaternàries (<i>beachrock</i>)	<i>Diàmetre:</i> de 70 a 80 cm a la zona intermareal i de 20 a 25 cm a la supralitoral. Amb màxims de 1,60 m. <i>Profunditat:</i> a l'entorn dels 10-15 cm; amb màxims de 32 cm.	Rampes i costes baixes esglaonades	Sanjaume (1979)
Costa Sud d'Alacant (País Valencià)	Dipòsits de platja i eolianites quaternàries (<i>beachrock</i>)	<i>Diàmetre:</i> 50 cm de mitjana, superiors per coalescència. <i>Profunditat:</i> 25 cm de mitjana.	Rampes i costes baixes esglaonades	Pérez-Cueva (1979)
Rabat (Marroc)	Eolianites quaternàries.	<i>Diàmetres:</i> 50 cm de mitjana. <i>Profunditat:</i> 25 cm de mitjana. Amb màxims de 1,50.	Costa baixa	Guilcher (1953)
Gower (Pembrokeshire, País de Gal·les, UK)	Calcàries carboníferes	<i>Diàmetre:</i> 60 cm de mitjana. <i>Profunditat:</i> 10 cm de mitjana.	Plataforma litoral	Guilcher (1953)

Taula 1: Recopilació de dades morfomètriques de cocons.

Taula 1: Summary of basin pool morphometric parameters.

Localització	Litologia	Mida	Situació	Referència
Cala Pudent (Mallorca)	Eolianites calcàries i sediments terrestres quaternaris	Diàmetre: 90 cm de mitjana amb màxim de 2,3 m. Profunditat: 7 cm de mitjana.	Costa baixa esglaonada	Roselló (1979)
Cala d'en Guixar (Santa Ponça, Mallorca)	Bretxes juràsiques	Diàmetre: de 120 a 4,5 cm de diàmetre major, i de 37,5 a 2,5 cm de diàmetre menor. Profunditat: de 2,6 a 33,2 cm.	Costa baixa esglaonada	Inèdit
Cala d'en Guixar (Santa Ponça, Mallorca)	Eolianites quaternàries	Diàmetre: de 48 a 158 cm d'eix major, i de 38 a 101 cm d'eix menor. Profunditat: valors mínims de 22 cm i màxims de 43 cm.	Rampa	Inèdit
s'Alavern (Llucmajor, Mallorca)	Calcarenites Miocè Superior (U. Escullosa)	Diàmetre: de 5 a 70 cm d'eix major, i de 2,5 a 46 cm d'eix menor. Profunditat: mínim de 4 cm i màxim de 33,5 cm.	Rampa	Inèdit
Cala Figuera (Santanyí, Mallorca)	Calcarenites Miocè Superior (U. Escullosa)	Diàmetre: de 3 a 400 cm d'eix major, i de 2 a 300 cm d'eix menor. Profunditat: mínim de 2,5 cm a 70 cm de màxim.	Penya-segat amb paleo rasa d'abradió al peu	Inèdit
Punta des Sivinar (Santanyí, Mallorca)	Calcarenites Miocè Superior (U. Escullosa)	Diàmetre: de 10 a 900 cm d'eix major, i de 2 a 500 cm d'eix menor. Profunditat: mínim de 2 cm i màxim de 120 cm.	Penya-segat amb paleo rasa d'abradió al peu	Inèdit
s'Estret des Temps (Santanyí, Mallorca)	Eolianites quaternàries	Diàmetre: de 4 a 200 cm d'eix major, i de 4 a 50 cm d'eix menor. Profunditat: mínim de 2 cm i màxim de 50 cm.	Duna adossada al penya-segat	Inèdit
es Caló (Betlem, Artà)	Eolianites quaternàries	Diàmetre: de 5 a 130 cm d'eix major, i de 3 a 64 cm d'eix menor. Profunditat: valor mínim de 3,7 cm i màxim de 47 cm.	Rampa	Inèdit

Taula 2: Recopilació de dades morfomètriques de cocons a Mallorca.

Taula 2: Summary of morphometric parameters for basin pools on Mallorca.

termes carst litoral o carst costaner per classificar el micromodelat subaeri que es desenvolupa sobre els afloraments de roca calcària a zones costaneres.

Així doncs, per *karren litoral* s'englobaran totes aquelles formes de meteorització que es desenvolupin sobre la roca calcària en ambients litorals i en les quals la dissolució hi jugui un paper important. Quedarien fora d'aquesta definició, entre d'altres, formes com les marmites, les plataformes litorals o les construccions organògenes, totes elles tan estretament lligades als ambients que tractem.

Treballs recents (FIOL *et al.*, 1996; SCHNEIDER, 1976; SPENCER, 1988 i VILES, 1984) posen de manifest la importància dels agents biològics, des de cianobacteris a gasteròpodes, en els processos de meteorització del rocam calcari tot parlant de biocarst o de processos biocàrstics o fitocarst segons la precisió terminològica (VILES, 1988a). Aquesta situació és particularment important a les costes calcàries on la superfi-

cie de la roca presenta un grau intens de colonització, les poblacions de gasteròpodes, crustacis (e.g. *Chthamalus stellatus* o *C. depressus*) i equinoderms són importants, i l'aportació d'aigua tant per pluja com per les onades no pot ser menystinguda.

Així doncs, sota l'epítet de microformes de meteorització del litoral calcari de Mallorca, es pretén sistematitzar les diferents formes que es desenvolupen a les costes rocoses calcàries. Descriure la seva distribució i organització tot posant exemples de la costa mallorquina.

Formes i criteris de classificació

No resulta senzill agrupar les formes desenvolupades sobre el substrat calcari de les costes rocoses ja que les formes i les combinacions d'aquestes fan que les classificacions siguin molt diverses. BOGLI (1980) defensa el criteri genètic per tal de simplificar les

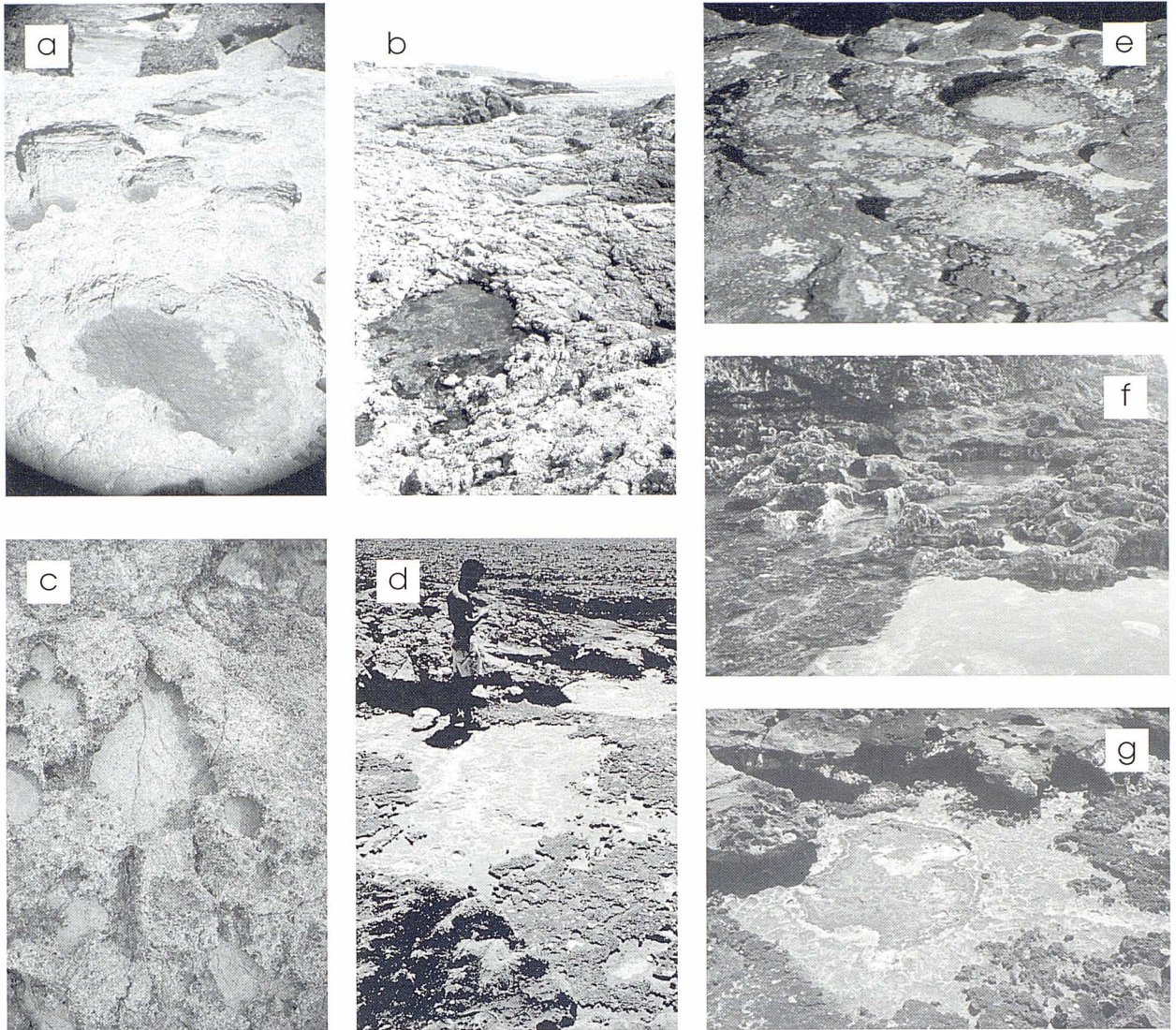


Figura 1: a) Cocons desenvolupats sobre eolianites, de planta arrodonida i creixement per coalescència (cala d'en Guixar, Sta. Ponça). b) Sistema de cocons desenvolupats sobre bretxes juràsiques amb una marcada influència en les dimensions dels seus eixos per diàclasi (cala d'en Guixar, Santa Ponça). c) Detall d'un cocó que es desenvolupa seguint els plans de les diàclasi. d) Cocó de formes irregulars arran del seu creixement per coalescència. Observi's la presència de sals i la formació d'un segon nivell de cocons en el fons (punta des Sabinar, Santanyi). e) Grup de cocons aïllats de planta arrodonida i fons pla (cala Murada, Felanitx). f) Xarxa de cocons coalescents amb aigua. Observi's com l'evolució de les formes deixa testimonis de les parets dels cocons com a relleus aïllats o pinacles (cala Figuera, Santanyi). g) Desenvolupament de mosses a les parets dels cocons, així com la generació de noves depressions de dissolució en el fons del cocó.

Figure 1: a) Basin pools developed on eolianites (Cala d'en Guixar, Sta. Ponça) with circular floor plan and growth through coalescence. b) Basin pools system developed on Jurassic breccias where major and minor axes follow rock fractures direction. (Cala d'en Guixar, Santa Ponça). c) Details of a basin pool which has developed following the line of the fracture. d) Irregularly shaped basin pool owing to its coalescent growth. Note the presence of salt and the formation of a second solution level in the basin pool floor (Punta des Sabinar, Santanyi). e) Group of isolated basin pools with a circular and flat floor plan (Cala Murada, Felanitx). f) Network of coalescent basin pools with standing water. Note how pinnacles appear as residual forms of the basin pool evolution (Cala Figuera, Santanyi). g) Notches in the basin pool walls and the development of secondary solution pans in the pool's floor.

classes morfològiques, no obstant els clarobscurs que encara existeixen sobre els processos que intervenen en el desenvolupament de les microformes de meteorització en litoral calcari aconsellen un criteri descriptiu de caràcter mixt. Així doncs, a continuació es segueix

l'esquema de FORD & WILLIAMS (1989) fonamentat en la morfologia, tot i que incorpora subdivisions arran dels factors genètics. Les grans classes que en resulten són: formes de planta arrodonida, formes linears controlades per fractures, formes linears controlades

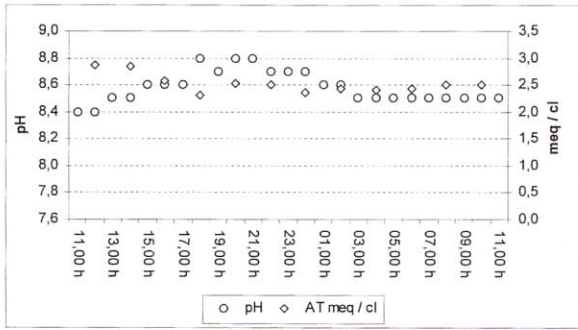
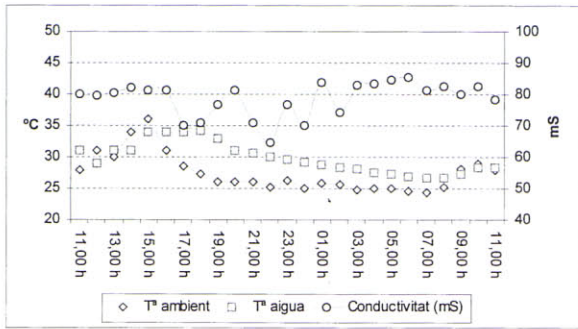


Figura 2: Seguiment de la química de les aigües dels cocons. Agost de 2000. Punta des Sivinar (Santanyi).

Figure 2: Basin pool water chemistry monitoring. August 2000. Punta des Sivinar (Santanyi).

hidrodinàmicament i un darrer grup de formes complexes o poligenètiques. Pel que fa a la terminologia catalana s'han adoptat les recomanacions de RIBA (1997), mentre que per als altres idiomes s'han indicat els termes utilitzats a la bibliografia citada al text.

A) Formes de planta arrodonida

Cocons – *solution pans, basin pools* (ang.); *vasques, mares* (fr.); *cuvetas, pozas, tinajitas* (cast.) -

Els cocons són depressions de planta el·líptica, poc profunds i de fons pla, les dimensions dels quals oscil·len des de l'ordre centimètric al mètric. Les seves parets són abruptes i mantenen un angle proper als 90° amb la base. Les parets laterals dels cocons solen presentar extraploms i entalladures de pocs centímetres de fondària. Es desenvolupen sobre diferents litologies calcàries i són presents sobre superfícies planes o subhorizontals tant a ambients micromareals com macromareals, sempre i quan hi predominin a la zona els processos de meteorització química.

Pel que fa a les seves dimensions la longitud, per norma general, és major que la profunditat. Les relacions entre aquests dos paràmetres varien en funció del substrat (Taula 1). Així les relacions entre longitud i profunditat mantenen proporcions de 5 a 2 (EMERY, 1946), 10 a 1 (MIL, 1962) o 6 a 1 (GUILCHER, 1953) sobre substrats amb porositats baixes i litologies dures; en canvi sobre litologies més blanques i més poroses

com pugin ésser les eolianites aquestes relacions varien en proporcions de 2 a 1 (LÓPEZ-BERMÚDEZ, 1979; GUILCHER, 1953; MILLER & MASON, 1994; PÉREZ-CUEVA, 1979; SANJAUME, 1979; SCHNEIDER, 1976). Els valors màxims de longitud corresponen als 62 m registrats per BATTISTINI (1981) a Madagascar, tot i que arreu els màxims oscil·len entre els 1,5 m i 10 m (Taula 1).

Els mecanismes genètics implicats en el desenvolupament del cocons són bàsicament bioquímics i el gros de la seva formació s'atribueix als processos de dissolució (TRUDGILL, 1987). Les primeres referències respecte el quimisme de les aigües dels cocons les trobem als treballs de FELDMAN & DAVY DE VIRVILLE (1933). Aquests autors durant el seu estudi de la flora de les costes rocoses registren variacions del pH durant 24h amb oscil·lacions de 8,1 a 10 unitats a les aigües embassades als cocons. Des d'un punt de vista geomorfològic, el problema de la gènesi dels cocons residia en la sobresaturació en carbonat càlcic (CaCO₃) de l'aigua de mar (TRUDGILL, 1976). A les costes de Hawaii, WENTWORTH (1944) posava de manifest que l'aigua d'escolament que arribava als cocons era responsable dels processos de dissolució. No seria, però, fins als estudis d'EMERY (1946) que s'abordaria el problema des d'una perspectiva analítica. EMERY (1946) monitoritzà a la costa meridional de Califòrnia (La Jolla) paràmetres com la temperatura ambiental, la temperatura de l'aigua, la salinitat, el pH o l'alcalinitat; tot posant de manifest com en aquelles depressions sobre substrat calcari reomplertes d'aigua marina es produïen canvis de pH i alcalinitat durant el vespre. Durant el dia, la flora que cobreix la roca consumeix el CO₂ mitjançant l'acció fotosintètica. En el moment que no disposa de llum suficient atura aquest procés i es produeix un increment del contingut en CO₂ a l'aigua de manera que es dissocia el carbonat càlcic i el volum d'aigua deixa d'estar sobresaturat baixant el pH i s'incrementa el potencial de dissolució.

SCHNEIDER (1976) desenvolupà la monitorització més completa a la costa croata – amb paràmetres com intensitat de llum, temperatura, concentració d'oxigen, alcalinitat específica, pH, oxigen dissolt, contingut en clorurs, contingut en calci, i la relació calci-clorur Ca/Cl – i planteja aquells mecanismes pels quals s'assimila el bicarbonat, descartant com a procés en l'evolució dels cocons la dissolució inorgànica. Per la seva banda TRUDGILL (1985) destaca el paper de la dissolució diferencial en funció de la mineralogia dels carbonats, ja que mentre que l'aigua marina està sobresaturada en carbonat càlcic no ho està en magnèsic. DEBRAT (1974) i MILLER & MASON (1994) també duen a terme seguiments de la química del cocons, així com també es desenvolupen experiments de laboratori (GUILCHER & PONT, 1957; DALONGEVILLE *et al.*, 1994; TRUDGILL, 1979) que apunten en la línia dels treballs d'SCHNEIDER (1976) a Croàcia.

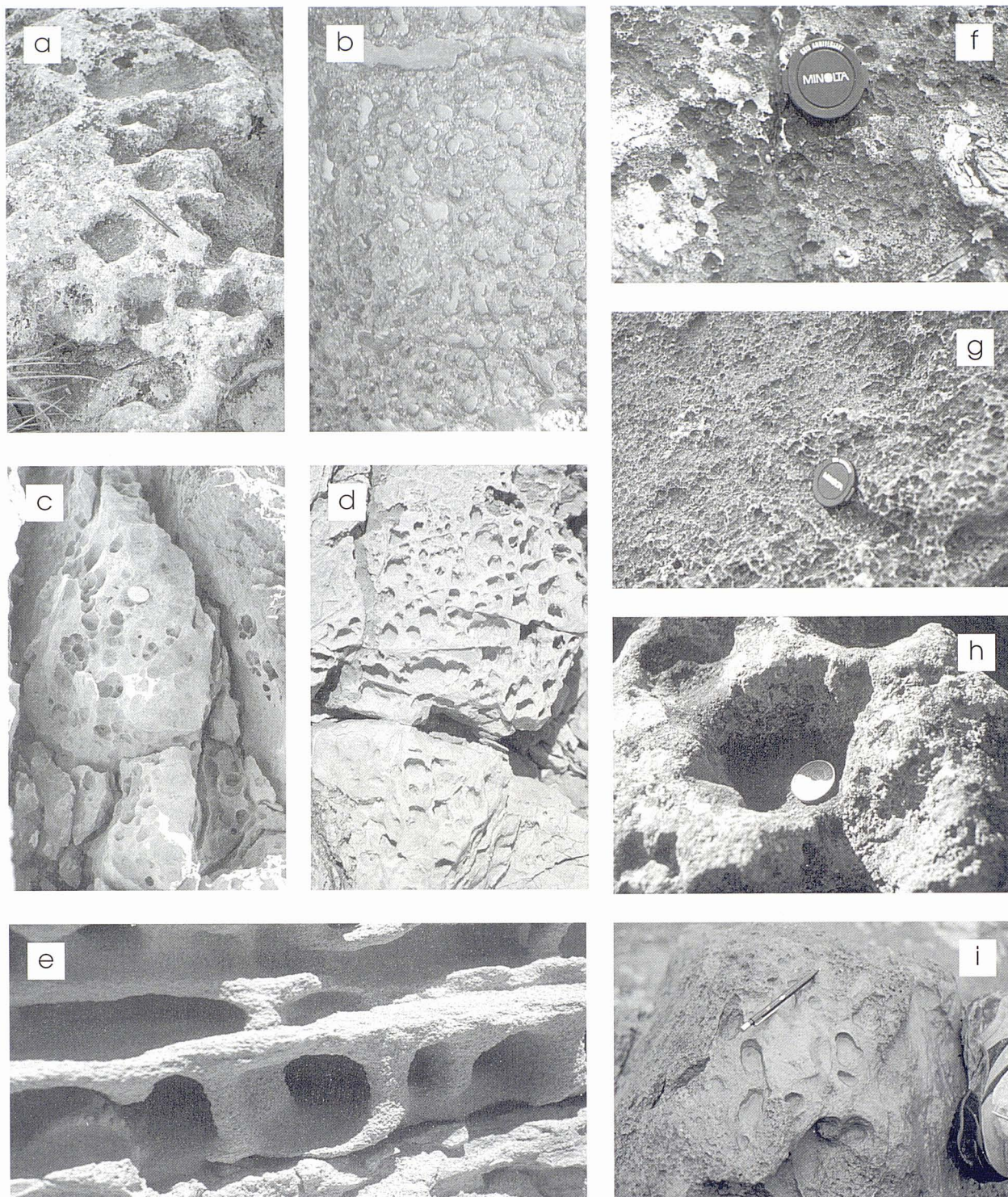


Figura 3: a) Alvéols sobre eolianites a la zona de ruixim (*spray*) amb una important colonització per líquens i cianobacteris (caló des Cans, Artà). b) Alvéols de fons concau desenvolupats sobre una superfície plana tallada en calcarenites del Miocè Superior (es niu de s'Àguila, Santanyi). c) Formes en niu d'abella a l'interior d'una esquerda (punta des Sivinar, Santanyi). d) Formes en niu d'abella sobre calcàries mesozoïques al domini del ruixim (punta des Faralló, Cala Rajada). e) Niu d'abella desenvolupat sobre eolianites i condicionat per l'estratificació de la roca (s'Estalella, Campos). f) Microalvéols sobre calcarenites del Miocè Superior. Observi's com els

substrat està intensament colonitzat per cianobacteris així com també la presència del gasteròpode *Melaraphe neritoides* a l'interior dels microalvéols (cala Murada, Felanitx). g) Aspecte del rocam a les parets verticals de la zona d'esquitxos on s'hi donen la major densitat de microalvéols (s'Alavern, Lluçmajor). h) Alvéol colonitzat per líquens al domini del ruixim (cala Murada, Felanitx). i) Cas extrem d'alveolització, després d'ésser arrabassats els clastes de la matriu, el buit que deixen són retocats pels agents de meteorització (Peix Menut, Banyalbufar).

Figure 3: a) Pits on eolianites in the spray zone with an important colonisation by lichens and blue-green algae (Caló des Cans, Artà). b) Rounded bottom pits developed on the flat surface of cut Upper Miocene calcarenites (Es Niu de S'Àguila, Santanyi). c) Honeycomb forms on a fracture wall (Punta des Sivinar, Santanyi). d) Honeycomb developed on Mesozoic limestones within the spray zone (Punta des Faralló, Cala Rajada). e) Honeycomb forms on eolianites and controlled by the stratification of the rock (S'Estalella, Campos). f) Micropits developed

on Upper Miocene calcarenites. Note, the bedrock is intensively colonized by blue-green algae, and also the presence of the gastropod *Melaraphe neritoides* inside the micropit (Cala Murada, Felanitx). g) Aspect of the vertical rock walls within the splash zone where the highest density of pits occurs (S'Alavern, Lluçmajor). h) Pit colonised by lichens in the spray zone (Cala Murada, Felanitx). i) Extreme example of pitting. After the clasts became detached from the bedrock, they have been reworked by weathering agents

La dissolució no és l'únic mecanisme que intervé en el desenvolupament dels cocons, KELLETAT (1997), DALONGEVILLE & LE CHAMPION (1982), TORUNSKI (1979), TRUDGILL *et al.* (1987) i el mateix SCHNEIDER (1976) destaquen l'acció erosiva física i química dels gasteròpodes i en alguns casos dels equinoderms en l'evolució lateral d'aquestes morfologies. També no es pot deixar de banda la meteorització mecànica per l'impacte de l'onatge o la meteorització per l'acció de les sals, tot i que amb un paper secundari.

Respecte a la morfologia dels cocons o als processos vinculats a la seva evolució, en el cas de les costes calcàries de Mallorca, comptem des de la segona meitat del segle vint amb treballs de caràcter descriptiu com el de WALTER-LEVY *et al.* (1958) realitzat al sector nord-occidental de la costa de la badia de Palma. Tot i no ser el gruix de l'objecte del seu estudi, els quaternaristes BUTZER (1962), BUTZER & CUERDA (1962), CUERDA & SACARÉS (1992) o GRÀCIA & VICENS (1998) fan referència a les característiques morfològiques dels cocons. En la mateixa línia també cal esmentar les referències als cocons de Cabrera de GINÉS (1993). El primer treball que aborda pròpiament la configuració i distribució dels cocons, a *grosso modo*, al litoral mallorquí el realitza ROSSELLÓ (1979) qui a la seva tesi doctoral (ROSSELLÓ, 1964) ja fa esment de les propietats d'aquestes formes. Des d'un punt de vista dinàmic MOSES & SMITH (1994) estudien els gradients de meteorització química per dissolució i per sals sobre els afloraments del Miocè Superior del Migjorn de l'illa.

Els cocons a la costa mallorquina són de planta el·líptica, amb dimensions que oscil·len des dels 10 cm fins als 6 m d'eix major i profunditats que varien dels 10 cm fins als 70 cm (Taula 2). La forma és arrodonida quan no s'hi dona un control accentuat de les diàclasis i s'allunya de cap a formes més allargades o irregulars en funció de les direccions de fracturació i diaclasma (Fig. 1). La distància entre cocons augmenta terra endins, essent la zona més propera a la mar característica per la coalescència i captura d'unes formes amb les altres. Pel que fa al fons dels cocons, aquest és pla o lleugerament irregular en funció de la distància a la costa i el tipus de material sobre el que s'han desenvolupat. Així, mentre els cocons desenvolupats sobre eolianites solen tenir un fons pla, o lleugerament

rugós als cocons sobre bretxes juràssiques, quan es tracta de materials amb fàcies de rodòlits o molt bioturbades el fons del cocons és més irregular. A més a més cal posar de manifest que en els cocons més propers a la línia de costa les irregularitats s'accentuen arran de l'efecte erosiu dels organismes brostejadors. Les parets dels cocons són verticals, essent típica la presència d'extraploms. És freqüent la presència de diferents entalladures que denoten diversos episodis evolutius de la morfologia.

Deixant els aspectes morfològics i passant a altres de caire dinàmic, l'agost de l'any 2000 es realitzà un monitoratge durant 24h de la química d'un conjunt de cocons a la Punta des Sivinar (Santanyi). Es mesuraren paràmetres com la temperatura ambiental i de l'aigua, la conductivitat, el pH, l'alcalinitat i l'oxigen dissolt. En termes generals es registrà un gradient de salinitat i temperatura en funció de la distància a la costa, tanmateix el patrons evolutius dels paràmetres estudiats són semblants per a tots els cocons (Fig. 2). La temperatura màxima ambiental registrada és de 38°C i la mínima de 24°C, la temperatura ambiental augmenta des de les 7,00h fins a les 17,00h, assolint el màxim entorn les 15,00h. L'aigua embassada als cocons presenta una corba on es fa patent l'efecte acumulatiu de la temperatura. La conductivitat com a indicador de la presència de clorurs a l'aigua ens mostra un lleuger augment de la salinitat, arran de l'evapotranspiració de l'aigua retinguda al cocó, durant les hores de major intensitat solar; tot i que no presenta oscil·lacions molt acusades. Cal advertir que s'han detectat fluctuacions importants de salinitat, de l'ordre de trenta unitats (92 a 120 mS) entre registres seguits a cocons amb columnes d'aigua important i en els quals s'havia observat, dies previs al mostreig, crostes de sals tot i que posteriorment foren reomplerts per aigua de pluja. Per tant sembla que pugui existir una microestratificació de l'aigua dels cocons. Per la seva banda els paràmetres de pH i alcalinitat segueixen els patrons teòrics, disminuint els valors de pH al vespre amb ordres de magnitud de 4 punts (pH de 8,9 a 8,5 o pH de 8,6 a 7,8). El descens en pH s'atribueix a l'augment de CO₂ lliure a l'aigua ja que durant el vespre aquest continua essent alliberat per la respiració dels organismes, i no és utilitzat per l'acció fotosintètica, així doncs l'aigua presenta una major acidesa perquè es dissocia el bicarbonat

(HCO_3^-) i l'àcid carbònic (H_2CO_3). Durant el dia la corba del pH puja cap a valors més bàsics, arran de l'assimilació del bicarbonat. L'alcalinitat presenta una tendència descendent durant el vespre i augmenta lleugerament durant el dia.

Alvèols, microalvèols – *cockling, pits, micropits* (angl.); *alvéoles, micro-alvéoles, vermiculations* (fr.); *alveólos, microperforaciones, microcáries* (cast.)

Les formes que concorren sota l'epígraf d'alvèols són l'exemple més clar d'una morfologia convergent. Es tracta de petites depressions de planta arrodonida o el·líptica poc profundes. Els diàmetres superiors al cm són rars i les profunditats no superen la meitat del diàmetre. Anomenarem microalvèols a aquelles formes que tinguin un diàmetre inferior al centímetre i alvèols a aquelles que el superin. Es poden presentar alineats seguint diàclasis, en coalescència, o de forma aïllada, tant sobre superfícies planes com sobre superfícies verticals. La manca d'una orientació preferent d'aquestes morfologies, així com d'un sentit gravitatori dominant, i el recobriments de la superfície de la roca per líquens i cianobacteris posa de manifest la importància dels agents biològics en la gènesi d'aquestes formes. FOLK *et al.* (1973) classifiquen aquest seguit de formes com a "fitocarst" en el sentit que són els líquens i els cianobacteris, que tenen la roca com a hàbitat, els responsables de la gènesi i evolució d'aquestes morfologies. En la mateixa línia apunten els estudis de DANIN *et al.* (1982) i els específicament desenvolupats a un gradient litoral de JONES (1989) o VILES (1988b).

Pel que fa als processos que contribueixen en l'evolució dels alvèols i microalvèols destaca l'acció física dels filaments dels líquens (MOSES & SMITH, 1993; CHEN *et al.*, 2000) o químiques derivades de l'acció metabòlica tant dels cianobacteris com dels líquens (FIOL *et al.*, 1996; GEHRMANN *et al.*, 1992; PEYROT-CLAUSADE *et al.*, 1995; POMAR *et al.*, 1975). Al desenvolupament dels alvèols també hi

contribueixen, directa i/o indirectament els organismes brostejadors que s'alimenten del tapís vegetal que recobreix les costes rocoses. Així, els cianobacteris estableixen una profunditat d'equilibri que els permeti d'una banda realitzar la fotosíntesi i mantenir les condicions d'humitat òptimes i d'altra protegir-se dels seus depredadors, els quals a la vegada bé físicament, bé per mecanismes químics erosionen la roca per tal d'obtenir el seu aliment, iniciant-se així un bucle tancat que té per resultat el desmantellament de la costa (SPENCER, 1988; TORUNSKI, 1979). Aquest cas és especialment significatiu en el cas de Mallorca per al gasteròpode *Melaraphe neritoides* i *Melaraphe punctata*, ambdues espècies és freqüent trobar-les dins dels microalvèols essent quasi bé impossible discriminar on comença i on acaba l'acció del gasteròpode o dels cianobacteris (KELLETTAT, 1980).

A les costes mallorquines els alvèols i microalvèols són força abundants i presenten unes densitats molt elevades a la zona afectada pels esquitxos i els temporals importants (Fig. 3). Els trobem tant a parets verticals com a superfícies horitzontals, tant a favor de la tendència del drenatge com al sostre de les balmes o superposant-se al gruix dels relleu dels pinacles. Per aquest motiu no es pot descartar que la meteorització per sals també hi pugui jugar un paper en l'evolució d'aquestes micromorfologies ja que a més a més de l'aportació de sals, el domini dels esquitxos també pateix processos de dessecació i humectació importants (MOSES & SMITH, 1994). De fet és força habitual trobar, quan s'observen mitjançant microscopi electrònic d'escandellatge, cristalls d'halita o de mirabilita ocupant els buits entre les parets dels elements de la roca (Fig. 4). Finalment cal posar de manifest que als ambients litorals també hi podem trobar alvèols i microalvèols en el sentit clàssic de formes estrictament de dissolució, tot i que no únicament de dissolució inorgànica. De fet en àmbits de cada cop més terrestres, el ruixim (*spray*) pot afavorir la dissolució per l'anomenat efecte ió-doble (FORD &

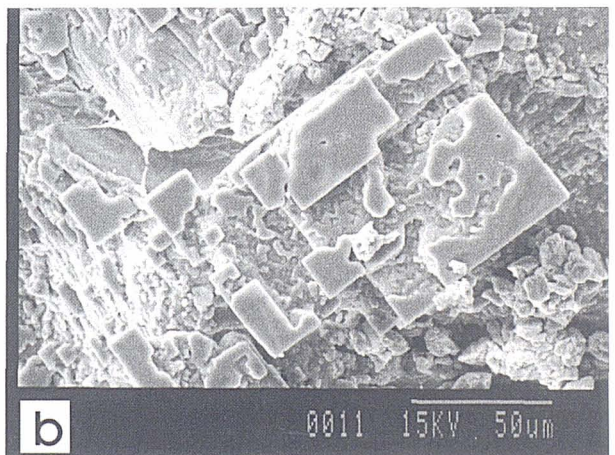
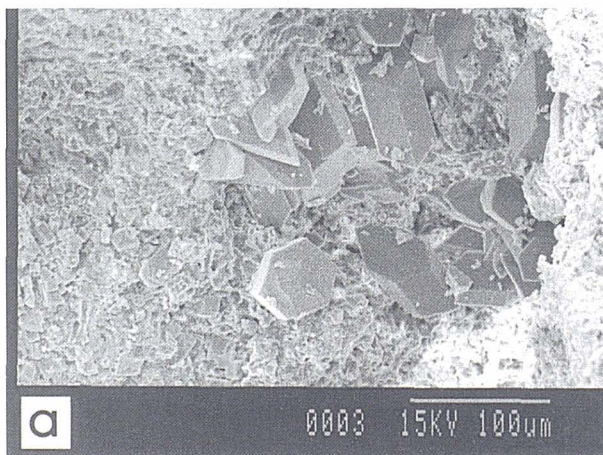


Figura 4: Presència de guixos (a) i sals (b) a l'interior dels microalvèols.

Figure 4: Presence of (a) gypsum and (b) salts inside pits

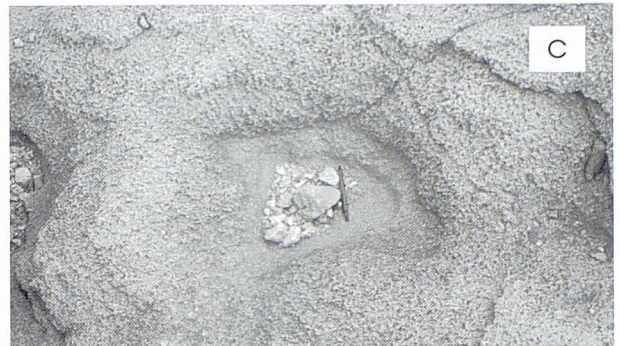


Figura 5: a) Marmita activa, tallada sobre eolianites i que presenta coalescència amb altres exemplars (Vallgornera, Lluçmajor). b i c) Marmites desenvolupades sobre eolianites, de les quals es pot observar l'estratificació, ubicades a la zona d'esquitxos i a la zona de ruixim (es Caló, Artà). d) Marmita situada pocs centímetres per sota del nivell de la mar (cala d'en Guixar, Santa Ponça).

Figure 5: a) Active potholes cut into eolianites with, among other things, coalescent growth (Vallgornera, Lluçmajor). b and c) Potholes developed on eolianites, where the stratification can be seen, and spray zones (Es Caló, Artà). d) Potholes located a few centimetres above mean sea level. (Cala d'en Guixar, Santa Ponça).

WILLIAMS, 1989). Un cas extrem d'alvèol es dona en aquells sectors del litoral on la costa s'ha desenvolupat sobre bretxes o conglomerats, de manera que quan els clastes són alliberats de la matriu, deixen una petita depressió que després d'uns petits retocs no sembla gens diferents als alvèols i microalvèols que trobem sobre substrats amb una mida de gra més homogènia.

Tafonni i nius d'abella – *cavernous weathering* (ang.), *honeycomb* (ang); *nid d'abeilles* (fr.); *cúpulas* (cast.)

El manlleu italià *tafonni* (sing. *taffone*) és emprat per quasi bé tota la bibliografia científica per tal de designar aquelles cavitats lleugerament esfèriques, més grans que un alvèol (des de més de 10 cm fins a uns quants metres d'alçada i profunditat) principalment resultat de la meteorització. Per la seva banda el terme de nius d'abella (*honeycomb*) s'utilitza per a aquells *tafonni* de petita mida que presenten com a particularitat una estructura de cel·les a mode de bresca. Tant els *tafonni* com els nius d'abella només es desenvolupen sobre superfícies verticals o inclinades. De *tafonni* i nius d'abella a ambients litorals se'n troben arreu de la geografia del globus i sobre diferents substrats, tot i que les arenisques i les arcoses (MATSUKURA & MAT-

SUOKA, 1996) faciliten el desenvolupament d'aquestes formes (SUNAMURA, 1992). Així tenim des de *tafonni* i *honeycomb* a costes desenvolupades sobre conglomerats o arenisques i margues del Terciari (MATSUKURA *et al.*, 1989), esquists (MOTTERSHEAD, 1982), materials volcànics (SMITH & McALLISTER, 1986) o sobre eolianites (UZUN, 1998). La meteorització per sals s'ha identificat com a l'agent principal que intervé en l'evolució dels *tafonni* i els nius d'abella (MOTTERSHEAD & PYE, 1994; RODRÍGUEZ-NAVARRO *et al.*, 1999) així com també tot i que amb un paper més secundari processos d'humectació i dessecació, i fins i tot biològics (VILES & PENTECOST, 1994). A les costes mallorquines tot i que no amb la freqüència en què apareixen altres tipus de micromorfologies, es poden trobar *tafonni* especialment a les eolianites quaternàries, les calcarenites del Miocè Superior, així com a les calcàries mesozoiques de les serres de Llevant (Fig. 3).

Marmites – *potholes* (ang.), *marmite de géant* (fr.), *marmita de gigante* (cast.)

Les marmites són depressions de planta cilíndrica o arrodonida formades sobre el substrat rocós per l'acció física tant d'arenes, graves, còdols com blocs que són moguts o rotats per l'energia de l'aigua. Aquestes

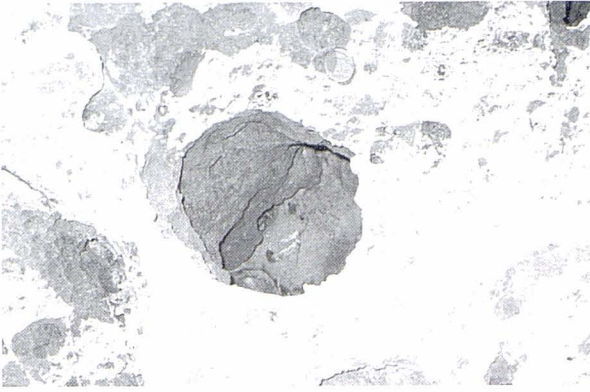


Figura 6: Conducte de subsòl. Observi's la forma arrodonida i la sinuositat del conducte així com la suavitat de les seves parets, i les restes de sòl a l'interior (cala Murada, Felanitx).

Figure 6: Subsoil solution tube. Note its rounded form and the sinuosity of the tube as well as the smoothness of its walls, and the residual soils inside (Cala Murada, Felanitx).

morfologies no són exclusives del domini litoral, i també apareixen en el llit dels cursos fluvials (SEGURA, 1990). Les marmites presenten quasi bé sempre una planta circular, les relacions entre l'eix major i l'eix menor oscil·len d'1 a 0,8 en funció de la forma del claste que les ha generat (SUNAMURA, 1992). Els exemplars que s'allunyen d'aquest patró són el resultat bé de la coalescència de depressions veïnades o fruit de les variacions de duresa o textura de la roca (TRENHAILE, 1987). Pel que fa a la profunditat, les marmites són més amples que profundes, ja que quan aquestes augmenten la profunditat sense fer-ho el diàmetre l'energia es dissipa amb major facilitat. Les marmites poden presentar una evolució discontinua en el sentit que durant una tempesta el claste que provoca l'erosió pot sortir disparat de la depressió, de la mateixa manera també hi pot entrar nou material particulat que segueixi el procés. De fet cal posar de manifest que qualsevol depressió que originàriament no fos una marmita, en el moment que s'ubica al seu interior de clastes que per l'acció de l'onatge provoquin una acció erosiva passa a comportar-se com a tal; de la mateixa manera que en perdre el claste adquireixen preponderància altres processos com els propis dels cocons.

Les marmites apareixen sobre substrats diferents sempre que es disposi de material abrasiu, així es coneixen referències de la presència d'aquestes formes tant sobre marbres (HOLBYE, 1989), granits (TRENHAILE *et al.*, 1999), sobre materials volcànics (SUNAMURA, 1992) i eolianites quaternàries (SANJAUME, 1985). A Mallorca les trobem des de les costes constituïdes per bretxes juràsiques, fins a les eolianites quaternàries (Fig. 5), essent freqüents els exemplars fossilitzats tan per sota com per sobre del nivell de la mar (GRÀCIA & VICENS, 1998).

Conductes de subsòl – soil dissolution tubules (ang.)

Els conductes tubulars són formes arrodonides de profunditat força més gran que no el radi i que evolucionen en sentit gravitatori aprofitant les línies de debilitat de la roca. Les relacions entre els seus eixos són de 1 a 1 per a les dimensions en planta i de 1 a 2 respecte l'eix major i la profunditat. Les dimensions dels conductes varien des de mínims de 4 x 4 x 9 cm fins a màxims de 26 x 26 x 50 cm. La forma vertical del conducte pot ésser sinuosa i en molts casos apareix amb sòls originals o d'erosió al seu interior; en alguns casos s'hi poden trobar una gradació que va des de material al·lòcton (restes de *Posidonia oceanica*, bioclastes) a una potència considerable de llims vermells (Fig. 6). Les parets són suaus, amb evidents signes d'una dissolució homogènia facilitada per la cobertura edàfica. Han estat trobades restes d'aquestes morfologies a diferents punts de la costa mallorquina, enmig d'àrees solcades de cocons com és el cas de la punta de n'Amer o de bona part del litoral de Llevant, especialment en aquells indrets més exposats i amb un perfil de costa convex.

B) Formes lineals controlades per fractures

Microfissures – microfissures (ang.), microfisuras (cast.)

Les microfissures són formes lineals rectilínies, la direcció de les quals està governada per l'estratificació o les diàclasis del substrat. Són molt poc profundes (<1cm) i la longitud pot ésser de varis centímetres. Són bàsicament formes de dissolució que aprofiten els plans de debilitat de la roca per a desenvolupar-se. L'aigua que circula per les microfissures prové bé de la pluja, bé de l'onatge (Fig. 7). Les microfissures com bona part de les formes lineals són presents al sector més terrestre del domini del ruixim (*spray*).

Esquerdes – splitkarren, vein-guided solution fissures (ang.)

Les esquerdes són depressions estretes, poc profundes i molt allargades que segueixen la direcció de les diàclasis. Aquestes morfologies oscil·len des de pocs centímetres fins a un parell de metres, tot i que la seva amplada no supera l'ordre cm. El mateix succeeix amb la profunditat (FORD & WILLIAMS, 1985). Quan sobre un substrat s'hi donen varies famílies de diàclasis les esquerdes poden formar canals, aparentment, meandriformes (Fig. 7). A la dissolució preferent del pla de debilitat també cal afegir-hi altres processos de meteorització, de caràcter biocàrstic, que contribueixen a l'evolució d'aquestes formes lineals. Les esquerdes destaquen sobre aquelles superfícies lleugerament inclinades cap a mar i allà on els sistemes de cocons no estan ben desenvolupats.

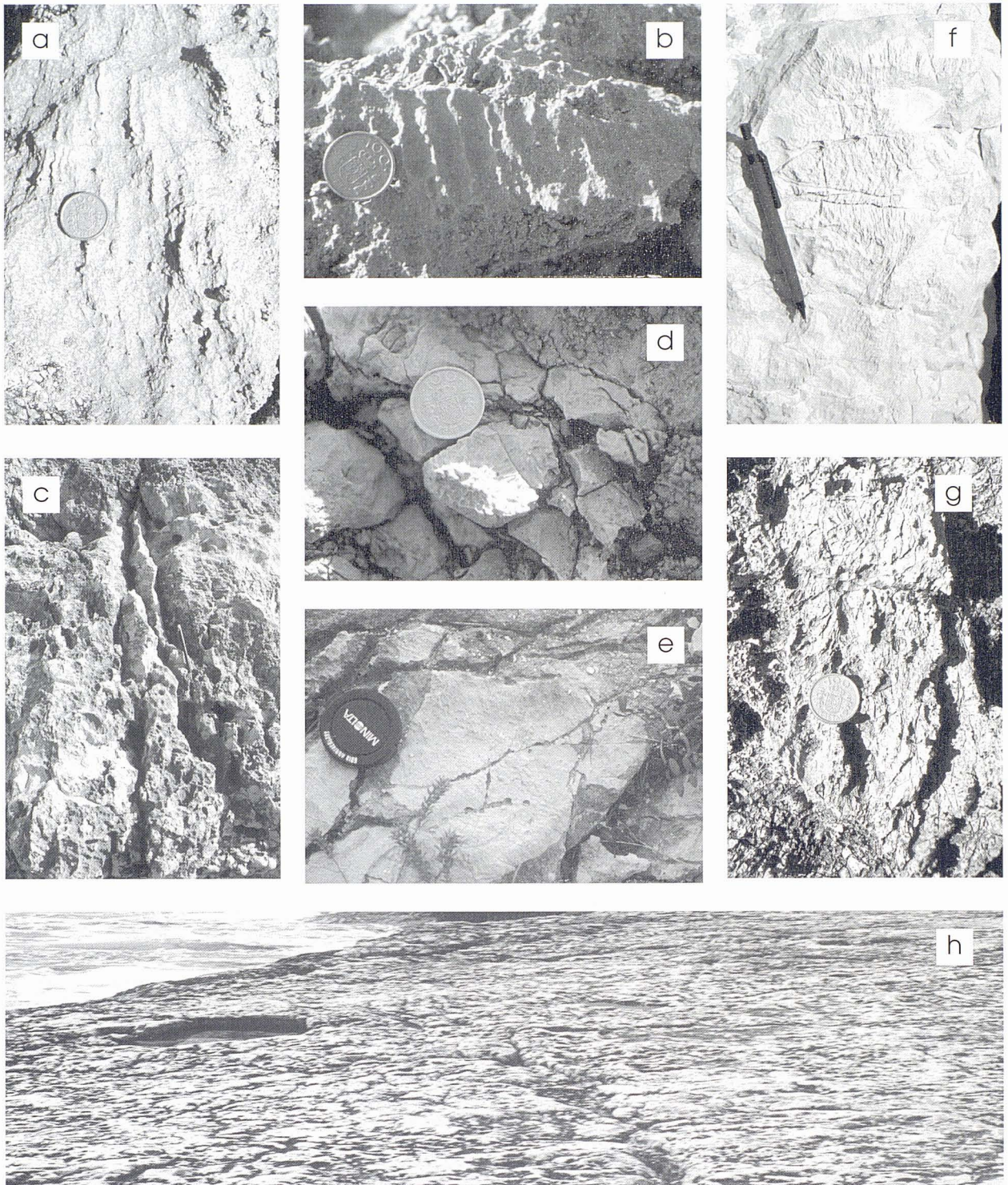


Figura 7: a i b) Estries desenvolupades sobre calcarenites del Miocè Superior (cala Murada) i bretxes juràsiques (cala d'en Guixar), respectivament. Observi's la forma en "u" i paral·lela dels canals. La primera de les fotografies correspon al domini del ruixim, mentre que la segona s'ubica a la zona d'esquitxos. c) Esquerdes amb longitud d'ordre mètric i amplada d'ordre centimètric, desenvolupades seguint la fracturació (punta des Sivinar, Santanyí). d) Canalicles trenats presents sobre els clastes d'una bretxa, el claste és d'una textura més fina que no la matriu (cala d'en Guixar, Santa Ponça). e) Canalicles desenvolupats sobre una superfície plana i que

comencen a ésser desmantellats per petits microal·lèols. La textura de la roca és de tipus *mudstone* (Cala Murada, Felanitx). f i g) Microfissures sobre calcàries mesozoiques i bretxes juràsiques (punta des Faralló a cala Rajada i cala d'en Guixar a Santa Ponça, respectivament). h) Superfície amb una densa xarxa d'esquerdes que arran de les diferents famílies de fractures generen formes semblants a canals meandriformes (caló de ses Favés, Santanyí).

Figure 7: a and b) Rillenkarren developed on Upper Miocene calcarenites (Cala Murada) and on Jurassic breccias (Cala d'en Guixar). Note the U-shape and the parallelism of the channels. The first photograph is a rillenkarren located in the splash zone, and the second in the spray zone. c) Splitkarren, being metric in length and centimetric in width, which follows the line of rock fractures (Punta des Sivinar, Santanyi). d) Microrills developed on a breccia clast. Because texture is finer than in matrix. (Cala d'en

Guixar, Sta. Ponça). e) Microrills developed on a bare surface which are being disturbed by blue-green algae pits. Rock is a mudstone. f & g). Microfissures on miocene calcarenite and mesozoic limestone rock outcrops (Punta des Faralló, Cala Rajada and Cala d'en Guixar, Santa Ponça). h) Surface with a dense network of splitkarren which follows the families of fractures and in some cases have a meander-like appearance (Caló de ses Faves, Santanyi).

C) Formes lineals controlades per hidrodinamisme

Canalicles – microrills, rillenstein (ang.)

Els canalicles són formes lineals l'amplada dels quals sol ésser d'1 mm i molt poc profundes, així com les microfissures tenen un fons angulós i abrupte, els canalicles el presenten més suau i arrodonit. Són sinuosos i fins i tot trenats sobre superfícies subhoritzontals, i esdevenen rectes amb l'increment del pendent. Es localitzen únicament a la zona afectada pel ruixim de l'onatge i sobre superfícies de textura molt fina i homogènia, especialment al Llevant i Migjorn de Mallorca sobre fàcies de tipus *mudstone*. FORD & WILLIAMS (1989) atribueixen als fluxos d'aigua per capilaritat la gènesi d'aquesta morfologia, i destaquen el paper que puguin tenir les rosades o les pel·lícules primes d'aigua com a agents de meteorització. A ambients litorals aquesta particular morfologia també ha estat identificada per FORD & LUNDBERG (1987) al supralitoral calcari de l'illa de Vancouver (Canadà) i per la seva banda GINÉS (1993) també ha identificat aquestes formes a les costes de l'arxipèlag de Cabrera.

Els canalicles, que són molt comuns a la costa formada pels materials de la unitat escullosa del Miocè Superior, així com també a les calcàries mesozoiques de la costa de Capdepera, sovint apareixen alterades per microalvèols colonitzats per líquens i cianobacteris que se superposen i trenquen la xarxa dels canalicles i vegades també de les microfissures (Fig. 7). Tot i que encara que aquest aspecte no ha estat abordat amb profunditat, l'aparença d'aquesta superposició recorda als processos que es donen a zones àrides com el sud de Tunísia, on se considera les microformes lineals com a relictos (tot i que força recents) fruit d'unes condicions més humides (SMITH *et al.*, 2000). En casos extrems com les bretxes juràsiques de la serra de Tramuntana, hem observat com els canalicles just es desenvolupen sobre els clastes atès que la matriu que els suporta presenta una textura més grollera (Fig. 7).

Estries – rillenkarren, solution flutes (ang.), cannelures (fr.); estriás de lapiaz (cast.)

Les estries són canals de fons arrodonit i parets fines organitzades de forma paral·lela que es disposen des de la cresta d'una roca llisa i disminueixen la seva profunditat fins a desaparèixer pendent avall (FORD & LUNDBERG, 1987). Les estries es caracteritzen per

mantenir una amplada més o menys constant a cada localitat (entre 1,2 i 2,1 cm a la serra de Tramuntana), mentre la longitud varia en funció d'un gradient relacionat amb les temperatures i la pluviometria (GINÉS, 1996). Els processos que intervenen en la seva formació són bàsicament la dissolució provocada per l'aigua de precipitació i l'acció derivada del metabolisme de líquens i cianobacteris que entapessen la roca (FIOL *et al.*, 1996). A la costa mallorquina aquesta morfologia és molt poc freqüent i té un patró de localització escassament definit, apareix tant a la zona d'envestida de l'onatge, com a la de ruixim, i sobre litologies prou diferents com unes bretxes juràsiques (Sta. Ponça) o unes calcarenites del Miocè Superior (cala Murada). No tenim notícia que aquesta morfologia en particular es doni en els conjunts de *karren* litoral llevat dels estudis de MILLER & MASON (1994) al sud de Sudàfrica, on es desenvolupen sobre dipòsits de platja i eolianites quaternàries (Fig. 7).

Canals de decantació – solution runnels, wandkarren, wall karren (ang.)

Aquesta és una morfologia poc comuna, però que es presenta molt sovint als afloraments de la unitat escullosa (Miocè Superior) del Llevant de Mallorca. Es tracta d'uns canals amb una amplada que supera el centímetre i paral·lels entre ells. Es disposen sobre l'extraplom de cocons que han aprofitat l'estructura tubular dels coralls per a desenvolupar-se, de manera que actuen com a col·lectors de l'aigua cap a dins del cocó.

D) Formes poligenètiques

Pinacles - spitzkarren, pinnacles (angl., fr.), agujas (cast.)

Els pinacles són cossos de roca de forma piramidal aïllats els uns dels altres. Les dimensions són força variables i depenen de factors molt locals (LEY, 1979). Les dades recollides a Mallorca presenten màxims de 70 cm, 22 cm d'eix major i 13 cm d'eix menor i mínims de 5 cm d'altura, 10 cm d'eix major i 3 cm d'eix menor sobre calcàries. Sobre eolianites l'altura màxima dels pinacles ha assolit 13 cm; 20 cm d'eix major i 5 cm d'eix menor; els mínims sobre aquesta litologia són de 2 cm d'altura, 5 cm d'eix major i 1,8 cm d'eix menor (Fig. 8). Els pinacles apareixen a la transició entre la zona d'estopeig de l'onatge i el domini dels esquitxos. Per darrera hi queda la zona de cocons pròpiament

dita. Els pinacles s'entenen com el relleu residual d'una superfície prèvia que ha estat desmantellada per la meteorització física i química durant la formació dels cocons (MILLER & MASON, 1994; SUNAMURA, 1992). De fet és molt comú observar a l'interior dels cocons restes dels nodes que comunicaven un grup de cocons coalescents i que amb el temps han quedat aïllats deixant un testimoni en forma de piràmide, de pinnacle.

Balma, visera, barbacana, entalladura – *notch, groove, nip, surf-notch (ang.); encorbellement, encoche, entaille (fr.); entalladura (cast.)*

Una balma és una indentació, de pocs centímetres a bastants metres, tallada a la costa rocosa en el vessant que dona al mar. Les balmes varien en mida, forma i relleu superficial i poden aparèixer a diferents nivells i desenvolupar-se arran de diferents processos (PIRAZZOLI, 1986). El desenvolupament de les balmes pot ésser atribuït a varis processos de meteorització, químics, mecànics i biològics.

L'acció mecànica per l'efecte erosiu de l'onatge o l'impacte del material solt que aquest arrossega, es reconeix en el balma per una superfície de la roca polida; llavors es parla d'una balma d'abrasió (TRENHAILLE *et al.*, 1998). Cal separar-los d'aquells que també s'ha format per l'acció impactant tot i que afavorits per la disposició estructural (balmes estructurals). Quan els que dominen són els processos de meteorització química i l'acció dels organismes es classifiquen com a balmes de corrosió (HIGGINS, 1980; RUST & KERSHAW, 2000) o de bioerosió (ABESNPERG-TRAUN *et al.*, 1990; HODGKIN, 1970; PIRAZZOLI & SALVAT, 1992) en funció de la preponderància dels processos.

A la costa mallorquina, quan el sector de costa està protegit presenta una altura important i un perfil transversal obert. En canvi l'altura de la balma és petita, i no hi ha quasi bé separació entre el sostre i la base de la balma quan la localització és exposada (Fig. 8).

Plataformes litorals – *shore platform (ang.), platier rocheux, trottoir rocheux (fr.), plataforma litoral, acera (cast.)*

Les plataformes litorals són superfícies d'erosió subhorizontals d'extensió variable en funció de l'exposició i les característiques del substrat sobre el qual es desenvolupen. A més a més d'una important component relacionada amb les condicions oceanogràfiques. Els processos que intervenen en la seva formació són variats i van des de l'acció mecànica de l'onatge fins a la meteorització química i l'acció bioerosiva (STEPHENSON, 2000). Les plataformes mallorquines (Fig.8) són més aviat petites (1 a 2 m), en aquells casos més favorables, l'amplada d'aquesta morfologia pot arribar o superar els 10 m. Les plataformes litorals per norma general es troben entapissades per pradells

de *Cystoceira* sps. i són nombrosos els organismes que hi desenvolupen una activitat bioerosiva, des d'equinoderms (e.g. *Paracentrotus lividus*) a bivalves perforants (e.g. *Lithophaga lithophaga*).

Trottoirs – *Trottoir, surf benches, armoured rim, bioherm, organic crust (ang.); trottoir, banquette, trottoir construit (fr.); acera (cast)*

El *trottoir* és una construcció biogènica produïda principalment per algues calcàries i vermèdids (DALONGEVILLE, 1993). Es disposa sobre o adossada a la costa rocosa des de pocs mm per sobre el nivell del mar a uns quants cm per sota (Fig.8), condicionat per l'abast de la cavitació de l'onatge que és un dels mecanismes més importants d'aportació de l'oxigen i els nutrients que requereixen aquestes comunitats (FOCKE, 1978). Pot arribar a tenir gruixos considerables, i desenvolupa paral·lelament una acció de protecció de la roca que entapissa, alhora que també facilita el desplaçament de l'onatge cap a dins del perfil de costa alhora que els propis organismes realitzen accions tan mecàniques com químiques d'erosió (NUNN, 1993). Els *trottoirs* atès que la seva distribució està estretament lligada al nivell marí són uns bons indicadors de les oscil·lacions quaternàries (PIRAZZOLI & SALVAT, 1992).

Bufadors – *blowhole (ang.)*

Els bufadors són conductes de morfologia molt variada que aprofitant els plans de debilitat connecten la superfície de la costa amb cavitats obertes a la mar, o amb la base de la balma, de manera que quan l'onatge estopeja la costa desplaça l'aire i l'aigua a través de la fissura com si es tractés d'un guèiser.

L'organització de les formes

A la figura 9 s'hi representen esquemàticament els perfils de costa més comuns a Mallorca. La característica més destriable, com a totes les costes calcàries rocoses (SPENCER, 1988), és una gradació tant de les formes, la fauna i la flora en funció del grau d'humectació per l'onatge.

Així es distingeix, de mar cap a terra, una zona de domini de l'onatge, una segona dels esquitxos (*splash*) i finalment una zona on l'aportació de l'aigua de mar ve en forma d'aerosol (*spray*). El domini de l'onatge coincideix amb l'àmbit on trobem formes com les plataformes litorals i el *trottoir*, quan el perfil de la costa es comença a verticalitzar llavors poden aparèixer les balmes. Mentre que les plataformes estan cobertes per concreccions organògenes i macròfits, la resta de superfície està solcada per morfologies com alvèols i microalvèols, així com també són fàcils d'observar les marques deixades per organismes com els equinoderms i gasteròpodes (especialment *Patella* sps.). És

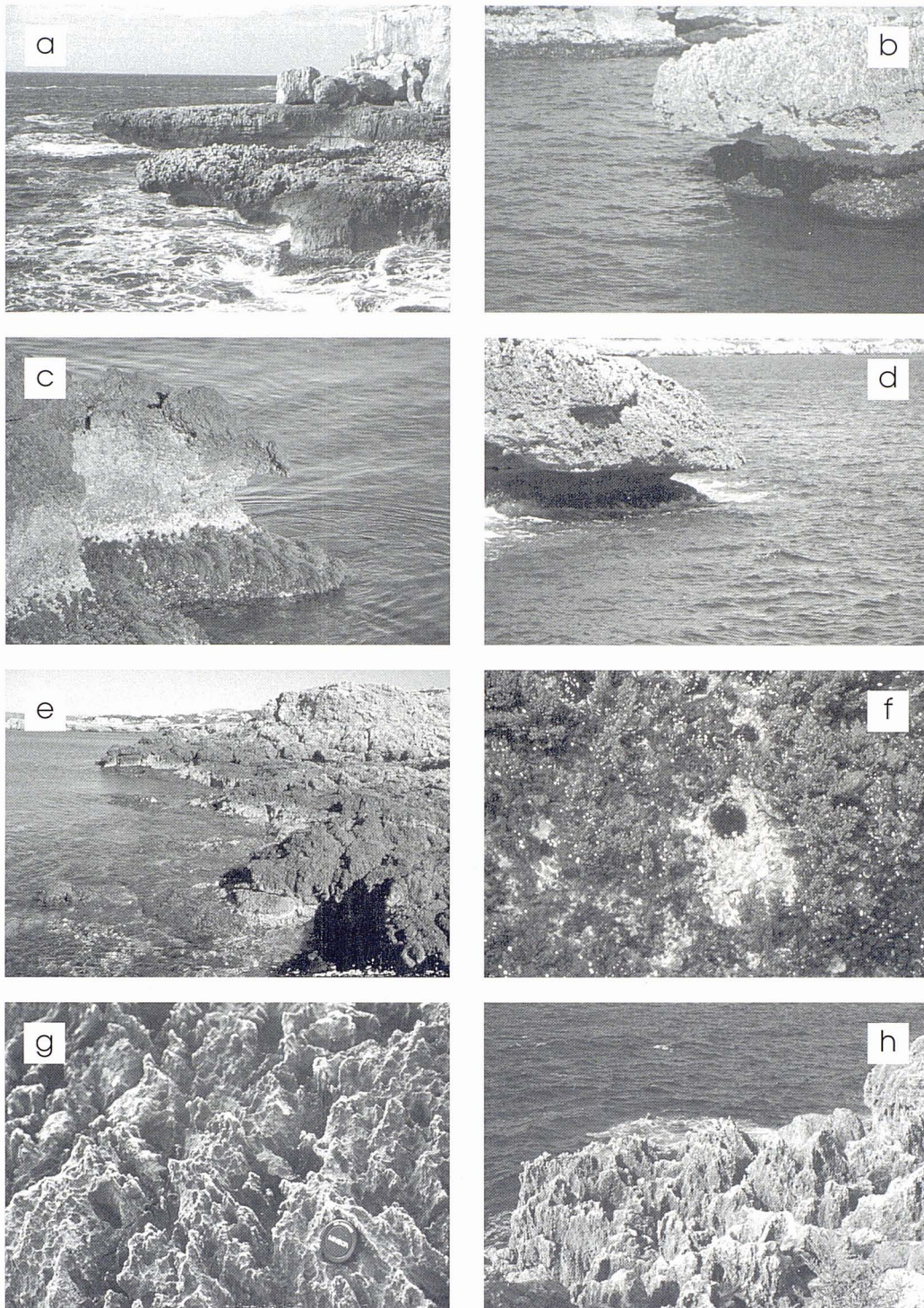


Figura 8: Balmes (mosses): a) i b) sobre calcarenites del Miocè Superior (punta des Sivinar); d) (cala Murada). c) sobre bretxes juràssiques (cala d'en Guixar). Plataforma litoral: e) panoràmica general i f) detall de la depressió provocada a la plataforma per un eriçó de mar. Pinnacles: g) Pinnacles sobre calcàries del Miocè Superior (cala Murada, Felanitx) i h) pinnacles desenvolupats sobre eolianites (s'Estret des Temps, Santanyi).

Figure 8: Notches cut into a) and b) Upper Miocene calcarenites (Punta des Sivinar) and d) (Cala Murada). c) into Jurassic breccias (Cala d'en Guixar). Shore platform showing: e) general view of rocky coast zonation from supratidal to shore platform and f) detail of sea urchin boring hole on shore platform. Pinnacles: g) Pinnacles developed on Upper miocene calcarenites (Cala Murada, Felanitx) and h) on eolianites (S'Estret des Temps, Santanyi).

en el canvi de pendent des de la plataforma litoral, quan s'adquireix un sentit vertical del perfil i fins que aquest torna a adoptar un sentit subhorizantal, que es troben les màximes densitats d'al·lèols i microal·lèols,

en qualsevol disposició i fins i tot superposant-se a altres morfologies.

Quan es passa al domini dels esquitxos és força comú trobar a les esquerdes i zones de drenatge

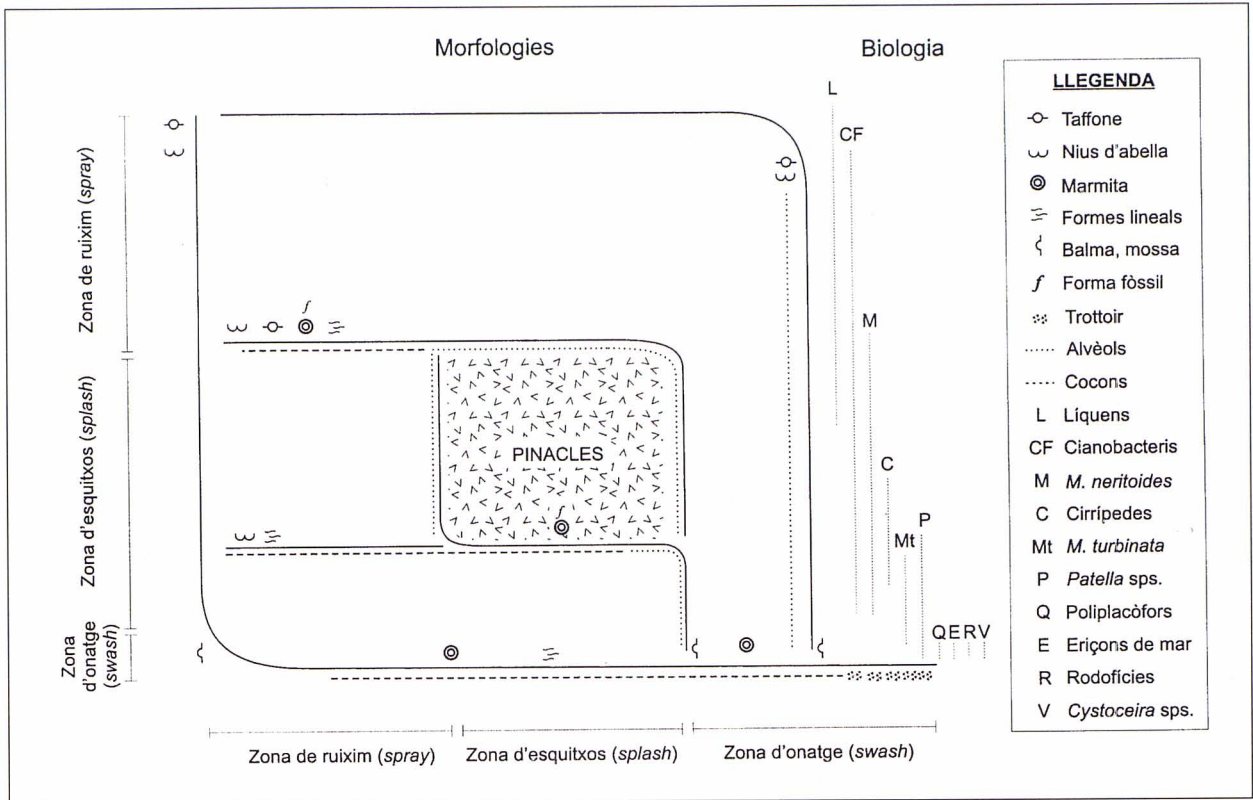


Figura 9: Esquema morfològic de la costa mallorquina que relaciona pendent, dinàmica marina, distribució de formes i zonació biològica.

Figure 9: Morphological scheme of the Mallorcan coast, relating the slope, marine dynamics, morphological distribution and biological zonation.

importants colònies de crustacis filtradors com *Chthamalus stellatus* o *C. depressus* que desenvolupen una acció de protecció de la roca; també en aquest àmbit i dins les esquerdes i microalvèols és freqüent trobar exemplars de *Melaraphe neritoides* o *M. punctata*. En els casos que des de la plataforma s'aixeca la vertical del penya-segat de l'ordre d'1 a 3 metres, abans de la zona on són presents els cocons s'identifica una àrea on els pinacles són la forma més característica.

Per darrera dels pinacles i ja quan es dona la transició de la zona de esquitxos a la de ruixim, quan la superfície és plana són freqüents els cocons. Aquests de mar cap a terra, disminueixen el grau de coalescència, de la mateixa manera que l'arrodoniment i la mida del cocó. Els cocons més interiors solen presentar formes més irregulars que no aquells més propers a la mar. Els alvèols i microalvèols disminueixen les seves densitats; és en aquesta zona on comencen a fer-se més evidents el seguit de formes lineals; especialment les controlades per fracturació. Pel que fa als conductes de subsòl, els canalicles, els nius d'abella o els *tafanni* solen aparèixer en aquest domini. La fauna queda molt reduïda, essent els gasteròpode *Melaraphe neritoides* quasi bé l'únic representant; a la zona de ruixim la roca està colonitzada per cianobacteris i líquens, i comencen a aparèixer algunes plantes superiors (*Limonium* sps.)

Conclusions

Les costes carbonatades de Mallorca presenten un conjunt de micromorfologies força variat i tenen en la seva gènesi diferents processos d'erosió i també d'acreció com en el cas del *trottoir*. El microrrelleu que en resulta sol designar-se com a *karren* litoral, tot i que algunes de les formes presents en aquest sistema no tenen la dissolució, inorgànica i/o orgànica, com a mecanisme evolutiu. Aquest és el cas de formes clarament d'erosió com les marmites o de meteorització química com els *tafanni*. Tanmateix la importància dels fenòmens biocàrstics és abasseguradora, i el tret més definitori dels processos d'erosió que es donen a les costes rocoses calcàries de Mallorca. Queda a l'expectativa la interpretació de formes com els conductes de dissolució, que essent típicament de subsòl apareixen entre formes pròpies del litoral; o la contribució de les paleomorfologies en el cas dels canalicles que actualment són desmantellats.

Agraïments

El present treball s'ha desenvolupat sota el finançament dels projectes MAS3-CT98-0173, ESPED: European Shore Platform Erosion Dynamics i DGE-SIC-PB98-0132: El karst y la morfogénesis litoral en las

Islas Baleares y la costa valenciana: su relación con las oscilaciones del nivel marino a lo largo del Cuaternario. Així mateix el treball no hauria estat possible sense els consells o l'ajuda en el camp, a un moment o a un altre, de Guillem Pons, Pau Balaguer, Marta Asensi, Maria Vidal, Emma Navarro, Gemma Villanueva, Marianna Baldo, Joan Miquel Carmona, Joaquin Ginés, Angel Ginés, Damià Vicens i Francesc Gràcia, a tots ells el nostre agraïment.

Bibliografia

- ABENSPERG-TRAUN, M.; WHEATIN, G.A. & ELIOT, I.G. (1990): Bioerosion, notch formation and micromorphology in the intertidal and supratidal zones of a calcareous sandstone stack. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 73: 47-56.
- BATTISTINI, R. (1981): La morphogenese des plateformes de corrosion littorale dans les gres calcaires (plateforme a vasques) et le probleme des vasques d'apres des observations faites a Madagascar. *Rev. Géom. Dyn.*, 30: 81-94.
- BOGLI, A. (1980): *Karst hydrology and physical speleology*. Berlin. Springer. 284 pp.
- BUTZER, K.W. (1962): Coastal geomorphology of Majorca. *Annals of the Association of America Geographers*, 52: 191-212.
- BUTZER, K.W. & CUERDA, J. (1962): Coastal stratigraphy of southern Mallorca and its implications for the Pleistocene chronology of the Mediterranean sea. *Journal of Geology*, 70: 398-416.
- CHEN, J.; BLUME, H.P. & BEYER, L. (2000): Weathering of rocks induced by lichen colonization, a review. *Catena*, 39: 121-146.
- CUERDA, J. & SACARÉS, J. (1992): *El Cuaternari del Migjorn de Mallorca*. Govern Balear. Palma. 130 pp.
- DALONGEVILLE, R. (1995): Le rôle des organismes constructeurs dans la morphologie des littoraux de la mer méditerranée: algues calcaires et vermetidés. *Norvis*, 42: 73-88.
- DALONGEVILLE, R. & LE CAMPION, Th. (1982): Aperçu sur l'érosion littorale en roches carbonatées. L'exemple de la Méditerranée. *Bull. Lab. Rhod. de Géom.*, 11-12: 3-12.
- DALONGEVILLE, R., LE CAMPION, Th. & FONTAINE, M.F. (1994): Bilan bioconstruction-biodestruction dans les roches carbonatées en mer Méditerranée: étude expérimentale et implications géomorphologiques. *Z. Geomorph. N.F.*, 38: 457-474.
- DANIN, A.; GERSON, R.; MARTON, K. & GARTY, J. (1982): Patterns of limestone and dolomite weathering by lichen and blue-green algae and their palaeoclimatic significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 37: 221-233.
- DEBRAT, J.M. (1974): Etude d'un karst calcaire littoral méditerranéen. Exemple du littoral de Nice a Menton. *Méditerranée*, 2: 63-85.
- EMERY, K.O. (1946): Marine solution basins. *The Journal of Geology*, 54: 209-228.
- FELDMANN, J. & DAVY DE VIRVILLE, A. (1933): Les conditions physiques et la végétation des flaques littorales de la côte des Albères. *Rev. Gén. de Botanique*, 45: 621-654.
- FIOL, LL.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (1996): Effects of biokarstic processes on the development of solutional rillenkarren in limestone rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 447-452.
- FOCK, J.W. (1978): Limestone cliff morphology on Curaçao (Netherlands Antilles), with special attention to the origin of notches and vermetid/coralline algal surf benches ("cornices", "trottoirs"). *Z. Geomorph. N.F.*, 22: 329-349.
- FOLK, R.L.; ROBERTS, H.H. & MOORE, C.H. (1973): Black phytokarst from Hell, Cayman Islands, British West Indies. *Geological Society of American Bulletin*, 84: 2351-2360.
- FORD, D.C. & LUNDBERG, J.C. (1987): A review of dissolutional rills in limestone and other soluble rocks. *Catena Supplement*, 8: 119-140.
- FORD, D. & WILLIAMS, P. (1989): *Karst geomorphology and hydrology*. Chapman & Hall. London. 601 pp.
- FORNÓS, J.J. (2000): Karren. In Hannock, P. & Skinner, B. (eds.): *The Oxford Companion to the Earth*: 575-576. Oxford University Press. Oxford.
- FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (1996): Karren landforms: an introduction. In Fornós, J.J. & Ginés, A. (eds.): *Karren landforms*: 17-22. Universitat de les Illes Balears. Palma.
- GEHRMANN, C.K.; KRUMBEIN, W.E.; PETERSEN, K. (1992): Endolithic lichen and the corrosion of carbonate rocks, a study of biopitting. *Int. J. Mycol. Lichenol.*, 5: 37-48.
- GINÉS, A. (1993): Morfologies exocàrstiques. In ALCOVER, J.A., BALLESTEROS, E. & FORNÓS, J.J. (eds.): *Història natural de l'arxipèlag de Cabrera*: 153-160. CSIC, Societat d'Història Natural, Moll. Palma.
- GINÉS, A. (1996): Quantitative data as a base for the morphometric definition of rillenkarren features found on limestones. In FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.): *Karren landforms*: 177-191. Universitat de les Illes Balears. Palma.
- GINÉS, J. (2000): El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología. *Tesi doctoral inèdita*. Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. 595 pp.
- GUILCHER, A. (1953): Essai sur la zonation et la distribution des formes littorales de dissolution du calcaire. *Annales de Géographie*, 331: 161-179.
- GUILCHER, A. & PONT, P. (1957): Étude expérimentale de la corrosion littorale des calcaires. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, 265-266: 48-62.
- GRÀCIA, F. & VICENS, D. (1998): Aspectes geomorfològics quaternaris del litoral de Mallorca. In FORNÓS, J.J. (ed.): *Aspectes geològics de les Balears*: 307-329. Universitat de les Illes Balears. Palma.
- HIGGINS, C.G. (1980): Nips, notches, and the solution of coastal limestone: an overview of the problem with examples from Greece. *Estuarine and coastal marine science*, 10: 15-30.
- HOLBYE, U. (1989): Bowl-karren in the littoral karst of Nord-Arnøy, Norway. *Cave Science*, 16: 19-26.
- HODGKIN, E.P. (1970): Geomorphology and biological erosion of limestone coasts in Malaysia. *Geological Society of Malaysia Bulletin*, 3: 27-51.
- JENNINGS, J.N. (1985): *Karst geomorphology*. Blackwell. Oxford. 293 pp.
- KELLETAT, D. (1985): Bio-destructive und bio-constructive formelemente an den spanischen mittelmeerküsten. *Geoökodynamic*, 6: 1-20.
- KELLETAT, D.H. (1997): Mediterranean coastal biogeomorphology: processes, forms and sea-level indicators. *Bull. Inst. Oceanographique Monaco, n°special*, 18: 209-224.
- KELLETAT, D.H. Formenschatz und prozeßgefüge des "biokarstes" an der küste von Nordost-Mallorca (Cala Guya). *Berliner Geographische Studien*, 7: 99-113.
- LEY, R.G. (1979): The development of marine karren along the Bristol channels coastline. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*, 32: 75-89.
- LÓPEZ-BERMÚDEZ, F. (1979): Formas y procesos kársticos en el litoral murciano. In BARCELÓ, B. (dir.): *Actas del VI coloquio de Geografía*: 57-64. AGE, Universidad de Palma de Mallorca. Palma.
- LUNDBERG, J. (1977): Karren of the littoral zone. Burren District, Co. Clare, Ireland. In *Proceedings of the 7th International Speleological Congress*: 191-293. British Cave Research Association. Sheffield.
- MATSUKURA, Y. & MATSUOKA, N. (1996): The effect of rock properties on rates of tafono growth in coastal environments. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*, 106: 57-72.
- MATSUKURA, Y.; MATSUOKA, N. & YANO, N. (1989): A preliminary study on tafoni and honeycombs in Nojima-zaki, Boso Peninsula, Japan. *Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba*, 15: 29-32.
- MAZZANTI, R. & PAREA, G.C. (1979): Erosione della "Panchina" sui litorali di Livorno e di Rosignano. *Boll. Soc. Geol. It.*, 90: 457-489.
- MII, H. (1962): Coastal geology of Tanabe bay. *Sci. Rept. Tohoku University*, 34: 1-93.
- MILLER, W.R. & MASON, T.R. (1994): Erosional features of coastal beachrock and aeolianite outcrops in Natal and Zululand, South Africa. *Journal of Coastal Research*, 10: 374-394.
- MOSES, C.A. & SMITH, B.J. (1993): A note on the role of the lichen *Collema auriforma* in solution basin development on a carboniferous limestone substrate. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 363-368.
- MOSES, C.A. & SMITH, B.J. (1994): Limestone weathering in the supra-tidal zone: an example from Mallorca. In ROBINSON, D.A. & WILLIAMS, R.B.G. (eds.): *Rock weathering and landform evolution*: 433-451.

- MOTTERSHEAD, D.N. (1982): Coastal spray weathering of bedrock in the supratidal zone at East Prawle, South Devon. *Field studies*, 5: 663-684.
- MOTTERSHEAD, D.N. & PYE, K. (1994): Tafoni on coastal slopes, South Devon, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19: 543-563.
- NUNN, P.D. (1993): Role of Porolithon algal-ridge growth in the development of the winward coast of Tongatapu Island, Toga, South Pacific. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 427-439.
- PÉREZ-CUEVA, A. (1979): Karst marino en el sector litoral Alacant-Torrevieja. In BARCELÓ, B. (dir.): *Actas del VI coloquio de Geografía*: 81-88. AGE, Universidad de Palma de Mallorca. Palma.
- PEYROT-CLAUSADE, M.; LE CAMPION, T.; HARMELIN, M.; ROMANO, J.C.; CHAZOTTES, V.; PARI, N. & LE CAMPION, J. (1995): La bioérosion dans le cycle des carbonates: essais de quantification des processus en Plynésie française. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 1: 85-94.
- PIRAZZOLI, P.A. (1986): Marine notches. In VAN DE PLASSCHE, O. (ed.). *Sea level research: a manual for collection data*: 361-400. *Geobooks*. Norwich.
- PIRAZZOLI, P.A. & SALVAT, B. (1992): Acient shorelines and quaternary vertical movements on Rurutu and Tubuai (Austral Isles, French Polynesia). *Z. Geomorph. N.F.*, 36: 431-451.
- POMAR, L.; ESTEBAN, M.; LLIMONA, X.M. & FONTARNAU, R. (1975): Acción de líquenes, algas y hongos en la telodiagénesis de las rocas carbonatadas de la zona prelitoral catalana. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, 30: 83-117.
- RIBA, O. (ed.). (1997): *Diccionari de Geologia*. Institut d'Estudis Catalans. Enciclopèdia Catalana. Barcelona. 1.407 pp.
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, C.; DOEHNE, E. & SEBASTIAN, E. (1999): Origins of honeycomb weathering: the role of salts and wind. *Geological Society of America Bulletin*, 111: 1250-1255.
- ROSSELLÓ, V.M. (1964): *Mallorca. El Sur y el Sureste*. Cámara de Comercio, Industria y Navegación de Palma de Mallorca. Palma. 553 pp.
- ROSSELLÓ, V.M. (1979): Algunas formas kársticas litorales de Mallorca. In BARCELÓ, B. (dir.): *Actas del VI coloquio de Geografía*: 115-121. AGE, Universidad de Palma de Mallorca. Palma.
- RUST, D. & KERSHAW, S. (2000): Holocene tectonic uplift patterns in northeastern Sicily: evidence from marine notches in coastal outcrops. *Marine Geology*, 167: 105-126.
- SANJAUME, E. (1979): Karst marino en el litoral del norte de Alacant. In BARCELÓ, B. (dir.): *Actas del VI coloquio de Geografía*: 123-129. AGE, Universidad de Palma de Mallorca. Palma.
- SANJAUME, E. (1985): *Las costas valencianas, sedimentología y morfología*. Secció Geografía. Universitat de València. València. 505 pp.
- SCHNEIDER, J. (1976): Biological and inorganic factors in the destruction of limestone coasts. *Contribution to Sedimentology*, 6: 1-112.
- SEGURA, F.S. (1990): *Las ramblas valencianas, algunos aspectos de hidrología, geomorfología y sedimentología*. Departament de Geografía. Universitat de València. València. 229 pp.
- SMITH, B.J. & McALLISTER, J.J. (1986): Observations on the occurrence and origins of salt weathering phenomena near lake Magadi, Southern Kenya. *Z. Geomorph. N.F.*, 30: 445-460.
- SMITH, B.J., WARKE, P.A. & MOSES, C.A. (2000): Limestone weathering in contemporary arid environments: a case study from southern Tunisia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1343-1354.
- SPENCER, T. (1988): Limestone coastal morphology: the biological contribution. *Progress in Physical Geography*, 12: 66-101.
- STEPHENSON, W.J. (2000): Shore platforms: a neglected coastal feature?. *Progress in Physical Geography*, 24: 311-327.
- SUNAMURA, T. (1992): *Geomorphology of rocky coasts*. John Wiley. Chichester. 302 pp.
- TORUNSKI, H. (1979): Biological erosion and its significance for the morphogenesis of limestone coasts and for nearshore sedimentation (Northern Adriatic). *Senckenbergiana marit.*, 11: 193-265.
- TRENHAILE, A.S. (1987): *The geomorphology of rock coasts*. Clarendon Press. Oxford. 384 pp.
- TRENHAILE, A.S.; PEPPER, D.A.; TRENHAILE, R.W. & DALIMONTE, M. (1998): Stacks and notches at Hopewell rocks, New Brunswick, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 975-988.
- TRENHAILE, A.S.; PÉREZ, A.; MARTÍNEZ, A.; COSTAS, M. & BLANCO, R. (1999): Rock coast inheritance: an example from Galicia, Northwestern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 605-621.
- TRUDGILL, S.T. (1976): The marine erosion of limestones on Aldabra Atoll, Indian Ocean. *Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd.*, 26: 164-200.
- TRUDGILL, S.T. (1979): Spitzkarren on calcarenites, Aldabra Atoll, Indian Ocean. *Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd.*, 32: 67-74.
- TRUDGILL, S.T. (1985): *Process and form in coastal limestone landforms*. Longman. London. 196 pp.
- TRUDGILL, S.T. (1987): Bioerosion of intertidal limestone, Co. Clare, Eire - 3: Zonation, process and form. *Marine Geology*, 74: 111-121.
- TRUDGILL, S.T.; SMART, P.; FRIEDERICH, H. & CRABTREE, R.W. (1987): Bioerosion of intertidal limestone, Co. Clare, Eire - 1: *Paracentrotus lividus*. *Mar. Geol.*, 74: 85-89.
- UZUN, A. (1998): Weathering forms on sandstone directly exposed to sea effects in Gelincikburnu and its surroundings (south coast of the Black Sea). *Z. Geomorph. N.F.*, 42: 233-244.
- VILES, H.A. (1984): Biokarst: review and prospect. *Progress in Physical Geography*, 8: 523-542.
- VILES, H.A. (1988a): *Biogeomorphology*. Blackwell. Oxford. 365 pp.
- VILES, H.A. (1988b): Cyanobacterial and other biological influences on terrestrial limestone weathering on Aldabra: implications for landform development. *Biological Society of Washington Bulletin*, 8: 5-13.
- VILES, H.A. & PENTECOST, A. (1994): Problems in assessing the weathering action of lichens with an example of epiliths on sandstone. In ROBINSON, D.A. & WILLIAMS, R.B.G. (eds.). *Rock weathering and landform evolution*: 99-116. John Wiley & Sons. Chichester.
- WALTER-LEVY, L.; FRÉCAUT, R. & STRAUSS, R. (1958): Contribution à l'étude de la zone littorale des îles Baléares. Biologie et chimie des algues calcaires. Formes du relief qui leur sont liées. *Revue algologique*, 3: 202-228.
- WENTWORTH, C.K. (1944): Potholes, pits and pans: subaerial and marine. *Jour. Geology*, 52: 117-130.