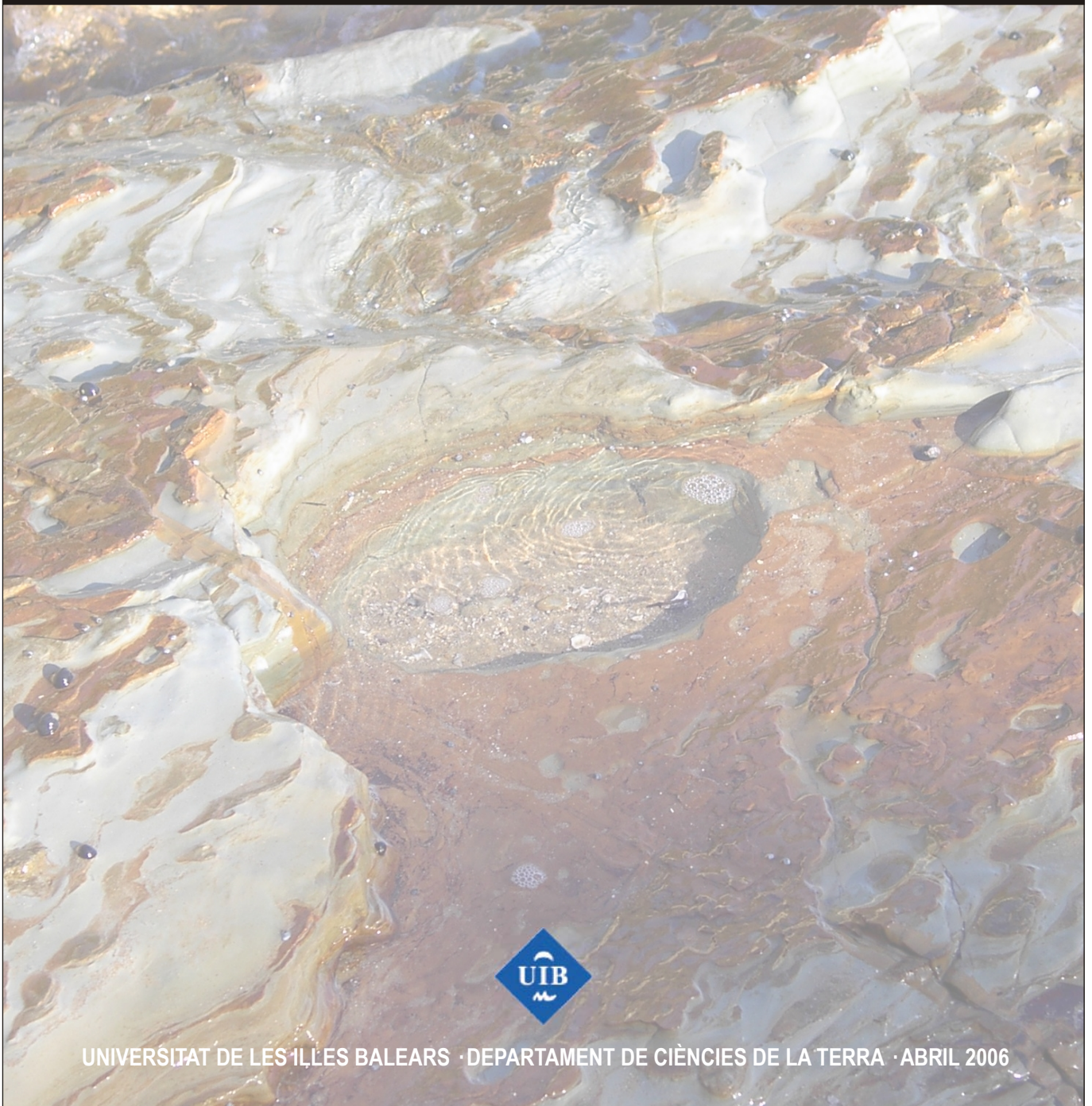


Lluís GÓMEZ-PUJOL

Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca



UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS · DEPARTAMENT DE CIÈNCIES DE LA TERRA · ABRIL 2006

S'Alavern	0 a 2 m	2 a 4 m	4 a 6 m	6 a 8 m	8 a 10 m
Taxa d'erosió mitjana ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	0,4957	0,1753	0,2470	0,2143	0,1808
Taxa d'erosió mínima ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	0,2892	0,0380	0,0188	0,0731	0,0827
Taxa d'erosió màxima ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	0,7658	0,7156	0,3813	0,4796	0,2482

Punta des Bauç	0 a 2 m	2 a 4 m	4 a 6 m	6 a 8 m	8 a 10 m
Taxa d'erosió mitjana ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	2,8341	1,1944	0,6821	0,4628	0,3543
Taxa d'erosió mínima ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	1,4482	0,2392	0,2621	0,2149	0,0529
Taxa d'erosió màxima ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	5,7397	3,2630	1,4141	1,1592	0,8317

Taula 2.21 Taxes d'erosió derivades de les diferències de pes de les peces de roca durant el test d'exposició en funció de la posició del dispositiu respecte el mar.

0,38 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ als 2,10 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ de les taxes mitjanes màximes. De mar cap a terra, s'hi pot apreciar un descens de les taxes d'erosió. Els diferencials mitjans de pes per a la zona d'onatge són de 3,00 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, per a la zona d'esquits de 0,68 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i, finalment, a la zona de ruixim les taxes es redueixen de 0,30 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ a 0,40 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Fig. 2.32).

A la localitat de s'Alavern (Taula 2.21) les taxes d'erosió mitjanes per a les peces de biocalcarenites del Miocè Superior són força menors, al voltant de 0,250 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, tot i que el rang abraça taxes mínimes de 0,004 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i màximes de 0,766 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Pel que fa al gradient d'erosió de mar cap a terra, les peces instal·lades a la zona més propera al n.m.m registren taxes de 0,450 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Les ubicades al domini hidrodinàmic dels esquits ho fan al voltant de 0,240 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i, finalment, aquelles peces on el més freqüent és que l'aigua del mar sols arribi en forma de ruixim, amb diferencials de pes de 0,181 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Fig 2.33).

2.6.4 Discussió

Les taxes obtingudes, així com els patrons que aquestes presenten en funció de la seva distància al mar, ens permeten reflexionar sobre quin és el paper dels processos que concorren en la seva evolució.

A ull nu es pot constatar, a ambdues localitats, la ràpida colonització de les peces de roca per algues epilítiques, criptoendolítiques i endolítiques. Tal vegada, de forma més intensa en aquelles peces més properes a la mar. La pròpia acció biològica d'aquests organismes ja és per ella mateixa un important agent de meteorització química (Spencer, 1988; Trudgill, 1985) a la qual s'hauria d'afegir l'acció de les sals i la dissolució inorgànica (Dibb *et al.*, 1983). I tot això, acceptant el reduccionisme que implica acceptar la protecció de la malla de niló respecte de l'abrasió o l'acció física de l'onatge.

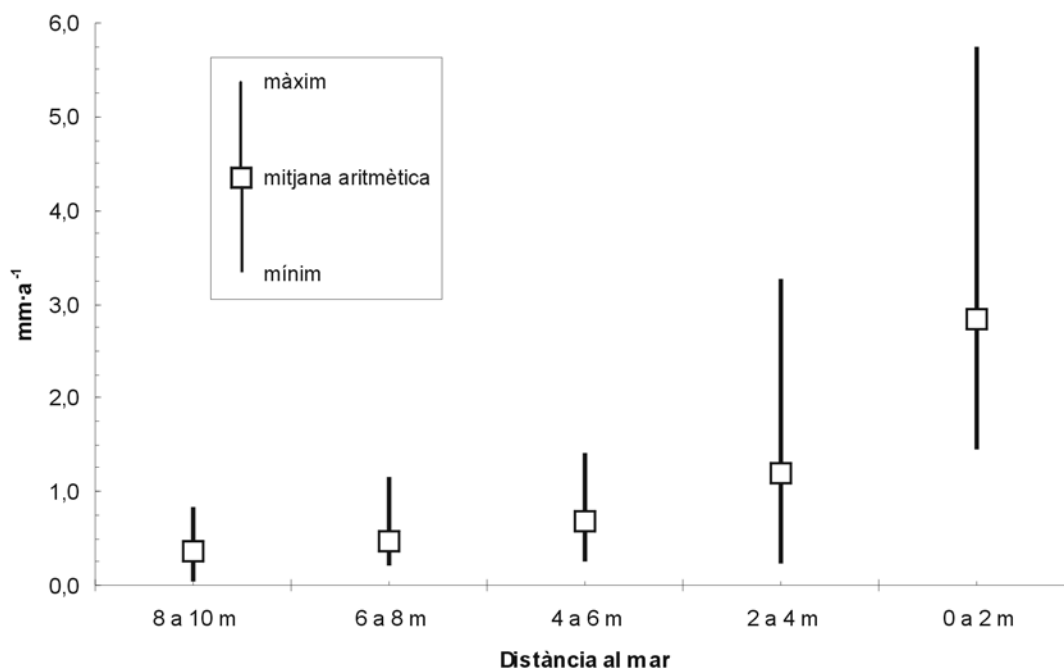


Fig. 2.32 Gradient de les taxes d'erosió a la Punta des Bauç calculades mitjançant tests d'exposició de peces de roca.

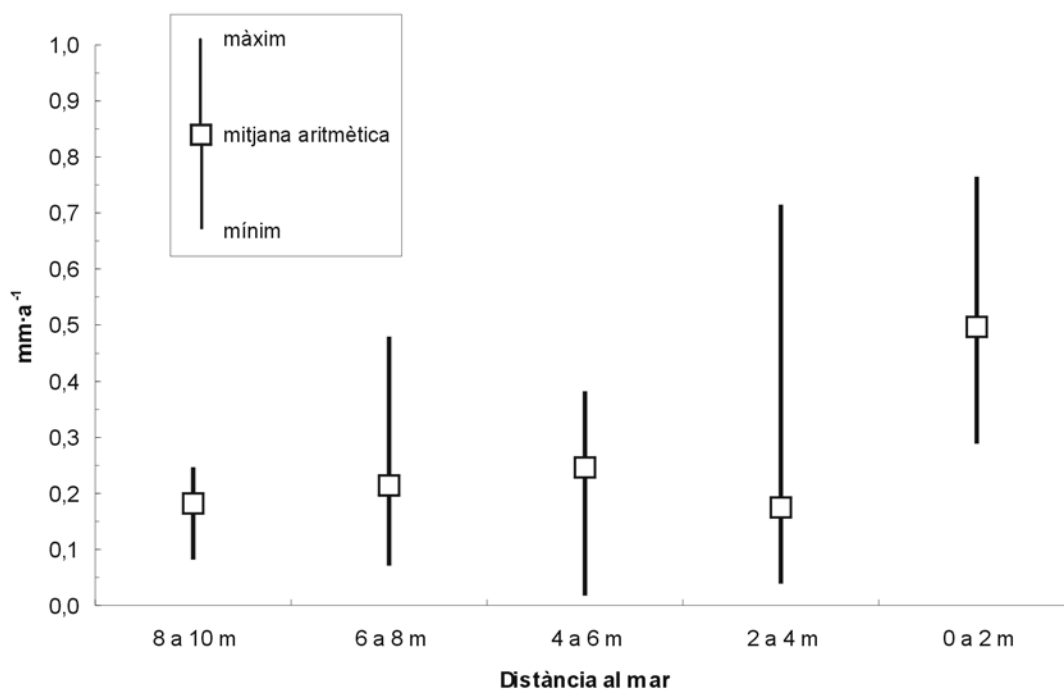


Fig. 2.33 Gradient de les taxes d'erosió a S'Alavern calculades mitjançant tests d'exposició de peces de roca.

La dissimetria dels diferencials de pes, al llarg del perfil i les taxes d'erosió mesurades, podrien explicar-se per la concurrència de la meteorització per sals i la colonització per cianobacteris de la roca. De fet, tot i que les peces de roca de les dues localitats tenen densitats semblants, el grau de cimentació i la mida de gra varia una respecte de l'altra, de manera que les eolianites són menys resistents i tenen un calibre de gra més gran. Aquest fet podria explicar la diferència entre les taxes d'erosió, especialment per l'efecte de les sals, atès que hi ha més superfície d'atac per les dimensions i buits entre els grans de la roca. La meteorització per sals i la colonització biològica depenen del gradient hidrodinàmic de la costa. Aquesta darrera perquè el grau d'humectació en determina les possibilitats fisiològiques i el grau de colonització i la meteorització per sals, perquè l'acció d'aquestes depèn de la freqüència i tipus d'aportació d'aigua marina, bé en forma de ruixim o d'esquits. Així, com més propera sigui la superfície rocosa a la mar experimentarà amb major intensitat l'acció d'aquests processos, perquè més propera és la font que els condiciona.

Pel que fa al paper de la dissolució inorgànica, Trudgill (1987) i Schneider (1976) defineixen els mecanismes pels quals es donen els processos de dissolució en aigües sobresaturades, en un principi, de carbonat càlcic. Aquest procés està estretament lligat a l'activitat fisiològica dels organismes endolítics i epilítics (Moses, 2003). Això no obstant, cal considerar un factor més que pot ajudar a explicar el patró i les diferents taxes d'erosió observades amb les

peces de roca al llarg dels perfils. Es tracta de l'oxigenació de l'aigua arran de la turbulència i el clapoteig que es genera a la zona d'onatge, així com de la força amb què surt projectada sobre la roca en forma d'esquits o solca les parets d'una esquerra, fet que augmenta la capacitat agressiva de l'aigua. Feim referència a l'*effect of solvent motion* (Kaye, 1957; Millero *et al.*, 2002) que sobre la roca es tradueix en una dissolució, principalment del ciment, així com dels elements al·lòctons que aquesta conté. El resultat és un augment de la porositat secundària.

2.7

Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades a partir de la degradació del patrimoni arquitectònic històric: la Torre d'en Beu (Santanyi)

Per tal de contrastar els valors i els ordres de magnitud dels tests d'exposició de peces de roca, s'ha plantejat la possibilitat d'estudiar la degradació del patrimoni arquitectònic històric costaner. En aquest sentit, les torres d'aguait i de senyes que apareixen arreu de la costa mallorquina es construïren amb els materials de pedreres molt properes i, en bona part dels casos, a peu del penya-segat on aquestes s'alcen. Aquest fet, d'una banda ofereix la possibilitat de treballar amb peces de roca tallades, de forma geomètrica i amb arestes llises, de les quals es coneixen documentalment l'any de construcció. També possibilita treballar amb les mateixes litologies que trobam a la línia de costa. De més a més, les característiques de les construccions



Fig. 2.34 La Torre d'en Beu (Santanyí). Imatges posterior (González de Chaves, 1986) i anterior a la intervenció que patí a la dècada dels setanta. Observi's com les carreuades de marès estaven ben conservades.

permeten avaluar les variacions espacials i la intensitat dels processos de meteorització.

2.7.1

Notes històriques i àrea d'estudi

A mitjans del segle XV la Mediterrània es converteix en un espai bipolar amb fronteres mòbils on les rutes comercials del cristianisme es veuen assolades per la pirateria i el corsarisme turc i el dels seus aliats. Després de la caiguda de Constantinoble per Mohamed II (1453) i de l'illa de Rodos (1522) per Solimà, les Illes Balears es troben en una vulnerable primera línia front als atacs de les forces navals d'Istanbul i del nord d'Àfrica (Deyà i Oliver, 2000). Les incursions i els saquejos de pirates i corsaris seran importants i freqüents durant els segles XVI i XVII, i no es redueixen fins a la batalla de Lepant el 1571. Sols durant el regnat de Felip I de Catalunya i II de Castella es registraren a l'illa de Mallorca quinze atacs turcs (Alzina *et al.* 1982).

Per combatre aquesta amenaça s'articula un sistema defensiu dissenyat pel metge, matemàtic, historiador i cronista del Regne, Joan Binimelis. El sistema consistí en la construcció d'un enfilall de torres i aguaites al llarg del perímetre litoral de Mallorca. Aquestes es comunicaven mitjançant senyals acústiques o de fum, que advertien els nuclis de població del perill d'un atac pirata activant el mecanisme *–viafora–* de defensa i auxili per a qualsevol punt de l'illa (González de Chaves, 1986).

Una d'aquestes torres és la d'en Beu localitzada al flanc septentrional de l'entrada de Cala Figuera, a Santanyí, que corona un penya-segat de 25 m d'alçària (Fig. 2.34).

La Torre d'en Beu és un edifici circular de paredat ciclopi amb quatre nervis de marès (a Mallorca eolianita carbonatada quaternària). La seva construcció s'inicià el 1565 i finalitzà el 1569. Després del seu abandó, l'estructura s'anà deteriorant, en especial les parets de reble, mentre les carreuades de marès quasi bé no patiren desperfectes. A finals de la dècada dels setanta la torre fou restaurada. Es poden identificar, avui per avui, quines foren les actuacions d'aquesta intervenció. Els carreus dels nervis són d'eolianita carbonatada i procedeixen de la pedrera propera de s'Estret des Temps (González de Chaves, 1986). En sentit antihorari, els nervis de marès estan orientats cap al SE, el NE, el NW i el SW.

Les temperatures mitjanes a la zona són de 17,7 °C i la precipitació és de 338 mm (Guijarro, 1986). El règim de vents es caracteritza pel predomini de les components de SW (35,9%) seguida de les d'E i SE amb un pes relatiu de 16,6% i de 13,7%. L'altura

Grau de meteorització	Descriptor
0	Superfície sense formes de meteorització
1	Superfície amb formes alveolars aïllades
2	Formes alveolars a més d'un 50% de la superfície
3	Presència de nius d'abella
4	Nius d'abella a més d'un 50% de la superfície
5	Nius d'abella amb alguna paret trencada
6	Nius d'abella parcialment desmantellats
7	Nius d'abella parcialment desmantellats a més d'un 50% de la superfície
8	Restes de parets de nius d'abella desmantellades
9	Superfície desmanegada

Taula 2.22 Escala nominal d'intensitat de meteorització (Mottershead, 2000a).

significant mitjana de l'onatge, a mar oberta, és per a un 70% dels registres de 0,5 a 1 m.

2.7.2

Disseny experimental

S'ha realitzat una cartografia detallada de cada contrafort, individualitzant-ne els carreus, i s'ha assignat a partir d'una escala nominal d'intensitat de meteorització (Taula 2.22) el grau d'alteració de cada carreu (Mottershead, 2000a). El resultat ofereix una base de dades de caràcter semiquantitatiu que permet la seva anàlisi mitjançant tècniques d'estadística no paramètrica.

Seguidament, s'han quantificat les taxes d'erosió en cada un dels carreus, des de la base de la torre fins a 3 metres d'altura. La taxa d'erosió es calcula a partir de la màxima profunditat de les formes de meteorització alveolar, tot prenent la superfície de tall del carreu com a zero relatiu (Williams i Robinson, 2000). En aquells carreus on el grau de meteorització és més acusat, s'ha pres com a referència de la superfície inicial la projecció de les superfícies de tall dels carreus superior i inferior (Lageat *et al.* 1994; Takahashi *et al.*, 1994). La quantificació de la profunditat màxima s'ha realitzat mitjançant un peu de rei. Paral·lelament, s'han recollit fragments dels carreus per al seu estudi mitjançant microscopi electrònic de rastreig, així com el material desagregat a l'interior dels alvèols dels carreus per a la seva anàlisi mitjançant difracció de raigs X.

2.7.3

Substrat i formes de meteorització

Des d'un punt de vista petrogràfic, els carreus de la Torre d'en Beu s'han elaborat amb arenisques carbonatades dipositades en un ambient dunar litoral durant el Plistocè. El diàmetre de gra és de 0,63 mm i està ben cimentat. Els grans en la seva majoria són bioclasts, tot i que també apareix algun gra de quars que es tradueix en una composició de la roca del

71,61% de calcita, seguida d'un 20,74% de dolomita, un 6,788% d'aragonita i al voltant d'un 1% de quars. La laminació, ben marcada, manté distàncies mitjanes entre làmines de 3 a 5 mm.

Les formes de meteorització hi són abundants. Formes alveolars, aïllades o que comparteixen parets a mode de mosaic o niu d'abelles (*honeycomb*) destaquen per la seva abundància als contraforts o nervis meridionals. Les dimensions de les formes alveolars presenten un espectre ampli, tot i que controlat per l'estratificació de l'eolianita. Les dimensions de l'eix major oscil·len de 8 a 524 mm, les de l'eix menor de 4 a 110 mm i, finalment, la profunditat de 6 a 147 mm. No obstant això, es constata la presència d'altres formes de meteorització, com la descamació, especialment en aquells carreus, pocs del conjunt, que en lloc d'estar col·locats donant la secció de l'estratificació al perfil de la torre, en donen el fil (la planta), de la laminació.

Cal destacar que els dos contraforts orientats a nord pateixen una important colonització biològica i que en molts casos, la superfície de marès està completament entapissada per líquens crustacis que sols permeten entreveure algunes ondulacions suaus que, de ben segur, tenen la seva gènesi en el binomi dissolució-bioerosió. Tanmateix, en comptades ocasions, superen el mil·límetre de profunditat.

2.7.4

Resultats

Un conjunt de 512 carreus, repartits en tres contraforts, han estat cartografiats i se'ls ha assignat un grau de meteorització en funció de l'escala nominal descrita a la taula 2.22. La cartografia no posa de manifest (Fig. 2.35) una diferència notable entre carreus veïnats, tot i que sí ho fa en un gradient d'altura i respecte a cada un dels contraforts. A la vegada, d'un total de 64 carreus repartits entre els quatre contraforts i de la base de la torre fins a una altura de 3 m s'ha mesurat la profunditat i els paràmetres de formes dels alvèols.

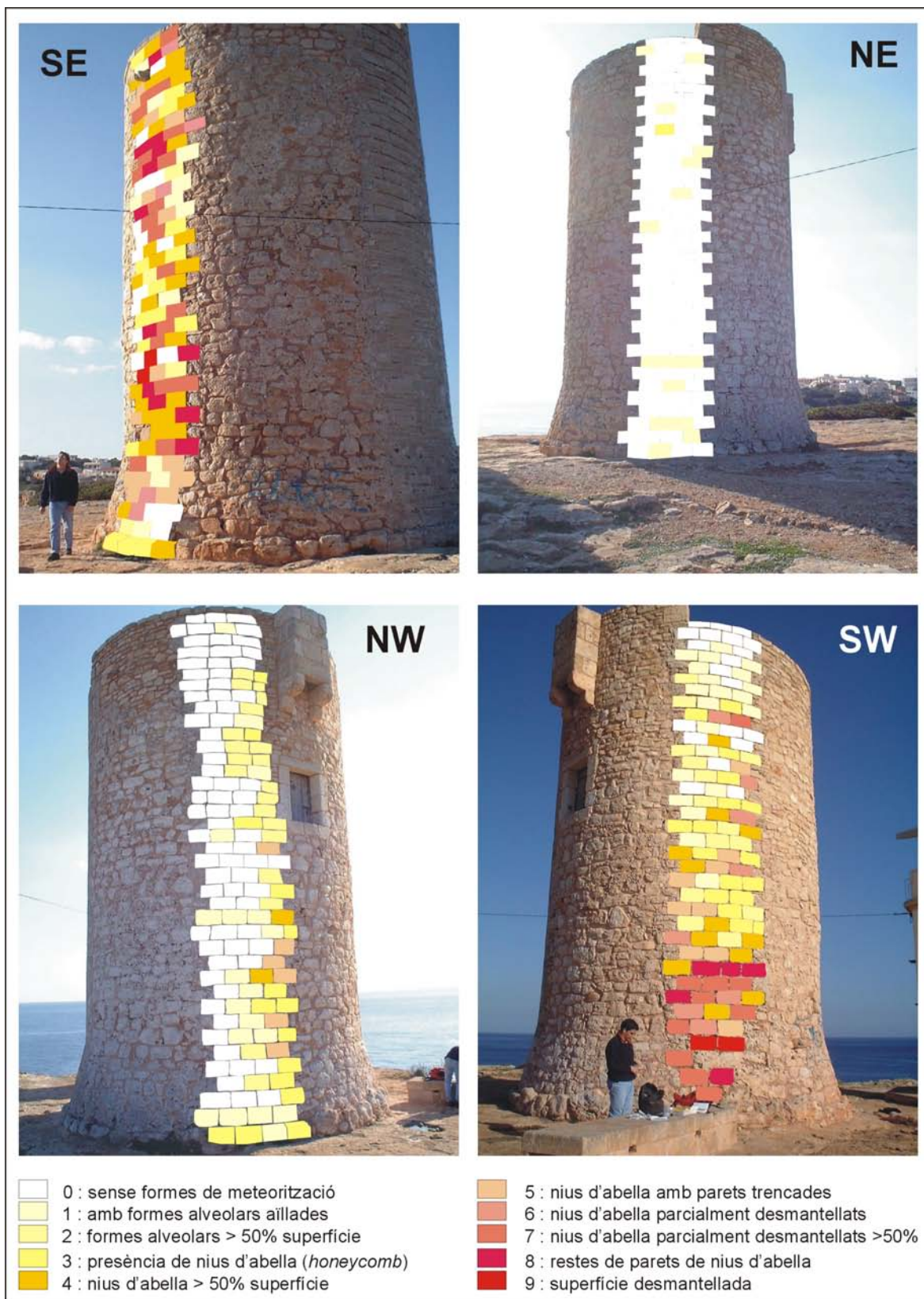


Fig. 2.35 Cartografia de les carreuades i dels carreus de la Torre d'en Beu en funció de l'escala d'intensitat de meteorització.

	NE	NW	SE	SW
χ^2	63,05	19,40	12,89	12,14
Graus de llibertat	5	17	25	21
p	0,00	0,30	0,97	0,93

Taula 2.23 Paràmetres de contrast del test de la χ^2 en l'avaluació del gradient en el grau de meteorització respecte de l'altura de la torre.

2.7.4.1 Variacions del grau de meteorització respecte de l'altura

La cartografia de detall dels carreus meridionals, SE i SW, destaca per un gradient invers del grau de meteorització respecte de l'altura, tot i que, com passa amb els altres contraforts, s'hi pot observar la presència de valors d'intensitat de meteorització baixos de forma contínua des de la base fins al sostre de la torre (Fig. 2.35).

L'efecte de l'elevació respecte a la mar i la base de la torre amb el gradient vertical de meteorització pot avaluar-se comparant dues distribucions, on una parteixi de les dades registrades i l'altra distribueixi en alçada proporcionalment els graus de meteorització. Aquest plantejament es correspon al del test estadístic de la χ^2 . Per al seu càlcul, s'han eliminat aquells carreus que oferien a la paret de la torre el fil, i no la secció de l'estratificació. Atès que, de la Fig. 2.35, se'n deriva que, tot i que discretes, hi ha variacions entre carreus veïnats, amb la finalitat de minimitzar la variabilitat s'ha realitzat una mitjana aritmètica de la intensitat de meteorització de cada filera de carreus. Així doncs, la hipòtesi nul·la estableix que si els diferents graus de meteorització apareguessin de forma proporcional, així com n'augmenta la cota, no podríem afirmar l'existència d'una variació significativa del grau de meteorització en funció de l'altura de la torre.

Els resultats del test per a cada contrafort (Taula 2.23) conclouen que per als contraforts septentrionals no es pot rebutjar la hipòtesi nul·la, però sí que queda descartada per als contraforts meridionals amb probabilitats del 98% i 94%. Per la qual cosa podem afirmar que per a aquestes exposicions hi ha un gradient en vertical del grau de meteorització.

2.7.4.2 Variacions del grau de meteorització respecte de l'orientació

Les mateixes probabilitats i valors crítics de la χ^2 de

l'anàlisi anterior ja posen en evidència un comportament particular de les orientacions dels contraforts a mode de jerarquia. Sense considerar aquells carreus que exposen als agents de meteorització el fil de l'estratificació, podria avaluar-se si hi existeix una diferència del grau de meteorització en funció de l'exposició.

Així doncs, allò que interessa és més la variabilitat que presenta cada contrafort entre els valors de meteorització dels seus carreus, que no la tendència central. O, dit d'una altra manera, allò que es vol avaluar és si hi ha més diferències entre els carreus d'un contrafort que entre les carreuades. Llavors s'hi ha d'aplicar el test no-paramètric de Mann-Whitney. Aquesta prova estadística permet contrastar si dues mostres diferents provenen de la mateixa població. Els resultats (Taula 2.24) que consideren totes les possibles relacions entre contraforts posen de manifest que sols les carreuades orientades a SE i SW poden pertànyer a una mateixa població, amb una probabilitat del 78,8%. Per a la resta de combinacions, els valors són inferiors a l'1%. De la qual cosa, se'n dedueix que mentre que els contraforts orientats a NE i NW presenten patrons de meteorització distints entre ells i respecte dels contraforts meridionals, les exposicions SE i SW presenten intensitats de meteorització similars o, el que és el mateix, estan sota l'acció dels mateixos agents de meteorització.

2.7.4.3 Taxes d'erosió

La manufactura dels carreus permet establir una superfície inicial, la qual cosa, juntament amb el coneixement de la data de finalització de la construcció de la Torre d'en Beu, ens ofereix la possibilitat de conèixer-ne les taxes d'erosió. A partir de les profunditats dels alvèols s'ha calculat una taxa d'erosió per al conjunt de $0,10 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, tot i que hi ha variacions entre contraforts. Així doncs, les exposicions al SE i SW presenten valors de retrocés al voltant de $0,115 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i de $0,153 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,

	SE vs NE	SE vs NW	SE vs SW	NE vs NW	NE vs SW	NW vs SW
U	292,50	72,00	623,50	187	124,00	1,00
Z	- 4,33	- 6,70	- 0,27	- 5,90	- 6,28	- 7,56
p	> 0,001	> 0,001	0,78	> 0,001	> 0,001	> 0,001

Taula 2.24 Paràmetres del test de Mann-Whitney per a l'avaluació del gradient en el grau de meteorització respecte de l'orientació de les carreuades. U = Paràmetre de Mann-Whitney, Z = valor crític, p = probabilitat.

Orientació de la carreuada	Mitjana aritmètica ± error (mm·a ⁻¹)	Mínim (mm·a ⁻¹)	Màxim (mm·a ⁻¹)
SE	0,115 ± 0,066	0,022	0,328
NE	0,062 ± 0,044	0,011	0,152
NW	0,075 ± 0,036	0,019	0,131
SW	0,153 ± 0,069	0,034	0,339

Taula 2.25 Taxes d'erosió calculades a partir de les profunditats màximes dels alvéols dels carreus de la Torre d'en Beu.

respectivament. Per als mateixos contraforts, els mínims són de 0,022 mm·a⁻¹ i 0,011 mm·a⁻¹ i els màxims de 0,328 mm·a⁻¹ a 0,152 mm·a⁻¹. D'altra banda, els contraforts orientats a nord presenten taxes d'erosió amb valors dues vegades inferiors als de les meridionals (Taula 2.25).

2.7.5

Discussió

S'ha constatat l'existència de dos gradients de meteorització en funció de l'altura i l'orientació dels carreus i dels contraforts de la Torre d'en Beu. La resposta diferencial d'aquests ve marcada per un comportament independent dels contraforts exposats a NE i NW i una resposta semblant dels contraforts orientats a SE i SW.

Moses i Smith (1994) avaluen la importància i el paper de les sals aportades per l'onatge i el ruixim marí en la meteorització i zonació geomòrfica del litoral SE de Mallorca. De la caracterització amb difracció de raigs X del material desagregat de l'interior dels alvéols i de les parets d'aquests, en destaca la presència de cristalls d'halita i guix als buits de la roca (Taula 2.26). Tant un com l'altre són minerals al·lòctons, fet que evidencia la font marina. La seva presència en les mostres estudiades varia de 10,45% a 1,08% en el cas de l'halita, i de 1,08 a 0,45% en el del guix. La seva presència disminueix en el contrafort NE i és nul·la en el NW. Tot i que no es pot establir, a partir dels resultats, una relació causa-efecte categòrica, s'ha de considerar la influència tant del vent com del transport de sals, com a factors explicatius del comportament diferencial dels contraforts meridionals.

De fet, la seva orientació coincideix amb el ventall de direccions dominants de l'onatge a la zona. La component SW aglutina el 20% de l'onatge amb una

alçària d'ona significant entre 0,5 i 1 m i, si hi tenim en compte els registres fins a 2 m, l'espectre que abraça és del 40%. La component SE també és important ja que suposa el 13% de l'onatge entre 0,5 i 1 m, molt per sobre de la resta de components que amb feines arriben a un 6%. Les fluctuacions estivals de temperatura i humitat de la zona entren dins dels paràmetres descrits per Goudie i Viles (1997), per tal que l'halita i els seus derivats puguin actuar com a agents de meteorització física, i també química. Força autors donen un pes preponderant a la meteorització per sals en la gènesi de formes alveolars com són els *honeycomb* i els *taffone* (McGreevy, 1985; Chabas i Jeanette, 2001).

Un altre aspecte a destacar, derivat de les observacions dels fragments dels carreus amb el microscopi electrònic de rastreig, és la resposta diferencial de les mostres dels contraforts meridionals i els septentrionals. Tanmateix, cal adoptar certes precaucions pel paper que pugui derivar-se d'un grau de cimentació distint dels carreus d'una exposició i els de l'altra. No obstant això, pot comprovar-se (Fig. 2.36) com la superfície de les mostres del contrafort SE ha perdut bona part del ciment i els grans en queden alliberats, mentre que les mostres del contrafort NW mantenen un important grau de cimentació, tot i que les formes suavitzades apunten cap a un paper destacat dels processos de dissolució (Moses i Viles, 1996).

Pel que fa al gradient en altura podria assignar-se'n una part als agents i processos anteriors, ja que els tres primers metres de la torre es corresponen amb el cap o la corona del penya-segat i és justament on la influència de l'onatge i el ruixim és més notable. D'altra banda, no es pot menystenir un altre factor molt habitual a les construccions amb carreuades de Mallorca, com és l'efecte de la capillaritat (Carbonell, 1999) i que accentuaria l'alteració dels carreus inferiors respecte dels superiors.

Carreuada	Calcita	Aragonita	Dolomita	Quars	Halita	Guix
SE	75,06%	6,22%	11,51%	1,12%	5,50%	0,59%
SW	68,24%	8,00%	16,27%	0,55%	3,57%	0,38%
NE	49,67%	5,67%	39,57%	0,57%	4,52%	0,00%

Taula 2.26 Composició mineralògica dels materials desagregats presents a l'interior dels alvéols de la Torre d'en Beu.

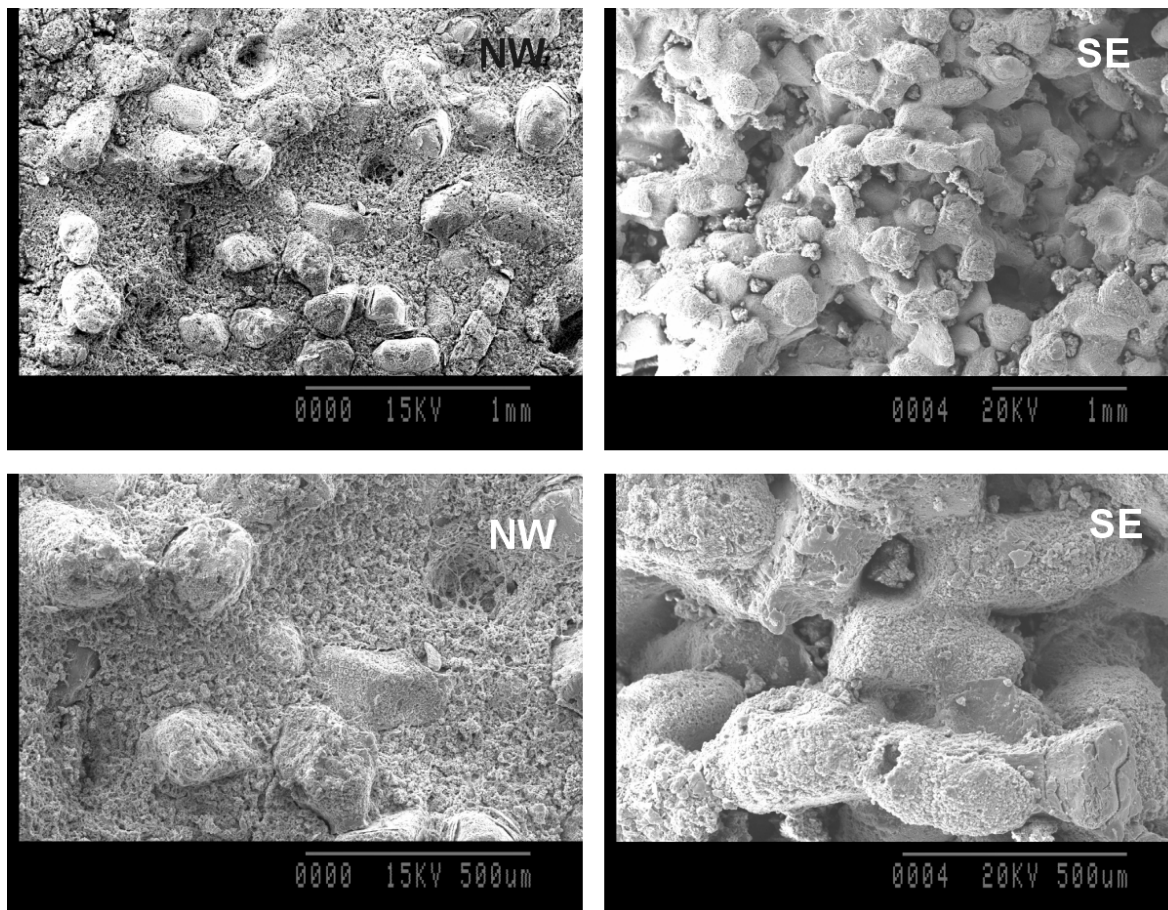


Fig. 2.36 Patrons de meteorització dels carreus de la Torre d'en Beu. Les mostres de la carreuada del NW presenten un grau de cimentació més alt que no pas les de la carreuada del SE que ha perdut bona part del ciment i els grans queden aïllats.

2.8 Naturalesa i significat de les taxes d'erosió

S'han caracteritzat instrumentalment les velocitats de denudació del rocam litoral en el període d'un any, mitjançant el micròmetre de dial mòbil (TMEM) i l'escàner làser en diferents superfícies de la costa rocosa de Mallorca. En paral·lel, s'hi han desenvolupat tests d'exposició de peces de roca i també s'han avaluat les velocitats d'alteració de les carreuades d'una edificació històrica. També s'hi ha avaluat, mitjançant el micròmetre de dial mòbil (TMEM), quin és el comportament de les superfícies rocoses a escala horària a les costes rocoses de Mallorca i al sud d' Austràlia.

L'ús de diferents tècniques instrumentals i aproximacions a l'erosió de les costes rocoses, mitjançant tests d'exposició o altres mètodes indirectes, aboca un conjunt de valors heterogenis, el significat dels quals, de vegades, és incert. Darrere aquesta situació s'amaga el problema de la naturalesa d'allò que es mesura, com es mesura, a quina escala es mesura i on es mesura.

El primer que els experiments descrits posen de

manifest és que el concepte d'erosió, o l'objectiu de quantificar-la, parteix d'un concepte reduccionista de la morfodinàmica de les costes rocoses. Especialment, quan introduïm a l'estudi una component d'escala, d'una magnitud considerable, com són les resolucions de les tècniques instrumentals que utilitzam. Conduir l'anàlisi de la denudació a l'interval de les micres suposa augmentar la informació sobre el desmanegament de la costa i quan augmenten les dades, també ho fa l'entropia.

Altrament, no és aconsellable parlar de taxes d'erosió, en sentit estricte, atès que mitjançant els valors d'altura relativa que s'obtenen amb els micròmetres es registren ascensos i descensos de la superfície de la roca. A s'Alavern, les taxes del sector supralitoral caracteritzat ballen d'un rebaixament màxim de $-1,810 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ a un bombament màxim de $1,183 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ en el període d'un any. Parlar de taxa d'erosió, doncs, és arbitrari en el marc temporal i de resolució instrumental de l'experiment. Stephenson i Kirk (1996) han desenvolupat el seguiment instrumental més llarg amb TMEM, fins a hores d'ara, a les costes rocoses de les plataformes litorals de Kaikoura. Es tracta d'una sèrie de 20 anys que, recentment i amb els resultats encara pendents de publicar, s'ha ampliat

a 30 anys (Wayne Stephenson *com. pers.*). De la comparació de les velocitats de denudació amb trenta anys de diferència, respecte d'altres de menor abast temporal, conclouen que un interval mínim de dos anys de mostratge és el període aconsellable per tenir uns valors de predicció fiables de l'erosió. Aquest fet és transcendental, perquè una seqüència de mostratge més dilatada ens permetria avaluar la significació específica de la component erosiva, de descens de la roca i la del bombament de la superfície de la roca.

Tanmateix, si es redueix la resolució de les observacions, com és el cas de les possibilitats de l'escàner làser, llavors els balanços són negatius i oscil·len, en el cas de la localitat de s'Alavern, de $0,103 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ a $0,411 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Arribats en aquest punt, i coneixedors de la feblesa que suposa l'abast temporal curt del nostre experiment, sí que cal posar èmfasi en la coincidència dels ordres de magnitud de les taxes calculades amb els dos mètodes. Tot i que hi ha algun valor amb coincidències importants d'una tècnica a l'altra, és més prudent abordar les semblances dels ordres de magnitud. Entre d'altres motius perquè l'altra circumstància cabdal és la de la posició del mostratge, bé en relació al gradient hidrodinàmic, bé en relació a la important variabilitat espacial de formes, agents i colonització biològica de les superfícies rocoses. Els rangs de les taxes calculades amb el micròmetre, amb les superfícies interpolades dels valors d'altura relativa i de les diferències entre escanejos successius, són semblants (Fig. 2.37), especialment per al TMEM i l'escàner làser. Així, els valors de descens de les superfícies estudiades amb micròmetre abraça dels $0,487 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ als $1,810 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i els de l'escàner làser de $0,103 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ a $1,377 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. De més a més de coincidir amb l'ordre de magnitud d'altres estudis desenvolupats sobre rocams sedimentaris (Taula 2.2) i amb les taxes de la localitat de Marengo, sembla que el desmanegament i, fins i tot, els ascensos relatius de la superfície de la roca tenen transcendència a escala de dècima de mil·límetre.

Pel que fa al segon dels experiments relatiu als canvis

de microtopografia de la superfície a s'Alavern, cal fer-ne algunes consideracions. La primera és l'efectivitat de l'instrument per registrar canvis en els valors d'altura relativa en un interval temporal curt. Els valors mitjans dels canvis d'altura relativa a escala horària són, en els dos vectors, al voltant de la centèsima de mil·límetre (l'amplària entre quartils és de $0,0140$ a $0,0510 \text{ mm}$), amb màxims i mínims que la depassen fins arribar a l'ordre mil·limètric. El patró de comportament de la superfície rocosa, juntament amb les variacions dels paràmetres ambientals i de temperatura de la roca, apunten a un control biològic de les variacions de microtopografia. Les observacions fetes amb el microscopi electrònic de rastreig posen de manifest la interrelació entre el cos inert de la roca i la penetració de les hifes liquèniques. En aquest sentit, les capacitats fisiològiques d'hidratació i dessecació dels teixits liquènics, de $0,005 \text{ mm}$ a $0,014 \text{ mm}$, coincidiria amb els ordres de magnitud dels intervals dels quartils, i els desplaçaments majors i els menors estarien en funció de la biomassa present intrapartícules. Aquest fenomen també s'ha identificat amb ordres de magnitud semblants a la localitat de Marengo. Així doncs, tenim que canvis de 5°C , de 40 punts d'humitat relativa o de $1000 \text{ lumen}\cdot\text{m}^{-2}$, poden implicar variacions d'altura relativa de $-0,303 \text{ mm}$ a $0,355 \text{ mm}$, en el cas de s'Alavern; i canvis de 5°C i de 30 punts d'humitat relativa, poden implicar canvis en la microtopografia de $-0,126 \text{ mm}$ a $0,261 \text{ mm}$ a Marengo.

Altra volta cal destacar l'ordre de magnitud del procés, així com també dos aspectes de certa importància. El primer és que aquest fenomen, fins ara conegut com a bombament de la superfície rocosa (*rock surface swelling*), no implica ascensos de la superfície sinó també descensos relatius i, fins i tot, episodis d'estabilització de la superfície. Per tant, és més aconsellable utilitzar un terme, més neutre i acurat, com variacions horàries de microtopografia (*rock surface change*). El segon dels punts a considerar és la importància de la component biològica que ens obliga a entendre la superfície del

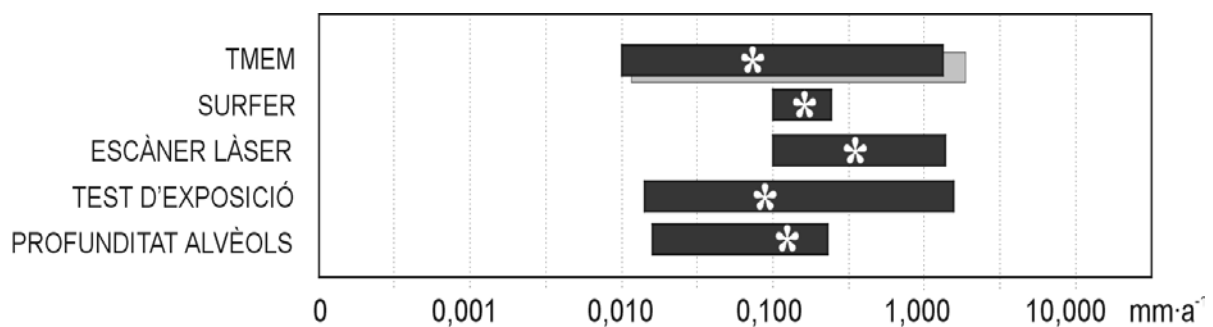


Fig. 2.37 Ordre de magnitud de les taxes de denudació calculades amb les tècniques instrumentals descrites. Les barres abraquen des del valor mínim al màxim registrat i l'estel indica el valor mitjà de la taxa d'erosió. La barres de color negre són valors d'erosió i les grises valors ascendents.

rocam litoral a escales temporals curtes, no com estàtic i inert que només pateix els processos i agents de meteorització-erosió, sinó com quelcom dinàmic. D'aquí que la component de la morfodinàmica de les costes rocoses no sigui sempre negativa. Finalment, una derivada procedimental, de cara al seguiment instrumental, és la conveniència, amb l'objectiu de comparar els registres d'altura relativa, de mostrear les superfícies de roca amb el TMEM durant les hores de màxima insolació. En aquest període és quan es pot minimitzar al màxim l'abast de l'acció del biofilm que colonitza la roca i, per tant, ens permet tenir una idea de l'abast de la dinàmica de les superfícies rocoses més sòlida.

Els resultats del test d'exposició de peces de roca tornen a abocar taxes d'erosió d'un ordre de magnitud semblant al dels resultats de les altres tècniques. Així, per a les eolianites quaternàries tenim valors de $0,950 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i per a les calcarenites de s'Alavern de $0,250 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Els dispositius del test d'exposició, ubicats vora les superfícies mostrejades amb TMEM a s'Alavern, aboquen valors mitjans d'erosió de $0,180 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ amb mínims de $0,080 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i màxims de $0,240 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, valors que coincideixen amb l'ordre de magnitud i, fins i tot, amb el valor d'alguna de les superfícies. En la mateixa línia apunten els paral·lelismes entre els resultats dels tests d'exposició amb eolianites i els de les velocitats d'alteració dels carreus de la Torre d'en Beu amb taxes mitjanes de

$0,153 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, mínimes de $0,034 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i màximes de $0,328 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Tot i així, els valors dels tests d'exposició són lleugerament superiors als de la resta de tècniques. En part, aquest fet està relacionat amb la naturalesa de la tècnica. I és que, al contrari del que passa amb els mostratges de la superfície del rocam, aquí el que se sotmet a l'acció del medi és una peça de roca fresca, sense alterar ni colonitzar.

Habitualment, s'atribueix el diferencial de pes de les peces de roca a la meteorització química i, malgrat el reduccionisme de pensar que la malla de niló protegeix de l'acció abrasiva i de les forces pneumàtiques de l'aigua, resulta estrany que els valors siguin tan semblants als de la denudació calculada amb TMEM i escàner làser, quan aquests no estan "protegits" dels agents esmentats. Així doncs, hi apareixen dos entrebancs: un ja es constatava instrumentalment, era la important variació espacial en el comportament dinàmic de la roca; l'altre és la dificultat d'integrar l'acció del medi sobre un substrat fresc, respecte de valors procedents d'un substrat colonitzat, amb un microrelleu o rugositat ben desenvolupat.

Tanmateix, els tests d'exposició i els patrons d'alteració dels monuments històrics, sí que ens ofereixen una informació valuosa respecte de l'abast espacial i la intensitat d'acció de la meteorització química i, en especial, de la meteorització per sals.



3 La contribució biològica en l'erosió de la costa rocosa

3.1

Introducció

En la morfodinàmica de les costes rocoses carbonatades, de més a més dels efectes de les forces hidràuliques, de l'acció mecànica i dels processos fisicoquímics, els processos d'erosió depenen d'un complex sistema d'interrelacions entre les components abiòtiques i les biològiques (Spencer i Viles, 2002; Kelletat, 1997; Trudgill, 1976a).

Són dues les vies per les quals els organismes són capaços d'alterar i desmanegar el rocam. La comunitat composta per microalgues epilítiques i endolítiques, fongs i altres components de les pàtines biològiques –*biofilms*– que es desenvolupen sobre el substrat rocós, corroeixen la roca mitjançant processos bioquímics (Duane *et al.*, 2003; Jones, 1989; Viles, 1987a; Pomar, 1976; Pohl i Schneider, 2002) i/o processos mecànics (Moses i Smith, 1993; Naylor i Viles, 2002). D'altra banda, les espècies de macroinvertebrats, que brostegen en aquesta pàtina biològica, constitueixen un altre grup rellevant en l'erosió de les costes rocoses carbonatades (Andrews i Williams, 2000; Donn i Boardman, 1988; Peyrot-clausade i Brunel, 1990; Trudgill *et al.*, 1987).

L'espectre d'organismes brostejadors a Mallorca és ample (gèneres *Patella*, *Monodonta*, *Melaraphe*, *Lepidochitona*, *Chiton*, *Paracentrotus*, etc.). Tots tenen en comú la disposició d'una ràdula abrasiva. Aquest fet implica que, de la seva activitat brostejadora, atès que les microalgues tenen el seu nínxol i s'arreceren a la porositat de la roca, se'n derivarà un trencament i erosió de la superfície rocosa. Així doncs, l'acció dels organismes brostejadors es considera com un procés bioerosiu força important (Torunski, 1979). Els agents biològics juguen un paper important en els processos de meteorització, bé com a responsables de formes de corrosió específiques, o, simplement, amplificant les taxes de denudació de formes llavorades per altres processos (Schneider, 1976; Spencer, 1988).

No obstant això, la contribució biològica dels organismes en la morfodinàmica de les costes rocoses no és sempre negativa. Hi ha organismes que ja sigui per processos químics, per l'estructura o per les seves característiques anatòmiques, desenvolupen una acció protectora del rocam respecte de la component erosiva, bé perquè atenuen l'acció de l'onatge (Jones i Hunter, 1995; Kelletat, 1997; Naylor i Viles, 2000), bé perquè protegeixen la superfície de la roca dels agents de meteorització fisicoquímica (Carter i Viles,

2003). Es pot arribar a donar la situació que un mateix organisme desenvolupi ambdues accions i, en funció del balanç, tenguin un comportament de protecció, o bé d'erosió–meteorització (Dalongeville *et al.*, 1994). En aquest sentit és important destacar el paper dels *trottoirs*: construccions d'algues rodofícies i vermètids que es disposen sobre la costa o adossades a la costa des de pocs cm per sobre del nivell del mar fins a gairebé un metre per sota (Dalongeville, 1995; Kershaw, 2000 i Nunn, 1993).

El principal problema en l'estudi del paper dels organismes en la morfodinàmica de les costes rocoses i el seu paper erosiu és el factor d'escala. El rang d'acció dels organismes abraça des de nanoescala a escales mètriques o decamètriques i, per tant, les aproximacions instrumentals i/o metodològiques poden anar dels estudis mitjançant microscopi electrònic de rastreig (SEM), fins a aixecaments topogràfics (Viles, 2001). A més a més, un altre problema arrenca dels diferents papers que juguen els microorganismes, animals i plantes, i les complexes relacions tròfiques i etològiques que hi mantenen. En algunes ocasions, actuen clarament com a agents bioerosius, però altres vegades poden exercir una acció de protecció o, fins i tot, de construcció (Kelletat, 1985; Dalongeville *et al.*, 1994). També es pot donar el cas, com passa en bona part amb els esculls d'organismes filtradors de cirrípedes (*Chthamalus* sp.) i bivalves (*Mytilus* sp.), que actuin en els dos sentits. D'una banda protegeixen el rocam, però en el cas que siguin arrabassats, llavors poden endur-se'n part de la superfície rocosa adherida a la seva base. El mateix pot extrapolar-se per a les algues i altres organismes que entapissen la roca (Smith i Bayliss-Smith, 1998). A la vegada contribueixen a la fatiga de la roca a la qual, en principi, protegeixen via meteorització química o física (Naylor i Viles, 2002). Una altra dificultat apareix arran del seguiment i la quantificació del paper de la bioerosió o de la bioprotecció. Aquest entrebanc té la seva raó de ser en la varietat de factors ecològics i ambientals que exerceixen el seu control en la distribució, els canvis en les densitats i en els paràmetres biomètrics de les poblacions i que tenen la seva màxima expressió en la zonació dels perfils de costa i en l'estacionalitat (Naylor *et al.* 2002).

3.2

La zonació de les costes rocoses

La zonació és una característica de tots els gradients ambientals, des dels marins fins als terrestres, com bé

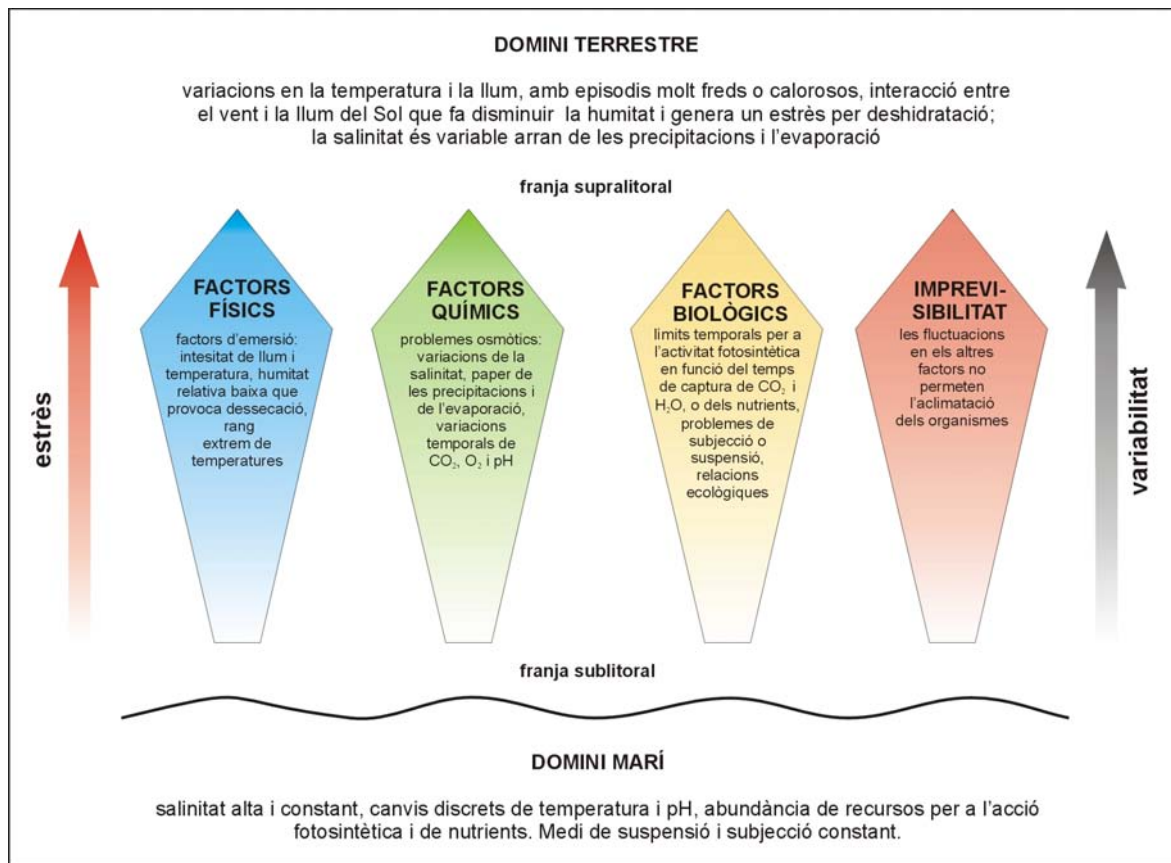


Fig. 3.1 Factors d'estrès del gradient vertical de les costes rocoses que en condicionen la zonació.

es fa palès als vessants de les muntanyes o a les costes rocoses (Raffaelli i Hawkins, 1996; Spencer, 1988).

A les costes, aquest gradient s'articula entre les condicions més estables de la mar i les més variables de la superfície emergida (Fig. 3.1). El medi marí, amb una salinitat alta i constant, amb canvis discrets de temperatura i pH, amb una relativa abundància de matèria per a l'acció fotosintètica (CO₂, H₂O) i nutrients (N, P, S), s'oposa a les condicions més fluctuants del medi terrestre. A les terres emergides, hi ha variacions de temperatura i d'il·luminació, el vent interactua amb la llum del Sol de manera que la humitat ambiental descendeix i, per tant, s'hi dona un estrès per dessecació. La salinitat és variable perquè depèn de l'onatge, el vent, les precipitacions i l'evaporació.

Així doncs, d'un extrem a l'altre són molts els factors d'estrès per a les comunitats biològiques de les costes rocoses. D'una banda, tenim els **factores físics** o vector d'emersiò. Aquest consisteix en els efectes que les diferències en intensitat de llum, temperatures, fluctuacions d'humitat i accidents topogràfics, tenen sobre els organismes.

Un segon conjunt de factors són els **químics**, bé entesos com els problemes osmòtics que es deriven de

les variacions de salinitat d'un extrem a l'altre del gradient, bé com els canvis en la distribució d'O₂, CO₂ i pH. Els condicionants biològics són relativament diferents per a la fauna i la flora.

Així, els **factores biològics**, per a la flora, giren al voltant de la possibilitat de desenvolupar l'acció fotosintètica. De mar cap a terra, disminueixen les possibilitats d'adquirir CO₂ i H₂O i altres nutrients per a la síntesi de proteïnes. Pel que fa a la fauna, el gradient litoral controla la possibilitat de respirar i d'alimentar-se, així com la pròpia suspensió o subjecció al rocam en relació a les mares i l'onatge.

Finalment, existeix un **factor d'imprevisibilitat o imprevisibilitat**, en el sentit que les fluctuacions constants en el medi no permeten una acimatació dels organismes. L'estrès és sistemàtic i canviant.

Bona part dels organismes que viuen a la costa rocosa, per no dir-ne la majoria, són marins d'antuvi. Per tant, la zona intermareal es caracteritza per la presència d'organismes aquàtics que requereixen algun grau d'humectació a partir del qual desenvolupen diferents estratègies fisiològiques (Little i Kitching, 1998). No és estrany, doncs, que es doni una correlació entre les condicions de tolerància i la posició física sobre el gradient litoral. Els

organismes sèssils que viuen als nivells alts de les costes rocoses, així com alguns de les zones intermèdies, semblen condicionats per factors físics. En canvi, en els nivells inferiors estan controlats per factors biològics, com són la competència i la depredació, tot i que els uns i els altres interactuen. En unes altres paraules, el medi físic afecta la intensitat i la importància de les interaccions biològiques (Lewis, 1976).

El model de zonació universal de les costes rocoses fou proposat per Alan i Anne Stephenson a partir dels treballs que realitzaren durant la dècada dels anys trenta del segle passat a la costa sudafricana i en els seus posteriors viatges (Stephenson i Stephenson, 1949). Aquesta és una classificació tripartita que emfatitza la divisió del gradient litoral des d'una perspectiva corològica. El seu principi descansa en la posició relativa dels principals tipus de comunitat que s'observen en el gradient vertical. Així doncs, les tres zones en què es divideix la zona litoral, el perfil de costa, són:

- a) Domini supralitoral: es caracteritza per líquens crustacis, cianobacteris, litorínids i altres petits caragols.
- b) Domini interlitoral: en destaca l'abundància

de cirrípedes, bivalves filtradors i de vegades ostreïds.

- c) Domini infralitoral: presència d'algues calcàries, formes incrustants i laminàries.

Tot i que aquesta classificació destil·la la influència del control mareal, Stephenson i Stephenson (1972) posen de manifest que la determinació dels límits de cada una de les zones, a partir del temps i freqüència d'immersió, no és un criteri adequat, ja que, per bé que les mareas en són un element important, només matisen un gradient que ja existeix entre dues zones ben definides, la terrestre i la marina. Lewis (1964) planteja una classificació semblant, tot i que proposa la divisió del gradient en funció de les condicions mitjanes d'humectació del litoral rocós. D'altra banda, també hi introdueix elements, com el grau d'exposició o el pendent de la costa. Així, l'amplitud de la franja litoral, en iguals condicions de pendent, és major en les costes exposades que no en les arrecerades. Tot plegat afavoreix la universalitat de la classificació.

Finalment, a la classificació de base ecològica de la costa, Schneider (1976) hi afegeix una descripció fenomenològica que relaciona les coloracions de la

	Stephenson i Stephenson (1952)	Lewis (1964)	Peres i Picard (1964)	Schneider (1976)	a la present memòria	terminologia anglesa	terminologia francesa	terminologia alemanya
marees màximes	domini supralitoral	p.e. domini supralitoral p.a.	domini adlitoral	FL zona de líquens HA zona d'halòfites GR zona grisa BS zona negra-blavosa DB zona marró	p.e. p.a. zona halòfites	supralitoral zone (supratidal)	étage adlitoral	supralitoral sprühtwasser - sprühtwasser
pleamar mitjanes	zona midlitoral	lim sup. L. littorea - Verucaria sp.	superior	FL zona groguenca WE zona blanca	zona C			
± 0	domini interlitoral	lim sup. Cirripeda sp.	domini midlitoral		zona B	littoral zone, midlittoral zone (intertidal)	étage médiolittoral	eulitoral (gezeitenzone)
baixamars mitjanes	franja infralitoral	lim sup. Laminaria	inferior	notch notch biogènic	zona A			
marees mínimes	domini infralitoral	p.e = perfil exposat p.a = perfil arrecerat	domini infralitoral	plataforma litoral	plataforma litoral, trottoir (Cystocleira sp.) p.e = perfil exposat p.a = perfil arrecerat	sublitoral zone (subtidal)	étage infralitoral	sublitoral (unterwasser-bereich)

Fig. 3.2 Correlació gràfica de les diferents zonacions del gradient litoral en funció dels factors hidrodinàmics, ecològics i de forma.

costa, els dominis biològics i les principals microformes. Sovint les diferents classificacions i terminologia no coincideixen en els seus límits o en els termes. La Fig. 3.2 recull i intenta correlacionar tant els termes com les classificacions de diferents autors, així com la proposta per a la zonació biològica de la costa de Mallorca.

3.3

L'acció bioerosiva a les costes rocoses carbonatades

Dels litobionts, hom en distingeix, segons la mida, entre microorganismes i macroorganismes. Així com també, en funció del nínxol, entre els epilítics, que són aquells que desenvolupen la seva activitat a la superfície de la roca, i els endolítics, aquells que ho fan a l'interior de la roca (Gobulic *et al.*, 1982). Segons la seva posició relativa respecte de la superfície de la roca, els endolítics se subdivideixen en casmoendolítics, quan colonitzen esquerdes i fractures de la roca; criptoendolítics, si colonitzen la porositat de l'interior de la roca i, finalment, els euendolítics o vertaders endolítics, que penetren activament des de la superfície fins a l'interior de la pedra formant galeries i cavitats d'acord amb la forma dels seus cossos.

La bioerosió és un procés que combina la corrosió del rocam, especialment en roques carbonatades, dels macroorganismes i microorganismes (endolítics i epilítics) i l'abradió biològica dels macroorganismes que brostegen i graten la superfície de la roca. Mentre que, de la corrosió biològica, se n'allibera carbonat en forma d'ions en dissolució (Ca^{2+} , HCO_3^-), el producte de l'abradió biològica són fragments de roca carbonatada entre 6,3 i 63,0 μm (Schneider i Torunski, 1983).

La microflora epilítica i endolítica –fotoautòfica i heterotròfica– manté una relació tròfica amb els organismes brostejadors (depredadors). L'acció de rebaixament de la superfície de les roques carbonatades depèn de la profunditat de compensació lluminosa. En absència de depredadors, els microorganismes endolítics han de trobar una posició d'equilibri entre les necessitats d'humectació i les d'insolació, de manera que puguin desenvolupar la fotosíntesi sense deshidratar-se. Quan s'incorporen els organismes brostejadors al sistema, el nivell de compensació lluminosa respecte de la superfície de la roca varia, bé perquè se'n redueix la cota i els microorganismes han de cercar una nova posició d'equilibri entre les necessitats fisiològiques i les condicions del medi, bé perquè els microorganismes eviten ser capturats pels seus depredadors (Boaventura *et al.*, 2002; Dye, 1998; Le Champion-Alsumard *et al.*, 1993; i Ruitton *et al.*, 2000).

Així, aquest cicle d'erosió–abradió biològica, amb un

equilibri ecològicament regulat, és el principal motor dels processos de bioerosió dels dominis supralitorals i interlitorals de les costes rocoses carbonatades (Schneider, 1976; Viles, 1984).

3.3.1

Acció erosiva dels microorganismes epilítics i endolítics

Les comunitats típiques de microorganismes epilítics i endolítics amb una acció directa sobre el rocam carbonatat, les integren cianobacteris, fongs i líquens (Viles, 1984). Sovint, aquests, tenen una estructura tan complexa que és difícil separar-los i considerar-ne de forma aïllada els mecanismes fisiològics i els d'alteració de la roca. Tot plegat justifica que força autors utilitzin el terme patina biològica o *biofilm* per tal de descriure'ls (Stolz, 2000).

Els **cianòfits** perforen la roca, i produeixen una densa xarxa de galeries i microcavitats, fins a una profunditat màxima de 900 μm de la superfície de la roca. Aquest límit el defineix la profunditat de compensació lluminosa (Pohl i Schneider, 2002). Les galeries dels cianòfits, habitualment perpendiculars a la superfície, poden arribar a 10 μm de diàmetre i a més de 200 μm de profunditat en substrats durs, com puguin ser unes dolomies ben cimentades; o al voltant de 6 a 10 μm de diàmetre i més de 350 μm de profunditat en calcarenites poc cimentades i de major porositat (Jones, 1989; Jones i Kahle, 1985). El patró de perforació acostuma a seguir estructures lineals que s'entrecreuen a mode de xarxa. El resultat és una elevada densitat de perforacions a mode de textura esponjosa (Naylor i Viles, 2002). A la costa, la població de cianòfits pot superar densitats de 800.000 individus per cm^2 i un sol tipus de cianòfit pot ocupar d'un 10% a un 33% de la superfície (Le Champion-Alsumard, 1979; Viles, 1988a; Viles *et al.*, 2000). Pel que fa a la distribució en el gradient litoral, els cianòfits disminueixen la seva presència en els sectors més humits i profunds de la costa perquè augmenta la densitat dels depredadors. Són molt abundants en la transició del domini interlitoral al supralitoral i tornen a disminuir en el supralitoral, quan els organismes epilítics entapissen la superfície de la roca (Torunski, 1979).

El mecanisme pel qual els cianòfits perforen la roca no és entès completament en contraposició al coneixement dels seus efectes (Pomar *et al.*, 1975; Schneider i Le Champion-Alsumard, 1999). Se suposa que els cianòfits endolítics segreguen àcids o altres productes metabòlics que ataquen la roca. De fet, l'espai que existeix entre les beines gruixades de polisacàrids dels filaments perforants dels cianòfits i les parets de les perforacions està farcit d'una xarxa de microfibrilles que sobresurten de les beines. Aquestes microfibrilles serien les responsables de la dissolució del substrat carbonatat, ja que els ions de

carbonat en dissolució (Ca^{2+} , CO_3^{2-}) poden ser utilitzats pels cianòfits fotoautòtrofs. El CO_3^{2-} es fa servir per reduir el pH mitjançant la seva combinació amb els ions HCO_3^- o el CO_2 , que són la font de carboni del cicle fotosintètic dels cianòfits (Schneider, 1976). Le Champion-Alsumard (1979), a les observacions efectuades a la costa francesa mediterrània, a Marsella, a partir de l'exploració amb microscopi electrònic, posa de manifest que els filaments endolítics dels cianòfits, en comparació amb els epilítics, són més rics en contingut de calci. Aquest fet implica que, almenys temporalment, els cianòfits incorporen i acumulen ions de Ca en els seus teixits cel·lulars o en les seves beines després de la dissolució del rocam (Tudhope i Risk, 1985).

Els efectes sobre el rocam són diversos. D'una banda, els cianòfits ataquen els grans de la roca i generen tot un seguit de nanoformes –depressions circulars i galeries– ben característiques (Moses i Viles, 1996) i, d'altra banda, també n'ataquen el ciment i en resulten un conjunt de processos de micritització i microesparització (Pomar *et al.*, 1975). Tanmateix, no hi ha un acord pel que fa a l'acció preferencial dels cianòfits. Jones (1989) i Viles (1987b) no identifiquen diferències quant a la densitat de perforacions entre grans i ciment, mentre que Moses (2003) observa com galeries i microcavitats es concentren en el ciment del rocam. Fiol *et al.* (1992 i 1996) posen de manifest com l'acció dels cianobacteris, encara que debilitant l'estructura cristal·lina de la roca, afavoreix la remoció de petites partícules de calcària arran de l'impacte de les gotes d'aigua de la pluja, de més a més dels processos de dissolució propis de l'activitat metabòlica i etològica.

Del total de l'erosió de la roca, al voltant d'un 33% correspon a l'acció dels cianobacteris (Peyrot-Clausade *et al.*, 1995). Les taxes d'erosió són variables en funció de les condicions ambientals i factors com la textura de la roca i el nombre i intensitat dels depredadors. Tot i així, s'ha quantificat l'acció erosiva dels cianòfits de $0,001 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ a $0,015 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ a les costes de les illes Bahames (Perkins i Tsentas, 1976), en $0,005 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ als monuments històrics de Jerusalem (Danin, 1983) i al *Forum Traianum* de Roma en $0,025 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Danin, 1990).

La bioerosió i biodeterioració de les roques carbonatades per líquens i fongs endolítics varia en funció de la naturalesa de la roca. Es caracteritza per la formació de microcavitats i galeries a la superfície de la roca i per l'acció mecànica de les hifes sobre els cristalls o els grans i la porositat (Gehrmann *et al.*, 1992). La profunditat màxima, pel que fa a la presència d'aquestes textures d'alteració, pot arribar a superar els 15 mm respecte de la superfície de la roca, tot i que habitualment no depassen els 3 mm (Pomar *et al.*, 1975). És difícil separar l'acció dels cianobacteris de la dels líquens, atesa la naturalesa de

la simbiosi. La superfície de la roca està intensament perforada pels peritecis o els apotecis –organismes reproductors– que, quan desapareixen, deixen microcavitats de forma discoïdal de dimensions al voltant de la dècima de mil·límetre o del mil·límetre. Sobre la roca, tot sovint, també s'hi poden apreciar solcs ben marcats que es corresponen amb el límit de contacte entre els tal·lus líquènics (Ascaso *et al.*, 1982).

En secció, s'hi observa que els líquens ocupen una zona alterada d'aproximadament 1 mm o 3 mm de gruixa i que la intensitat de la seva acció disminueix de forma progressiva en profunditat (Ascaso i Wierzychos, 1994). La component algal, a l'interior de la roca i molt propera a la superfície, genera petites cavitats de forma esfèrica de 30 a 70 μm , tot sovint trenades o alineades (Pomar, 1976). La component fúngica ofereix una variació de formes menor. Les hifes penetren la roca fins a profunditats d'1 cm, tot i que l'habitual és una profunditat mitjana d'1 mm. La penetració es duu a terme de forma indistinta a l'interior dels grans i entre els cristalls, tot i que en els primers és més difícil. Les hifes s'endinsen en la roca seguint direccions cristal·logràfiques ben marcades, direccions de mínima resistència que es fan ben patents entre els cristalls de calcita i els bioclasts (Pomar *et al.*, 1975). Val a dir que la disposició estructural d'aquesta penetració fúngica no disminueix gradualment amb la profunditat respecte de la superfície, sinó que existeixen dues zones ben diferenciades i delimitades, aproximadament de la mateixa gruixa. La primera zona, immediatament per sota de la superfície, està fortament colonitzada i manifesta la major intensitat de fenòmens de degradació de la roca. La zona inferior presenta una penetració dèbil de les hifes segons els plans intercristal·lins o sense ordenació aparent a la micrita (Viles, 1987a).

Els mecanismes pels quals els líquens alteren la roca poden ser de caràcter físic o mecànic i químic. Els mecànics consisteixen en la pressió que exerceixen les hifes entre els grans i els cristalls, tant en sentit vertical com en horitzontal, fins arribar a fragmentar-la, o bé a trencar els propis grans o els cristalls un cop iniciada la seva perforació química (Fry, 1924; Jones i Kahle, 1985). En aquest sentit, també cal considerar l'efecte de contracció i expansió del tal·lus líquènic arran dels cicles d'humectació i de dessecació ambientals (Gómez-Pujol *et al.*, en premsa; Moses i Smith, 1993), o bé, a mode d'efecte secundari, l'acció mecànica pel creixement de cristalls de sals secundàries –especialment oxalats– que, precipitats per influència del líquen, ocupen els buits i les microesquerdes de la roca (Chen *et al.*, 2000). De caràcter físic, tot i que no estrictament erosiu, és el mecanisme pel qual els líquens incorporen matèria mineral al seu tal·lus, embolicant fragments de roca despresos entre les seves hifes, especialment a la

superfície de la roca (Ascaso i Wierzychos, 1994).

Els efectes de l'atac químic dels líquens sobre la roca són difícils de separar d'aquells descrits per als cianòfits. Aquest atac consisteix en la perforació, per part de les hifes, dels grans i cristalls de la roca i de la formació de productes secundaris just per sota del tal·lus líquènic, arran de la seva acció metabòlica i la secreció d'àcids orgànics (Wilson i Jones, 1982). Ascaso *et al.* (1982) troben evidències que les secrecions d'oxalat càlcic de la component fúngica del líquen són les responsables de l'atac químic de la calcita a la interfase entre el líquen i la roca.

Així doncs, els líquens, a les roques carbonatades, produeixen canvis en la textura i en la fàbrica de les roques, d'acord amb els seus ritmes biològics. Controlen, matisen i redueixen l'acció dels processos externs de dissolució inorgànica (Pomar i Calvet, 1974; Mottersehah i Lucas, 2000), els cicles de meteorització tèrmica i les variacions d'humitat (Carter i Viles, 2003 i 2004). Fins i tot, en el balanç meteorització-erosió, els líquens arriben a protegir la superfície de la roca dels agents erosius (Carter i Viles, 2005; Viles i Goudie, 2004). De tot plegat, en resulta un tipus de microrelleu particular a les roques carbonatades que hom ve a designar com a fitocarst (Bull i Laverty, 1982; Folk *et al.*, 1973) o, de forma més genèrica, biokarst (Viles, 1988b).

3.3.2

Acció erosiva dels macroorganismes perforadors

Els macroorganismes endolítics –principalment casmolítics– característics de les costes rocoses carbonatades són les esponges (*Cliona*), els bivalves (*Lithophaga*, *Gastrochaena*) i els cucs (*Polydora*) perforadors, així com també els bogamarins (*Equinoderma*) que tenen un comportament a cavall entre els organismes endolítics i els epilítics (Schneider, 1976). Tots ells, arran del seu grau de tolerància respecte de les condicions ambientals, a diferència dels cianòfits i els líquens, ocupen els dominis interlitoral i sublitoral de la costa.

Les esponges produeixen perforacions esfèriques o el·líptiques, la densitat de les quals els pot arribar a donar l'aparença de nius d'abella. Les seves dimensions oscil·len de 0,5 mm a 1 mm de diàmetre i de 0,09 mm a 0,02 mm de profunditat (Trudgill, 1985). Les esponges són organismes filtradors i, per tal d'estar en contacte amb els corrents d'aigua sense ser-ne arrabassades, necessiten fixar-se a la roca. Perforen la roca mitjançant la secreció d'àcids orgànics i el disseny dels seus teixits els permet malmetre la roca físicament, fins al punt de poder trencar fragments de roca de 60 a 80 μm de gruixa. Els valors de remoció de substrat carbonatat de les esponges s'ha quantificat de 0,17 a 35 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en

funció de la densitat d'esponges i el temps d'exposició de les peces de roca sotmeses a la colonització de les esponges del gènere *Cliona* (Spencer, 1988). Semblants són els patrons de colonització i d'alteració dels poliquets, així com també les seves taxes d'erosió (Hutchings i Peyrot-Clausade, 2002). Val a dir que els uns i els altres no només dissolen el CaCO_3 , sinó que també produeixen partícules d'arena fina (15-100 μm) arran de la seva acció mecànica sobre el rocam (Schneider, 1976).

Els bivalves que perforen la roca poden arribar a profunditats al voltant dels 10 cm des de la superfície de la roca. En la seva majoria es tracta d'organismes filtradors que perforen la roca per mitjà d'àcids orgànics, o bé sols la debiliten per després procedir a l'abració dels murs de l'orifici, per mitjà d'òrgans o teixits específics (Trudgill, 1985). Tot sovint les valves d'aquests organismes presenten irregularitats que constitueixen el negatiu de la forma de la perforació de la roca, així com també els cicles de creixement de l'organisme. Per a *Hiatella artica* s'ha quantificat la seva acció erosiva en taxes que oscil·len de 1,25 a 10 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Trudgill i Crabtree, 1987) i per a *Lithophaga lithophaga* aquests valors oscil·len de 4,3 a 12,9 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Spencer, 1988; Trudgill, 1976a).

Especialment important és el paper bioerosiu dels equinoderms que, com en el cas dels anteriors organismes, ataquen la roca mitjançant glàndules que segreguen àcids orgànics (Bak, 1990) i també per l'abració dels seus cossos i de les ràdules de què estan dotats (Torunski, 1979; Trudgill *et al.*, 1987). Els equinoderms produeixen depressions de planta circular proporcionals en profunditat i amplària a les dimensions del seu cos, així com també canals d'una depressió a una altra. La importància dels equinoderms com a agents bioerosius depèn de factors ecològics (Peyrot-Clausade *et al.*, 2000; Conand *et al.*, 1988; Trudgill *et al.* 1987). Les taxes d'erosió per a *Echinometra lucunter* són de 10 a 14 $\text{cm}^3\cdot\text{a}^{-1}$ i per a *Parecentrotus lividus* de 500 a a 2500 $\text{cm}^3\cdot\text{a}^{-1}$, el que equival a taxes de bioerosió entre 2,5 i 15 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$.

3.3.3

Acció erosiva dels macroorganismes brostejadors

Els organismes que brostegen la superfície de les costes rocoses, consumint cianòfits, fongs i líquens, són principalment gastròpodes. La seva acció erosiva és principalment de tipus mecànic, tot i que la ràdula dels gastròpodes no està mineralitzada. Tot i així és prou resistent com per gratar la superfície de la roca, que ja està debilitada per l'acció dels cianòfits (Schneider, 1976; McLean, 1967), i deixar evidències de traces o pistes de la seva acció en forma de canals o traces ovalades relacionades, bé amb la geometria del seu cos (*Patella* sp.), o bé amb el seu desplaçament (*Monodonta* sp. i *Melaraphe* sp.)

Agent	Taxa	Substrat	Localitat	Referència
<i>Acanthopleura brevispinosa</i> (P)	0,65 mm·a ⁻¹	calcarenita	Aldabra Atoll	Taylor i Way, 1976
<i>Acanthopleura gemmata</i> (P)	0,50 mm·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Heron Island	McLean, 1974
<i>Acanthopleura gemmata</i> (P)	0,20 – 2,90 mm·a ⁻¹	calcarenita	One Tree Islands	Trudgill, 1983
<i>Acanthopleura granulata</i> (P)	13,0 cm ³ ·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Barbados	McLean, 1967
<i>Acanthopleura granulata</i> (P)	0,12 mm·a ⁻¹	calcarenita	Bahames	Rasmussen i Frankenberg, 1990
<i>Cittarium pica</i> (C)	1,30 cm ³ ·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Barbados	McLean, 1967
<i>Littorina meleagris</i> (C)	0,15 cm ³ ·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Barbados	McLean, 1967
<i>Littorina neritoides</i> (C)	0,07 – 0,13 mm·a ⁻¹	calcària (cretaci sup.)	Ístria, Croàcia	Torunski, 1979
<i>Littorina neritoides</i> (C)	0,07 a 0,013 cm ³ ·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Barbados	McLean, 1964
<i>Littorina unifacta</i> (C)	0,15 – 0,76 mm·a ⁻¹	calcarenita	Shag Rock Is. (Austràlia)	Abensperg-Traun <i>et al.</i> , 1990
<i>Littorina ziczac</i> (C)	0,40 cm ³ ·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Barbados	McLean, 1967
<i>Nerita tessellata</i> (C)	0,40 cm ³ ·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Barbados	McLean, 1967
<i>Nerita versicolor</i> (C)	0,80 cm ³ ·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Barbados	McLean, 1967
<i>Nodolittorina tuberculata</i> (C)	0,60 cm ³ ·a ⁻¹	<i>beachrock</i>	Barbados	McLean, 1967
<i>Patella coerulea</i> (L)	0,51 – 0,76 mm·a ⁻¹	calcària (cretaci sup.)	Ístria, Croàcia	Torunski, 1979
<i>Patella vulgata</i> (L)	0,15 – 0,49 mm·a ⁻¹	calcària cretencia	Sussex	Andrews i Williams, 2000

Taula 3.1 Recull de taxes d'erosió de macroorganismes brostejadors a la costa rocosa.

mentre brostegen (Villanueva *et al.*, 2001). El resultat és l'alliberament de fragments de roca de 100 a 200 µm d'eix màxim. La intensitat de les taxes d'erosió dels gastròpodes depenen de l'abast de la seva distribució i de les seves densitats, dels cicles biològics, de les estratègies etològiques i del control que exerceixen els gradients hidrodinàmics i topogràfics (Lang *et al.*, 1998). S'ha quantificat la contribució de diferents gastròpodes a diferents localitats amb un espectre ampli de taxes de rebaixament de la superfície rocosa (Taula 3.1). No obstant això, aquells organismes amb una capacitat d'erosió més transcendent són els dels grup de pegellides i els poliplacòfors tropicals.

3.4

Patrons i taxes de bioerosió a les costes rocoses de Mallorca

Amb la finalitat de quantificar la contribució de la component biològica en els patrons i taxes d'erosió de les costes rocoses carbonatades s'ha avaluat la capacitat erosiva dels principals macroorganismes brostejadors presents a la costa de Mallorca. Les localitats on s'han estudiat les densitats, la distribució i la capacitat erosiva dels organismes es corresponen a les descrites per al càlcul de les taxes d'erosió mitjançant escàner làser (apartat 2.5.1, taula 2.18).

Pel que fa a la litologia a la Cala d'en Guixar (CG) i a la Punta des Faralló (PF) afloren roques carbonatades, mesozoiques plegades, mentre que a s'Alavern (SA), Cala Murada (CM) i la Punta des Sivinar (PS) afloren, calcarenites tabulars postorogèniques del Miocè Superior (Fig. 3.3).

3.4.1

Materials i mètode

A cada una de les localitats d'estudi, en funció de la variabilitat de la línia i el perfil de costa, s'han aixecat d'un a cinc **perfils topogràfics**, mitjançant una estació total TOPCON® CTS210, i s'indiquen tots els canvis bruscs de pendent, amb un registre de cota cada 15-20 cm. La direcció dels perfils és perpendicular a la costa i abracen des del domini terrestre fins allà on les condicions de seguretat han permès obtenir cotes per sota del nivell marí. Atès que a Mallorca no existeix un zero topogràfic "real" per als aixecaments topogràfics oficials, s'ha considerat el límit superior de les praderies de *Cystoceria sp.* sobre tenasses i plataformes com a zero relatiu. La *Cystoceria* és una macroalga que viu just per sota dels primers centímetres de columna d'aigua que pot arribar a profunditats de 55 m (Ribera i Gómez, 1985). De vegades, coincidint amb les baixades del nivell de la mar, arran de la pressió atmosfèrica entre 0,25 m i 1 m (Basterretxea *et al.*, 2004), les mates de *Cystoceria* romanen emergides i pateixen una important dessecació. Per tant, el seu límit superior ve a coincidir amb la posició estadística de pocs mil·límetres per sota del nivell marí mitjà.

A partir dels perfils de costa, s'ha confeccionat un **inventari dels organismes bioerosius** presents a les zones d'estudi i se n'ha determinat la distribució espacial, tipologia d'hàbitats i comportament erosiu. Sobre els perfils, s'hi ha indicat la coloració de la roca i la distribució de les formes de relleu (plataforma litoral, cocons, pinacles, esquerdes, etc.).

Per tal de caracteritzar la **densitat dels organismes** al

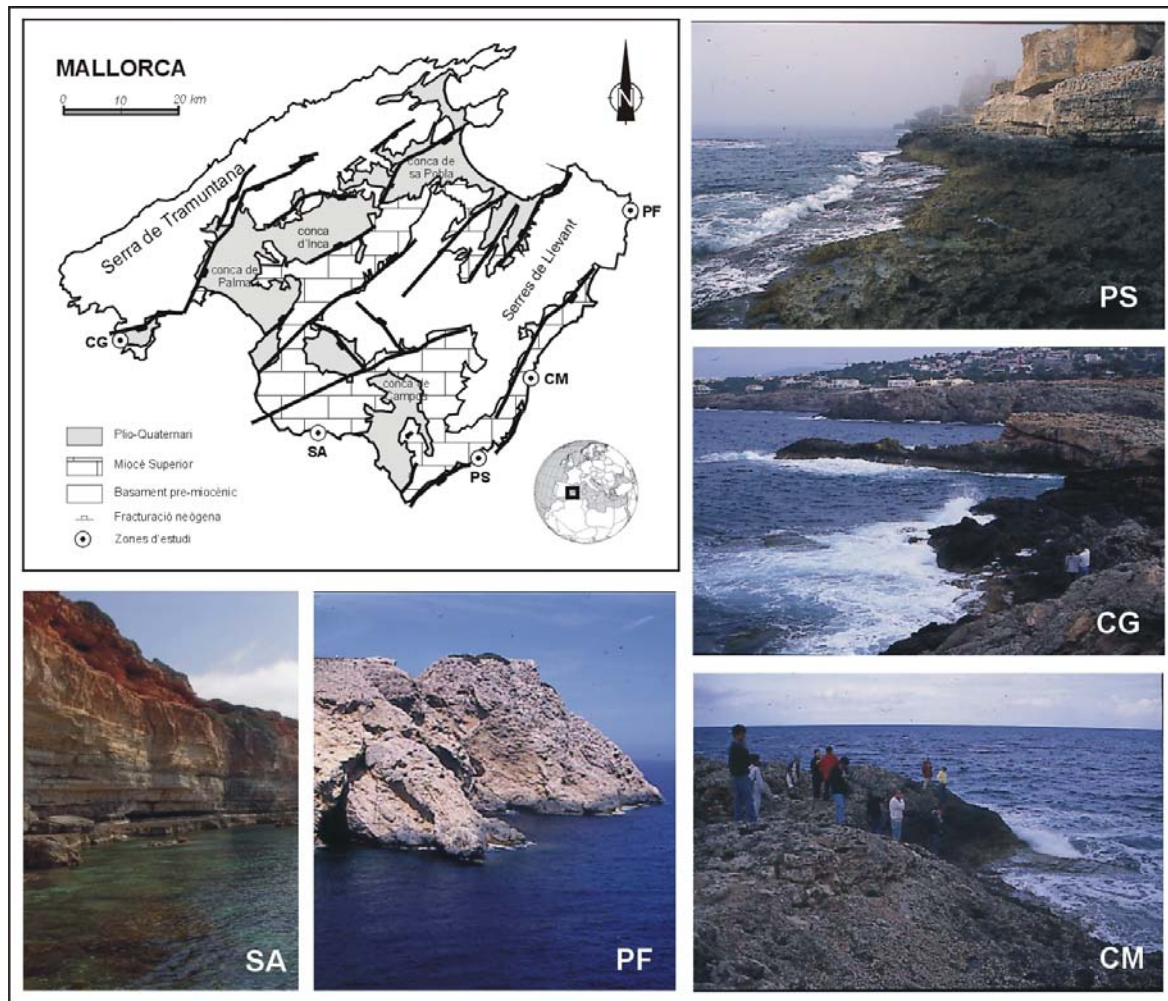


Fig. 3.3 Localització de les zones d'estudi i mostratge biològic. PS, Punta des Sivinar; CG: Cala d'en Guixar; CM, Cala Murada; SA, s'Alavern i PF, Punta des Faralló.

llarg dels perfils, s'hi ha desenvolupat un mostratge aleatori a partir de dos marcs, un de 0,25 m² i l'altre de 0,10 m² amb subdivisions d'1 cm de costat, en funció de les dimensions dels organismes i la seva abundància. Per a cada segment de la zonació del perfil, s'ha realitzat un nombre de recomptes (1 recompte cada 3,5 m) en funció de la variabilitat dels valors de densitat per a cada organisme en els registres i el tipus de micromodelat (Trudgill, 1988). Els recomptes s'han repetit de 3 a 4 cops per calcular l'error dels valors de densitat. Els recomptes s'han dut a terme estacionalment durant dos anys (el període de mostratge s'inicià l'estiu de 1999 i finalitzà la tardor de 2000). A cada una de les zones delimitades sobre el perfil, s'hi han recollit mostres representatives –un mínim de tres rèpliques– de *Melaraphe neritoides*, i *Patella rustica* per quantificar-ne les propietats biomètriques, analitzar-ne el contingut lític dels pèl·lets i comparar-ne els valors entre poblacions (Torunski, 1979).

La quantificació de la **capacitat erosiva** dels organismes s'ha calculat de forma indirecta a partir

del residu lític dels seus pèl·lets. Aquesta aproximació fou desenvolupada per McLean (1967). Andrews i Williams (2000) destaquen que, entre els seus inconvenients, s'hi compta: (a) que no és una mesura directa de l'erosió i, per tant, pot existir una component del material rocós alliberat que no sigui ingerida per l'organisme, (b) existeix la possibilitat que part de la roca ingerida sigui atacada per àcids orgànics durant la digestió de l'organisme i (c) no tot el residu lític es correspon amb carbonat càlcic i, donades les quantitats i el volum de residu lític, sovint no és possible separar-la de les altres fraccions no orgàniques dels pèl·lets fecals. Tanmateix, les taxes d'erosió calculades a partir de mètodes indirectes, mantenen una correlació significativa amb les taxes d'erosió, derivades de la quantificació de les perforacions dels organismes i del càlcul de la seva edat (Connand *et al.*, 1998; Rasmussen *et al.*, 1990; Trudgill *et al.*, 1987).

Així doncs, d'aquells organismes amb majors valors de densitat –*Melaraphe neritoides* i *Patella rustica*–, se n'han recollit a cada localitat tres rèpliques per

zona biològica amb un mínim de 50 individus per mostra. Un cop al laboratori, les mostres de *Melaraphe neritoides* s'han ubicat a un recipient amb aigua desionitzada entre 24 i 48 h perquè els organismes alliberassin tot el seu contingut intestinal. Es renten, un a un, els individus de *M. neritoides*; seguidament, es filtra l'aigua dels recipients sobre un filtre orgànic calibrat i aquest, després, s'eixuga al forn a 105 °C durant 24 h (McLean, 1967). Finalment, se'n calcula la massa. Per a les mostres de *Patella rustica*, els individus s'han deixat deshidratar a temperatura ambient, cara amunt, a un recipient compartimentat que permet la caracterització individual de les pegellides. Després d'eixugar-les al forn a 105 °C durant 24 h, se n'ha separat el cos de la closca i se n'ha calculat la massa. El contingut fecal s'ha determinat incinerant les mostres procedents del rentat i filtratge de *Melaraphe neritoides* i la part blana dels individus de *Patella rustica*, a 550 °C durant 5 h i, llavors, se'n pesa la massa d'acord amb Peyrot-Clausade et al. (2000). El residu dels pèl·lets fecals s'interpreta, tot i ser reduccionista, com a fracció mineral. Els experiments a propòsit del temps que roman la ingesta de roca en el sistema digestiu

dels organismes permeten associar la quantitat de roca erosionada en un dia per un organisme amb la seva producció fecal diària (Vidal *et al.*, 2001b i c). Així doncs, a partir de la densitat dels individus a cada localitat i zona del perfil de costa, tot coneixent l'edat i estructura de la població a partir de l'estudi de les seves característiques biomètriques i havent-ne avaluat la capacitat erosiva, se'n pot derivar una taxa de bioerosió a partir de l'expressió següent:

$$T_b = PPF / \delta_r = \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$$

On T_b és la taxa de bioerosió de l'organisme ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$), PPF és la fracció mineral dels pèl·lets fecals anuals referida a la població que colonitza cada una de les zones estudiades ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) –calculada a partir de la relació entre la producció de residu lític diària per individu ($\text{g} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$) i els recomptes periòdics dels organismes per a cada zona i per a cada localitat d'estudi ($\text{ind} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)– i δ_r , que és la densitat de la roca ($\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$) on els organismes brostegen. Paral·lelament, s'ha observat el contingut, estructura, mida i forma dels pèl·lets fecals frescos mitjançant observacions de microscopi electrònic de rastreig (Fig. 3.4).

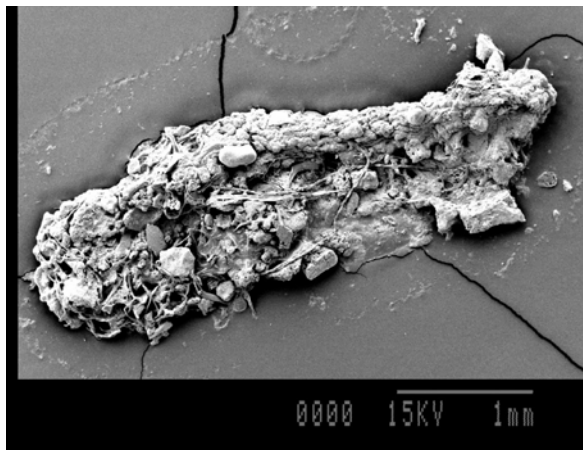


Fig. 3.4 Imatge de microscopi electrònic de rastreig d'un pèl·let fecal de *Monodonta turbinata* i el detall de la presència de fragments de roca amb dimensions al voltant de 100 i 200 µm entre les fibres i els filaments orgànics.

3.4.2

Els macroorganismes bioerosius de les costes rocoses carbonatades de Mallorca

A continuació es presenta un llistat dels macroorganismes implicats en la bioerosió de les costes rocoses presents a les localitats estudiades, amb informació respecte de les seves dimensions, distribució i hàbitat.

BIVALVIA

Lithophaga aristata (Dillwyn, 1817)

Mol·lusc amb una conquilla llarga i cilíndrica formada per dues valves iguals amb bandes de creixement separades. Les seves dimensions són de 15 a 26 mm de longitud, tot i que en determinades ocasions pot arribar als 50 mm. És una espècie cosmopolita i molt habitual a la Mediterrània, en particular a les ribes occidentals i meridionals. El seu hàbitat abraça des del límit de la marea baixa fins a 100 m de profunditat. Es diferencia de *L. lithophaga* pels apèndixs posteriors de cada valva. És un potent perforador tant de substrats rocosos com d'altres bivalves o gastròpodes i dels bioherms d'algues rodofícies. El seu mecanisme de perforació consisteix en la secreció d'àcids orgànics.

Lithophaga lithophaga (Linnaeus, 1758)

Gènere amb una conquilla allongada i cilíndrica

formada per dues valves iguals. Les seves dimensions oscil·len de 60 a 95 mm de longitud, tot i que pot arribar als 110 mm. S'escampa des de la costa occidental del continent africà fins a la Mediterrània. El seu hàbitat comprèn dels 100 m de profunditat fins al límit de la marea baixa. Perfora substrats durs com esculls de corals, roques carbonatades i, fins i tot, la fusta o les infraestructures sotaiguades (dics, esculls artificials). Es coneix, popularment, com a dàtil de mar i se'n fa consum gastronòmic.

Mytilaster solidus (Martin in Monterosato, 1872)

Bivalve de 8 a 15 mm de longitud, amb màxims de 19 mm. La seva distribució és mediterrània, encara que hi ha algunes colònies a les ribes atlàntiques properes i és possible que hagi arribat a les costes atlàntiques franceses. És un organisme intermareal, que viu adherit a les roques o a comunitats algals, com les de *Corallina mediterranea*. La xarnera té de 2 a 3 pues cardinals que no són evidents. Llevat de la presència de petits canals amb estries, l'aparença de la copinya és llisa. L'interior de les valves és d'un color blanc-perla brillant amb matisos porpra. La seva forma és extremadament variable, raó per la qual en el passat es distingia entre dues espècies o formes: *M. solidus* en sentit estricte, que es caracteritzava per una cara ventral còncava i *M. solidus* var. *minimus* (Poli, 1975) amb la cara ventral recta. Totes les espècies dels mitiloids són bivalves sèssils adherits a la roca o a les algues coral·lígenes presents al límit inferior del domini interlitoral. Quan l'organisme està viu desenvolupa una funció protectora de la roca, però quan és arrabassat per les tempestes, la depredació natural o l'home, pot esdevenir una espècie erosiva. La seva presència a les costes estudiades és ocasional.

Mytilus edulis (Linnaeus, 1758)

Bivalve sèssil adherit a la roca o als bioherms d'algues calcàries, la conquilla del qual té dimensions al voltant de 30 i 140 mm de longitud, tot i que existeixen exemplars que poden arribar als 228 mm. La dimensió de l'espècie depèn del seu biotop. Així les conquilles interlitorals són de dimensions petites i en comptades ocasions superen els 60 mm, mentre que els exemplars d'aigües més profundes acostumen a superar els 90 mm de longitud. Els límits de la distribució de *M. edulis* no es coneix exactament, arran de la seva confusió amb altres bivalves molt similars. Hom accepta que és una espècie pròpia de l'hemisferi nord, tot i que s'escampa per l'Atlàntic i també el Pacífic (Japó). A les costes europees viu sobre substrats rocosos i des dels sectors inferiors del domini interlitoral fins a profunditats de 40 m. És una espècie extremadament variable pel que fa a la forma i al color. Algunes conquilles són gruixudes i tenen un patró d'estries radiades associades a les línies de

creixement, tot i que la majoria són llises i fines. Els espècimens mediterranis són llargs, plans i tenen una línia basal més còncava. És molt freqüent als transectes estudiats.

Musculus subpictus (Cantraine, 1835)

Mitiloid amb una conquilla formada per dues valves simètriques, quasi ovals, que s'aprimen en el seu costat interior. Les seves dimensions poden arribar als 19 mm de longitud, tot i que són més habituals longituds de 5 i 10 mm. Es pot trobar des de les costes de Noruega a les d'Angola i tota la costa occidental d'Àfrica. A la Mediterrània, el seu hàbitat comprèn des del nivell de marea baixa fins a 60 m de profunditat. És habitual trobar-lo als biòtops on abunden els equinoderms o associat a *Laminaria* sp. Pot perforar les conquilles d'altres organismes com *Ascidia mentula*, *Acidiella aspersa*, *Cliona intestinalis* o *Holothuria tubulosa*. És un bivalve extremadament fi, amb una conquilla de color verdós amb 15 o 18 nervis anteriors i entre 20 o 35 nervis posteriors. És poc freqüent als perfils caracteritzats.

CRUSTACEA

Chthamallus stellatus (Poli, 1791)

Crustaci filtrador de forma piramidal i aparença rugosa, amb una obertura a l'apex i un diàmetre de 15 mm. Molt habitual a les costes mediterrànies i a la mar Negra, al migjorn d'Anglaterra i a la mar del Nord. És força abundant al domini supralitoral de les costes rocoses de Mallorca, i coincideix amb l'àrea on dominen els esquits de les onades.

Chthamallus depressus (Poli, 1791)

Crustaci filtrador semblant a *C. stellatus* tot i que la seva forma cònica és més aplanada. Se'n poden distingir sis plaques d'aparença llisa. El seu diàmetre mitjà és de 15 mm. La seva distribució és restringida a la mar Mediterrània i la mar Negra. El seu hàbitat és el domini supralitoral i és molt abundant a les costes rocoses de Mallorca.

ECHINOIDEA

Arbacia lixula (Linnaeus, 1758)

Equinoïdeu de closca semiesfèrica dura que pot arribar als 30 mm de diàmetre amb pues gruixudes, tan llarga com el diàmetre del cos, de color negre. És una espècie amb una distribució àmplia de les costes nordatlàntiques de Portugal al sud d'Àfrica tot i que exclusiu de litorals rocosos. El seu hàbitat és el

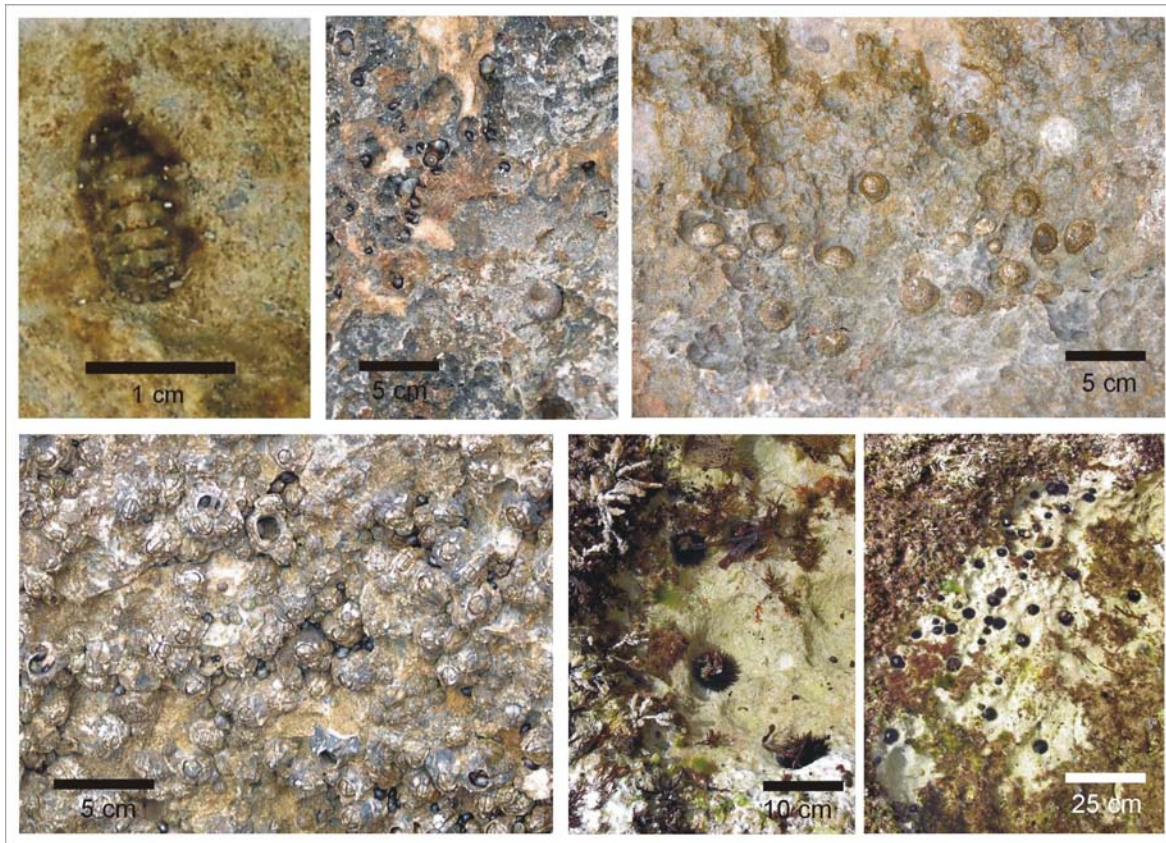


Fig. 3.5 Organismes bioerosius de les costes rocoses de Mallorca. A la fotografia superior esquerra, un exemplar de *Chiton olivaceus* en el fons d'un cocó desventrat per la mar. La imatge superior central presenta, en primer pla, un exemplar de *Melaraphe punctata* i ocupant les petites cavitats de la roca, exemplars de *Melaraphe neritoides*. La fotografia superior dreta recull un grup d'exemplars de *Patella rustica* en el canvi de pendent entre la plataforma litoral i la paret vertical del notch. A la fotografia inferior esquerra hi ha una superfície completament entapissada per *Chthamallus depressus* entre els quals, i en alguns casos dins els *C. depressus* morts, trobam exemplars de *Melaraphe neritoides*. Les fotografies inferior central i dreta recullen diferents detalls de l'acció bioerosiva del bogamari *Paracentrotus lividus* sobre el rocam d'una plataforma litoral.

domini sublitoral, tot i que pot arribar als 50 m de profunditat.

Paracentrotus lividus (Lamarck, 1822)

Equinoderm de closca arrodonida i lleugerament aplanada al ventre o bé al dors. El seu diàmetre pot arribar als 70 mm. Les seves pues són llargues i d'un color verd fosc amb matisos porpra. És un organisme molt comú arreu, que apareix a tocar de contacte entre el domini interlitoral i el sublitoral fins a profunditats de 30 m. Habita tant substrats rocosos com arenosos.

GASTROPODA

Melaraphe neritoides (Linnaeus, 1758)

Gastròpode amb una conquilla petita, de 3 a 9 mm d'alçària, de color gris-negrós i forma d'espiral bombada que habita des de les costes occidentals de Noruega fins al sud del Marroc, les Canàries i les Açores. És força comú a la Mediterrània i a la mar

Negra. El seu hàbitat són els dominis supralitorals de les costes rocoses, i coincideix amb l'abast espacial dels esquits i el ruixim de les onades. És un organisme brostejador molt abundant a les costes rocoses de Mallorca, en especial als cocons i esquerdes, amb densitats que arriben als 5.000 ind·m⁻² (Fig. 3.5).

Melaraphe punctata (Gmelin, 1791)

Gastròpode semblant a *M. neritoides*, tot i que de dimensions majors, de 8 a 18 mm d'alçària, i amb un patró reticulat i una espiral ben marcada a la conquilla. Apareix regularment a les costes més càlides de la Mediterrània i a les illes Canàries. A Mallorca, la seva distribució es restringeix a la costa meridional. Probablement, es tracta d'una introducció recent (Barrados i Flexas, 1997).

Monodonta articulata (Lamarck, 1822)

Gastròpode amb una conquilla en forma de baldufa de 15 a 28 mm de diàmetre i, com a màxim, 35 mm

d'alçària. El brodat de la seva conquilla defineix una espiral de color verd-grisós on destaca una línia en espiral que alterna segments vermells i blancs. És una espècie típica de la Mediterrània, tot i que també es pot trobar a les costes portugueses. És pròpia del domini interlitoral. També apareix en els sectors més propers al nivell mitjà de la mar o just per sota d'aquest. És un organisme abundant a les costes rocoses de Mallorca.

Monodonta turbinata (Born, 1870)

Gastròpode de 15 a 38 mm de diàmetre i com a màxim 43 mm d'alçària. La seva copinya defineix una espiral de color verd-grisós amb taques alternants de color crema, blanc i verd, i és més aplanada que *M. articulata*. És típica de la Mediterrània, tot i que també es pot trobar a les costes portugueses. És una espècie pròpia del domini interlitoral i apareix en els sectors més propers al nivell mitjà de la mar o just per sota d'aquest. És un organisme abundant a les costes rocoses de Mallorca.

Patella rustica (Linnaeus, 1758)

Mol·lusc d'entre 18 i 32 mm de longitud amb una copinya de color fosc i forma cònica amb límits basals irregulars. Es poden apreciar a l'interior de la copinya segments alternants de color fosc. El seu hàbitat és el domini interlitoral, i és molt comú de la mar Cantàbrica fins a Mauritània i a la Mediterrània. És molt abundant a les costes de Mallorca (Fig. 3.5).

Patella caerulea (Linnaeus, 1758)

Gastròpode de 20 a 66 mm de longitud amb una copinya aplanada, de límits arrodonits o pentagonals i amb una escultura suau de nerviacions radials. El color interior té matisos blaus, blancs i marrons. La seva distribució és mediterrània, tot i que és més habitual al sector occidental. Habita els sectors inferiors del domini interlitoral o ja al sublitoral de les costes rocoses, tot i que, en algunes ocasions també apareix a l'interior dels cocons més propers a la mar. Té nombrosos sinònims complementaris. Els més comuns són *P. scutellaris* (Blainville, 1825) o *P. subplana* (Potiez i Michaud, 1838).

Patella ullysiponensis (Gmelin, 1791)

Espècie semblant a l'anterior, tot i que es caracteritza per una copinya allongada, amb l'interior porcellanós, una base irregular amb nerviacions prominents i bandes de creixement concèntriques. Les seves dimensions oscil·len dels 20 als 50 mm de llargària.

La seva distribució s'escampa des de la mar Negra fins al nord de les Illes Britàniques, tot i que és absent al Canal de la Mànega. Els límits meridionals no es coneixen. Respecte de les altres *Patella* prefereix els límits inferiors del domini intermareal.

Vermetus triquetter (Bivona-Bernardi, 1832)

Gatròpode de conquilla tubular i superfície còncava formada per poques espirals i bandes robustes, de color blanc i gris. Pot arribar als 40 mm de llargària. La seva distribució abasta la Mediterrània i les Illes Canàries, típic del domini interlitoral. És relativament abundant a les costes rocoses de Mallorca.

POLYPLACOPHORA

Chiton olivaceous (Linnaeus, 1758)

Poliplacòfor allongat de 15 a 30 mm de llargària, plaques espesses amb quilla i costelles marcades de color grisós. L'enrevolta un cinturó amb bandes clares i fosques. És un organisme comú i abundant arreu. Apareix al domini interlitoral a poca profunditat o dins cocons propers a la mar i habitualment plens d'aigua.

Lepidochitona corrugata (Reeve, 1848)

La copinya d'aquest polioplacòfor és ovalada, sense un patró clar de forma i té dos nervis a cada lateral. Apareix associat a substrats carbonatats i és típicament mediterrani. A l'Atlàntic, sols apareix a les costes de Cadis i al sud de Portugal. Es pot trobar al domini interlitoral i, en determinades ocasions, en zones emergides molt properes al nivell mitjà de la mar. És un organisme brostejador tot i que no es considera efectiu en l'erosió de la roca. Té molts sinònims, *Chiton cinereus* (Poli, 1791). *C. caprearum* (Scacchi, 1836) i, fins no fa gaire, s'assignava al gènere *Middendorffia*. Tot i que present, no és abundant a les costes rocoses de Mallorca. Apareix a petits cocons a la zona de ruixim i sobre les crostes biològiques de les plataformes litorals.

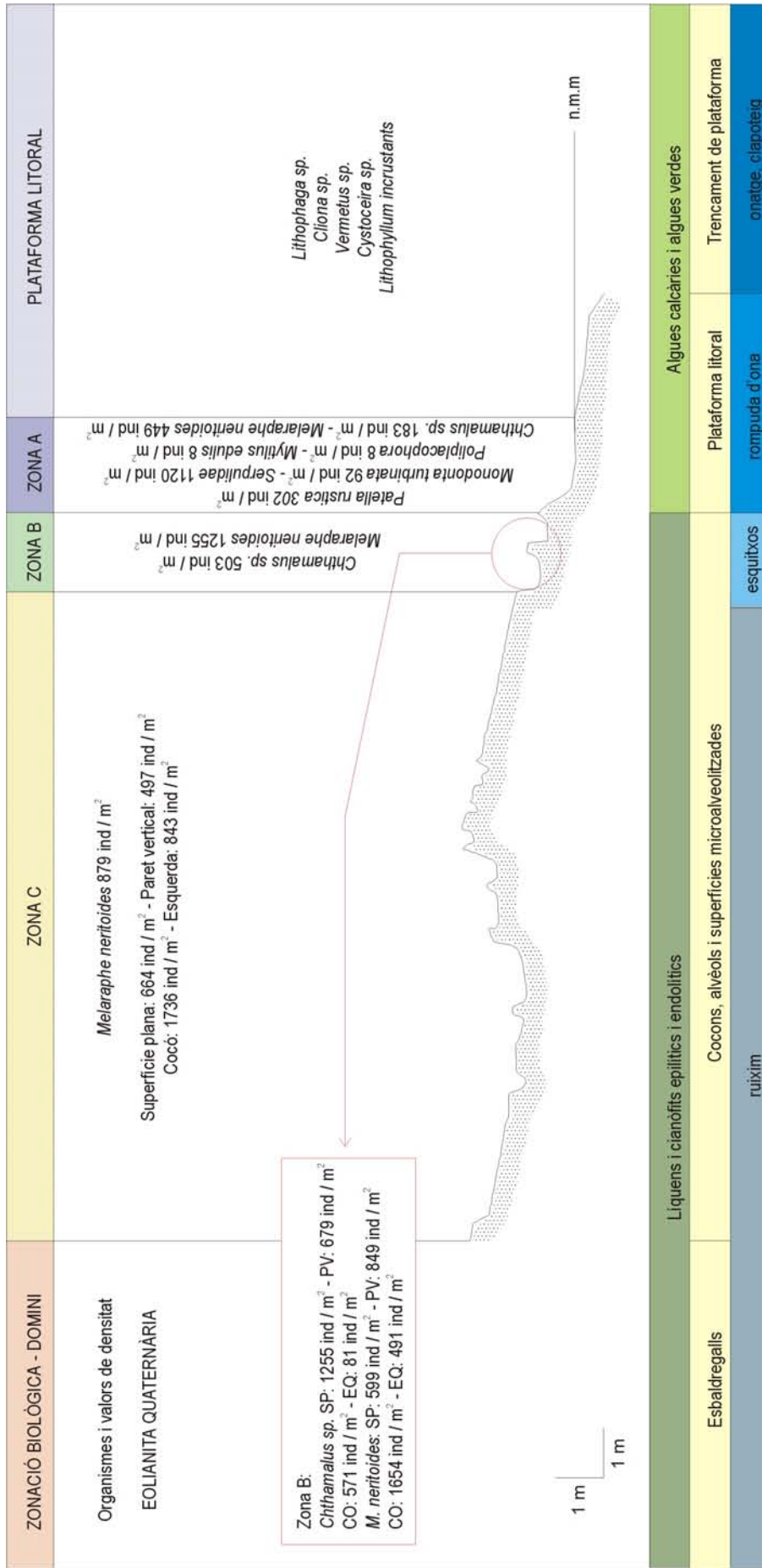
3.4.3

La zonació biològica de les costes rocoses de Mallorca

L'observació de les comunitats biològiques de la costa de Mallorca revela un espectre uniforme d'espècies amb petites diferències entre les zones d'estudi.

La primera zona es correspon amb la plataforma litoral i abasta de 0 a 1 m per sota del nivell mitjà de

Fig. 3.6 Zonació biològica del perfil número 4 de la Cala d'en Guixar (pàgina següent)



la mar. La comunitat que hi domina és *Cystoceirum mediterraneae* (Feldman, 1937). Els macròfits més comuns són els del grup de la *Cystoceira*, tot i que no és gens senzill distingir entre *C. mediterranea* i *C. stricta* que entapissen, quasi bé, el 100% de la superfície de la plataforma. A les costes de Mallorca, *Cystoceira* sps. du associades altres algues com *Ceranium rubrum*, *Corallina elongata* i *Corallina granifera* (Barceló et al., 1999; Ballesteros et al., 1993). Hi ha altres espècies com *Dictoyla dichotoma*, *Halopteris scoparia*, *Padina pavonica*, *Amphiroa rigida* i *Halimeda tuna*, tot i que la seva cobertura és força menor que la de les espècies dominants. La fauna la caracteritzen espècies com *Lithophaga aristata*, *Lithophaga lithophaga* (Bivalvia), *Emarginula octaviana*, *Fissurella nubecula*, *Acmaea virginea* i *Vermetus triqueter* (Gastropoda); i *Paracentrotus lividus* i *Arbacia lixula* (Echinoderma).

La segona de les zones la roca de la qual té un color blanquinós (Zona A) és difícil d'adscriure a una sola comunitat perquè suposa un gradient del domini dels macròfits a la zona supralitoral. Les crostes de l'alga calcària *Lithophyllum incrustans* i la colonització del cianòfit *Rivularia* sp. són els responsables de la coloració de la roca. S'han identificat altres algues en aquesta zona que són *Spongites notarisii*, *Chaetomorpha capillaris*, *Laurencia papillosa* i *Laurencia truncata* (Barceló et al., 1999). Les pegellides són els organismes brostejadors més importants en la zona A. L'espècie més comuna i amb majors densitats és *Patella rustica*, seguida de *Patella caerulea* i *Patella ullysiponensis* (Bosch i Moreno, 1986). Estretament relacionat amb la localització de pegats de cianòfits, hi apareix *Lepodichiton corrugata* i *Chiton olivaceus* (Polyplacophora).

Altres organismes presents a la Zona A són gastròpodes com *Monodonta turbinata*, *Monodonta articulata* i *Vermetus triqueter*; bivalves com *Mytilus edulis*, *Mytilaster solidus* i *Musculus subpictus*; i, finalment, espècies del grup dels serpulíds. També són característics d'aquest domini biològic els crancs *Pachygrapsus marmoratus* o *Eriphia spiniformis*.

La tercera zona considerada (Zona B) és agranada per les ones només durant les fortes tempestes i coincideix amb l'àmbit on els esquits de les onades humitegen la roca. L'element més característic d'aquesta zona és l'alta densitat dels *Chthamulus* sp que poden arribar a cobrir completament la roca. El rocam presenta un color grisós arran de la colonització de cianòfits. *Chthamallus stellatus* i *Chthamallus depressus* entapissen la roca especialment als punts on es concentren els fluxos d'entrada i retorn d'aigua (esquerdes, sortints), ja que són organismes filtradors. La presència de *Melaraphe neritoides* també és destacada.

Finalment el quart domini, la zona C, es pot relacionar

amb l'associació *Verrucariuo-Melaraphetum neritoidis* (Augier, 1982). L'espècie dominant és *Melaraphe neritoides*, tot i que en determinades localitats *Melaraphe punctata* pot aparèixer si es donen les condicions d'hàbitat i distribució favorables (Barrado i Flexas, 1997). *M. Punctata* fou identificada per primer cop el 1983 en una sola localitat de Mallorca. Actualment es troba en expansió i ha colonitzat quasi bé tota la costa de Mallorca, excepció feta de la costa nord. Pel que fa a la flora, les espècies típiques d'aquesta zona són els líquens *Verrucaria amphibia*, *Arthopyrenia halodytes* i *Caloplaca maritima* i el cianòfit *Rivularia* sp (Llimona, 1991).

La Fig. 3.6 representa l'aplicació d'aquesta classificació en un dels perfils estudiats. La zonació biològica també integra els fenòmens hidrodinàmics i morfològics. Així doncs, la zona del perfil que sempre roman sota l'aigua coincideix amb la comunitat de la plataforma litoral. Quan aquesta talla la component horitzontal i comença a aixecar-se, just on trenquen habitualment les ones, comença la zona A. El domini hidrodinàmic dels esquits correspondria amb la colonització dels crustacis filtradors *Chthamallus stellatus*, que delimita l'extensió de la zona B. Aquí, hi són freqüents els pinacles i els cocons que comparteixen parets. Finalment, des d'on disminueixen els *Chthamallus* fins a on apareixen les primeres plantes superiors, *Limonium* sp., queda definida la zona C, on són habituals cocons aïllats i superfícies subhoritzontals amb alvèols i microalvèols.

3.4.4

Densitats i biometries de les poblacions d'organismes bioerosius de les costes rocoses de Mallorca

S'han mostrejat diferents perfils, repartits entre les cinc localitats descrites durant dos anys (Annex 2). Un dels principals problemes durant aquests períodes ha estat la dificultat de treballar i dur a terme inventaris als sectors més baixos del perfil, sobre la plataforma, arran de les condicions marítimes.

La **Cala d'en Guixar** (CG) es troba a l'oest de l'illa de Mallorca. És un sector de costa llavorat a les dolomies plegades del Retià sobre les quals es diposita un sistema de ventalls i dunes quaternàries. La localitat està exposada als vents del sudoest i la costa es caracteritza per un seguit de caps i badies que coincideixen, respectivament, amb perfils de penya-segats verticals i rampes de pendent suau. La plataforma litoral és estreta, tot i que hi ha sectors en què pot arribar als 6 m d'amplària. Als sectors més arrecerats, s'hi desenvolupen *trottoirs* de dimensions notables, així com també hi apareixen coves litorals.

A la zona A del sector de costa de Cala d'en Guixar, la densitat dels organismes varia en funció de la

	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
CGP1	208	100	157	161
CGP2	118	331	178	46
CGP3	175	160	148	115
CGP4	575	396	216	242
CGP5	679	141	93	87
CGP6	293	31	93	87
CMP1	160	190	154	117
CMP2	174	216	158	196
PF1	293	157	109	189
PF2	643	632	208	141
PSP1	1379	418	304	112
SAP1	183	151	126	150

Taula 3.2 Densitats mitjanes (ind·m⁻²) de *Patella sp.* a les localitats estudiades. Vegeu els codis de la localitat al text.

microtopografia. De les pegellides, principalment *Patella rustica*, se'n registren densitats màximes de 741 ind·m⁻², tot i que la mitjana entre estacions queda en un rang entre 100 i 269 ind·m⁻². No obstant això, aquests valors duen associades desviacions típiques importants (Annex 2), de les quals es desprèn la important variabilitat espacial pel que fa a la colonització d'aquest organisme. Un dels altres organismes importants a la zona són els serpúlids, especialment allà on la pàtina de les algues rodofícies cobreix la roca. Valors màxims de 30.635 ind·m⁻² no són estranys en la sèrie temporal de mostratge. Tot i que amb una presència menys important, i així com augmenta la presència dels crustacis filtradors, hi apareixen *Monodonta turbinata* i *Lepidochitona corrugata*. *M. turbinata* arriba a registrar densitats de 300 ind·m⁻², i és especialment freqüent a les basses bioconstruïdes per *Chthamalus*. Aquests arriben a assolir una presència important a les esquerdes, amb valors mínims de densitat entre 4.370 i 9.984 ind·m⁻², i màxims de 54.400 ind·m⁻².

No obstant això, a les superfícies subhorizontals on l'aigua no circula si no és en condicions de tempesta, les densitats de *Chthamalus depressus* són molt baixes, entre 124 i 185 ind·m⁻². A la zona B, els *Chthamalus* són més abundants que no pas *Melaraphe neritoides*. Així, per als primers, les densitats màximes es registren a la tardor amb 975 ind·m⁻², mentre que per a *Melaraphe* les densitats màximes, a la primavera i a l'estiu, són de 596 i 568 ind·m⁻² respectivament. La microtopografia juga un paper important en l'explicació de la diferència dels valors de densitat per a *Melaraphe neritoides* a la zona C. Així doncs, mentre a les superfícies subhorizontals només hi ha 31 ind·m⁻², a les esquerdes, les densitats de *M. neritoides* arriben als 488 ind·m⁻² (Taula 3.3)

Pel que fa a les variables biomètriques, *Patella* té valors màxims de longitud a l'estiu (18,14 mm) i mínims a la tardor (16,74 mm). En el cas de *Melaraphe*, durant els mostratges d'estiu i tardor, s'hi registren els valors màxims d'alçària (5,91 mm a la

zona C), tot posant de manifest un increment de les dimensions dels individus terra endins a tots els perfils i a totes les estacions (Taula 3.4 i Fig. 3.7).

La localitat de s'Alavern (SA), al sud de Mallorca, es caracteritza per una costa amb penya-segats verticals que descansen sobre una plataforma litoral. Aquest sector de costa està exposat als vents i als temporals de mar de SE.

La part batuda per l'onatge d'aquesta plataforma està entapissada per *Cystoceria sp.* A la zona A, hi abunden les pegellides amb densitats que oscil·len de 31 a 895 ind·m⁻². Es reparteixen per igual entre *Patella rustica* i *P. ullysiponensis* (Taula 3.2). *Monodonta turbinata* també hi té una presència considerable, que arriba a valors de 130 ind·m⁻². Mentre que el grup dels serpúlids s'ha identificat a cada estació, amb densitats al voltant de 300 ind·m⁻², els poliaplacòfors han presentat patrons més irregulars i amb abundàncies menors. El mateix succeeix amb *Melaraphe neritoides* i *Chthamalus stellatus*.

A la zona B, després d'un petit relleix, el nombre d'individus de *Chthamalus stellatus* augmenta considerablement. Les densitats arriben a valors de 1.000 i 4.375 ind·m⁻². *M. neritoides* no canvia substancialment la seva densitat durant cada una de les estacions de l'any. Els seus valors d'abundància

Perfil	Zona	Prim.	Estiu	Tardor	Hivern
1	A	895	340	873	617
	B	596	568	623	514
	C	213	225	172	528
2	A	575	357	509	471
	B	762	640	988	734
	C	354	383	403	263
3	A	185	494	519	502
	B	415	234	985	451
	C	196	109	239	133
4	A	247	595	646	448
	B	525	1895	1032	1463
	C	819	1593	615	814
5	A	821	1477	602	500
	B	1596	525	1295	436
	C	525	152	316	224
6	A	602	533	231	2230
	B	3097	1412	2250	944
	C	823	833	741	1216

Taula 3.3 Densitats mitjanes (ind·m⁻²) de *Melaraphe neritoides* a Cala d'en Guixar.

	Estiu 99	Tardor 99	Hivern 00	Prim. 00
N	106	77	75	48
μ	18,14	16,73	18,84	17,74
σ	4,87	4,89	3,34	4,25
Mínim	1,89	8,90	10,74	9,34
Màxim	45,80	33,65	26,40	25,15

Taula 3.4 Variació estacional de l'amplària de *Patella rustica* a la Cala d'en Guixar. Unitats en mm.

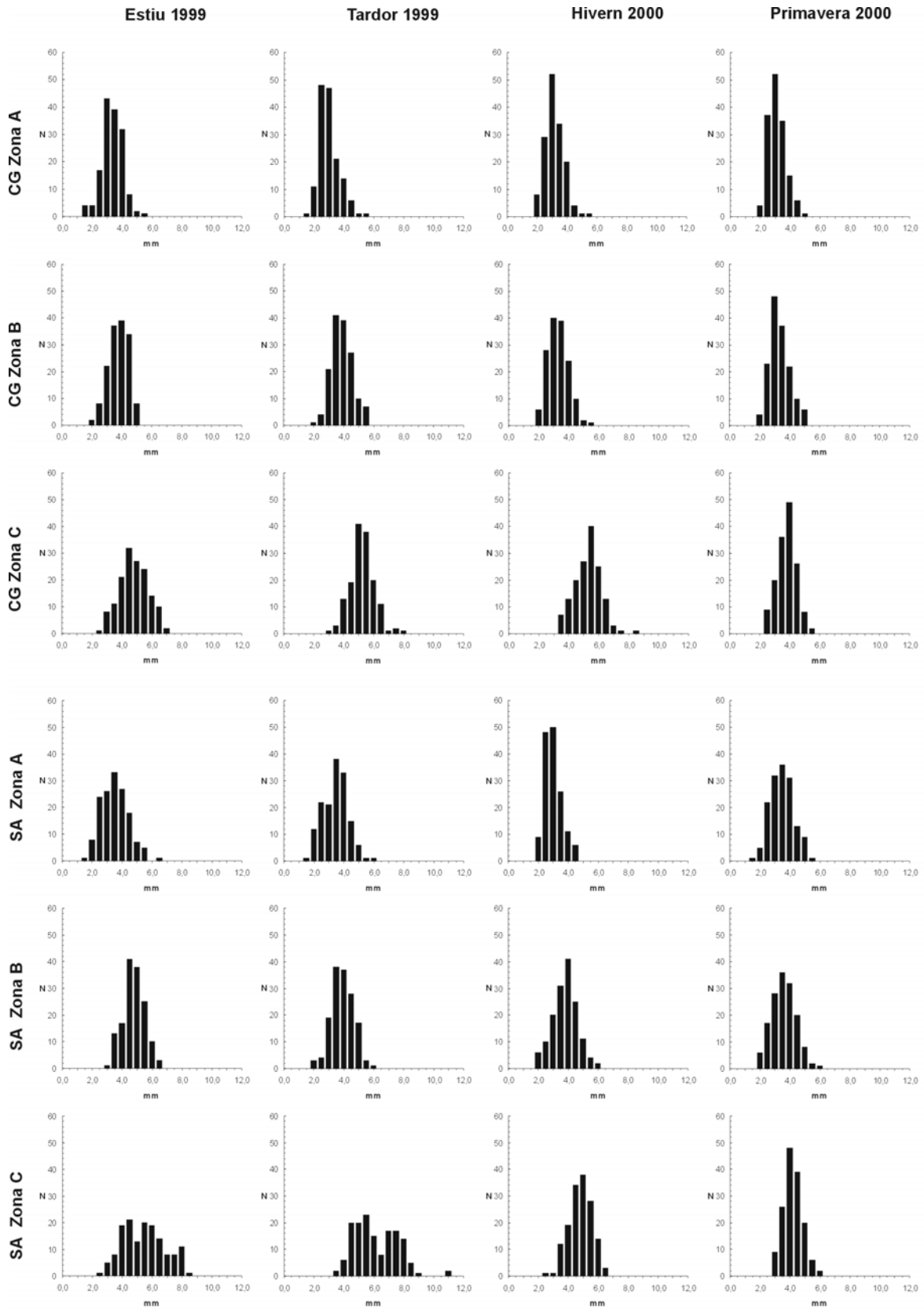


Fig. 3.7 Variació de l'alçària de *Melaraphe neritoides* a la Cala d'en Guixar (CG) i a s'Alavern (SA) d'acord amb l'estació i la zonació biològica. Observi's que hi ha un patró d'augment de les dimensions de *M. neritoides* amb la distància a la línia de costa, així com també lleugeres variacions de les dimensions d'eix major durant la primavera i l'estiu.

Perfil	Zona	Prim.	Estiu	Tardor	Hivern
1	A	195	183	113	192
	B	1903	1379	1522	1015
	C	345	293	335	348

Taula 3.5 Densitats mitjanes (ind·m⁻²) de *Melaraphe neritoides* a s'Alavern.

abracen dels 700 als 1.500 ind·m⁻².

A la zona C, que abraça un sector de blocs a peu de penya-segat i una antiga rasa de 3 a 4 m per sobre del nivell marí, les densitats de *Melaraphe neritoides* són menors amb valors mínims que arrenquen de 158 o 212 ind·m⁻² a màxims de 804 ind·m⁻² segons l'estació.

En el cas de *Patella*, només present a la zona A, la mitjana de longitud de la seva conquilla és de 18,3 mm a l'estiu i de 17,00 mm a l'hivern (Taula 3.6). Per a *Melaraphe neritoides*, no s'observen variacions estacionals dels paràmetres biomètrics, amb valors màxims de longitud de 6,8 mm. No obstant això, sí que es fa evident un augment de les dimensions dels organismes de mar cap a terra (Fig. 3.7).

A la **Punta des Sivinar** (PS), el perfil de costa el defineix una rasa sobre la qual hi descansa un penya-segat tallat a les calcàries del Miocè Superior i que, després d'una caiguda d'1 a 1,5 m, inicia el desenvolupament d'una plataforma sotaiguada.

Pel que fa a les poblacions d'organismes bioerosius a la zona A, les pegellides, principalment *Patella rustica*, presenten una distribució irregular, fet pel qual els valors de densitat marquen un interval de 418 a 3.837 ind·m⁻². *Monodonta turbinata* i els crustacis filtradors hi tenen presències considerables, amb densitats de 864 ind·m⁻² i 4.753 ind·m⁻² respectivament. En aquesta zona, també s'hi constata la presència de *Melaraphe neritoides*, arran de la verticalitat i rugositat de la paret, amb mitjanes mínimes de 500 ind·m⁻² i màximes de 3.951 ind·m⁻² en funció de l'estació.

A la zona B *Chthamallus depressus* és l'organisme dominant amb densitats de 864 ind·m⁻² a 2.600 ind·m⁻². La presència de *Melaraphe neritoides*, en aquest sector, és força menor, amb densitats de 371 a 549 ind·m⁻², tot i que hi ha concentracions importants d'aquest individu a esquerdes o a les parets dels cocons amb valors de 3.249 ind·m⁻².

	Estiu 99	Tardor 99	Hivern 00	Prim. 00
N	77	–	75	77
μ	18,3	–	17,08	17,03
σ	4,06	–	3,99	4,51
Mínim	8,83	–	7,89	8,04
Màxim	25,63	–	26,43	25,43

Taula 3.6 Variació estacional de l'amplària mitjana de *Patella rustica* a s'Alavern. Unitats en mm.

Perfil	Zona	Prim.	Estiu	Tardor	Hivern
1	A	1319	479	363	220
	B	864	549	371	348
	C	374	264	226	143

Taula 3.7 Densitats mitjanes (ind·m⁻²) de *Melaraphe neritoides* a la Punta des Sivinar.

A la zona C no hi ha variacions significatives d'abundància entre estacions, però sí que existeix una variabilitat considerable en relació a la microtopografia. Les densitats habituals per a *Melaraphe neritoides*, al segment més terrestre del perfil, són de 226 ind·m⁻² a 374 ind·m⁻² (Taula 3.7).

La caracterització biomètrica permet constatar com per a *Patella sp.* (Taula 3.8) hi ha un màxim en la longitud mitjana de l'eix major dels individus durant l'estiu (21,21 mm) i un mínim a l'hivern (18,42 mm). En el cas de *Melaraphe neritoides* es reconeix una tendència similar i s'aprecia, com passava a les anteriors localitats, un augment de les dimensions dels individus de mar cap a terra (Fig. 3.8).

En el cas de **Cala Murada** (CM), la costa, tallada en les calcàries del Miocè Superior, és més variable amb perfils que canvien de plataformes litorals a parets verticals amb *notchs* ben desenvolupats. Aquesta és una de les localitats sotmeses a un major nombre de tempestes i mar de fons.

De fet, la zona A només es pogué mostrejar durant la primavera. En comparació a d'altres localitats, la colonització és menys important. A la zona A, *Patella rustica* presenta densitats mitjanes de 160 a 174 ind·m⁻² segons l'estació (Taula 3.2). Els crustacis filtradors hi estan poc representats. A la zona C, *Melaraphe neritoides* arriba a densitats entre 347 i 547 ind·m⁻² (Taula 3.8)

Les dades biomètriques de *Patella rustica* (Taula 3.10) tornen a apuntar cap a un màxim estival, pel que fa a les seves dimensions de longitud (22,09 mm), i a un mínim hivernal (17,47 mm). Pel que toca a *Melaraphe neritoides*, s'hi constata una tendència similar, a la vegada que un augment de l'alçària de les conquilles de la zona A a la C, passant de 2,75 mm a 5,17 mm d'alçària respectivament.

La **Punta des Faralló** (PF) està formada per calcàries plegades del Mesozoic amb una estratificació i

	Estiu 99	Tardor 99	Hivern 00	Prim. 00
N	74	72	74	72
μ	19,50	15,09	18,38	20,15
σ	4,28	3,85	5,21	3,57
Mínim	10,64	6,98	7,62	12,28
Màxim	28,30	23,25	27,58	26,05

Taula 3.8 Variació estacional de l'amplària mitjana de *Patella rustica* a la Punta des Sivinar. Unitats en mm.

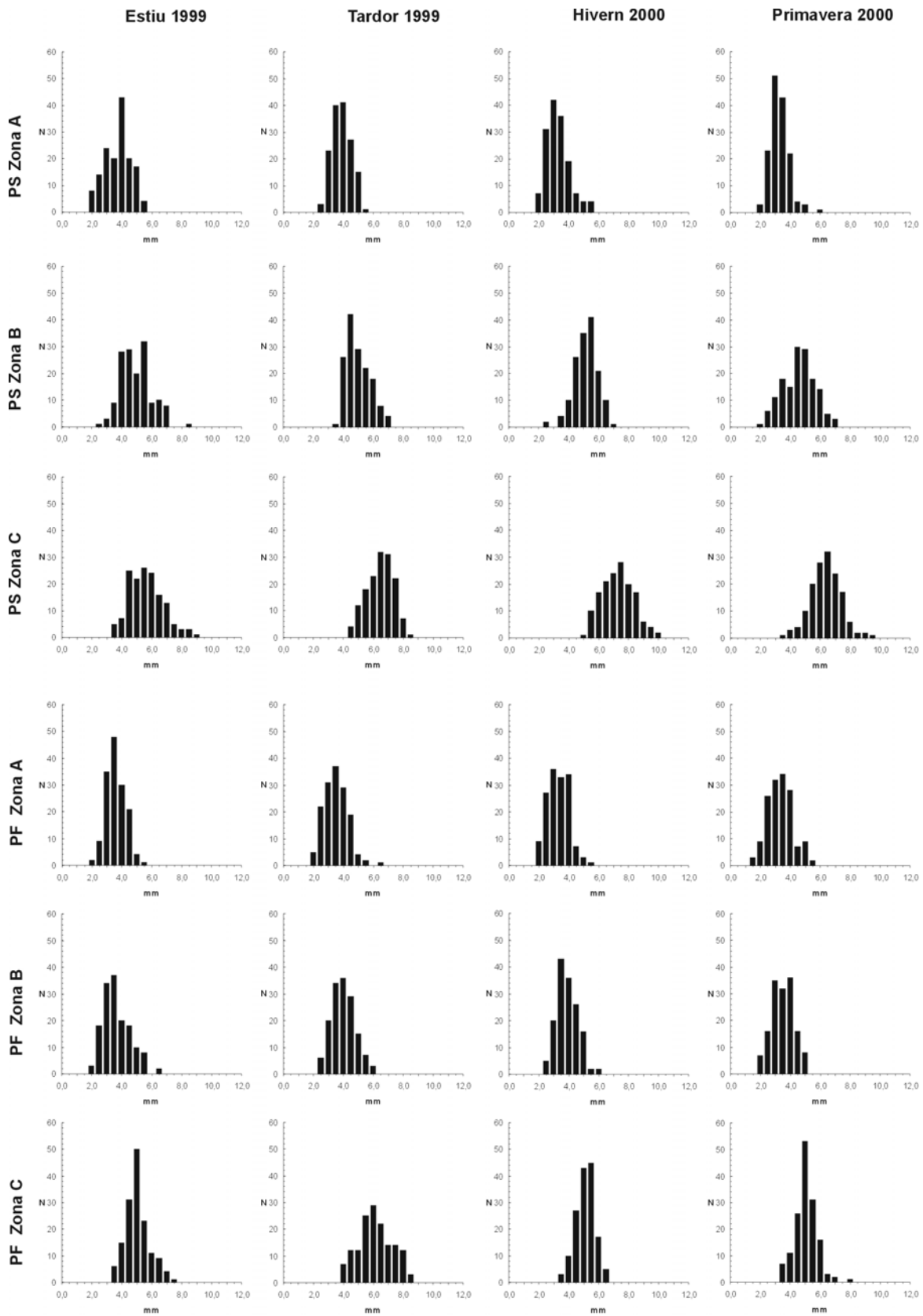


Fig. 3.8 Variació de l'alçària de *Melaraphe neritoides* a la Punta des Sivinar (PS) i a la Punta des Faralló (PF) d'acord amb l'estació i la zonació biològica. Observi's que hi ha un patró d'augment de les dimensions de *M. neritoides* amb la distància a la línia de costa, així com també lleugeres variacions de les dimensions d'eix major durant la primavera i l'estiu.

Perfil	Zona	Prim.	Estiu	Tardor	Hivern
1	A	593	995	795	552
	B	1867	1666	729	845
	C	540	783	734	489
2	A	485	289	154	108
	B	871	401	614	795
	C	205	313	635	446

Taula 3.9 Densitats mitjanes (ind·m⁻²) de *Melaraphe neritoides* a Cala Murada.

	Estiu 99	Tardor 99	Hivern 00	Prim. 00
N	93	75	72	71
μ	20,09	19,23	19,50	20,41
σ	4,21	5,64	4,72	3,55
Mínim	8,88	8,30	8,77	13,12
Màxim	28,41	30,10	28,14	28,55

Taula 3.10 Variació estacional de l'amplària mitjana de *Patella rustica* a Cala Murada. Unitats en mm.

esquistositat molt fina. Als sectors de la Punta des Faralló, exposats a l'onatge de nord, hi ha plataformes ben desenvolupades, mentre que a les exposicions arrecerades la façana del penya-segat cau dins la mar.

A la zona A, *Patella rustica* presenta densitats de 293 ind·m⁻², ballant els valors mitjans de densitat de 62 a 833 ind·m⁻². Els serpúlids són poc importants i *Monodonta turbinata* apareix puntualment i de forma dispersa. *Chthamallus stellatus* és molt abundant amb poc més de 3.000 ind·m⁻². *Melaraphe neritoides* arriba als 1.000 ind·m⁻² i es concentra a esquerdes i cocons.

La zona B està entapissada gairebé en la seva totalitat per *Chthamallus*, amb densitats segons l'estació de 2.000 a 3.000 ind·m⁻². *Melaraphe neritoides* apareix entre els esculls de crustacis, a esquerdes i alveolitzacions, tot sumant valors d'abundància mínims de 1.375 ind·m⁻² i màxims de 3.901 ind·m⁻².

A la zona C, de marcada component vertical, les densitats de *Melaraphe neritoides* oscil·len de 294 a 652 ind·m⁻² (Taula 3.11).

En aquells perfils de la Punta des Faralló sense desenvolupament de la plataforma litoral, no hi ha una transició clara de la zona blanca (A) a la més terrestre (C) i la vegetació de màquia és molt propera a la línia

Perfil	Zona	Prim.	Estiu	Tardor	Hivern
1	A	386	853	1542	400
	B	2015	2422	2055	1943
	C	652	226	505	348
2	A	54	83	401	247
	B	195	213	100	432
	C	386	853	1542	400

Taula 3.11 Densitats mitjanes (ind·m⁻²) de *Melaraphe neritoides* a la Punta des Faralló.

de costa. Les pegellides arriben als 640 ind·m⁻², *Monodonta* als 731 ind·m⁻² i, mentre els polioplacòfors són relativament abundants, entre 440 ind·m⁻² i 570 ind·m⁻², *Chthamallus* i *Melaraphe* són anecdòtics. Ja als sectors més terrestres, *Melaraphe neritoides* és l'únic macroorganisme que hi apareix, i ho fa de forma dispersa, perquè, tot i que la mitjana dels valors absoluts de densitat fluctuen entre 213 i 672 ind·m⁻², són habituals registres de 31 ind·m⁻².

La caracterització biomètrica dels organismes aboca diferències pel que fa a les dimensions mitjanes dels individus durant el mostratge. Així, per a *Patella rustica* els màxims es registren durant la primavera amb 18,53 mm (Taula 3.12), el mateix que passa amb *Melaraphe neritoides*. A més a més, s'hi registra un augment de dimensions de la zona A a la C. D'aquí que les dimensions mitjanes d'alçària dels gastròpodes sigui de 3,38 mm a la primera zona i de 5,25 mm a la segona (Fig. 3.8).

3.4.5

Factors que determinen la variabilitat de les densitats dels organismes en la zonació de la costa rocosa de Mallorca

La Cala d'en Guixar, arran de la seva variabilitat geomòrfica i del nombre de perfils mostrejats (Fig. 3.9), permet avaluar quins són els controls sobre la distribució i densitat dels organismes.

Juntament amb els valors de densitat, descrits a l'apartat anterior, s'ha confeccionat una base de dades on s'integren les variables de distància i l'alçària respecte de la mar i la forma del perfil per a cada recompte d'individu (Taula 3.13). El nivell marí és un zero relatiu, a partir de la presència del límit superior de la praderia de *Cystoceira sp.* sobre la plataforma litoral. No existeix una variació mareal significativa, tot i les fluctuacions de 0,30 m de caràcter baromètric que, en ocasions, poden arribar a 1 m (Basterretxea *et al.*, 2004; Tintoré *et al.*, 1990). Per al càlcul del paràmetre de forma, una vegada definit el zero biològic, s'ha integrat l'àrea acumulada a tot el perfil per sota el punt de mostratge. (Fig. 3.10). De més a més, s'hi afegixen variables de microtopografia indicades prèviament en el registre: superfícies subhoritzontals (BS), recomptes a parets verticals (VF), recomptes dins dels cocons (BP) i recomptes a les esquerdes (CV). Atès que s'han

	Estiu 99	Tardor 99	Hivern 00	Prim. 00
N	105	–	78	76
μ	16,96	–	17,38	20,40
σ	6,17	–	4,86	6,43
Mínim	4,01	–	8,08	10,64
Màxim	30,11	–	24,76	15,68

Taula 3.12 Variació estacional de l'amplària mitjana de *Patella rustica* a la Punta des Faralló. Unitats en mm.

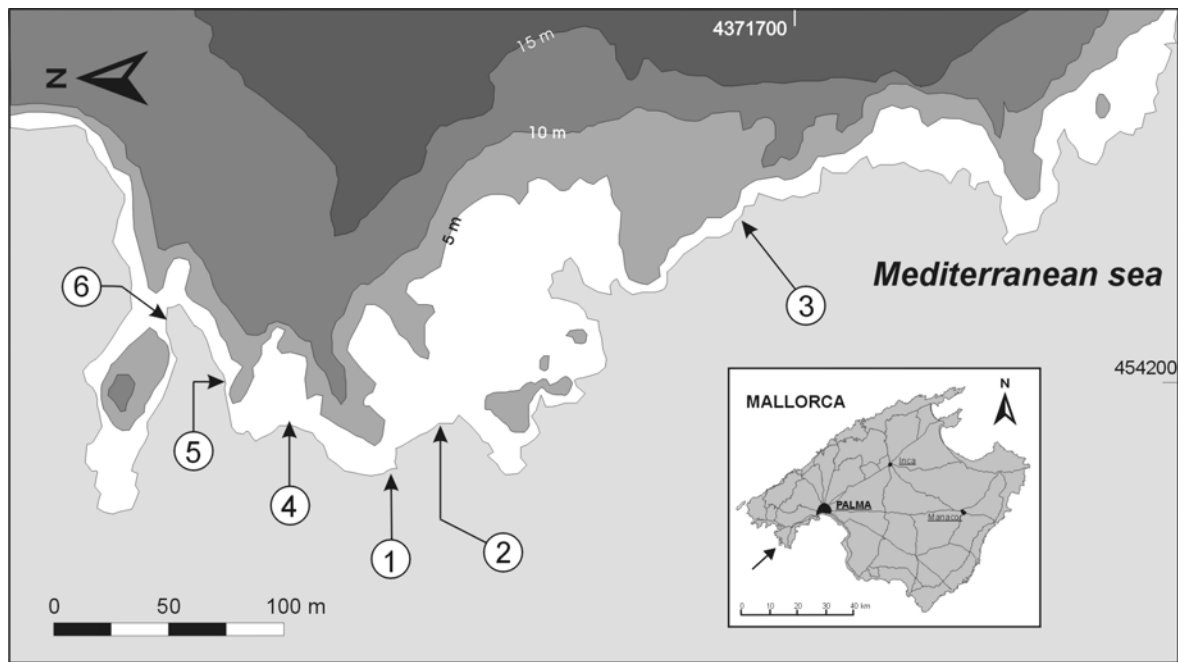


Fig. 3.9 Localització dels perfils on s'han dut a terme els recomptes biològics a la Cala d'en Guixar.

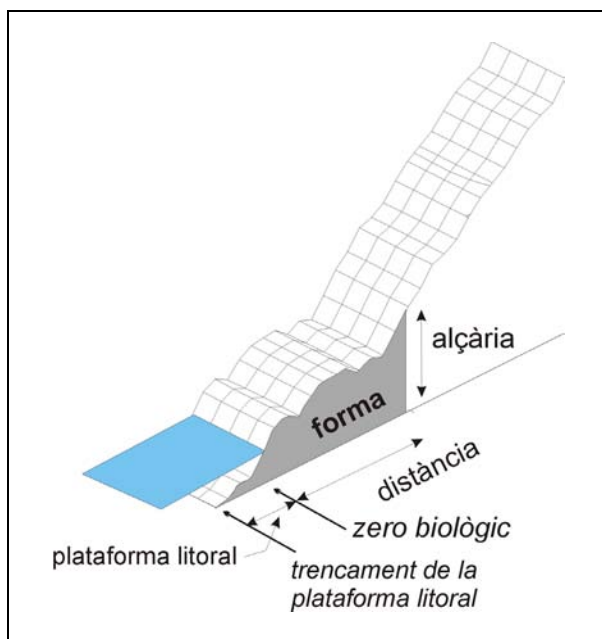


Fig. 3.10 Descripció de les variables espacials introduïdes a l'anàlisi. Alçària: alçària per sobre del zero biològic; Forma: àrea acumulada des del límit exterior de la plataforma litoral fins a la posició del recompte.

mostrejat els perfils durant 2 anys (de la primavera de 1999 a la tardor de 2000), també s'hi poden introduir les variables d'estació per tal d'avaluar el paper de les diferències en la distribució dels organismes. Els valors de densitat de cada organisme s'han transformat en valors de biomassa (pes sec en grams), a partir de les anàlisis biomètriques de les mostres recollides a cada una de les zones. El grau d'exposició

respecte de l'onatge no és senzill de definir ni de quantificar (Pannacciulli i Rellini, 2000). Tot i així, s'ha utilitzat una classificació categòrica per la qual els perfils 1, 2, 3 i 4 estan més exposats que no els perfils 5 i 6 (Fig. 3.9). Els primers perfils es localitzen a petites entrades, protegits de les direccions dominants d'onatge de SW, mentre que els segons estan localitzats a caps o a segments lineals del litoral encarats a la direcció dominant de l'onatge.

Una de les altres variables considerades és la litologia del substrat. Els perfils 4 i 6 es corresponen amb un rocam d'eolianites carbonatades poc cimentades, amb una porositat interpartícula elevada. La resta de transectes discorren sobre bretxes dolomítiques del Retià dures i ben cimentades.

Finalment, s'ha introduït una variable relacionada amb el grau d'humectació de la costa. Per aquest motiu, s'ha calculat la mitjana de l'altura d'ona dels quinze dies anteriors al mostatge biològic, a partir de les dades d'altura d'ona en mar profunda dels models WANA més propers a la zona d'estudi. Tot i que la correlació de l'onatge a mar oberta amb els valors predictius del model matemàtic és bona (Günther *et al.*, 1991), cal tenir en compte que el trencament a la costa pot abocar valors d'altura d'ona força diferents respecte a les previsions.

3.4.5.1 Anàlisi estadística multivariant

A priori, l'abundància de les espècies sembla presentar una distribució unimodal al llarg del perfil. Així doncs, l'aproximació analítica pot desenvolupar-

Descriptor
<p>Matriu d'observacions:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Biomassa de cada organisme a cada recompte i per estació (g·m⁻²) (4 espècies, 4 estacions = 16 variables). <p>Matriu de variables explicatives:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Distància al zero relatiu de cada recompte (m) - Alçària de cada recompte respecte el zero relatiu (m) - Àrea del perfil acumulat respecte el zero relatiu (m²) - Micromorfologia on s'ha dut a terme el recompte (categòrica, 4 variables) - Exposició (categòrica, 2 variables) - Litologia (categòrica, 2 variables) - Perfil (categòrica, 6 variables) - Alçària mitjana de les onades dels 15 dies anteriors al mostratge (m)

Taula 3.13 Descripció de les variables utilitzades per a l'anàlisi estadística dels factors que determinen la variabilitat de la distribució dels organismes en la zonació de la costa de Mallorca.

se des de l'anàlisi canònica de correspondències, CCA (Legendre i Legendre, 1998). La variació espacial de les espècies s'ha modelat a partir de la determinació, mitjançant la CCA, dels eixos resultants de la combinació significativa de les variables ambientals. La CCA avalua conjuntament el pes de cada variable ambiental i n'ordena les relacions amb les variables de cada espècie, la presència d'altres espècies i el perfil, així com també en redueix les dimensions espacials (ter Braak i Smilauer, 1998).

El resultat de l'ordenació de les variables pot representar-se mitjançant gràfics bidimensionals o tridimensionals, tot posant de manifest les relacions entre espècies, mostres i variables ambientals. S'han utilitzat els gràfics bidimensionals, de manera que les variables quantitatives es presenten en forma de fletxa, indicant la direcció i magnitud de la variació. El pes de cada una de les variables sobre el nou espai de coordenades explicatives, l'indica la posició de les variables respecte de les fletxes (ter Braak i Smilauer, 1998).

S'hi han desenvolupat tres tipus d'anàlisi estadística. Primer, s'ha avaluat la variabilitat *intraprofil* de les densitats dels organismes per a cada recompte i per a cada transecte. Dels trenta-sis transectes (6 perfils caracteritzats 6 cops), se n'han codificat els recomptes com a variables categòriques (1 quan el recompte quantifica la presència d'algun organisme i 0 quan no ho fa) i se n'ha avaluat la covariància a una CCA parcial. Les anàlisis de correspondència canònica parcials permeten organitzar la matriu de biomassa d'espècies, així com la combinació lineal d'un altre conjunt de variables explicatives de les quals també s'ha considerat l'autocorrelació. Dit d'una altra manera més planera, primer s'avaluen quines relacions existeixen entre la presència dels organismes o la seva absència al llarg del perfil, i només respecte d'aquests, i després s'avalua quina és l'autocorrelació

de les variables ambientals (p.e. humectació, forma, distància, micromorfologia) en el propi perfil. Finalment, es contraposen aquests dos conjunts de dades. Cal posar de manifest que no es dona una autocorrelació espacial en els valors de densitat de les espècies, tot i les distàncies relativament curtes entre els recomptes (el test I de Moran no és significatiu en cap dels intervals de distància considerats i els variogrames sols reflecteixen un efecte atzarós en la seva distribució).

La segona de les anàlisis estadístiques considera les variacions entre perfils, utilitzant el mateix model de l'anàlisi anterior, encara que canviant el paper de la covariància de les variables i les variables explicatives. Així doncs, s'han mesurat els paral·lelismes entre perfils a partir dels efectes de les variables espacials (p.e. distància, forma, etc.). Aquestes característiques s'han redefinit a partir de les puntuacions de cada transecte a l'espai canònic. Del conjunt de puntuacions, només 36 del primer eix canònic s'han utilitzat per avaluar el paper de la variació estacional, l'exposició, la litologia i la humectació, a partir d'anàlisis normalitzades de la variància, ANOVA (Grafen i Hails, 2002). La resta de puntuacions dels altres eixos canònics no han estat significatives.

Finalment, el tercer conjunt d'anàlisi s'ha dissenyat per tal d'avaluar el percentatge de variació de les espècies en funció de les variables ambientals. Una vegada més s'ha aplicat l'anàlisi de correspondències canòniques parcial. En els casos de colinealitat (p.e. més de dues variables significatives però amb una correlació elevada), se n'ha eliminat la de menor poder d'explicació. Cinc subconjunts de dades n'integren el model: (a) variables relacionades amb la distribució en alçada, (b) diferències entre transectes (aquestes inclouen els efectes de l'exposició i la litologia), (c) diferències entre estacions, (d) efecte de la microtopografia, i (e) efecte de l'onatge incident. Per a la descomposició de la variància s'han seguit els criteris de Legendre i Legendre (1998) i ter Braak i Smilauer (1998).

3.4.5.2 Resultats

Del total de recomptes, se'n genera una base de dades de 34.859 individus repartits en 1.895 mostres. L'anàlisi estadística s'ha restringit a les espècies més abundants, que són *Melaraphe neritoides*, *Patella rustica*, *Monodonta turbinata* i *Lepidochitona corrugata*.

Pel que fa a la variabilitat dins del mateix perfil, l'anàlisi canònica de correspondències, com a covariables (considerant els 36 transectes, 6 transectes durant 6 estacions), aboca que dues de les variables relacionades amb les components verticals

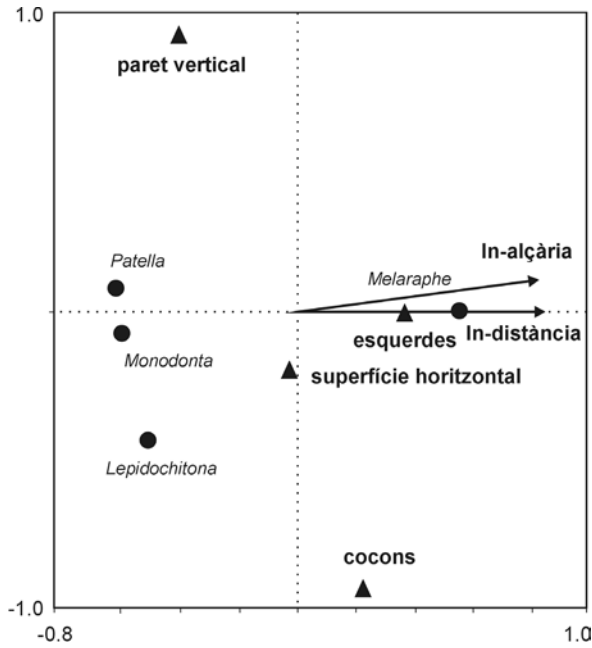


Fig. 3.11 Puntuacions de l'anàlisi de correspondències canòniques en funció del gradient vertical i la microtopografia (els transectes s'han tractat com a covariables). L'escala dels eixos fa referència als paràmetres de distància intraespècies.

del perfil (distància i alçària respecte del zero biològic) i la microtopografia dels perfils (superfícies planes i verticals, esquerdes i cocons) expliquen bona part de la variació de l'abundància dels organismes (42,7%, $P < 0.001$). Tot i així, la importància relativa del gradient vertical, per ell mateix, és major que no pas la magnitud de la microtopografia. D'aquest 42,7%, un 83% ($P < 0.001$) es correspon amb el gradient vertical i només un 3% ($P > 0.001$) amb la

forma de la superfície. El gràfic resultant de la CCA (Fig. 3.11) posa en evidència el gradient vertical, perquè les posicions més properes a la mar exerceixen un control sobre *Patella*, *Monodonta* i *Lepidochitona* i les més allunyades sobre *Melaraphe*. Així mateix, també destaca el pes de *Patella* a les parets verticals, el de *Melaraphe* a les esquerdes i el de *Lepidochitona* als cocons, com a localitzacions més probables.

La variabilitat entre transectes s'ha avaluat a partir d'una matriu d'abundància de les espècies i d'una combinació lineal de 36 variables categòriques que representen els perfils, l'estació i d'altres variables ambientals. L'anàlisi canònica de correspondències ha permès determinar el pes de cada una de les variables categòriques a l'espai canònic (Fig. 3.12). Així doncs, per a les variables contrastades, el primer eix sembla que és significatiu (21,2% de tota la variabilitat, quan tots els eixos canònics n'expliquen el 76,5%). Les puntuacions de les 36 variables s'han utilitzat per assajar l'existència de diferències entre transectes (mitjançant una ANOVA de dues cues). Les variables ambientals considerades són les estacions (6 categories) i els transectes (altres 6 categories).

	SQ	gl	F-ratio
Transecte (1 – 6)	8,69	5	34,68
Estació	0,44	5	1,76 (N.S.)
Error	1,25	25	

Taula 3.14 Resultats de l'anàlisi de la variància (ANOVA) per a les 36 puntuacions (sis transectes respecte de sis estacions) sobre el primer eix de l'espai canònic. Aquestes puntuacions s'empren com a estimes de les característiques de cada transecte perquè la resta de variables presenten colinealitat. SQ: suma de quadrats, gl: graus de lliberats, F-ratio: estadístic de contrast..

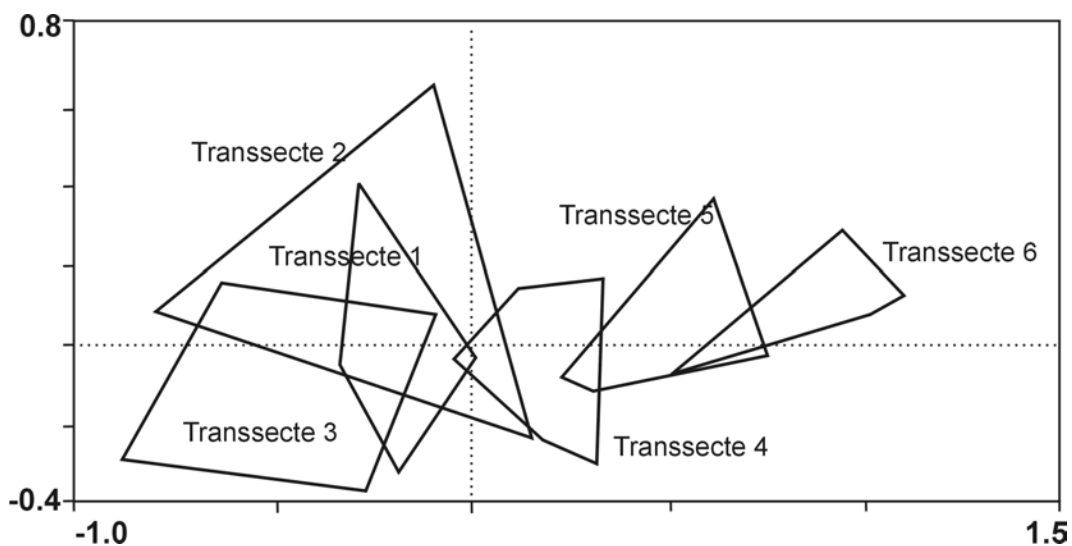


Fig. 3.12 Projecció de les 36 variables categòriques per a cada transecte i estació sobre els eixos canònics. La posició de les variables ve definida com el centroid de totes les puntuacions de les mostres per a un transecte en particular. El polígon delimita, per a cada perfil, les mostres de cada estació.

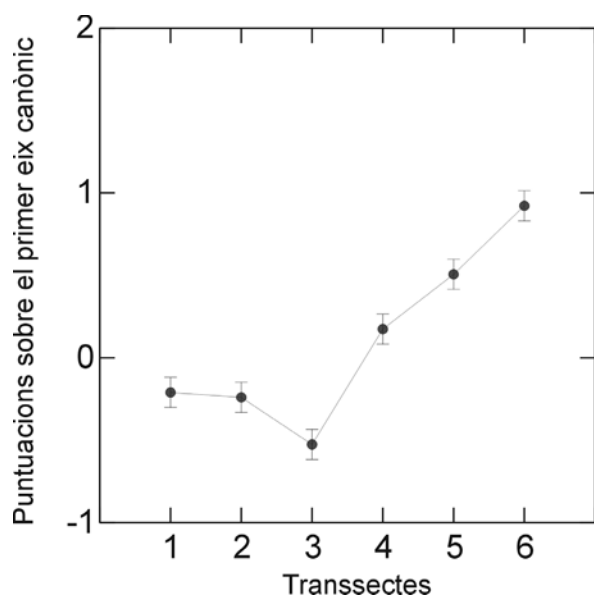


Fig. 3.13 Mitjanes de les puntuacions i intervals de confiança per a cada transsecte. Les puntuacions de cada transsecte i estació es corresponen als valors assignats per al primer eix de l'anàlisi canònica de correspondències parcial.

Tot i que la diferència entre transsectes sembla important (Fig. 3.13), no hi ha una evidència significativa entre les variacions d'abundància i les estacions (Taula 3.14). A partir de les matrius de les sumes al quadrat de l'ANOVA, s'ha determinat l'efecte de l'exposició i de la litologia en la semblança entre perfils, pel que fa a la colonització biològica. La primera comparació (transsecte 1 a 4 vs. 5 i 6) revela diferències significatives entre perfils exposats i perfils arcerats ($F_{(1,25)} = 133,4; P < 0,001$). Els perfils exposats estan relacionats amb majors puntuacions al primer eix canònic (Fig. 3.13), a la vegada que també estan relacionats amb la major presència de *Patella*, *Monodonta* i *Lepidochytone*. La comparació relativa a la litologia (transsectes 1, 2, 3, 4 i 5 respecte de 4 i 6) també constata diferències significatives ($F_{(1,25)} = 70,6; P < 0,001$) associades al tipus de substrat (bretxes dolomítiques ben

	traça	% variància
Totes les variables	0.801	48.4
Gradient vertical	0.395	31.6
Intertranssectes	0.284	24.9
Estacions	0.058	6.3
Microtopografia	0.040	4.5
Onatge	0.013	1.6
Total	1.656	

Taula 3.15 Explicació de la variància en la distribució de la biomassa al perfil per als cinc conjunts de variables ambientals. Les variables ambientals s'han seleccionat a partir dels resultats de l'anàlisi canònica de correspondències parcials. Observi's com la suma total de la variància de les variables explicatives supera el total de la variància explicada, ja que també incorpora la quantificació de la variància entre conjunts.

cimentades vs. eolianites carbonatades poc cimentades).

Pel que toca a la variabilitat en conjunt, integrant els factors considerats per avaluar les diferències als mateixos perfils i entre perfils, s'han seleccionat les següents variables: (a) la component vertical del perfil (ln de la distància i de la forma), (b) cada un dels sis transsectes com a variable categòrica, (c) els mostresos o les estacions, també com a variable categòrica, (d) la tipologia de microtopografia associada als recomptes (quatre variables categòriques) i (e) l'alçària mitjana de l'onatge dels quinze dies anteriors al mostratge. Així doncs, el primer factor per a l'explicació de les diferències en el grau de colonització és el gradient vertical, la forma del perfil, amb un 31,6% de la variància (Taula 3.15). Les diferències entre perfils expliquen el 24,9%. Sota aquest epígraf, almenys, s'integren les diferències relatives a l'exposició i la litologia. La resta de variables només expliquen una petita part de la variància. L'estacionalitat pot justificar un 6,3% de la variància, la micromorfologia un 4,5% i l'onatge un 1,6%.

Si es cartografia la puntuació de la projecció dels 1.895 recomptes sobre el primer eix canònic a cada perfil (el que representa un 42,4% del total de la variabilitat i el 90% de la variabilitat explicada), podem comparar de forma gràfica els perfils (Fig. 3.14). D'una banda, es posa de manifest el gradient vertical de la distribució de la biomassa i, per una altra, les diferències entre perfils exposats i arcerats. Els perfils exposats (1 a 4) presenten una puntuació major a la base respecte dels arcerats, fet que coincideix amb una major presència i abundància de *Patella*, *Monodonta* i *Lepidochytone*, que és especialment significativa als perfils de pendent més suau.

3.4.5.3 Discussió

De l'anàlisi estadística, se'n desprèn l'existència d'una variabilitat important en la distribució de les espècies en els perfils. Existeix un efecte significatiu del conjunt de variables ambientals sobre la distribució de les espècies, tot i que només pot justificar una part moderada de la variabilitat (48%). No obstant això, les explicacions amb nivells baixos o moderats de les distribucions dels organismes són freqüents arran dels molts factors que les determinen (ter Braak i Smilauer, 1998), tot i que això no implica que no hagin de ser considerades amb certa prudència i a títol informatiu.

Aparentment, punts de la superfície òptims per a la colonització biològica registren pocs individus, tot i que altres registres propers suposen la presència de centenars d'individus. Aquest fet és especialment

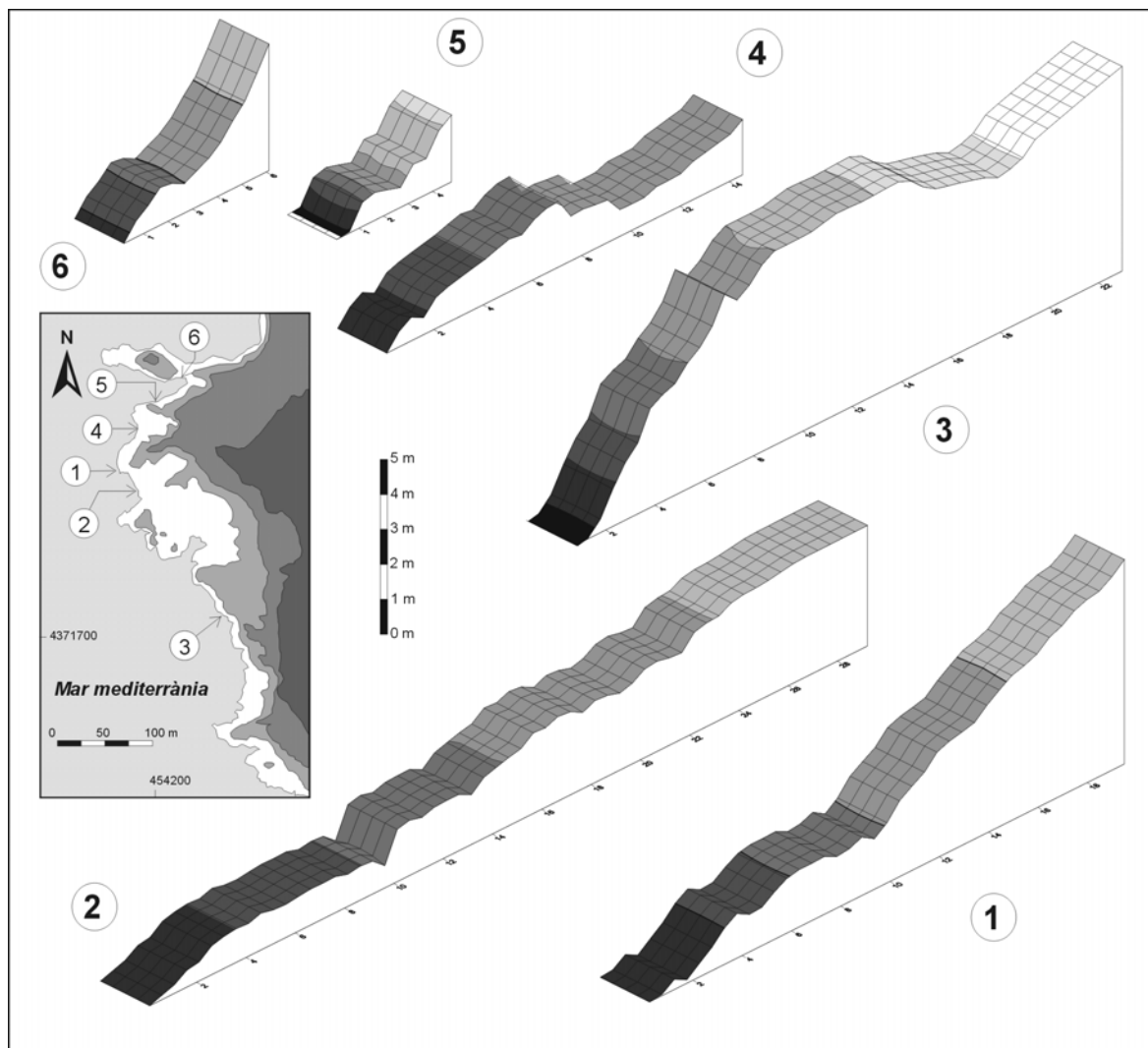


Fig. 3.14 Projectió sobre els perfils estudiats de les puntuacions de les variables sobre el primer eix canònic. El gràfic resultant és un mapa d'isolinies on la component biològica està normalitzada i permet la comparació de la colonització biològica entre perfils. De forma gràfica s'aprecia com la forma del perfil en condiciona l'abast de les zones. Així, la major biomassa, relacionada amb l'abundància d'organismes com *Patella* i *Monodonta*, és major als perfils de pendent suau que no als de pendent marcat.

notable quan s'hi introdueixen, a l'anàlisi, les categories de microtopografia. La distribució a mode de pegats dels organismes pot ser explicada per efecte de la depredació sobre els organismes (ocells marins, murícids i crancs), o en relació a la distribució de la seva font d'alimentació. En aquest sentit Vidal *et al.* (2001a) han estudiat la distribució de pigments dels cianòfits a diferents perfils de la costa i en constaten la distribució a mode de taques o pegats. Si s'assumeix que aquesta distribució, no continua i dispersa, no està esbiaixada respecte de les variables estudiades, llavors la importància de les variables ambientals als perfils de Cala d'en Guixar és clara. El principal control sobre la distribució dels organismes és el gradient, la forma de la costa, fet que explica l'estructura de la comunitat amb un patró general de zonació on *Patella*, *Monodonta* i *Lepidochitona* són més abundants arran de mar i *Melaraphe* a les parts altes del perfil.

El gradient vertical està relacionat alhora amb el gradient d'humectació, que es posa de manifest pels patrons de diferència entre transectes. Els perfils exposats tendeixen a presentar un nombre major d'espècies i una colonització més important a les zones baixes de perfil. Als perfils més arrecerats, les densitats majors i el factor de biomassa s'accentuen en els segments més terrestres.

La litologia sembla jugar un paper secundari, però important, en la zonació del perfil de costa, tot i que les altes puntuacions del perfil 4 puguin estar associades a la combinació d'un transecte exposat i una roca porosa. Aquest fet facilitaria el desenvolupament d'un biofilm, la magnitud del qual explicaria la importància de la presència de *Patella* i *Melaraphe* respecte dels altres perfils.

Així doncs, *Patella sp.*, *Lepidochitona corrugata* i

Monodonta turbinata colonitzaran els hàbitats amb major grau d'humectació, mentre que *Melaraphe neritoides* serà més abundant als ambients més secs dels perfils. Per tant, els factors biòtics i abiòtics donaran força o actuaran sobre el mateix patró, maximitzant la presència dels agents erosius en perfils exposats de litologies poroses, en els sectors més propers al nivell mitjà de la mar. Dit d'una altra manera, existeix un control litològic, estructural i fins i tot evolutiu de la costa rocosa, sobre la distribució dels organismes, perquè és la forma del perfil la que determina quin és el gradient d'humectació i, a partir d'aquí, la concentració o la dispersió dels dominis biològics i la seva possible acció bioerosiva.

3.4.6

Taxes i capacitat bioerosiva: resultats i discussió

Atès que *Patella rustica* i *Melaraphe neritoides* són els organismes amb major presència a les costes rocoses de Mallorca, se n'ha avaluat la capacitat bioerosiva, entesa com la quantitat de roca que graten i s'engassen els organismes brostejadors a la recerca d'aliment ($\text{g}\cdot\text{ind}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$). Si aquest paràmetre es relaciona amb la densitat de la roca ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) i amb la població mitjana dels organismes a cada zona ($\text{ind}\cdot\text{a}^{-1}$), d'acord amb l'equació 1 (pàg. 75), llavors es pot derivar una taxa de rebaixament ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) de la superfície rocosa. De més a més, el contrast entre la capacitat erosiva i la taxa d'erosió permet avaluar quin control juguen en les taxes de bioerosió la litologia, les característiques biomètriques de les poblacions dels organismes i la quantitat d'organismes que hi ha a les zones en què s'ha dividit la costa.

Així doncs, per a *Patella rustica*, la capacitat erosiva fluctua entre els $7,81 \text{ g}\cdot\text{ind}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ de les mostres de la Punta des Faralló i els $11,41 \text{ g}\cdot\text{ind}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ de Cala Murada (Taula 3.16). La capacitat erosiva de les

pegellides procedents de les localitats amb substrats de calcarenites miocenes són majors que no pas les de les localitats amb dolomies i calcàries ben cimentades i plegades. En aquest sentit, els valors per a la Punta des Sivinar, s'Alavern i Cala Murada, queden dins la forquilla dels $8,28$ i $11,41 \text{ g}\cdot\text{ind}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, mentre que la Punta des Faralló i la Cala d'en Guixar tenen com a valors respectius de capacitat erosiva dels organismes $8,25 \text{ g}\cdot\text{ind}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ i $7,81 \text{ g}\cdot\text{ind}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. L'aparent control litològic es difumina quan es consideren les taxes d'erosió a cada una de les zones (Taula 3.16). Així, perfils com els de la Cala d'en Guixar, tallats a les bretxes juràsiques, i els de s'Alavern, on afloren calcarenites esculloses poc cimentades, aboquen taxes d'erosió semblants al voltant de $0,34$ o $0,36 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. També sobta constatar que no hi ha un patró clar entre els perfils arrecerats i els exposats. D'aquesta manera, no hi ha diferència entre les taxes d'erosió dels perfils de Cala d'en Guixar i sí que és ben marcada la diferència entre el perfil arrecerat i l'exposat de la Punta des Faralló, amb taxes $0,482 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ i $1,023 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, respectivament, per a *Patella rustica*.

Per tal d'avaluar si les diferències entre les capacitats erosives i les taxes d'erosió són significatives o no ho són, i per extensió el control de la població i/o el rocam sobre la taxa de bioerosió de *Patella*, s'han desenvolupat dos tests estadístics no paramètrics de contrast.

Primer, tant per a les taxes de capacitat erosiva, com per a les taxes d'erosió, s'ha desenvolupat el test de Kruskal-Wallis. Aquest és l'equivalent no-paramètric de l'anàlisi normalitzada de la variància d'una coa, tot i que opera per rangs. La seva finalitat és avaluar si un conjunt de mostres independents prové d'una mateixa població. Ho fa establint les probabilitats per les quals la distància de cada grup de dades, respecte la mitjana del conjunt de dades, sigui prou gran com per no haver més variació a la mostra que en el conjunt de les mostres.

Perfil	Zona	δ roca	Capacitat bioerosiva ($\text{g}\cdot\text{ind}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)					Taxa mitjana de bioerosió ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)					
			Prim	Est	Tard	Hiv	Total	Prim	Est	Tard	Hiv	Total	
CG	1	A	2,60	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	0,500	0,200	0,288	0,396	0,346
	2	A	2,60	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	0,284	0,656	0,328	0,112	0,345
	3	A	2,60	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	0,420	0,316	0,272	0,284	0,324
	4	A	2,06	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	1,740	0,992	0,504	0,752	0,997
	5	A	2,60	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	1,628	0,280	0,172	0,216	0,730
	6	A	2,06	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	0,888	0,076	0,216	0,272	0,363
SA	1	A	2,40	1,398	1,170	1,905	1,414	8,287	0,428	0,296	0,400	0,352	0,369
PS	1	A	2,45	2,771	1,704	1,345	1,706	9,976	6,240	1,164	0,668	0,312	2,095
CM	1	A	2,12	2,169	1,753	2,200	3,171	11,413	0,656	0,628	0,640	0,700	0,656
	2	A	2,12	2,169	1,753	2,200	3,171	11,413	0,712	0,716	0,656	1,172	0,814
PF	1	A	2,35	1,509	1,785	–	2,166	7,810	0,752	0,476	–	0,696	0,482
	2	A	2,35	1,509	1,785	–	2,166	7,810	1,652	1,920	–	0,520	1,023

Taula 3.16 Capacitat bioerosiva i taxes d'erosió de *Patella rustica* a les costes rocoses carbonatades de Mallorca.

	Cala d'en Guixar	Cala Murada	Punta des Faralló	Punta des Sivinar
Cala Murada	U = 0; Z = -4,208 P < 0,000	–		
Punta des Faralló	U = 22; Z = -2,57 P < 0,009	U = 8; Z = -2,082 P < 0,043	–	
Punta des Sivinar	U = 11; Z = -2,436 P < 0,014	U = 6; Z = -1,710 P < 0,087	U = 10,5; Z = -0,430 P < 0,762	–
s'Alavern	U = 45; Z = -0,070 P < 0,974	U = 2; Z = -2,396 P < 0,016	U = 4; Z = -1,721 P < 0,114	U = 5; Z = -0,866 P < 0,486

Taula 3.17 Paràmetres del test de Mann-Whitney per a la capacitat bioerosiva de *Patella rustica*.

La segona aproximació consisteix a aplicar el test no paramètric de Mann-Whitney, la capacitat del qual és la mateixa que el de l'anterior, tot i que dissenyat per a dades aparellades. Per tal de treballar amb el mínim de dades necessàries per a l'execució dels tests, en lloc d'emprar les taxes anuals, s'han considerat les estacionals. Així, hi ha un mínim de quatre dades per a cada localitat.

La prova de Kruskal-Wallis, tant per a la capacitat erosiva ($\chi^2 = 23,99$; gl = 4; $P < 0,001$), com per a les taxes d'erosió ($\chi^2 = 12,705$; gl = 4; $P < 0,013$), permet rebutjar-ne la hipòtesi nul·la. Per tant, les mostres provenen de poblacions diferents o, dit d'una altra manera, les capacitats erosives i les taxes d'erosió són significativament diferents. Si s'avaluen les semblances estadístiques, parell a parell, de les localitats (Taula 3.17), pel que fa a la capacitat erosiva, hi ha zones d'estudi que no són significativament diferents.

És el cas de la Cala d'en Guixar i s'Alavern, ja que els rangs de les seves capacitats erosives estacionals se solapen. En menor mesura, existeix una semblança a considerar entre la Punta des Faralló i la Punta des Sivinar.

Pel que toca a les taxes d'erosió, una consideració prèvia és recordar que en el seu càlcul s'integren les densitats mitjanes dels individus a la zona biològica corresponent. En el cas de *Patella rustica*, a la zona A. Per tant, tot i que es constata que en el conjunt no hi ha semblances significatives, sí que podem considerar que se solapen els rangs de les taxes d'erosió de la Punta des Faralló i la Punta des Sivinar (Taula 3.18).

Dues litologies tan diferenciades com les calcàries

plegades mesozoiques de la Punta des Faralló i les calcarenites miocenes de la Punta des Sivinar, mostren, d'una banda, capacitats erosives i taxes d'erosió estadísticament semblants pel que fa a *Patella rustica*. El mateix es podria extrapolar per a la Cala d'en Guixar i s'Alavern. Aquest fet implica que, amb independència de les propietats de la roca pel que toca a la capacitat erosiva (Taula 3.18), els individus de *P. rustica* tenen la mateixa eficiència en el desmanegament de la roca.

Descartada una diferència pel que fa a l'edat i l'estructura de les poblacions, ja que ambdues localitats presenten mitjanes d'eix màxim de l'organisme al voltant de 19 mm i desviacions típiques semblants, una possible explicació a aquestes semblances seria la resposta dels individus a les facilitats o a l'abundància relativa del volum dels seus nutrients. Si la colonització de cianòfits o el biofilm és prou important, llavors l'esforç del brosteig es redueix amb independència del control que pugui exercir el rocam. Si, en canvi, el biofilm és menys abundant, llavors les pegellides han de dur a terme una acció més eficaç i més agressiva per alimentar-se.

Llavors sí, que quedaria reflectit el paper de la roca com a control de la capacitat de desmanegament de la superfície rocosa. La semblança de les taxes d'erosió entre localitats de substrat diferenciat, una vegada feta la consideració a l'entorn de la capacitat erosiva, és senzilla de justificar perquè depèn del factor poblacional que s'ha aplicat a l'equació per a convertir la capacitat erosiva en valors de denudació del rocam

Així doncs, sumàriament, per a *Patella*, es pot afirmar que, tot i que les característiques litològiques (duresa, porositat, alteració) són importants, les taxes de bioerosió depenen d'altres variables de caràcter més

	Cala d'en Guixar	Cala Murada	Punta des Faralló	Punta des Sivinar
Cala Murada	U = 39; Z = -2,39 P < 0,016	–		
Punta des Faralló	U = 28,5; Z = -2,18 P < 0,026	U = 19,5; Z = -0,646 P < 0,573	–	
Punta des Sivinar	U = 19; Z = -1,843 P < 0,069	U = 13; Z = -0,510 P < 0,683	U = 10,5; Z = -0,426 P < 0,762	–
s'Alavern	U = 37; Z = -0,614 P < 0,576	U = 10; Z = -2,72 P < 0,004	U = 10; Z = -2,558 P < 0,010	U = 3; Z = -1,443 P < 0,149

Taula 3.18 Paràmetres del test de Mann-Whitney per a les taxes d'erosió de *Patella rustica*.

Perfil	Zona	Densitat roca (g·cm ⁻³)	RESIDU LÍTIC PÈL-LETS (g·ind ⁻¹ ·estació ⁻¹)				Total (g·ind ⁻¹ ·a ⁻¹)	TAXA MITJANA D'EROSIÓ (mm·a ⁻¹)				Taxa anual
			Primavera	Estiu	Tardor	Hivern		Primavera	Estiu	Tardor	Hivern	
Cala d'En Guixar												
1	A	2,60	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0076	0,0020	0,0200	0,0036	0,0083
	B	2,60	0,007	0,016	0,008	0,003	0,034	0,0060	0,0144	0,0076	0,0028	0,0077
	C	2,60	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,0072	0,0012	0,0012	0,0024	0,0030
2	A	2,60	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0048	0,0020	0,0116	0,0028	0,0053
	B	2,60	0,007	0,016	0,008	0,003	0,034	0,0080	0,0160	0,0124	0,0040	0,0100
	C	2,60	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,1200	0,0020	0,0032	0,0012	0,0047
3	A	2,60	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0016	0,0032	0,0120	0,0028	0,0048
	B	2,60	0,007	0,016	0,008	0,003	0,034	0,0044	0,0060	0,0124	0,0024	0,0062
	C	2,60	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,0068	0,0004	0,0020	0,0004	0,0025
4	A	2,06	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0024	0,0048	0,1880	0,0032	0,0073
	B	2,06	0,007	0,016	0,008	0,003	0,034	0,0068	0,0596	0,0164	0,0096	0,0231
	C	2,06	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,0356	0,0108	0,0064	0,0044	0,0143
5	A	2,60	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0068	0,0092	0,0136	0,0028	0,0081
	B	2,60	0,070	0,016	0,008	0,003	0,097	0,0164	0,0132	0,0160	0,0024	0,0120
	C	2,60	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,0180	0,0008	0,0024	0,0008	0,0056
6	A	2,06	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0064	0,0040	0,0068	0,0164	0,0083
	B	2,06	7,000	0,016	0,008	0,003	7,027	0,0404	0,0444	0,0356	0,0060	0,0317
	C	2,06	0,022	0,040	0,005	0,030	0,097	0,0356	0,0056	0,0076	0,0064	0,0139
Cala Murada												
1	A	2,12	0,006	0,000	0,003	0,004	0,013	0,0060	0,0000	0,0036	0,0040	0,0035
	B	2,12	0,003	0,003	0,004	0,004	0,014	0,0104	0,0080	0,0056	0,0064	0,0076
	C	2,12	0,050	0,002	0,005	0,004	0,061	0,0044	0,0024	0,0068	0,0040	0,0045
2	A	2,12	0,006	0,000	0,003	0,004	0,013	0,0052	0,0000	0,0008	0,0008	0,0016
	B	2,12	0,003	0,003	0,004	0,004	0,014	0,0048	0,0020	0,0048	0,0060	0,0044
	C	2,12	0,005	0,002	0,005	0,004	0,061	0,0016	0,0012	0,0060	0,0036	0,0031
Punta des Sivinar												
1	A	2,45	0,016	0,004	0,002	0,003	0,025	0,0348	0,0032	0,0012	0,0012	0,0101
	B	2,45	0,004	0,002	0,008	0,002	0,016	0,0048	0,0016	0,0048	0,0008	0,0030
	C	2,45	0,028	0,002	0,008	0,003	0,041	0,0160	0,0008	0,0028	0,0008	0,5100
Punta des Faralló												
1	A	2,35	0,004	0,005	0,003	0,004	0,016	0,0028	0,0072	0,0084	0,0240	0,0052
	B	2,35	0,006	0,019	0,004	0,070	0,099	0,0212	0,0792	0,0140	0,0224	0,0342
	C	2,35	0,003	0,008	0,008	0,006	0,025	0,0036	0,0032	0,0068	0,0036	0,0043
2	A	2,35	0,006	0,019	0,004	0,007	0,036	0,0004	0,0028	0,0028	0,0028	0,0022
	B	2,35	0,003	0,008	0,008	0,006	0,025	0,0012	0,0028	0,0012	0,0044	0,0024
S'Alavern												
1	A	2,40	0,003	0,030	0,002	0,003	0,038	0,0008	0,0008	0,0004	0,0008	0,0008
	B	2,40	0,004	0,003	0,003	0,004	0,014	0,0116	0,0076	0,0076	0,0076	0,0085
	C	2,40	0,003	0,001	0,003	0,067	0,074	0,0016	0,0004	0,0020	0,0388	0,0106

Taula 3.19 Capacitat bioerosiva i taxes d'erosió de *Melaraphe neritoides* a les costes rocoses de Mallorca.

biològic i ecològic.

Pel que fa a *Melaraphe neritoides*, la seva capacitat erosiva té valors mínims de 0,013 g·ind⁻¹·a⁻¹ a màxims de 0,099 g·ind⁻¹·a⁻¹. A grans trets, no hi ha excessives diferències entre la capacitat erosiva de *M. neritoides* a les zones A i B, però sí que canvia la magnitud de la capacitat a la zona C (Taula 3.19). Tampoc no s'aprecia una separació clara entre la capacitat erosiva en substrats més cimentats i els menys cimentats.

El major nombre de dades per a *Melaraphe* ens permet desenvolupar les anàlisis descrites per a *Patella*, tant per al contrast entre localitats, com per a la caracterització dels valors entre zones biològiques. En el cas de la comparació de la capacitat erosiva entre les localitats d'estudi ($\chi^2 = 4,147$; gl = 4; $P < 0,386$), es pot rebutjar la hipòtesi nul·la, per la qual cosa no hi hauria una diferència significativa de les capacitats bioerosives de *Melaraphe neritoides* en funció de les localitats, el que es podria interpretar com a diferències en funció del tipus de rocam.

Tampoc no es constata una similitud significativa entre la capacitat erosiva entre zones ($\chi^2 = 7,52$; gl = 2; $P < 0,023$), fet que ve a coincidir amb les diferències biomètriques entre zones. Els individus de majors dimensions de *Melaraphe neritoides* es localitzen terra endins, perquè arran de les seves

relacions entre la boca de la conquilla i les dimensions d'aquesta tenen menys capacitat de subjecció i resistència a l'envestida de l'onatge, que no pas els exemplars més petits (Bosch i Moreno, 1982). De més a més, també s'hi afegixen arguments de tipus biològic associats als patrons de reproducció de *Melaraphe*, per la qual cosa és més habitual trobar els exemplars més grossos i antics terra endins i els més petits i joves arran de mar. La capacitat erosiva augmenta amb l'edat i les dimensions dels individus.

Localitat a localitat i zona a zona (Taula 3.20) no es pot rebutjar la hipòtesi nul·la del test de Mann-Whitney per a les localitats de Cala Murada, la Punta des Sivinar i s'Alavern. Les seves capacitats bioerosives no són significativament diferents. Per a la resta, la variació a cada localitat és més gran que no pas les semblances entre localitats. Així doncs, per a *Melaraphe neritoides*, es pot plantejar el control litològic sobre la capacitat bioerosiva de forma clara, ja que a totes tres localitats hi afloren les calcarenites miocenes. No obstant això, també hi ha relacions significatives entre s'Alavern i la Cala d'en Guixar, fet pel qual tampoc no es pot descartar, com es justificava per a les pegellides, la influència biològica en la capacitat bioerosiva. De fet, quan es consideren, parell a parell, les diferències significatives entre les zones biològiques i la capacitat erosiva, es torna a plantejar un espectre de diferències significatives que,

	Cala d'en Guixar	Cala Murada	Punta des Faralló	Punta des Sivinar
Cala Murada	U = 28; Z = -1,671 <i>P</i> < 0,117	–		
Punta des Faralló	U = 14; Z = -1,287 <i>P</i> < 0,258	U = 19,5; Z = -0,646 <i>P</i> < 0,573	–	
Punta des Sivinar	U = 30; Z = -1,021 <i>P</i> < 0,359	U = 6,5; Z = -0,307 <i>P</i> < 0,786	U = 8; Z = -1,290 <i>P</i> < 0,247	–
s'Alavern	U = 23; Z = -0,280 <i>P</i> < 0,842	U = 4; Z = -0,218 <i>P</i> < 1,000	U = 5; Z = -1,060 <i>P</i> < 0,381	U = 7; Z = -0,150 <i>P</i> < 1,000

Taula 3.20 Paràmetres del test de Mann–Whitney per a la capacitat bioerosiva de *Melaraphe neritoides* en funció de la localitat.

	Cala d'en Guixar	Cala Murada	Punta des Faralló	Punta des Sivinar
Cala Murada	U = 16; Z = -2,450 <i>P</i> < 0,013	–		
Punta des Faralló	U = 20,5; Z = -0,529 <i>P</i> < 0,616	U = 5; Z = -1,033 <i>P</i> < 0,381	–	
Punta des Sivinar	U = 23; Z = -1,528 <i>P</i> < 0,140	U = 14; Z = -0,931 <i>P</i> < 0,931	U = 4; Z = -1,043 <i>P</i> < 0,393	–
s'Alavern	U = 23; Z = -0,265 <i>P</i> < 0,842	U = 3; Z = -0,655 <i>P</i> < 0,700	U = 6; Z = -0,775 <i>P</i> < 0,548	U = 7; Z = -0,149 <i>P</i> < 1,000

Taula 3.21 Paràmetres del test de Mann–Whitney per a les taxes d'erosió de *Melaraphe neritoides* en funció de la localitat.

amb tota probabilitat, està lligat a l'estructura de la població i a les dimensions dels individus de *Melaraphe neritoides*. De fet, els valors de capacitat erosiva de la zona C acostumen a ser lleugerament superiors als de les altres dues zones (Taula 3.19).

Per a *Melaraphe neritoides* varien de 0,008 a 0,510 mm·a⁻¹, tot i que la variabilitat entre localitat i entre zones és considerable. Els valors de les taxes acostumen a ser majors a la zona B del perfil de costa. El mateix exercici estadístic que s'ha fet per a la capacitat bioerosiva, en el cas de les taxes d'erosió de *Melaraphe neritoides*, permet rebutjar la hipòtesi nul·la per al conjunt de localitats i per al conjunt de zones (Taula 3.21). Les taxes d'erosió són, doncs, significativament diferents entre les localitats ($\chi^2 = 6,39$; gl = 4; *P* < 0,172) i entre les zones ($\chi^2 = 3,247$; gl = 2; *P* < 0,197). Les diferències entre zones responen a les característiques biomètriques i als valors de densitat que ja s'han considerat per a la capacitat bioerosiva, perquè pel que fa a la capacitat bioerosiva només s'ha aplicat un producte que relaciona la densitat de la roca amb la població. De

	Zona A	Zona B	Zona C
Zona B	U = 51 Z = -0,630 <i>P</i> < 0,562	–	
Zona C	U = 17,5 Z = -2,895 <i>P</i> < 0,003	U = 7 Z = -1,670 <i>P</i> < 0,116	–

Taula 3.22 Paràmetres del test de Mann–Whitney per a la capacitat bioerosiva de *Melaraphe neritoides* en funció de la zonació biològica.

manera que el que magnificam són les diferències que ja s'havien constatat (Taula 3.21).

De les diferències de taxa bioerosiva localitat a localitat, tot i que es mantenen els patrons de la capacitat erosiva, canvia el poder de les relacions estadístiques entre localitats (Taula 3.20). Això vol dir que, de més a més del control litològic que s'insinuava, també té un paper relatiu l'estructura i el volum de la població de *Melaraphe neritoides*. Així doncs, per a les costes rocoses carbonatades de Mallorca, l'agent bioerosiu més important és *Patella rustica*, amb taxes de bioerosió que fluctuen entre 0,40 i 2,00 mm·a⁻¹ amb valors mitjans de 0,60 mm·a⁻¹.

La capacitat bioerosiva de *Melaraphe neritoides* és deu cops menor, un ordre de magnitud, que les de *Patella*. Per a *Patella sp.*, tot i que les característiques de textura, duresa i porositat de la roca juguen un paper important, altres factors de caràcter biològic i ecològic ajuden a explicar les variacions en la capacitat bioerosiva i les taxes d'erosió. En canvi, per a *Melaraphe neritoides*, amb valors mitjans de taxa d'erosió de 0,010 mm·a⁻¹, també es pot apreciar el control biològic i ecològic, tot i que es fa més palesa la incidència del rocam en els patrons i les taxes d'erosió d'aquests organismes.

Tot plegat, i de cara a futurs estudis, es recomana plantejar la quantificació de la bioerosió a les costes carbonatades des d'una perspectiva ecològica, a la vegada que es fa necessari tenir un coneixement sòlid del paper i distribució dels cianòfits i altres microorganismes epilítics i endolítics, per tal de poder justificar les taxes d'erosió dels macroorganismes brostejadors.

4 Freqüència, magnitud i escala en la morfodinàmica de les costes rocoses: s'Alavern com a excusa

4.1

Introducció

L'estudi dinàmic de l'erosió de les costes rocoses, ara per ara i d'acord amb el coneixement empíric que se'n té, presenta nombrosos problemes pel que fa a la seva sistematització (Spencer i Viles, 2004; Woodroffe, 2003). Aquest fet respon a l'elevat nombre de mecanismes, agents i factors de control, sovint interrelacionats i poc compresos que contribueixen a l'alteració i desmanegament de la roca. Així mateix, també juguen un paper important, en aquesta distorsió, les velocitats i la recurrència a les quals els mecanismes i els agents actuen (Goudie i Viles, 1999). D'una banda, hi ha mecanismes l'efectivitat dels quals, en termes de disgregació del rocam, destaca a escales temporals curtes, mentre que d'altres tenen transcendència en escales temporals i espacials llargues (de Boer, 1992). També és obligada la referència a l'efectivitat o la magnitud de l'esdeveniment, en el sentit de com són d'efectius aquests mecanismes en temps: breus o puntuals i mobilitzant grans volums de rocam, o bé continus i afectant un petit volum de material. Finalment, i per si no n'hi havia prou, s'hi afegeix la complexitat de lligar els processos i agents que operen en diferents escales i la relació entre la seva escala d'acció i la formació o destrucció del relleu a escales espacials majors (Viles, 2001).

El seguiment i la instrumentalització dels agents i taxes d'erosió i meteorització a les costes rocoses carbonatades de Mallorca permet plantejar la jerarquia dels processos i els factors que els controlen en termes de freqüència, eficiència en el reculament de la costa i escala espacial.

A la localitat d'estudi de s'Alavern (Fig. 4.1), s'hi han desenvolupat totes les tècniques instrumentals

descrites en aquesta memòria (capítol 2), així com també el seguiment de la component biològica (capítol 3). De més a més, Balaguer i Fornós (2003) també han fet el seguiment de les taxes de disintegració granular de la façana del penya-segat. Per al càlcul de la disgregació granular contínua, aquests autors han utilitzat trampes de sediment per gravetat. Es tracta de recipients col·locats al peu dels penya-segats als quals s'associa una superfície del penya-segat, a partir de la qual es relaciona el pes del sediment acumulat al recipient per tal d'obtenir-ne taxes de retrocés. La funció utilitzada, així com la justificació de la seva expressió matemàtica, es troben descrites a Balaguer (2006).

Els moviments de masses o desprendiment de fragments de roca s'han calculat a partir dels eixos màxims dels blocs caiguts dels penya-segats o de les cicatrius que han deixat, tant a la façana del penya-segat, com al límit exterior de la plataforma. Es prenen en consideració criteris com la densitat de la roca, o el volum de porositat del con d'enderroc, per tal d'establir-ne les taxes d'erosió que ens permetin comparar-ho amb els altres processos (Balaguer *et al.*, 2002; Lahousse i Pierre, 2003a i b).

4.2

Taxes de denudació

Les taxes d'erosió relatives a la denudació general de la plataforma litoral calculades per Swantesson *et al.*, (en premsa) són poc significatives, en el sentit que els ordres de magnitud resultants són propers a la pròpia font d'error del MEM (Stephenson i Kirk, 1996). A més a més, s'hi observa com la desviació estàndard entre les tres lectures del MEM augmenta així com és més rugosa la superfície de la roca. De mar cap a terra, les taxes de denudació no canvien gaire (Taula

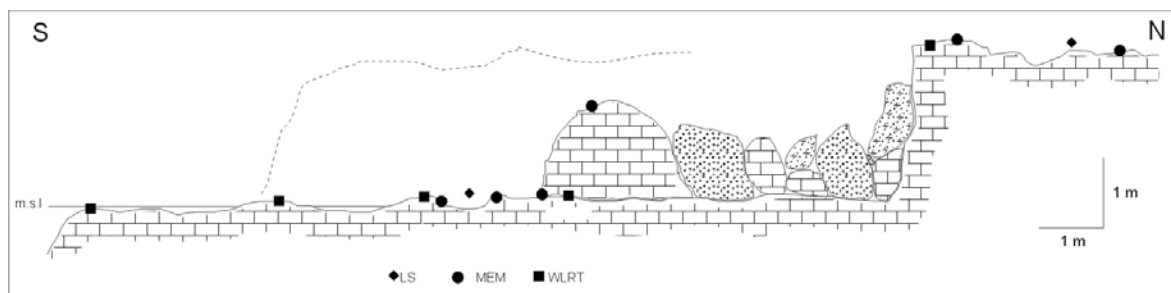


Fig. 4.1 Dispositiu de mostratge a s'Alavern. LS: escàner làser, MEM: micròmetres de dial fix i de dial mòbil; WLRT: tests d'exposició de peces de roca.

	Distància al mar (m)	Taxa erosió (mm·a ⁻¹)	Zonació biològica	Zonació hidrodinàmica	Observacions
MEM 1	1,50	n.a.	A	batuda	
MEM 2	3,07	- 0,036	A	batuda	
MEM 3	4,01	+ 0,002	B	esquitxos	Swantesson <i>et al.</i> <i>en premsa</i>
MEM 4	4,92	- 0,035	C	ruixim	
MEM 5	8,76	- 0,008	C	ruixim	
MEM 6	11,84	+ 0,032	C	ruixim	
TMEM 1	9,25	- 0,787 a + 1,006	C	ruixim	<i>biofilm</i>
TMEM 2	9,25	-1,613 a + 1,183	C	ruixim	<i>biofilm</i>
TMEM 3	11,97	-0,487 a + 0,782	C	ruixim	<i>biofilm</i>
TMEM 4	11,97	-1,810 a + 1,195	C	ruixim	<i>biofilm</i>
LS 1	4,00	- 0,310	B	esquitxos	gastròpodes
LS 2	10,50	-0,250	C	ruixim	

Taula 4.1 Taxes d'erosió calculades mitjançant micròmetre de dial fix (MEM), micròmetre de dial mòbil (TMEM) i escàner làser (LS) a s'Alavern.

4.1) i s'han d'interpretar amb precaució. L'erosió, tant al domini de batuda com al d'esquitxos, és de l'ordre de 0,035 mm·a⁻¹, mentre que a la zona d'abast del ruixim, hi tenim des de taxes d'erosió quasi bé nul·les (0,008 mm·a⁻¹) i/o per sota de l'interval de confiança instrumental, fins a increments –moviment en positiu– de la superfície equivalents a les taxes de denudació (Swantesson *et al.*, en premsa).

Patrons semblants, tot i que amb una major resolució i cura instrumental, s'han obtingut mitjançant el micròmetre de dial mòbil només a la zona de ruixim. Les taxes mitjanes oscil·len de -0,206 a 0,058 mm·a⁻¹, amb taxes mínimes d'erosió de -1,810 mm·a⁻¹ i màximes de 1,195 mm·a⁻¹.

Les taxes de denudació calculades mitjançant l'escàner làser ofereixen uns valors força més grans; així, per a la superfície escanejada localitzada a la zona d'esquitxos, la taxa és de 0,310 mm·a⁻¹, mentre que la superfície de la zona afectada sols pel ruixim és de 0,250 mm·a⁻¹. La representació gràfica de les diferències entre les successives microtopografies posa de manifest la dispersió dels punts on s'ha produït l'erosió arran de la superfície. Aquest patró sembla estar relacionat amb la naturalesa eogenètica de les roques carbonatades, principalment miocenes i

quaternàries. Les estructures i fàcies sedimentàries, així com el grau de porositat, faciliten aquest tipus de patró erosiu poc definit (Taboroši *et al.*, 2004).

4.3 Taxes de bioerosió

A la zona d'estudi només s'ha calculat la taxa d'erosió relativa als dos gastròpodes més abundants, *Melaraphe neritoides* i *Patella sp.*, principalment *P. rustica*, encara que també hi són presents exemplars de *P. ullysiponensis*. Aquests organismes es distribueixen de manera desigual al llarg del perfil d'estudi. Així, a la zona més terrestre del perfil, aquella afectada pel ruixim, hi trobam entre 290 i 350 individus de *Melaraphe neritoides* per m², amb una densitat més elevada durant la primavera i l'hivern (Taula 4.2).

Ben important és la presència d'aquest petit gastròpode a la zona afectada pels esquitxos de l'onatge, on s'arriben a comptar densitats mitjanes de 1000 a 2000 exemplars per m². A la zona de batuda, els exemplars de *M. neritoides* disminueixen la seva presència dramàticament fins al centenar d'individus, mentre que el grup de les *Patella sp* hi apareix amb

Zonació biològica	Densitat <i>Melaraphe neritoides</i> (ind· m ⁻²)				Taxes d'erosió (mm·a ⁻¹)				Mitjana anual (mm·a ⁻¹)
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern	
A	195	183	113	192	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0008
B	1903	1379	1522	1015	0,0029	0,0019	0,0019	0,0019	0,0085
C	345	293	335	348	0,0004	0,0001	0,0005	0,0006	0,0004
Zonació biològica	Densitat <i>Patella rustica</i> (ind· m ⁻²)				Taxes d'erosió (mm·a ⁻¹)				Mitjana anual (mm·a ⁻¹)
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern	
A	183	151	126	150	0,107	0,074	0,100	0,088	0,369

Taula 4.2 Densitats de població i taxes d'erosió de *Melaraphe neritoides* i *Patella rustica* a s'Alavern.

Distància al mar	0 a 2 m	2 a 4 m	4 a 6 m	6 a 8 m	8 a 10 m
Taxa d'erosió mitjana (mm·a ⁻¹)	0,4957	0,1753	0,2470	0,2143	0,1808
Taxa d'erosió mínima (mm·a ⁻¹)	0,2892	0,0380	0,0188	0,0731	0,0827
Taxa d'erosió màxima (mm·a ⁻¹)	0,7658	0,7156	0,3813	0,4796	0,2482

Taula 4.3 Taxes d'erosió calculades mitjançant test d'exposició de peces de roca a s'Alavern.

nivells de 125 a 200 individus per m². Aquesta distribució, que respon a la forma del perfil de costa i a la humectació per l'onatge que la forma de la costa implica (Palmer *et al.* 2003), té una important transcendència pel que toca a les taxes d'erosió de la plataforma litoral. Així, a la zona de batuda, les taxes de bioerosió de *Patella sp* són de l'ordre de 0,369 mm a⁻¹ i les de *M. neritoides* de 0,001 mm a⁻¹. Ja a la zona d'esquitxos les taxes mitjanes d'erosió de *M. neritoides* són de 0,008 mm a⁻¹ i a la zona de ruixim de 0,005 mm a⁻¹ (Taula 4.2).

4.4

Tests d'exposició de peces de roca

A s'Alavern, les taxes d'erosió de les pastilles exposades durant un any tenen valors mitjans de 0,25 mm·a⁻¹, tot i que el rang fluctua de 0,004 mm·a⁻¹ a 0,765 mm any⁻¹. Des del contacte mar-terra, s'hi observa una disminució de les taxes d'erosió. Així, les taxes registrades a la zona més propera a la mar donen valors de 0,450 mm·a⁻¹, mentre que aquelles que es

troben quasi bé al peu del penya-segat són de l'ordre d'una tercera o quarta part menors, amb valors mitjans de 0,180 mm·a⁻¹ (Taula 4.3).

4.5

Taxes de desintegració granular de la façana dels penya-segats

Les taxes mitjanes d'erosió de la façana dels penya-segats, expressades com el retrocés lineal homogeni de la façana del penya-segat a partir de la distribució del sediment capturat a cada trampa, en funció de la seva àrea de captura, aboquen valors que oscil·len de 0,009 a 0,248 mm·a⁻¹. Les taxes d'erosió mitjanes se situen en 0,080 mm·a⁻¹ (Balaguer i Fornós, 2003). Les taxes màximes de retrocés es registren durant els intervals temporals on augmenta la mitjana, o bé la intensitat de les precipitacions (Fig. 4.2). El material recollit a les trampes de sediment de s'Alavern és de textura grollera, grànuls i palets de forma laminar i aparença angular, tot i que també hi ha una component

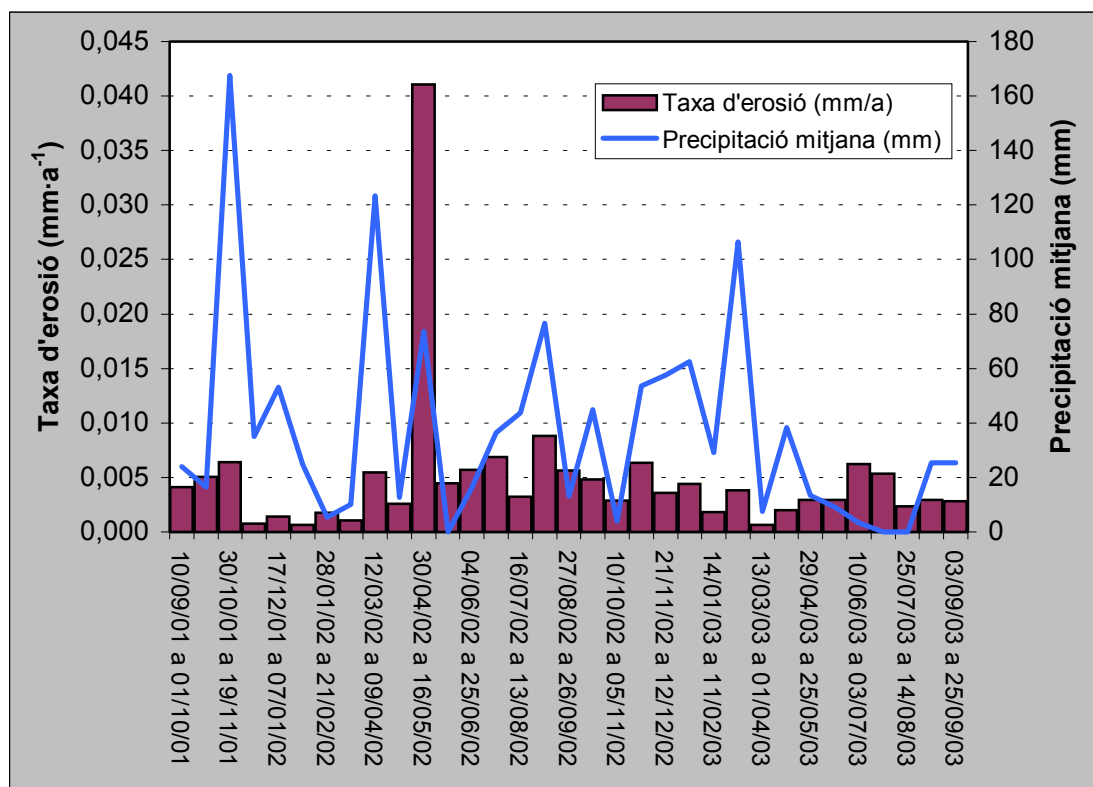


Fig. 4.2 Relació entre desintegració granular i precipitacions a s'Alavern (Balaguer, 2006).

considerable de materials fins. De fet, aquesta dicotomia respon a l'alternança i tipologia de materials que componen els penya-segats. Mentre les calcarenites aboquen la major part dels elements grollers, els paleosòls que queden entre els nivells d'eolianites pleistocenes constitueixen l'aportació principal de fins, ja que tenen un color vermellós característic que permet fer-ne l'assignació en aquestes unitats del penya-segat.

4.6

Taxes relacionades amb l'acció mecànica de les onades

La visita periòdica als penya-segats de s'Alavern ha

permès comprovar l'acció de dinàmica marina. Durant la darrera setmana de febrer i la primera de març del 2002, se succeïren varis episodis de mar grossa que es traduïren a la línia de costa amb diverses mossegades d'entre 8 i 16 m³ (Fig. 4.3). Amb posterioritat, s'han anat arrabassant altres blocs, alguns de dimensions ben considerables com el del mes de maig de 2004 que suposa un volum de 35 m³. Les mossegades i l'arrabassament de blocs tenen un marcat control estructural. D'una banda, les onades aprofiten les línies de contacte entre capes, desenvolupant un *notch*, mentre que la component vertical, que determina la forma dels blocs arrabassats que queden just sota el cantell exterior de la plataforma litoral, ve condicionada per un joc de diàclisis de 058° i 137°.

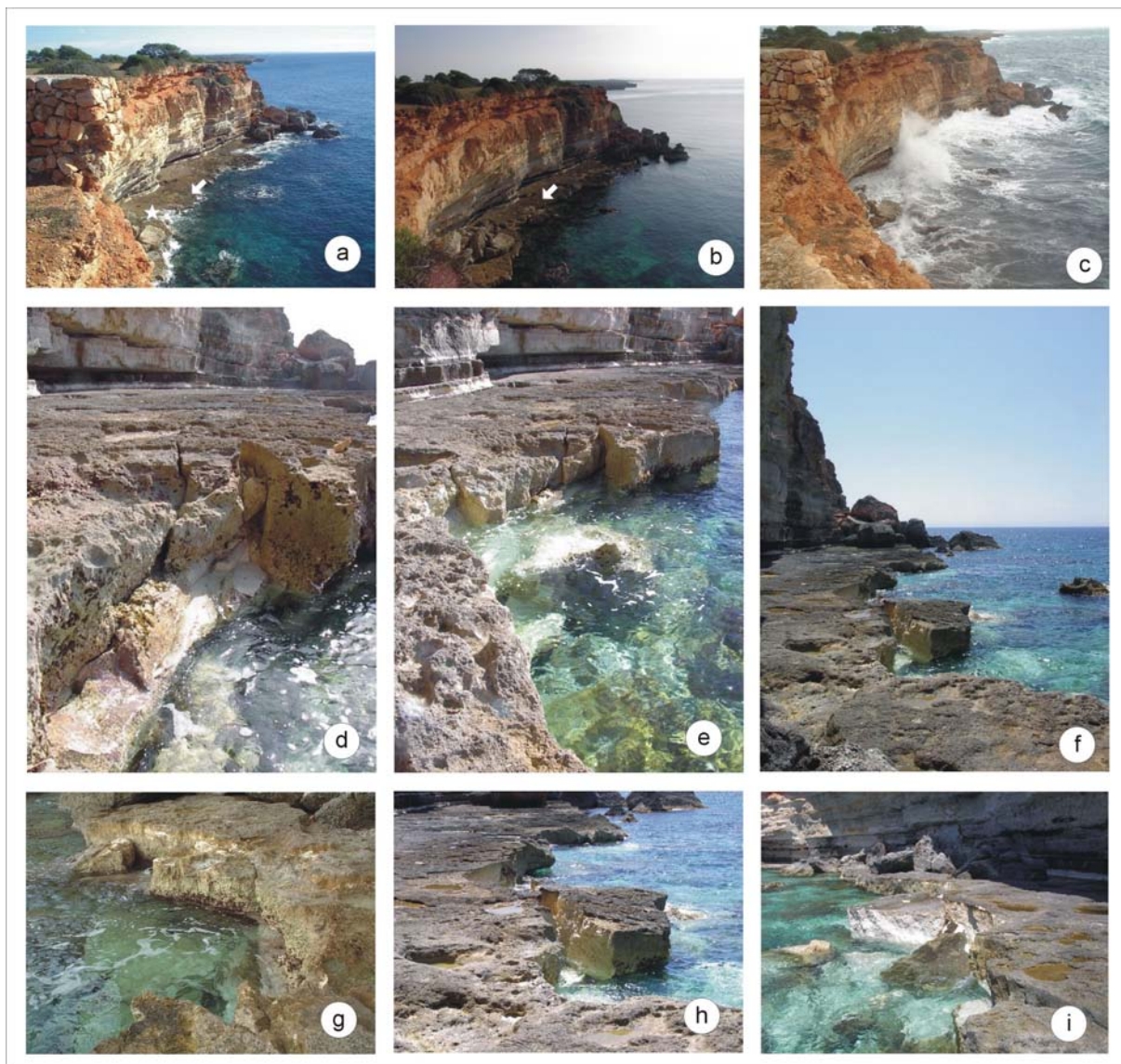


Fig. 4.3 Moviments de massa i blocs arrabassats a s'Alavern. a) març 2002; b) desembre 2004; c) temporal de gener de 2003; d, g, h, i) detall de les cicatrius dels blocs arrabassats; e i f) trencament i desplaçament d'un fragment de plataforma de grans dimensions. Imatges corresponents al març de 2002 i el juny de 2004.

4.7

Moviments de masses

El mes de desembre de 2001, a s'Alavern (Balaguer *et al.*, 2002), es produí una caiguda de blocs que afectà 40 m³ de materials procedents dels nivells superiors quaternaris de la sèrie del penya-segat (paleosòls, encrostaments i dunes). Tres sistemes de fractures amb direccions mitjanes, per ordre d'importància, de 058°, 003° i 137° estan implicades en el col·lapse i afavoreixen la inestabilització d'aquells blocs de roca que estan en voladís, arran de l'erosió dels paleosòls més tous i, per tant, menys resistents que els encrostaments i les eolianites fòssils. L'erosió diferencial, doncs, afavoreix la inestabilització dels blocs. Les precipitacions tenen un paper important com a catalitzadores de la inestabilització dels vessants. Els valors de precipitació mitjana a s'Alavern són de 342 mm (Guijarro, 1986), però la mitjana per a l'any 2001 s'ha incrementat fins a 458 mm, prop de 100 mm més. Però això no és tot, cal observar que sols entre novembre i desembre de 2001 s'ha recollit el 43% de les precipitacions de tot l'any i, per tant, en pocs mesos s'ha incrementat sobtadament la càrrega hidràulica de la roca. És destriable el fet que en tres mesos els blocs, que havien caigut de la façana del penya-segat sobre la plataforma, han estat rentats per l'acció marina i les evidències de desplaçament per tracció dels blocs sobre la plataforma són ben minses.

4.8

Discussió

La representació gràfica que relaciona la magnitud de les taxes d'erosió i la freqüència amb què els processos i agents que les causen actuen sobre el rocam litoral (Fig. 4.4), posa de manifest l'existència d'un gradient, una jerarquia pel que toca a l'aportació en el desmantellament de la línia de costa a s'Alavern. Aquelles taxes d'erosió relacionades amb els processos fisicoquímics, l'acció biològica o els canvis de microtopografia, suposen ordres de magnitud en les taxes d'erosió que poden arribar a ser cent, mil o milions de vegades més petits que no aquells que es deriven de l'acció hidràulica o els moviments de masses. No obstant això, aquest gradient s'inverteix en el vector temporal. Els processos i agents de meteorització i erosió fisicoquímics o biològics actuen a una escala diària o horària (Stephenson *et al.* 2004), i el rentat del material que disgreguen, bé per les pluges, bé per l'acció del vent o del propi onatge, es tradueix en una taxa d'erosió que pot ser més o menys important (Balaguer i Fornós, 2003; Woodroffe, 2003). Diferent és el que passa amb els moviments de masses o l'arrabassament de blocs per l'acció hidràulica, les escales temporals dels quals són més amples, i la distància relativament llarga entre episodis d'anys, dècades o segles, que estan

relacionats amb la ciclicitat i recurrència de fenòmens climàtics (Viles i Goudie, 2003).

Des de 1998 es fa un seguiment de la costa meridional mallorquina i són pocs els moviments de masses inventariats (Balaguer, 2006). En el cas de s'Alavern, dels moviments de masses i de l'acció hidràulica, se n'alliberen materials del penya-segat fins que el volum de roca alterada, o bé el propi pla de fractura, queda desmantellat i, de nou, el rocam fresc queda exposat a l'acció dels processos i agents de meteorització.

En termes d'ecologia es podria parlar d'un període de resistència –etapa de la morfogènesi on predomina l'erosió i el transport del sediment– molt acotat en el temps i separat per llargs períodes biostàtics –etapa d'equilibri– (Brundsen, 2002). En aquest sentit també apunten els treballs de Lahousse *et al.* (2003a i 2003b) on, a medis semblants, identifiquen intervals entre els moviments de masses generalitzats de prop de vint o trenta anys. Així doncs, destaquen dos grups d'agents i processos en el binomi meteorització-erosió: aquells que operen de forma contínua, però que suposen l'alliberament de quantitats petites de material o un retrocés de la costa discret; front a d'altres grups d'agents i processos que operen d'una forma discontinua, però que per contra són més efectius en el retrocés de la costa. Fet i fet, s'organitzen en dues sèries temporals d'erosió superposades, de període i longitud diferents. La de menor amplitud i període –meteorització fisicoquímica, biològica–, com que és induïda pel rentat constant de la superfície de la roca, no es troba quasi mai en una situació d'equilibri i podríem parlar d'una resistència ininterrompuda; mentre que els moviments de masses que representarien la sèrie temporal de major amplitud i longitud pateixen episodis de biostàcia ben definits, com succeeix en d'altres medis on la meteorització-erosió disminueix en funció del temps (Colman, 1981).

La consideració de les variables de freqüència i magnitud en les taxes calculades ajuda a plantejar el debat entorn de l'acció predominant de l'acció de l'onatge i de la meteorització a les costes rocoses. Aquest debat, que ha centrat bona part de les discrepàncies dels geomorfòlegs (Stephenson, 2000; Trenhaile, 2002), apareix aquí com un artefacte en el sentit que la preponderància de l'acció de l'onatge o de la meteorització a les costes rocoses depèn de la posició de l'investigador en l'escala temporal i la resolució dels estudis. El desplaçament en el vector negatiu, que indica el gràfic de la Fig. 4.4, ens marca la transició des de la perspectiva dinàmica a l'evolutiva en l'estudi de les costes rocoses. Tot i que aproximacions de tipus evolutiu, per al cas de la costa rocosa meridional de Mallorca, atorguen als moviments de masses i a la desintegració granular un paper suficient per explicar el retrocés de la costa

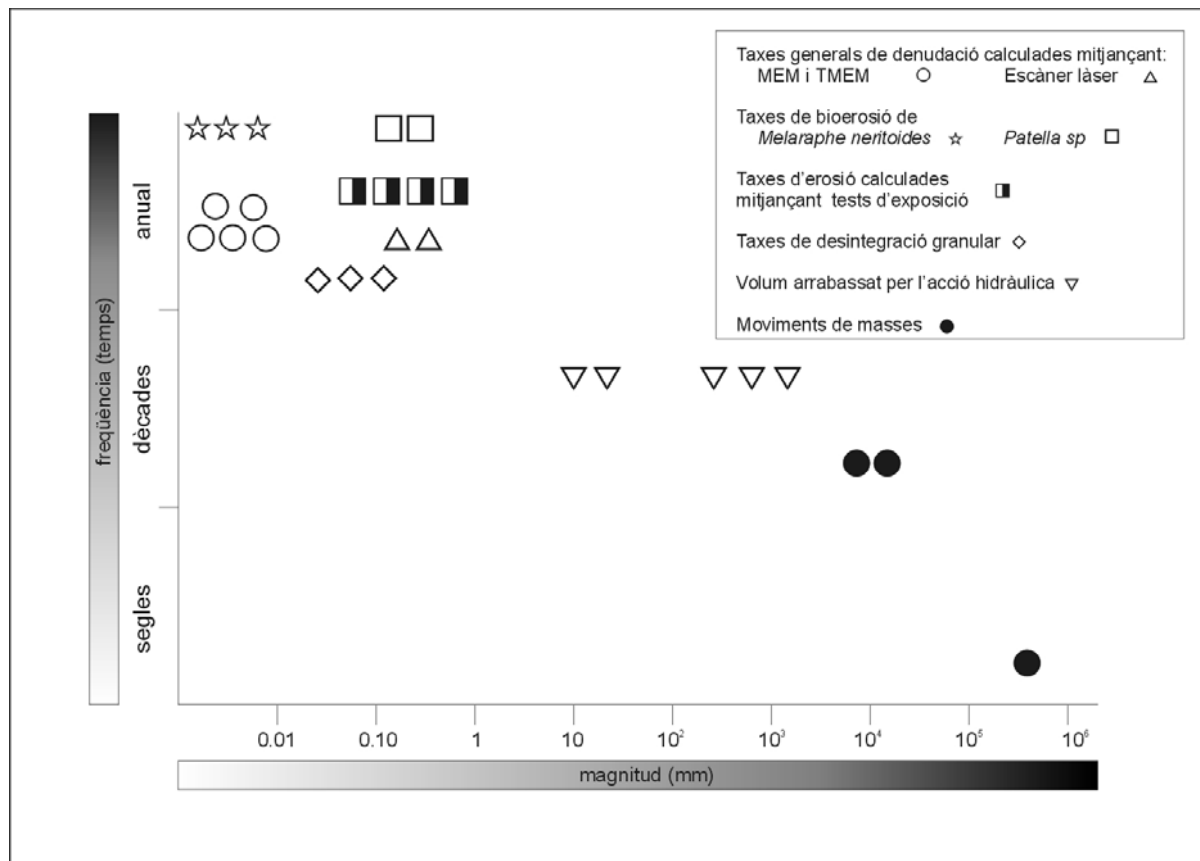


Fig. 4.4 Freqüència i magnitud en la morfodinàmica de la costa rocosa de s'Alavern. Taxes calculades mitjançant MEM, TMEM, escàner làser, tests d'exposició de peces de roca, residu lític dels pèllets fecals dels organismes brostejadors, trampes de sediment i estandardització del volum de roca mobilitzat pels moviments de masses i per l'acció hidràulica de les onades.

(Fornós *et al.* 2005), també és cert que aquests no es poden deslligar de la influència de l'onatge o de processos com els de bioerosió i/o bioprotecció. Més encara, quan els estudis recents posen de manifest la necessitat d'entendre les costes com a ecosistemes (geosistemes) complexos amb relacions multicausals i multidireccionals entre els seus components, especialment a les costes carbonatades (Gómez-Pujol i Fornós, 2004a; Naylor *et al.*, 2002; Viles *et al.*, 2000)

Un altre fet que cal posar de manifest arran dels resultats obtinguts a s'Alavern, és la dificultat per integrar els resultats obtinguts mitjançant diferents tècniques i el seu significat real. Aquest problema no és nou (Trudgill, 1977). Arrenca de les diferents tècniques emprades, del seu grau de resolució i error, i de conèixer allò que realment permeten avaluar. Així, les taxes obtingudes amb el MEM són realment baixes i properes al límit de confiança de l'error instrumental. El MEM, ateses les seves característiques i limitacions, només mesura tres punts d'alçària relativa preferentment a superfícies planes. Per tant, queden excloses del mostratge esquerdes, superfícies verticals, extraploms i zones on abunden els organismes com *Melaraphe neritoides* o *Patella*

sp, i on es presuposen taxes d'erosió majors que les mesurades pel MEM. L'escàner làser, amb una capacitat de mostratge espacial major, ens aboca resultats més propers als assignats a la bioerosió o als tests d'exposició. Aquests darrers, no obstant, plantegen el dubte d'allò que s'està mesurant. Es pot descartar l'acció de l'abrasió, però com destriar entre allò que correspon a bioerosió per cianobacteris, l'atac químic, l'acció de les sals... En realitat no és gens senzill, i encara que es poden fer extrapolacions a partir d'experiments de laboratori, sempre hi ha el problema de relacionar els paràmetres del model amb els de la realitat (Trudgill i Viles, 1998). Els entrebancs per homogeneïtzar els resultats de les tècniques esmentades amb els de les trampes de sediment, o el càlcul del volum dels moviments de masses o arrabassament de blocs, són els mateixos. Així doncs, el criteri que hom accepta per superar aquest entrebanc és el de comparar els ordres de magnitud, més que no les taxes d'erosió *per se* (Trudgill, 2000). En aquest sentit, allò que s'hi destaca és la importància en una escala de temps curta dels processos d'erosió lligats a la meteorització química i a la biològica en la component horitzontal de les costes rocoses. Els ordres de magnitud de les taxes de bioerosió i les dels tests d'exposició són semblants i

vénen a coincidir amb la quantificació de l'acció de tots els processos que habitualment s'assignen als resultats de l'escàner làser (Williams *et al.* 2000). La preponderància de la meteorització no ve de nou perquè es manifesta en el mateix modelat de la costa de s'Alavern, destacant l'abundant nombre de cocons i la rugositat de la microtopografia potenciada per la naturalesa de la roca. Els moviments de masses o l'arrabassament, si s'homogeneïtzassin –això seria assignar el volum de roca després de forma homogènia a la superfície de plataforma, considerant-ne una recurrència d'acord amb la bibliografia– ens donaria taxes a comparar de l'ordre de la centèsima de mil·límetre de rebaixament. Ordre de magnitud que convergeix en el domini de la meteorització química i

biològica i amb el perquè de l'aspecte rugós de la superfície de la roca. D'altra banda, la tècnica instrumental, de la qual es disposa avui per avui, complica molt estudiar la façana dels penya-segats com es fa amb la component horitzontal. Així doncs, tot i que els estudis de disgregació granular no ens permeten inferir quins agents actuen sobre el penya-segat en relació a les escales d'acció temporals i espacials petites, sí que, per analogia amb altres estudis duts a termes en ambients molt semblants sobre façanes d'elements arquitectònics històrics (Gómez-Pujol *et al.* 2002a), podem inferir que els processos d'alteració fisicoquímica tenen una importància igual o molt semblant als descrits a les zones de ruïna de la plataforma litoral.



5 Formes de meteorització i erosió a les costes rocoses carbonatades

5.1

Introducció

El micromodelat de les costes rocoses carbonatades resulta de la interacció entre diferents processos i agents, motiu pel qual 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 interlitoral a la supralitoral de les costes rocoses i que es perllonguen fins a l'àrea de declivi dels processos marins front als pròpiament terrestres. No obstant això, 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 dels esbaldregalls (com podria ésser el cas d'una marmita) i, d'altra banda, comprèn les depressions creades pels bogamarins o altres gastròpodes brostejadors com *Patella rustica*, *Monodonta turbinata* o *Melaraphe neritoides*.

Un altre problema, de caràcter terminològic, 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 terreny amb una hidrologia i un relleu força diferent d'altres sistemes (Ford i 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 d'ús per designar formes que abasten diversos ordres de magnitud és el manlleu germànic *karren* (Fornós, 2000). Així doncs, el terme carst fa referència al sistema integrat per l'exocarst i l'endocarst, com a elements estretament interrelacionats. Un és l'enllaç de l'altre a la superfície. Ara bé, atès que les formes superficials del rocam litoral no tenen perquè estar vinculades amb les formes i processos subterrànies, sembla poc apropiat utilitzar termes com 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'entendrà tot aquell seguit de formes de meteorització que es desenvolupin sobre la roca calcària als ambients litorals i en les quals la dissolució 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 es consideren.

Treballs recents (Fiol *et al.*, 1996; Moses, 2003; Viles, 1995) posen de manifest la importància dels agents biològics, des de cianobacteris a gastròpodes, en els processos de meteorització del rocam calcari, tot parlant de biocarst o de processos biocàrstics o fitocarst (Viles, 1988a). Aquesta situació és particularment important a les costes carbonatades on la superfície presenta un grau intens de colonització i on l'aportació d'aigua, tant per la pluja com per les onades, no pot ser menystinguda.

L'estudi del micromodelat de les costes calcàries, tot i que no compta amb una tradició consolidada, no és pobre en contribucions. Des dels treballs de Wentworth (1939), un dels primers científics que aborden aquestes formes del relleu costaner, l'aproximació a l'estudi del *karren* litoral ha canviat significativament en els seus continguts i objectius. Així, n'hi ha que centren els seus objectius en la descripció de les formes i la seva organització espacial (Emery, 1946; Corbel, 1952; Guilcher, 1953; Dalongeville, 1977; Mazzanti i Parea, 1979; Sanjaume, 1985), mentre que d'altres dediquen els seus esforços a identificar i entendre els processos i els agents que operen a les costes carbonatades (Folk *et al.*, 1973; Schneider, 1976; Trudgill, 1976a i 1979; Viles *et al.*, 2000; Lundberg i Lauritzen, 2002 i Moses, 2003).

A les Illes Balears, i en especial a Mallorca, el primer treball que considera el *karren* litoral és el de Walter-Levy *et al.* (1958). El seguirien observacions breus de Butzer (1962), Butzer i Cuerda (1962) i Ginés (2000) en el marc dels seus treballs d'estratigrafia quaternària. El primer article que aborda, en exclusiva, aquest tipus de formes és el de Rosselló (1979), qui intenta avaluar la tipologia i l'organització de les formes, a la vegada que assaja de calcular-ne una taxa de denudació, d'acord amb els treballs previs

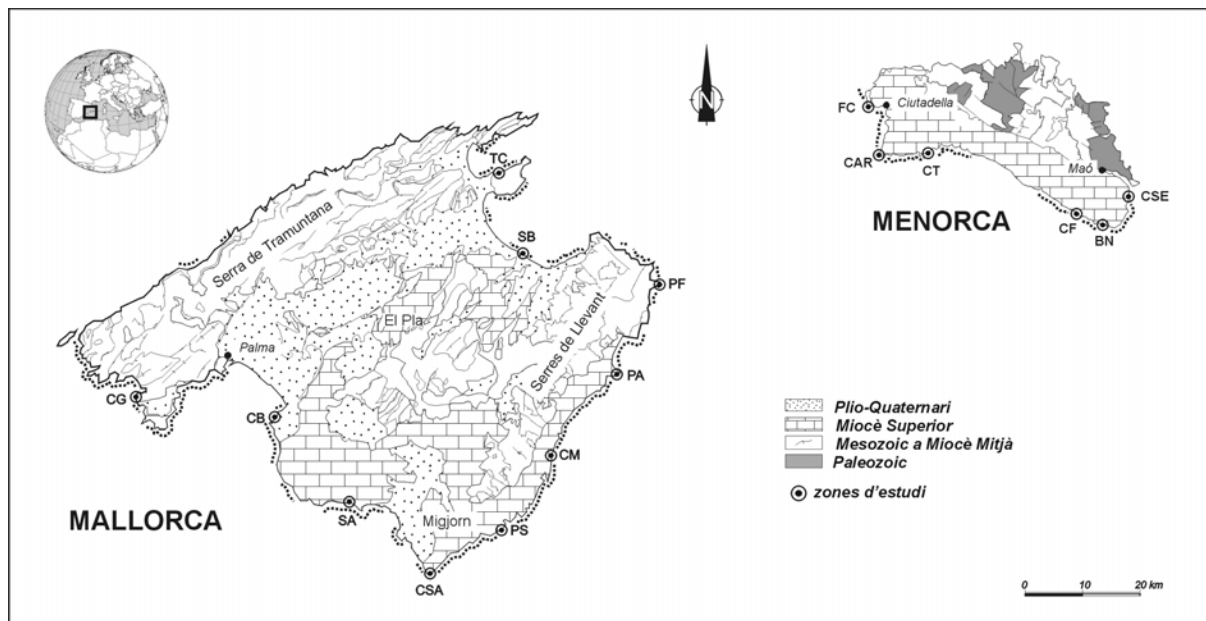


Fig. 5.1 Croquis geològic i localització de les zones d'estudi a Mallorca i Menorca. La línia de punts indica la presència a la zona costanera de formes abundants de *karren* litoral. A Mallorca, CG: Cala d'en Guixar, CB: Cala Blava, SA: S'Alavern, CSA: Cap Salines, PS: Punta des Sivinar, CM: Cala Murada, PA: Punta de n'Amer, PF: Punta des Faralló, SB: Son Bauló i TC: Punta de Tacàritx. A Menorca, FC: Far de Ciutadella, CAR: Cap d'Artrutx, CT: Cala Turqueta, CF: Cap d'en Font, BN: Binibèquer, CSE: Cala Sant Esteve.

dels quaternaristes. Posteriorment, apareixen altres treballs que posen l'èmfasi en la relació entre les formes del *karren* litoral i els processos bioerosius (Kelletat, 1980, 1985). Moses i Smith (1994) caracteritzen l'abast espacial del processos inorgànics –meteorització per sals i dissolució– que actuen a les costes del Migjorn de Mallorca a partir d'observacions de microscopi electrònic de rastreig i la difracció de raigs X. De 1998 ençà, hi ha un augment dels treballs que es dediquen a la descripció morfològica i a la identificació del paper dels agents i els processos, tot integrant les dues tradicions, que configuren el *karren* litoral de Mallorca (Gómez-Pujol i Fornós, 2001; Fornós i Gómez-Pujol, 2002) per passar, amb posterioritat, a contrastar els models a les costes menorquines (Gómez-Pujol i Fornós, 2004a, b i c).

5.2

Àrea d'estudi

Mallorca i Menorca es troben localitzades al centre de la Mediterrània occidental (Fig. 5.1). Gaudeixen d'un clima típicament mediterrani amb estius càlids i secs i hiverns humits i temperats. La temperatura anual mitjana és de 17°C, amb una mitjana mínima de 10°C els mesos d'hivern i una mitjana màxima de 25°C els mesos d'estiu. La precipitació mitjana és de 500 mm i es concentra, bàsicament, a la tardor (Guijarro, 1986). A les costes de Mallorca i Menorca, les onades –en mar oberta– poques vegades superen els 8 m d'alçària i longituds d'ona de 50 m. De més a mes, aquests paràmetres es redueixen considerablement quan es

desplacen cap a costa, arribant, només durant les tempestes amb graus de 6 a 8 a l'escala de Beaufort, a alçàries màximes de 4 m (Butzer, 1962). L'amplitud de marea és quasi bé nul·la, inferior als 0,25 m, tot i que canvis en la pressió atmosfèrica i l'acció dels vents poden contribuir a fluctuacions importants del nivell marí, que poden arribar a la diferència entre mareas màximes i mínimes d'1 m (Basterretxea *et al.*, 2004).

Mallorca i Menorca són els enclavaments emergits més extensos del Promontori Balear, un engruïment de l'escorça continental que s'articula com a continuació del cinturó de plegaments i d'encavalcaments alpins de les serralades Bètiques, estructurat durant el Miocè Mitjà (Alonso Zarza *et al.*, 2002; Gelabert, 1998). Els principals accidents del relleu d'ambdues illes es corresponen amb horsts formats després de l'extensió postectònica i exposen materials deformats d'edat paleozoica a roques carbonatades del Miocè Mitjà. Els grabens associats es corresponen amb relleus suaus i plans, reomplerts per dipòsits carbonatats de plataforma miocens i ventalls al·luvials i eolianites quaternàries (Gelabert, 1998 i Gelabert, 2003).

Les costes rocoses són característiques, per no dir dominants, del perímetre litoral de les illes de Mallorca i Menorca. Estan associades a canvis bruscs de la batimetria i poques vegades la isòbata de –20 m es troba a distàncies majors de 500 m respecte de la línia de costa. La forma dels penya-segats està relacionada amb la disposició i característiques de les unitats morfoestructurals de cada illa. Els penya-

segats aplomats són típics dels vessants marítims dels horsts, mentre que els grabens donen redós a albuferes i sistemes platja-duna. Els relleus tabulars, adossats als principals horsts i grabens, estan delimitats per falles lítriques d'edat Miocè Superior–Quaternari (Gelabert, 1998) que es tradueixen a la línia de costa en penya-segats verticals d'altures mitjanes i baixes. Així doncs, a mode d'instàntania, les costes rocoses de Mallorca i Menorca presenten perfils aplomats o composts tallats en materials del Paleozoic fins al Miocè Superior. L'alçària dels penya-segats varia, localment, de 3 a 30 m, i es perllonga mar endins entre 3 i 5 m. Als afloraments plegats, les plataformes litorals i el *karren* litoral apareixen a mode de pegats quan l'estructura i la litologia ho permeten. Quan hi afloren les roques carbonatades del Miocè Superior, els penya-segats presenten un perfil esglaonat relacionat, d'una banda, amb la disposició tabular i geometria dels estrats de les unitats del Miocè Superior, així com de les seves propietats geomecàniques (Pomar i Ward, 1999; Pomar *et al.*, 2003) i, d'altra banda, amb les fluctuacions plistocenes del nivell marí (Butzer, 1962). El tram final d'aquests penya-segats, a tocar de la ribera, cau en vertical amb façanes de 3 a 30 m. Les plataformes litorals, tot i que amb una distribució discontinua, són més freqüents que als afloraments de materials plegats. De la mateixa manera, els conjunts o dispositius de *karren* litoral, són força comuns en els afloraments carbonatats del Miocè Superior, així com a les eolianites quaternàries que s'adossen.

5.3

Materials i mètode

S'ha procedit a la delimitació de la presència de formes de *karren* litoral arreu de la costa de Mallorca i del Migjorn de Menorca (Fig. 5.1), a partir de la visita de camp i la consulta de la fotografia aèria obliqua del *Servicio de Costas del Ministerio de Medio Ambiente*. Seguidament, s'han seleccionat 17 localitats, 11 a Mallorca i 6 a Menorca, on s'ha aixecat un perfil de detall mitjançant una estació total TOPCOM® CTS210, des del trencament de la plataforma litoral fins a les primeres evidències de predomini dels processos estrictament terrestres. El zero relatiu dels perfils s'assigna al límit superior de les mates de *Cystoceira* sp. a la plataforma litoral. Sobre el perfil, s'hi ha delimitat l'extensió de les zonacions hidrodinàmiques i biològiques (capítol 3), així com la presència i dimensions de les principals formes. Atès que els cocons són les formes més representatives i abundants en els conjunts de *karren* litoral, tant de Menorca com de Mallorca, s'ha realitzat la seva caracterització morfològica d'acord amb els criteris de Johansson *et al.* (2001). Per a cada localitat es duen a terme un mínim de 25 observacions per cada una de les subdivisions de la zonació hidrodinàmica i biològica. Cada una de les

observacions integra dades quantitatives i dades categòriques de caràcter descriptiu.

En el primer grup hi ha incloses la *llargària* (L), l'*amplària* (A) i la *profunditat* o *fondària* (D). La primera és la distància de l'eix simple de major desenvolupament de la depressió. L'amplària és la distància màxima de costat a costat del cocó, perpendicular a la llargària i, finalment, la profunditat és la màxima distància entre la cota més alta i més baixa del cocó en la component vertical. Aquesta mesura no és senzilla d'obtenir arran del grau d'evolució i la complexitat de certes formes. En casos com la coalescència de cocons, o la interrelació entre cocons i pinacles, la mesura de profunditat s'ha pres considerant no tant la distància màxima, sinó la distància mitjana entre les cotes inferiors i superiors de la forma estudiada.

Les dades descriptives (Fig. 5.2) consideren diferents aspectes del perímetre de les formes, la seva interrelació i geometria, el tipus de fons i la disposició respecte el sistema de diàclasi i fractures. Així, per l'*obertura* entendrem si els cocons estan interconnectats, o bé estan isolats els uns respecte dels altres. La variable de *forma* diferencia entre depressions de planta circular, rectangular, triangular, allargada i irregular. La configuració del perímetre, com són els *límits* dels cocons, és una de les altres característiques considerades. Se separa entre depressions de límits rectes, sinuosos, amb indentacions i mixtos. El *tipus de fons*, si és pla, rugós o si hi ha crestes evidents –separació d'antigues depressions individualitzades–, és una altra de les variables registrades. Finalment, el darrer conjunt de dades correspon a la relació de la forma en planta amb l'organització del sistema de diàclasi o de fractures. Així, en funció de la *relació amb les fractures*, distingirem entre cocons desenvolupats seguint-ne una, paral·lel a dues fractures, desenvolupat arran de la intersecció de dues, arran de la intersecció de dos jocs o més de fractures i, també, depressions la forma de les quals està governada per un seguit de jocs de diàclasi paral·lels que en tallen altres que els són perpendiculars. En algunes ocasions, no hi ha evidència d'un control estructural en el desenvolupament en planta del cocó.

A cada un dels transectes, perpendiculars a la línia de costa, s'hi han recollit fragments de roca per a la seva observació mitjançant microscopi electrònic de rastreig (SEM) seguint Taylor i Viles (2000). El centenar i escaig de fragments de roca estudiats procedeixen de diferents posicions de la zonació hidrodinàmica i biològica del perfil, així com dels diferents atributs d'una mateixa forma. Per tant, s'han pres mostres de les crestes dels pinacles, de la seva base, del fons dels cocons, de les parets que els separen o de les entalladures dels seus laterals. La classificació de les nanofomes i atributs relacionats

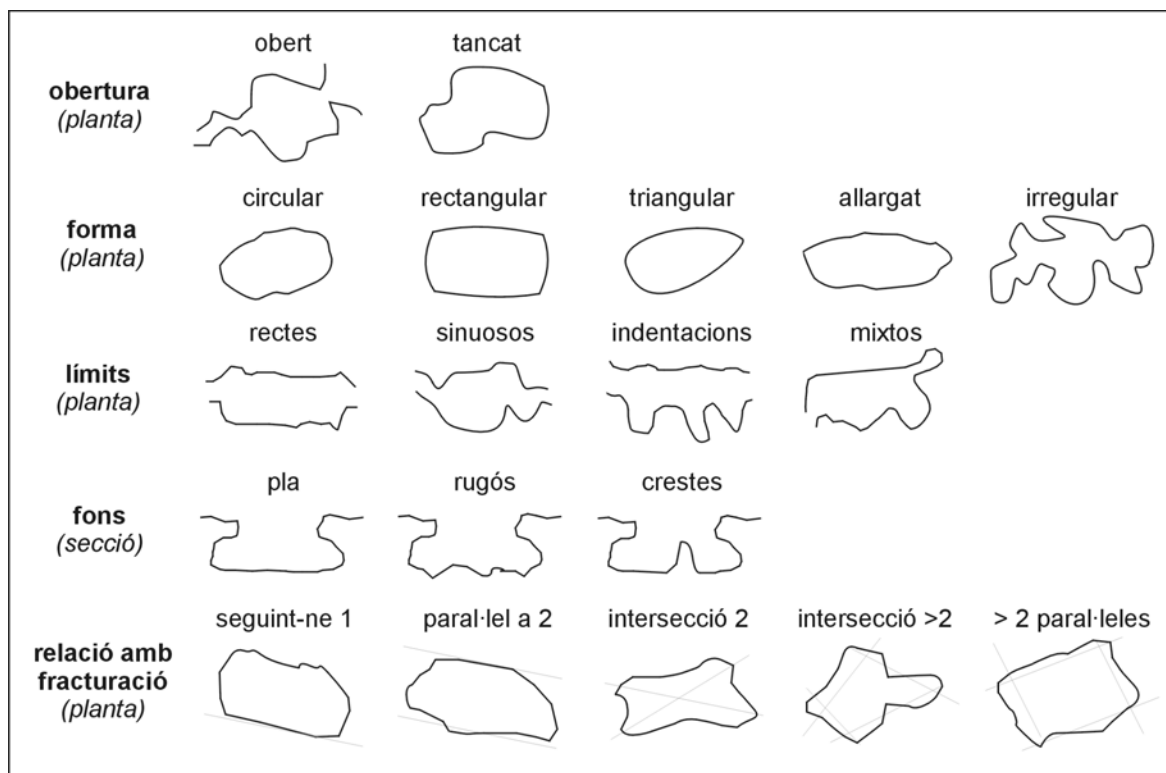


Fig. 5.2 Criteris de classificació dels cocons en funció de la forma, límits, connexió, tipus de fons i relació amb el sistema de fractures segons Johansson *et al.* (2001).

amb els processos d'alteració segueix els criteris de Viles i Moses (1998) i es tractarà més detalladament a l'apartat corresponent, en aquest mateix capítol.

recomanacions de Riba (1997), mentre que per als altres idiomes s'indica la terminologia present a Ginés (1999) i a la bibliografia citada al text.

5.4 Formes i criteris de classificació

No resulta gens senzill agrupar les formes desenvolupades sobre el substrat carbonatat de les costes rocoses, ja que les formes i combinacions d'aquestes obrin un ventall tan ample de possibilitats que fan que les classificacions siguin molt diverses. Bogli (1980) defensa una classificació dominada per un criteri genètic per tal de simplificar les classes o tipologies morfològiques. No obstant això, els claroscurs que encara existeixen sobre els processos que intervenen en el desenvolupament de les microformes de meteorització en el litoral calcari aconsellen un criteri descriptiu de caràcter mixt.

Així doncs, a continuació se segueix l'esquema de Ford i Williams (1989) en el qual la classificació de les formes descansa en els aspectes de forma, tot i que incorpora subdivisions arran dels factors genètics. Les grans classes que en resulten són: formes de planta arrodonida, formes lineals controlades per fractures, formes lineals controlades hidrodinàmicament i un darrer grup de formes complexes o poligenètiques.

Pel que fa a la terminologia catalana s'han adoptat les

5.4.1 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 (Fig. 5.3). 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 profunditat. Es desenvolupen sobre diferents litologies carbonatades i són presents a superfícies planes o subhoritzontals, tant a ambients micromareals com macromareals, sempre i quan predominin a la zona els processos de meteorització química.

Pel que fa a les seves dimensions, la llargària, per norma general, és major que la profunditat. Les relacions entre aquests dos paràmetres varien en funció del substrat (Taula 5.1) Així, els quocients entre llargària i profunditat mantenen proporcions de 5 a 2 (Emery, 1946), de 10 a 1 (Mii, 1962) o de 6 a 1 (Guilcher, 1953) sobre substrats amb porositats baixes i grans ben cimentats. A litologies menys cimentades i

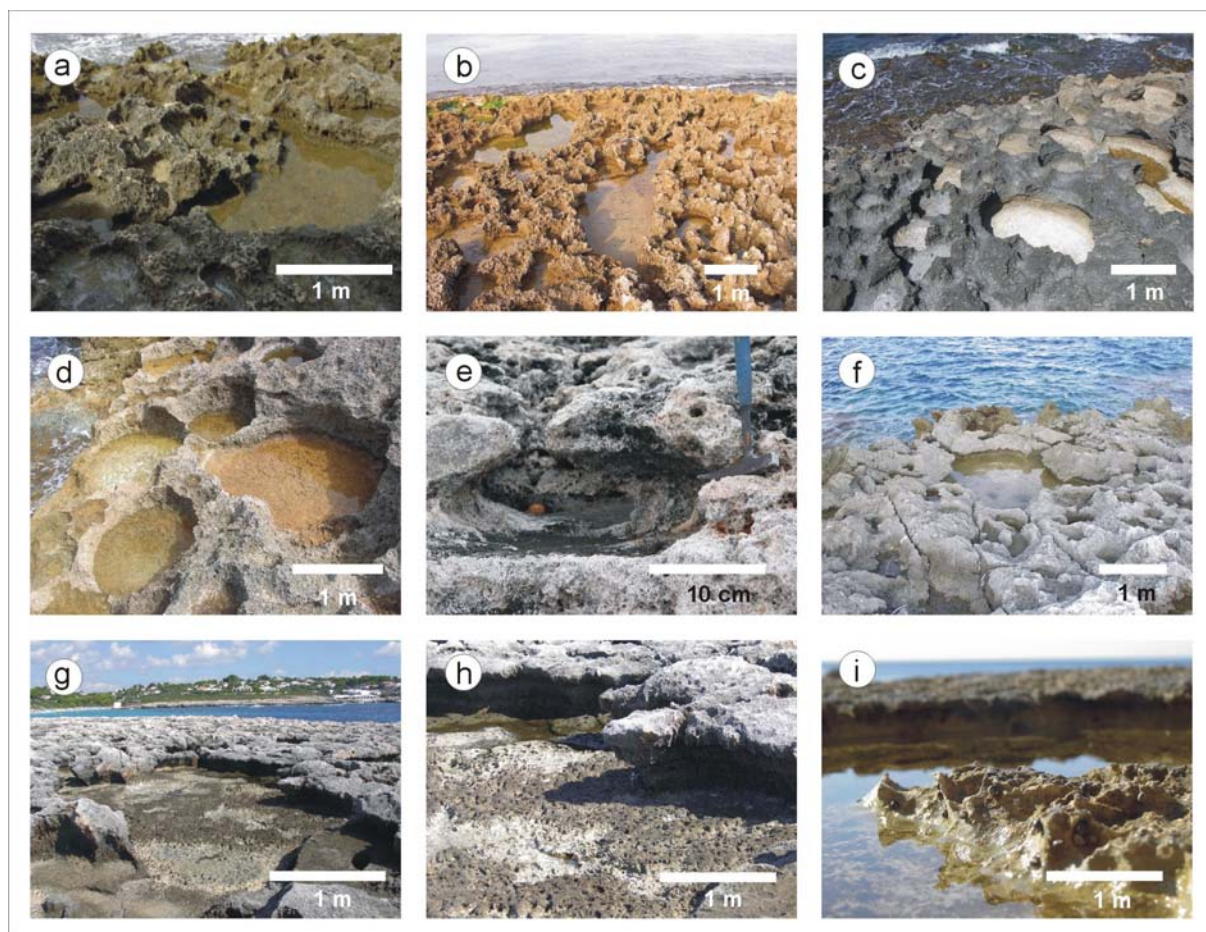


Fig. 5.3 Cocons. a) Cocons interconnectats arran de la intersecció de dues fractures a la contrada de ses Penyes Roges (Calvià, Mallorca) desenvolupats sobre calcàries del Miocè Superior. b) Conjunt heteromètric de cocons, els de major desenvolupament –de 5 a 7 m de llargària– ho fan seguint una alineació de fracturació dominant de direcció NE, Cala Blava (Llucmajor, Mallorca). c) Cocons de planta arrodonida sobre un pegat d'eolianites carbonatades a la Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca). d) Cocons aïllats i de planta arrodonida que comparteixen les parets a les eolianites de Tacàritx (Alcúdia, Mallorca). e) Detall de les parets laterals dels cocons amb entalladures accentuades que són evidència del domini de processos de dissolució sobre fàcies de rodòfits del Miocè Superior a s'Algar (Menorca). f) Cocó de grans dimensions (9 m de llargària), de planta irregular i fons pla, format per la coalescència de diverses formes a Cala Sant Esteve (Sant Lluís, Menorca). g) Detall de la imatge anterior on es poden apreciar els microalvèols que apareixen al fons de la depressió i evidències, a les parets laterals de dos nivells, de dissolució que marquen el reculament de la paret vertical. i) Detall d'una cresta –antiga paret lateral entre dos cocons– al bell mig d'una forma de dimensions modestes sobre les calcàries del Miocè Superior a s'Alavern (Llucmajor, Mallorca).

més poroses, com les eolianites, aquestes relacions mantenen proporcions de 2 a 1 (López-Bermúdez, 1979; Guilcher, 1953; Miller i Mason, 1994; Pérez-Cueva, 1979; Sanjaume, 1979; Schneider, 1976). Els valors màxims de llargària corresponen als 62 m registrats per Battistini (1981) a Madagascar, tot i que arreu els màxims se situen al voltant d'1,5 i 10 m (Taula 5.1).

Els mecanismes genètics implicats en la gènesi dels cocons són bàsicament bioquímics i el gros de la seva formació s'atribueix als processos de dissolució (Trudgill, 1987). Les primeres referències respecte del quimisme de les aigües dels cocons es troben als treballs de Feldman i Davy de Virville (1933). Aquests autors, en el marc d'un estudi de la flora de les costes rocoses, analitzen durant un cicle de 24

hores el pH de l'aigua embassada als cocons i detecten oscil·lacions de 8,1 a 10 unitats de pH. Fins aleshores, des d'un punt de vista geomòrfic, el problema de la gènesi dels cocons resideix en la sobresaturació en carbonat càlcic (CaCO_3) de l'aigua de la mar (Trudgill, 1976a). Per tant, es proposava l'aigua d'escolament com la responsable dels processos de dissolució que afectaven els cocons (Wentworth, 1944). No seria fins als estudis d'Emery (1946), quan s'abordaria el problema des d'una perspectiva analítica. Emery estudià els paràmetres de temperatura ambiental, temperatura de l'aigua, pH i alcalinitat de les depressions sobre substrats calcaris reomplertes d'aigua marina de la costa meridional de Califòrnia (La Jolla). Els seus resultats posaven de manifest l'existència de canvis de pH i d'alcalinitat durant el vespre.

Localitat	Litologia	Dimensions	Situació	Referència
La Jolla (Califòrnia, USA)	Arenisques calcàries cretàciques i eocenes	Llargària: 25 a 50 cm Profunditat: 3 a 20 cm	Plataforma litoral. Amplitud marea: 1 m	Emery (1946)
Wakayama (Japó)	Arenisques calcàries miocenes	Llargària: 20 a 40 cm Profunditat 3 a 4 cm	Plataforma litoral. Amplitud marea: 1 m	Mii (1962)
Costa de Morombe (Madagascar)	Eolianites calcàries pliocenes	Llargària: 15 a 100 cm.	Plataforma litoral de 2 a 4 m d'amplària.	Battistini (1981)
Nord-Arnøy (Gideskaal, Noruega)	Marbre	Llargària: 10 a 300 cm Profunditat: 25 a 30 cm.	Domini supralitoral. Amplitud marea: 2,3 m	Holbye (1989)
Livorno, Rosignano (Toscana, Itàlia)	Dipòsits de platja i eolianites quaternàries	Llargària: 10 a 50 cm Profunditat: 4 a 50 cm	Plataforma litoral Amplitud marea: 0,30 m	Mazzanti i Parea (1979)
Burren (Co. Clare, Irlanda)	Calcàries	Llargària: 24 a 43 cm Profunditat: 8 a 40 cm	Costa baixa esglaonada	Lundberg (1977)
Costa de Zululand (Sudàfrica)	Dipòsits de platja i eolianites pliocenes i holocenes	Llargària: 50 a 600 cm Profunditat: 4 a 24 cm	Rampes i costes baixes esglaonades	Miller i Mason (1994)
Garzotto (Croàcia)	Calcàries	Llargària: 30 cm Profunditat: 10 a 15 cm	Costa baixa esglaonada. Amplitud marea: 1 m	Schneider (1976)
Costa de Múrcia (Múrcia)	Calcàries i dolomies triàsiques, calcàries pliocenes i quaternàries	Llargària: 20 a 80 cm Profunditat: 10 a 32 cm	Costa baixa esglaonada	López Bermúdez (1979)
Costa nord d'Alacant (País Valencià)	Dipòsits de platja i eolianites calcàries quaternàries	Llargària: 20 a 80 cm Profunditat: 10 a 32 cm	Rampes i costes baixes esglaonades	Sanjaume (1979)
Costa sud d'Alacant (País Valencià)	Dipòsits de platja i eolianites quaternàries	Llargària: 50 cm Profunditat: 25 cm	Rampes i costes baixes esglaonades	Sanjaume (1979)
Rabat (Marroc)	Eolianites quaternàries	Llargària: 50 cm Profunditat: 25 cm	Costa baixa	Guilcher (1953)
Gower (País de Gal·les)	Calcàries carboníferes	Llargària: 60 cm Profunditat: 10 cm	Plataforma litoral	Guilcher (1953)
Cala Pudent (Mallorca)	Eolianites quaternàries	Llargària: 90 a 230 cm Profunditat: 7 a 10 cm	Costa baixa esglaonada	Roselló (1979)

Taula 5.1 Recull de dades morfològiques de cocons a diferents localitats i sobre diferents litologies. Els valors de les dimensions fan referència als màxims i els mínims descrits a cada treball. En el cas que només hi aparegui un sol valor, aquest correspon a la mitjana del paràmetre morfològic.

Schneider (1976) desenvolupà el seguiment més complet de paràmetres físics i químic de l'aigua retinguda als cocons a la costa croata. Les corbes d'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), permeten plantejar aquells mecanismes pels quals s'assimila el bicarbonat, tot descartant com a procés, en l'evolució dels cocons, la dissolució inorgànica. Durant el dia, la flora que entapissa la roca consumeix el CO₂ de l'aigua 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, fet pel qual

disminueix el pH i s'incrementa el potencial de dissolució. D'altra banda, Trudgill (1985) destaca el paper de la dissolució diferencial en funció de la mineralogia dels carbonats, ja que mentre l'aigua marina està sobresaturada en carbonat càlcic, no ho està en magnèsic. Debrat (1974) i Miller i Mason (1994) també duen a terme seguiments de la química de l'aigua dels cocons i, juntament amb altres experiències de laboratori (Guilcher i Pont, 1957; Dalongeville *et al.*, 1994 i Trudgill, 1979), apunten en la línia dels treballs d'Schneider, tot posant èmfasi en el control de la microflora que habita a la roca en els processos de dissolució.

Ara bé, la dissolució no és l'únic mecanisme que intervé en el desenvolupament dels cocons. Kelletat

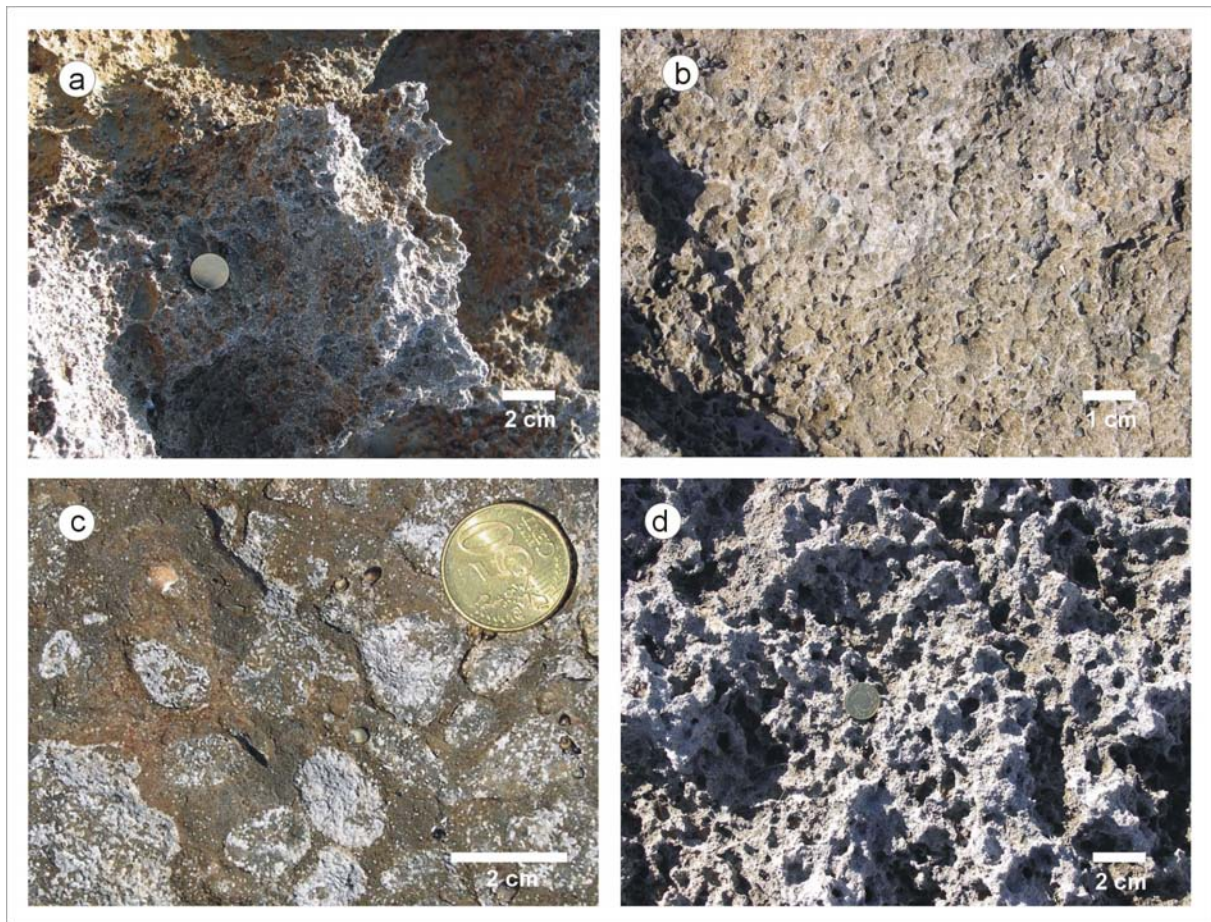


Fig. 5.4 Alvèols i microalvèols. a i b) Superposició de microalvèols a sobre i dins les concavitats d'alvèols sobre les eolianites quaternàries de Cala Blava (Llucmajor, Mallorca) i Son Bauló (Santa Margalida, Mallorca). Molts dels microalvèols apareixen ocupats per exemplars de *Melaraphe neritoides* i *M. punctata*. c) Alvèols i microalvèols poc desenvolupats a les eolianites quaternàries de Cap Salines (Ses Salines, Mallorca). Es pot apreciar com a l'interior dels alvèols la colonització per microflora és menor que a l'exterior, a la vegada que també es pot observar una microrugositat del seu fons que coincideix amb l'acció brostejadora dels individus de *Melaraphe neritoides* que apareixen a la fotografia. d) Alvèols relacionats amb la textura i facies de les calcàries algals –rodòlits– del Miocè Superior de la Punta de n'Amer (Sant Llorenç, Mallorca).

(1997), Dalongeville i Le Champion (1982), Torunski (1979), Trudgill *et al.* (1987) i el mateix Schneider (1976) destaquen l'acció erosiva física i química dels gastròpodes i, en alguns casos, dels equinoderms en l'evolució lateral d'aquestes formes. Tampoc no es pot deixar de banda la meteorització mecànica per l'impacte de l'onatge o de la meteorització per sals, tot i que amb un paper secundari.

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

Les formes que concorren sota l'epígraf d'alvèols són l'exemple més clar d'una forma convergent. Es tracta de petites depressions de planta arrodonida o el·líptica poc profundes. Els diàmetres superiors al centímetre són rars i les profunditats no són majors que la meitat del diàmetre. S'anomenen microalvèols aquelles formes que tenguin un diàmetre inferior al centímetre

i alvèols aquelles que el superin. Es poden disposar alineats, seguint diàclasi, en coalescència o de forma aïllada, tant sobre superfícies planes com sobre superfícies verticals. L'absència d'una orientació preferent d'aquestes formes, la manca d'un control gravitatori dominant, juntament amb el recobriment de la superfície de la roca per líquens i/o cianòfits, posa de manifest la importància dels agents biològics en la gènesi d'aquestes formes (Fig. 5.4). Folk *et al.* (1973) classifiquen aquest seguit de formes com a "fitocarst" en el sentit que són els líquens i els cianòfits, que tenen la roca com a hàbitat, els responsables de la gènesi i evolució d'aquestes formes (vegeu el capítol 3). En la mateixa línia apunten els estudis de Danin *et al.* (1982) i els treballs, específicament desenvolupats a un gradient litoral, de Jones (1989) i Viles (1988b).

Pel que fa als processos que contribueixen a l'evolució dels alvèols i microalvèols, en destaca l'acció dels filaments dels líquens (Moses i Smith,

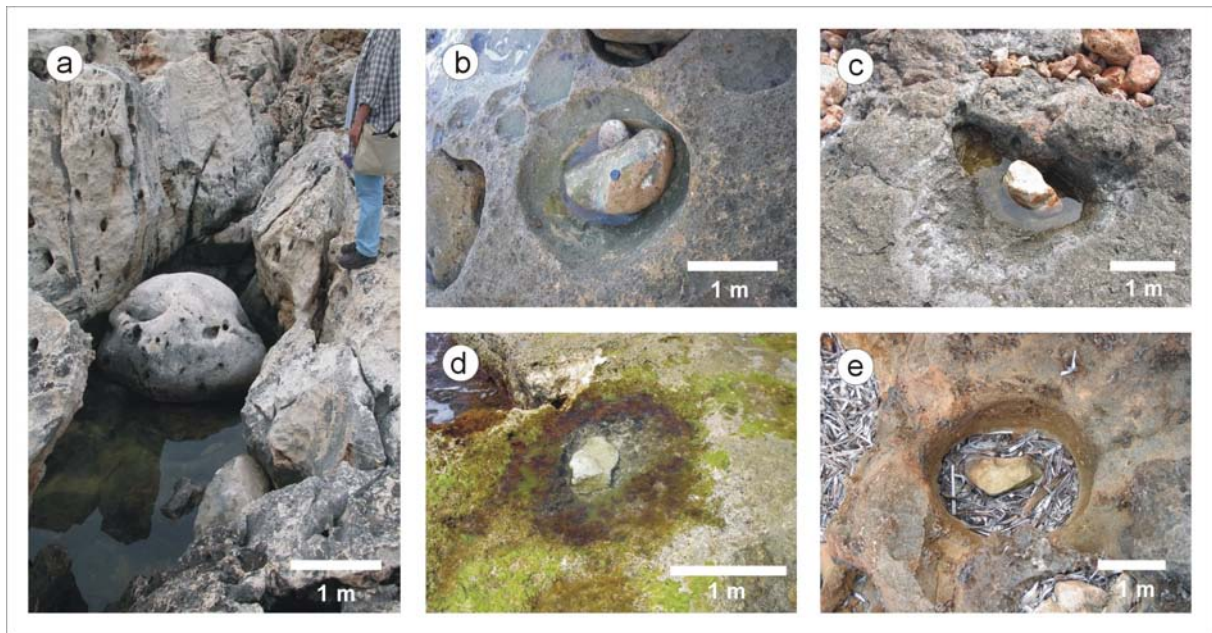


Fig. 5.5 Marmites. a) Marmites de grans dimensions a s'Algar (Sant Lluís, Menorca). El bloc que rota i eixampla una antiga esquerda té dimensions al voltant d'1,5 m d'eix major i 1 m d'amplària i alçària. Presenta una colonització de serpulíds i perforacions d'altres organismes marins que n'indiquen la procedència marina, tot i estar a prop de 5 m per sobre del nivell de la mar. b) Marmita amb evidències de dos cicles d'evolució i varis clastes al seu interior al Cap de Fornells (Menorca). c) Marmita desenvolupada sobre eolianites quaternàries tot i que els blocs són de calcàries del Miocè Superior al Cap Enderrocat (Llucmajor, Mallorca). d) Cocó amb una colonització biològica –observi's les parets entapissades per rodofícies– dins el qual la mar ha deixat un bloc angular alliberat del trencament de la plataforma i que comença a actuar com una marmita. e) Marmita temporalment inactiva que conserva el bloc que efectua l'acció erosiva a Cala Blava (Llucmajor, Mallorca).

1993; Chen et al., 2000) o l'atac químic derivat 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).

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

El manlleu italià taffoni (sing. taffone) és emprat a gairebé 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 de llargària i profunditat), principalment resultat de la meteorització. Per la seva banda, el terme nius d'abella s'utilitza per a aquells taffoni de petites dimensions que presenten com a particularitat una estructura de cel·les a mode de bresques. Tant els taffoni com els nius d'abella, només es desenvolupen sobre superfícies verticals o lleugerament inclinades.

De taffoni i nius d'abella, als ambients litorals, se'n troben arreu i sobre diferents substrats: de les arenisques arcòsiques (Matsukura i Marsuoka, 1996), als conglomerats i arenisques (Matsukura., 1989), esquists (Motersehad, 1982), materials volcànics (Smith i McAllister, 1986) i sobre les eolianites carbonatades quaternàries de la riba oriental de la Mediterrània (Uzun, 1998). La meteorització per sals

s'ha identificat com el principal agent en l'evolució dels taffoni i els nius d'abella (Mottershead i Pye, 1994; Rodríguez-Navarro *et al.*, 1999). També tenen un paper important, tot i que secundari, els processos d'humectació i dessecació i, fins i tot, els processos biològics (Viles i Pentecost, 1994).

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

Les marmites són depressions de planta arrodonida formades sobre el substrat rocós per l'acció física d'arenas, graves, còdols o blocs, que són moguts o rotats per l'energia de l'aigua (Sunamura, 1992).

Aquestes formes 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 de 0,8 a 1 en funció de la forma i les dimensions del clast que les ha generades. Els exemplars que s'allunyen d'aquest patró són el resultat de la coalescència de depressions veïnes o el fruit de les variacions de duresa o textura de la roca (Trenhaile, 1987). Quant a la profunditat, les marmites són més profundes que amples, ja que quan aquestes augmenten la profunditat, sense fer-ho el diàmetre, l'energia cinètica del còdol en moviment es dissipa amb major facilitat. Les marmites poden

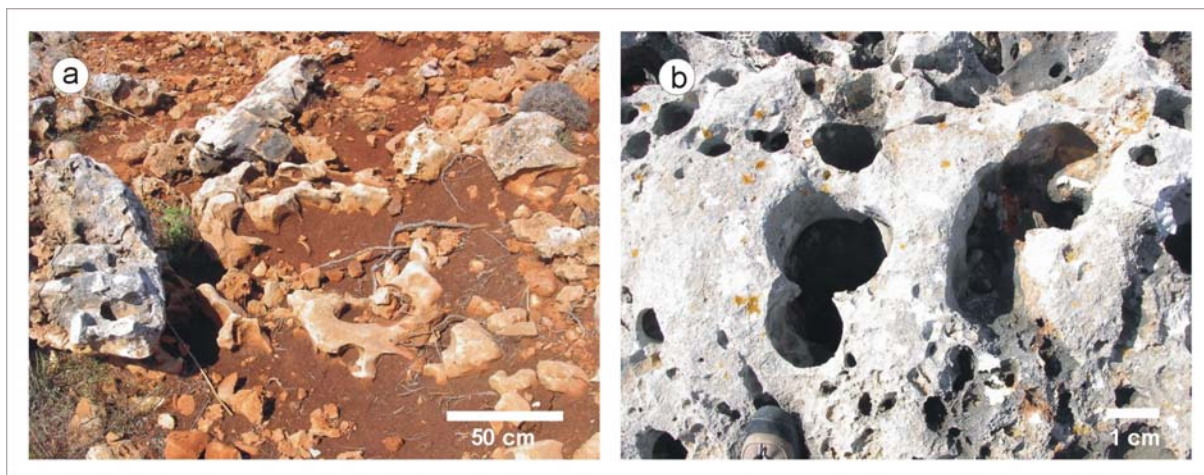


Fig. 5.6 Conductes de subsòl al sector més terrestre del perfil de costa, (a) just acabats de desenterrar a les contrades de Punta Prima (Sant Lluís, Menorca) i (b) més evolucionats a Cala Murada (Manacor, Mallorca). El rocam d'ambdues localitats són calcàries algals del Miocè Superior.

presentar una evolució discontinua en el temps, en el sentit que, durant una tempesta, el clast que provoca l'erosió pot sortir disparat de la depressió. De la mateixa manera, també hi pot entrar nou material particular que activi de nou 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 un clast, que per l'acció de l'onatge desenvolupi una acció erosiva, passa a comportar-se com una marmita. Igualment, en perdre el clast, adquireixen preponderància altres processos com puguin ser els propis dels cocons (Fig. 5.6). Les marmites apareixen sobre substrats diferents sempre que es disposi de material abrasiu. Així, es coneixen referències de la presència d'aquestes formes sobre marbres (Holbie, 1989), granits (Trenhaile et al., 1999), materials volcànics (Sunamura, 1992) i eolianites quaternàries (Sanjaume, 1985). Val a dir que són freqüents exemples fossilitzats d'aquestes formes, tant per sobre com per sota del nivell marí actual (Gràcia i Vicens, 1998).

Conductes de subsòl – *soil dissolution tubes, tubules, shafts* (ang.); *criptolapiaz* (cast.).

Els conductes tubulars són formes de planta arrodonida, 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 d'1 a 1 per a les dimensions en planta i d'1 a 2 respecte l'eix major i la profunditat. Les dimensions dels conductes varien de mínims de 4×4×9 cm fins a màxims de 26×26×50 cm. La forma vertical del conducte pot ésser sinuosa i, en molts casos, apareix amb sòls originals o d'erosió al seu interior. També es pot donar el cas de trobar-hi una gradació que va des de material al·locton (restes de *Posidonia oceanica*, bioclasts) a una potència

considerable de llims vermells. Les parets són suaus, amb evidents signes d'una dissolució homogènia facilitada per la cobertura edàfica (Fig. 5.6).

5.4.2

Formes lineals controlades per fractures

Microfissures – *microfissures* (ang.), *microfissuras* (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 desenvolupar-se. L'aigua que circula per les microfissures prové, bé de la pluja, bé de l'onatge (Fig. 5.7). 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 centimètric. El mateix succeeix amb la profunditat (Ford i Williams, 1985). Quan sobre un substrat s'hi donen varies famílies de diàclasi, les esquerdes poden formar canals, aparentment, meandriformes (Fig. 5.7). 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

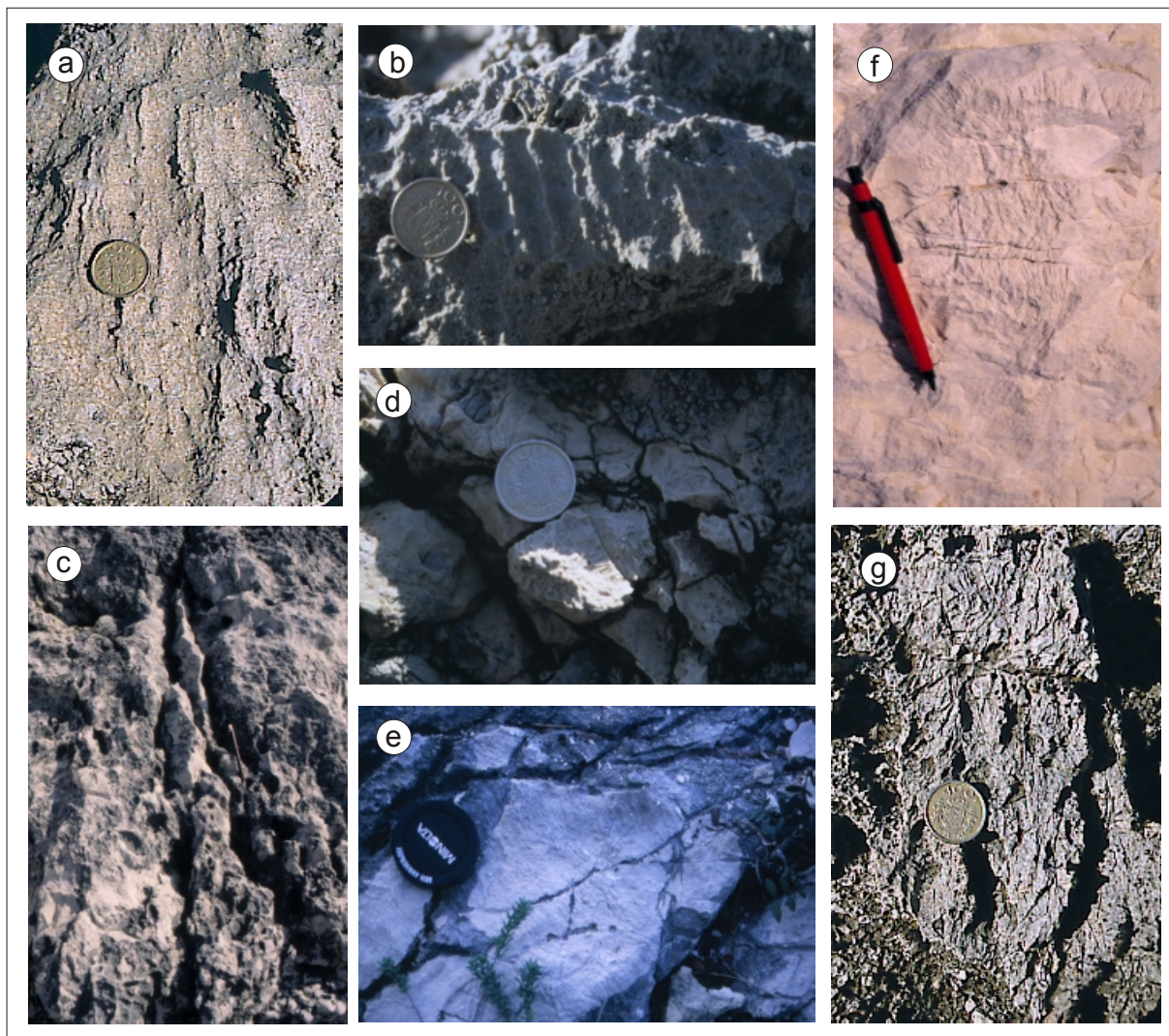


Fig. 5.7 Formes lineals. a i b) Estries desenvolupades sobre calcarenites del Miocè Superior (Cala Murada, Manacor, Mallorca) i bretxes juràsiques (Cala d'en Guixar, Calvià, Mallorca), respectivament. Observi's la forma en "u" i paral·lela dels canals. La primera de les fotografies correspon al domini del ruixim, mentre que la segona s'ubica a la zona d'esquits. c) Esquerdas amb longitud d'ordre mètric i amplada d'ordre cm, desenvolupades seguint la fracturació a la Punta des Sivinar (Santanyí, Mallorca). d) Microsolcs trenats presents sobre els clasts d'una bretxa. El clast és d'una textura més fina que no la matriu a Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca). e) Microsolcs desenvolupats sobre una superfície plana, que comencen a ésser desmantellats per petits microal·veòls. La textura de la roca és de tipus *mudstone*. Cala Murada (Manacor, Mallorca). f i g) Microfissures sobre calcàries mesozoïques i bretxes juràsiques a la Punta des Faralló (Cala Rajada, Capdepera, Mallorca) i a Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca), respectivament.

aquelles superfícies lleugerament inclinades cap a la mar i allà on els sistemes de cocons no estan ben desenvolupats.

5.4.3

Formes lineals controlades per hidrodinamisme

Microsolcs microrills, rillenstein (ang.)

Els microsolcs són formes lineals l'amplada dels quals sol ésser d'1 mm i molt poc profunds. Així com les microfissures tenen un fons angulós i abrupte, els microsolcs el presenten més suau i arrodonit. Són sinuosos i, fins i tot, trenats sobre superfícies subhoritzontals que esdevenen rectes amb l'increment del pendent (Fig. 5.7). Es localitzen únicament a la

zona afectada pel ruixim de l'onatge i sobre superfícies de textura molt fina i homogènia. Ford i Williams (1989) atribueixen la gènesi d'aquesta morfologia als fluxos d'aigua per capil·laritat 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 i 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.

L'aparença dels microsolcs, encara que aquest aspecte no ha estat abordat en profunditat, recorda els processos que es donen a zones àrides, com el sud de

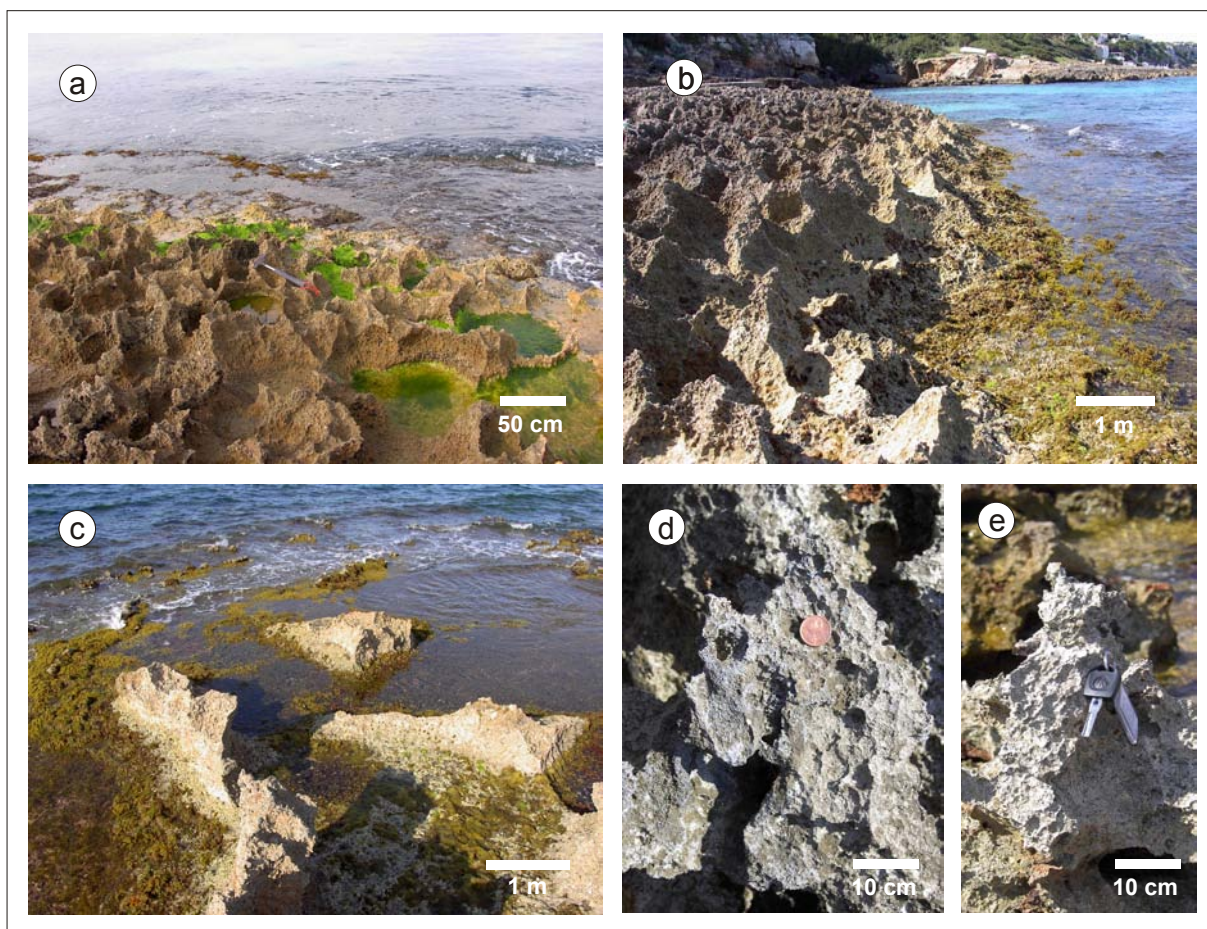


Fig. 5.8 Pinacles. a) Pinacles aïllats just a tocar de la plataforma litoral i d'altres que encara estan units a les seves bases a Cala Agulla (Capdepera, Mallorca). b) El desenvolupament dels pinacles, en aquest cas sobre eolianites quaternàries, dóna lloc a topònims com la Punta de ses Punxes (Cala Blava, Lluçmajor, Mallorca). c) Pinacles aïllats a la Punta de Tacàrit (Alcúdia, Mallorca). d i e) Detall dels microalvèols superposats a la forma piramidal dels pinacles al Far de Ciutadella i Punta Prima (Menorca). Observi's la manca d'orientació preferent dels microalvèols.

Tunísia, on es consideren les microformes lineals com a relictos (tot i que força recents), fruit d'unes condicions més humides (Smith *et al.*, 2000).

Estries *rillenkarren*, *solution flutes* (ang.), *cannelures* (fr.); *estrias 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 i 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 de Mallorca), mentre que 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 cianòfits que entapissen la roca (Fiol *et al.* 1996). No hi ha gaire informació sobre

el desenvolupament d'aquesta forma en els conjunts de *karren* litoral, llevat dels estudis de Miller i Mason (1994) al sud de Sudàfrica, on s'hi desenvolupen sobre dipòsits de platja i eolianites quaternàries (Fig. 5.7).

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

Aquesta és una morfologia poc comuna en el *karren* litoral. Es tracta de canals amb una amplada que supera el cm, paral·lels entre ells. Es disposen sobre l'extraplom de cocons que han aprofitat l'estructura de la roca per desenvolupar-se, de manera que actuen com a col·lectors de l'aigua cap a l'interior dels cocons.

5.4.4
Formes poligenètiques

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

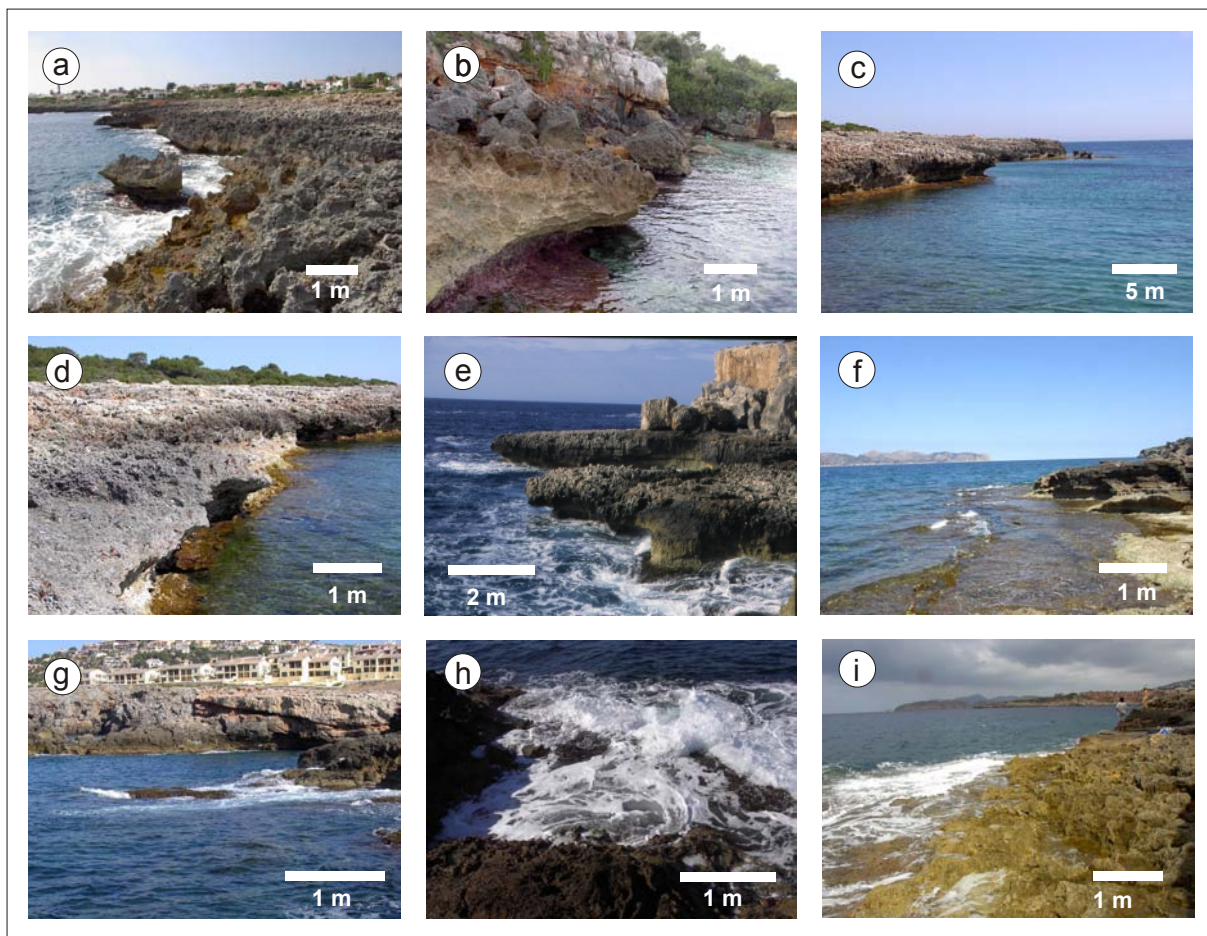


Fig. 5.9 *Notchs, trottoirs i plataformes.* a) *Notchs* tallats a les calcàries algals del Miocè Superior al Cap d'Artrutx (Ciutadella, Menorca). b) *Notch* amb relleix biogènic, *trottoir*, a la seva base proper al Cap Enderrocat (Llucmajor, Mallorca). c i d) Perfils de *notch* i plataforma i *notch* i *trottoir* a la Punta de n'Amer afectant calcàries del Miocè Superior (Sant Llorenç, Mallorca). e) *Notchs* de grans dimensions als sortints d'un sector de costa ben articulada a la Punta des Sivinàr (Santanyí, Mallorca). f) Plataforma litoral de 5 m d'amplària tallada sobre eolianites quaternàries a la Punta Llarga (Alcúdia, Mallorca). g i h) Plataforma litoral amb amplàries de 3 a 7 m tallada sobre les bretxes plegades del Retià a la Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca). i) Plataforma litoral de 4 a 6 m d'amplària sobre calcàries del Miocè Superior entre les Penyes Roges i el Banc d'Eivissa (Calvià, Mallorca).

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). Els pinacles apareixen a la transició entre la zona d'estopeig de l'onatge i el domini dels esquits. En general, els pinacles tenen una aparença molt esponjosa perquè estan completament entapissats per microalvèols sense cap tipus d'orientació preferent (Fig. 5.8). D'altra banda, les seves arestes són molt abruptes.

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 i 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 pinacle. Trudgill (1979), Folk *et al.* (1973) i Jones (1989) atribueixen la gènesi dels pinacles a l'erosió diferencial i a l'alteració biològica, especialment pel que fa al microrelleu

superposat a la forma piramidal. Moses (2003) hi lliga la meteorització per sals.

Notch, balma, entalladura *notch, groove, nip, surf-notch* (ang.); *encorbellement, encoche, entaille* (fr.); *entalladura* (cast.)

Un *notch* és una indentació, de pocs centímetres a bastants metres, tallada a la costa rocosa en el vessant que dona al mar. Els *notchs* varien en mida, forma i relleu superficial i poden aparèixer a diferents nivells i desenvolupar-se arran de diferents processos (Pirazzoli, 1986).

El desenvolupament dels *notchs* 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 *notch* per una superfície de la roca polida; llavors es parla d'un *notch* d'abrasió (Trenhaile *et al.* 1998). Cal separar-los d'aquells que

també s'han format per l'acció impactant, tot i que afavorits per la disposició estructural (*notchs* estructurals). Quan els que dominen són els processos de meteorització química i l'acció dels organismes, es classifiquen com a *notch* de corrosió (Higgins, 1980; Rust i Kershaw, 2000) o de bioerosió (Abesnperg-Traun *et al.*, 1990; Hodgkin, 1970; Pirazzoli & Salvat, 1992), en funció de la preponderància dels processos.

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

Les plataformes litorals són superfícies d'erosió subhoritzontals, d'extensió variable en funció de l'exposició i les característiques del substrat sobre el qual es desenvolupen, de més a més d'una important component relacionada amb les condicions oceanogràfiques (Trehaile, 2002 i 2004b). 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).

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

El *trottoir* és una construcció biogènica produïda principalment per algues calcàries i vermètids (Kershaw, 2000). Es disposa sobre la costa o adossada a la costa rocosa des de pocs mm per sobre el nivell del mar a uns quants cm per sota (Fig.5.9). Està condicionat per l'abast de la cavitació de l'onatge, que és un dels mecanismes més importants d'aportació de l'oxigen i dels 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. A la vegada, també facilita el desplaçament de l'onatge cap a dins del perfil de costa, alhora que els propis organismes realitzen accions d'erosió (Nunn, 1993), tant mecàniques com químiques.

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.); *cheminée de jaillissement*, *soufflard* (fr.); *bufadero*, *bufón*, *sopladero* (cast.)

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 tractàs d'un guèiser.

5.5 Distribució i organització del *karren* litoral a Mallorca i al Migjorn de Menorca

Un periple marítim en sentit antihorari permetrà, primer, identificar i analitzar el micromodelat de les costes rocoses carbonatades de Mallorca, per passar després a les del Migjorn de Menorca.

5.5.1 Cala d'en Guixar (CG)

La Cala d'en Guixar, un sector de costa entre les localitats d'El Toro i Santa Ponça (Calvià), representa un dels enclavaments de contacte més occidental i meridional de la Serra de Tramuntana amb la mar. A la localitat d'estudi, hi afloren bretxes carbonatades plegades del Retià, sobre les quals hi descansa un paquet potent de paleosòls, ventalls al·luvials i dipòsits d'interferència entre processos col·luvials, al·luvials i sistemes dunars que, amb tota probabilitat, corresponen a la transició Pliocè – Quaternari (Rohdenburg & Sabelberg, 1973). S'adossen a la costa, i sobre els materials anteriors, un seguit de dunes grimpadores quaternàries per criteri estratigràfic de l'estadi isotòpic 3-4 que, desventrades per la mar o per l'exploració com a pedreres, ofereixen un paisatge ben interessant de la costa. Es tracta d'un sector de costa ben articulad, amb nombrosos entrants i sortints que aprofiten l'estructura i plegament del rocam, fet pel qual són abundants els exemples de coves marines.

A la Cala d'en Guixar s'hi han estudiat dos perfils de costa. Un sobre les bretxes del Retià i l'altre sobre eolianites quaternàries que permet comparar els efectes de la litologia i de la fracturació sobre les formes del rascler litoral (Fig. 5.10).

5.5.1.1 Perfil sobre bretxes

El primer dels perfils està tallat sobre bretxes dolomítiques plegades del Retià, poc poroses (6,2%) i amb valors de rebot de l'escleròmetre de 58,8, per la qual cosa a l'escala de Selby entrarien a la categoria de roques dures. Pel que fa a la fracturació, la línia de costa la defineixen dos conjunts de fractures de direcció 090° i 165°. La primera delimita les alineacions paral·leles a la línia de costa i la segona els entrants, més o menys perpendiculars. Se n'han identificat dues famílies més, de fractures, tot i que de

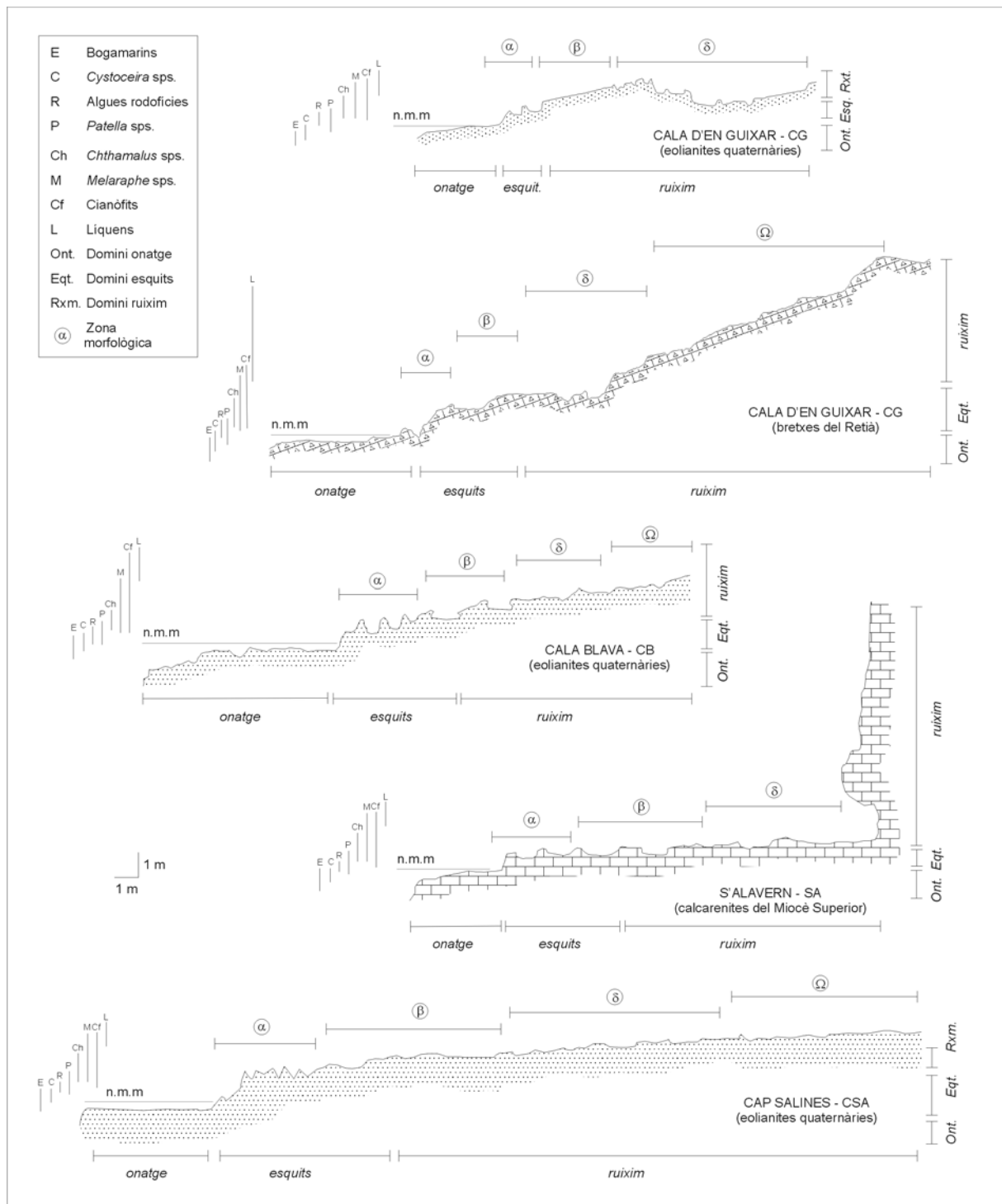


Fig. 5.10 Zonació morfològica, biològica i hidrodinàmica dels perfils estudiats a Mallorca. Localització dels perfils a la figura 1.

menor importància, amb direccions al voltant de 065° i 010° . L'alçària mitjana significant de les onades a la zona, a mar oberta, és de 1,15 m amb màxims de 2,20 m. Les tempestes i vents dominants són de SW.

El perfil on s'ha procedit a la mesura de les formes de planta arrodonida té una longitud de 22 m i una alçària de 6 m, des del punt on la plataforma litoral trenca la seva component horitzontal, fins al punt on

apareixen els primers exemplars de *Limonium sps.*

Des d'un punt de vista morfològic, al perfil, s'hi distingeixen un mínim de cinc zones. La primera, de mar cap a terra, correspondria a la **plataforma litoral**. Aquesta té una amplària mitjana de 3,15 m, tot i que arriba a màxims de 4,23 m, amb un pendent mitjà de $0,88^\circ$. Es tracta d'una superfície subhoritzontal completament coberta per una pàtina biològica

d'algues vermelles i organismes incrustants que, juntament amb els pradells d'algues com *Cystoceria sp.* o els esculls de musclos (*Mytilus edulis*), esmorteixen l'acció de les onades que rompen a la plataforma i protegeixen la plataforma de la seva acció erosiva. L'aparença de la superfície de la plataforma és suau i tan sols es veu trencada per les depressions dels bogamarins (*P. lividus* i *A. lixula*) i també per alguna marmita. Els blocs de les marmites sotaiguades són fragments arrabassats dels nivells al·luvials i dels encrostaments quaternaris que romanen per sobre les bretxes del Retià terra endins. No s'aprecia la presència de *notchs* al contacte entre la plataforma i la part emergida de la costa rocosa, així com tampoc als sectors de les bretxes del Retià que cauen a plom mar endins.

El segon segment del perfil (**zona α**) el delimita la presència d'un microrelleu rugós sobre les parets verticals i els replans, de poca entitat -20 a 80 cm d'alçària-, sobre els quals abunden al·vèols i microal·vèols lligats a l'activitat bioerosiva de *Patella rustica* i *Patella caerulea* i dels cianòfits. És una zona relativament estreta, de poc més d'1 m d'amplària. En la seva transició amb el primer sector, on apareixen els cocons, hi destaquen depressions bioconstruïdes per crustacis filtradors com *Chthamalus stellatus*, allà on, en altres perfils, hi trobam pinacles. Les seves dimensions són variades i sovint venen condicionades per les esquerdes que s'organitzen a mode *trittkarren*. Aquests cocons són de planta circular o allargada i no superen els 20 cm d'eix major i el 10 cm de profunditat.

El tercer sector (**zona β**) queda clarament delimitat per una densitat elevada de cocons, dels quals la característica més evident és la seva coalescència (Taula 5.2). El 81,25% de les depressions mesurades en aquest domini estan desventrades en el seu flanc marí. O bé han perdut la paret que els separa d'altres individus, o en mantenen una cresta prou baixa com perquè, amb determinats volums d'aigua, sols es puguin individualitzar els cocons en base a l'arrodoniment o al tancament de la seva planta. Aquí els cocons tenen unes dimensions mitjanes de llargària de 30,30 cm, amb màxims de 214 cm i una relació de 2 a 1, pel que fa a la llargària i l'amplària, i de 5 a 1, pel que fa a la llargària i la profunditat. La fondària dels cocons a la zona β gira al voltant dels 6 o 7 cm, tot i que hi ha màxims de 33 cm. La majoria dels cocons tenen una planta el·líptica, o bé rectangular i els seus límits són rectes arran de la fracturació que, en un 75% del casos, lliga la presència dels cocons a la intersecció de dues diàclasis.

El quart domini (**zona δ**) té una aparença més suau. Els cocons continuen essent les formes dominants, tot i que, respecte a l'anterior sector, hi apareixen en major proporció els cocons tancats (37,5%) i en

disminueixen els connectats sense perdre la seva important presència (62,5%). Per cocons tancats cal entendre aquells que comparteixen carenes o parets amb d'altres, però són independents els uns respecte dels altres, de manera que no hi ha un transvasament d'aigua entre cocons veïnats. Les dimensions mitjanes són lleugerament superiors, 37 cm de llargària, 21 cm d'amplària i 10 cm de profunditat. No obstant això, el caràcter rectangular (50%), els límits rectilinis de les depressions (69%), juntament amb la mateixa presència dels cocons (75%) ve condicionat per l'encreuament de les diàclasis (Taula 5.2). Les superfícies que queden entre cocons presenten un microrelleu on abunden els microal·vèols a les superfícies planes, a més a més de l'eixamplament d'esquerdes per dissolució.

Finalment, el cinquè dels sectors (**zona Ω**) coincideix amb el canvi més bruscat de pendent del perfil, devers 3 m d'altura respecte el zero relatiu del perfil. Als replans, encara hi apareixen alguns cocons, encara que quasi exclusivament tancats (81%) i aïllats els uns dels altres, sense compartir envans. Les dimensions mitjanes de les depressions, així com les màxims, són menors respecte dels segments anteriors. Així, els seus valors són de 28,60 cm de llargària mitjana. Els màxims arriben als 59 cm. Mentre la relació de llargària i profunditat és similar a la de les altres zones, també s'acusa una disminució de l'eix menor dels cocons, ja que la relació de llargària i profunditat és d'1,47 a 1. A diferència de les zones anteriors i malgrat la textura de la roca, els cocons de la zona Ω , en un 81 % dels casos, tenen el fons pla. El paper del control de les diàclasis és palès una vegada més, el 69% de les depressions són rectangulars i, en més d'un 75% de les observacions, els límits són rectes i responen a la presència de la pròpia diàclasi o a la intersecció de dues. Cal destacar la presència de formes lineals de control hidrodinàmic, en particular d'estries (*rillenkarren*) en alguns sectors, o crestes entre esquerdes de la superfície rocosa, així com també de microsolcs sobre els clasts de gra molt fi de les bretxes.

5.5.1.2 Perfil sobre eolianites

El segon dels perfils estudiats a la Cala d'en Guixar està tallat sobre un pegat d'eolianites carbonatades quaternàries ubicat en el cul d'un petit entrant de la línia de costa. Des d'un punt de vista petrològic, ens trobam davant d'una biocalcarenita, ben classificada, i amb una marcada laminació per l'alternança d'arenas mitjanes i fines. Es tracta d'una roca poc cimentada, i molt porosa (24,25%), amb uns valors de rebot d'escleròmetre (28,6) que correspon a la categoria de roca poc resistent. L'alçària mitjana significant de les onades, a mar oberta, és d'1,15 m amb màxims de 2,20 m. Les tempestes i vents de SW són dominants. Respecte el perfil anterior, tenen una orientació

Litologia perfils		Cala d'En Guixar					Cala Blava			S'Alavern		Cap Salines		
		Bretxes carbonatades (Retià)			Eolianites carbonatades (Quaternari)		Eolianites carbonatades (Quaternari)			Calclutites (Miocè Superior)		Eolianites carbonatades (Quaternari)		
Zonació morfològica		β	δ	ω	β	δ	β	δ	ω	β	δ	β	δ	ω
Llargària (cm)	Mitjana	30,30	36,90	28,60	31,60	51,20	57,50	75,60	47,50	27,40	25,30	120,40	91,40	101,30
	SD	50,90	43,80	15,20	18,30	58,10	15,60	17,20	13,60	12,70	17,20	41,70	52,20	52,50
	Mínim	4,50	9,00	7,00	10,00	12,00	38,00	40,00	31,00	8,00	7,00	70,00	33,00	32,00
	Màxim	214,00	189,50	59,00	70,00	204,00	80,00	105,00	65,00	61,00	70,00	204,00	225,00	190,00
Amplària (cm)	Mitjana	12,40	20,60	21,60	25,80	34,60	43,80	46,90	35,10	20,30	17,40	86,90	50,70	69,90
	SD	15,30	29,40	13,10	16,60	35,90	15,60	17,60	16,00	9,40	10,60	29,90	36,50	32,40
	Mínim	2,50	7,00	3,50	9,00	9,00	29,00	10,00	17,00	7,00	6,00	50,00	16,00	22,00
	Màxim	66,50	128,00	43,00	70,00	120,00	71,00	75,00	70,00	38,00	46,00	144,00	150,00	130,00
Fondària (cm)	Mitjana	6,30	10,40	7,30	22,70	14,30	25,30	26,30	25,20	17,50	13,60	32,70	18,80	15,50
	SD	8,20	7,20	3,40	12,10	9,00	4,67	4,60	8,20	7,60	8,50	14,70	7,30	3,30
	Mínim	1,00	2,80	1,00	5,00	4,00	17,00	18,00	15,00	6,00	4,00	15,00	10,00	10,00
	Màxim	33,20	28,00	13,00	55,00	30,00	33,00	34,00	42,00	33,50	31,00	67,00	30,00	20,00
Llargària vs. amplària	Mitjana	2,18	2,04	1,47	1,24	1,47	1,36	2,06	1,46	1,39	1,42	1,40	1,91	1,47
	SD	1,02	0,91	0,41	0,28	0,37	0,30	1,76	0,40	0,43	0,34	0,24	0,40	0,35
	Mínim	1,06	0,92	0,90	0,79	1,00	1,09	1,14	0,90	1,04	1,00	1,03	1,43	0,76
	Màxim	5,00	4,38	2,55	1,95	2,42	2,08	7,00	2,10	2,54	2,26	1,75	2,55	2,13
Llargària vs. fondària	Mitjana	5,04	3,69	4,30	2,01	3,70	2,31	2,90	1,93	1,65	1,92	3,99	5,09	6,31
	SD	2,36	2,59	2,08	1,86	2,31	0,61	0,62	0,34	0,67	0,73	1,38	2,27	2,59
	Mínim	2,11	1,25	1,50	0,33	0,40	1,31	1,90	1,43	0,88	0,96	2,09	2,00	3,20
	Màxim	8,80	8,97	10,00	6,86	8,16	3,33	4,06	2,52	4,29	4,63	6,73	8,33	11,33
Obertura (%)	Obert	81,25	62,5	18,75	64,71	29,41	70,00	80,00	-	80,00	13,33	100,00	20,00	0,00
	Tancat	12,5	37,5	81,25	35,29	70,59	30,00	20,00	100,00	20,00	86,67	-	80,00	100,00
Forma (%)	Circular	6,25	-	-	76,47	76,47	60,00	40,00	20,00	33,33	43,33	20,00	30,00	10,00
	Rectangular	37,50	75,00	68,75	-	-	-	-	10,00	6,67	13,33	10,00	10,00	50,00
	Triangular	12,50	6,25	12,50	5,88	5,88	30,00	20,00	30,00	10,00	23,33	10,00	10,00	10,00
	Allargat	25,00	6,25	6,25	5,88	0,00	10,00	20,00	30,00	33,33	13,33	40,00	40,00	20,00
	Irregular	25,00	12,50	12,50	11,76	17,65	0,00	20,00	10,00	16,67	6,67	20,00	10,00	10,00
Límits (%)	Rectes	75,00	68,75	75,00	-	5,88	10,00	10,00	40,00	-	6,67	20,00	20,00	60,00
	Sinuosos	-	6,25	12,50	88,24	88,24	50,00	40,00	40,00	53,33	70,00	20,00	50,00	20,00
	Indentacions	12,50	18,75	6,25	11,76	-	-	-	-	10,00	16,67	10,00	-	-
	Mixtos	12,50	6,25	6,25	-	5,88	40,00	50,00	20,00	36,67	6,67	50,00	30,00	20,00
Fons (%)	Pla	6,25	62,50	81,25	23,53	82,35	-	60,00	10,00	6,67	76,67	-	90,00	90,00
	Rugós	68,75	37,50	18,75	64,71	11,76	90,00	10,00	90,00	76,67	23,33	80,00	-	-
	Crestes	25,00	6,250	-	11,76	5,88	10,00	30,00	-	16,67	-	20,00	10,00	10,00
Relació amb fractures (%)	Seguint-ne 1	12,50	25,00	37,50	23,53	47,06	20,00	20,00	50,00	10,00	16,67	20,00	40,00	-
	Paral·lel a 2	-	-	-	-	11,76	-	-	-	70,00	-	-	20,00	20,00
	Intersecció 2	75,00	25,00	50,00	76,47	35,29	70,00	70,00	40,00	20,00	76,67	20,00	30,00	50,00
	Intersec. > 2	12,50	50,00	12,50	-	-	10,00	10,00	10,00	-	3,33	60,00	10,00	30,00

Taula 5.2 Paràmetres morfomètrics dels cocons de Cala d'en Guixar a Cap Salines.

paral·lela, si bé el primer es troba a un sortint de la costa i el de les eolianites a una entrada.

El perfil té una longitud de 12 m i una alçària de 3 m des del trencament de la plataforma litoral fins allà on acaba l'aflorament d'eolianita i torna a aparèixer la bretxa retiana. La forma del perfil està controlada per la geometria i la disposició de l'estratificació del pegat de duna (Fig. 5.10).

Del perfil sobre eolianites, en podem separar quatre zones en funció de la distribució de les formes. La primera d'elles, de mar cap a terra, és el mòdul que defineix la **plataforma litoral**. Com en el cas anterior, es tracta d'una superfície subhoritzontal de 4,69 m d'amplària i rost mitjà de 0,78°, entapissada

per una pàtina d'algues rodofícies sobre la qual hi descansa una comunitat d'algues verdes. La comunitat de bogamarins és més important i dona com a resultat un major nombre de depressions i una superfície més rugosa. Tot i que al perfil estudiat no hi ha *notch*, sí que als afloraments d'eolianites quaternàries més arcerats es troben exemples de dimensions considerables, gairebé sempre associats a *trottoirs*.

Just per sobre del nivell superior de la *Cystoceira sp.*, a la **zona α** , hi apareixen cossos piramidals d'eolianita de 24 a 76 cm d'alçària, als quals se superposa una xarxa de microalvèols amb diàmetres al voltant de 0,5 cm o inferiors. Així com s'avança cap a terra, els pinacles estan units a la seva base per cordons o crestes que, en alguns casos, arriben a individualitzar

algun cocó. A les parets verticals dels pinacles, s'hi troben *Chthamallus stellatus*, *C. depressus* i *Melaraphe neritoides*, mentre que als espais plans entre pinacles hi ha un nombre considerable d'exemplars de *Patella caerulea* i *P. rustica*. A grans trets, la superfície entre cocons no és gaire accidentada, tot i que s'hi poden apreciar les depressions associades a l'acció brostejadora de les pegellides.

El següent sector, **zona β** , a 3 m del zero relatiu del perfil, es caracteritza per la presència de cocons que estan connectats o bé que comparteixen envans. Fins i tot, algun dels envans presenta un grau tan elevat d'evolució que recorda els pinacles. Les dimensions mitjanes dels cocons en aquesta zona són de 31,60 cm de llargària, prop de 26 cm d'amplària i 22,70 cm de profunditat (Taula 5.2). Les dimensions màximes que s'hi registren són de 70 cm de llargària. A diferència de l'altre perfil, les relacions entre paràmetres morfomètrics són menors. Així es pot parlar de formes lleugerament aplanades, ja que la llargària i l'amplària mantenen proporcions d'1,24 a 1 i, respecte de les de profunditat, de 2 a 1. En la seva majoria, els cocons de la zona estan oberts (64,71%) i presenten una planta circular (76,47%) i límits sinuosos (88,24%), a diferència del perfil sobre bretxes retianes, fet que remarca l'escàs control que exerceix la fracturació sobre el pegat d'eolianites quaternàries. El fons dels cocons és rugós (64,71%) i, en aquells connectats i amb plantes irregulars, s'hi observa la presència de crestes com a testimoni d'antics envans.

El darrer sector del perfil, **zona δ** , el defineixen una vegada més els cocons, tot i que aquest cop en destaca que no estan connectats i que romanen aïllats els uns respecte dels altres. Així, el 70,59% de les observacions corresponen a depressions tancades, les dimensions de les quals són lleugerament superiors a les de la zona anterior. La llargària mitjana arriba als 51,20 cm amb màxims de 204 cm, mentre que la mitjana de profunditat és de 14,30 cm. Així les relacions entre llargària i amplària se situen al voltant d'1,47 i les de llargària i profunditat ho fan a 3,70. Existeix certa organització en la disposició de les formes. Un mínim del 50% de les observacions segueix la mateixa alineació pel que fa al seu eix major. El fons dels cocons és pla i a les seves parets s'hi observa una important presència de *Melaraphe neritoides*.

5.5.2

Cala Blava (CB)

El perfil es troba a la badia de Palma, a un sector de costa comprès entre el caló de s'Almadrava i la Punta de ses Punxes, en referència a l'abassegadora presència de les formes de *karren* litoral. Es tracta d'un conjunt de dunes quaternàries que es disposen

sobre el substrat Miocè. Aquest apareix en algunes raconades, rere la rampa a la qual dona cos la duna fòssil, així com ens apropam al Cap Enderrocat.

El perfil està modelat sobre eolianites quaternàries atribuïdes al Tirrenià (Cuerda i Sacarès, 1992) i es perllonga al voltant de 18 m des de la caiguda a plom de la plataforma litoral, en el seu límit exterior, fins a les primeres cases aixecades arran de mar. La diferència d'altura és de 3 m (Fig. 5.10).

Hi aflora una arenisca bioclàstica formada, principalment, per grans formats per fragments d'algues vermelles, bivalves i gastròpodes, ben classificada i molt porosa (26,32%). L'alçària mitjana significant de les onades, en mar oberta, és d'1,25 m amb màxims de 2,40 m. La direcció predominant de mar i de tempestes és de SW, motiu pel qual el perfil queda arrecerat arran de la seva posició al flanc oriental de la badia de Palma.

El caló de s'Almadrava destaca pel desenvolupament de la **plataforma litoral**, de 2,5 a 6 m d'amplària en els sortints i que descomparaix a les entrades de la línia de costa. El pendent és suau, al voltant de 0,34°. Com passa a la Cala d'en Guixar, la comunitat biològica, a la vegada que redueix l'efecte de les onades per la rugositat que suposa tota la vegetació i la protecció de la superfície rocosa per la pàtina coral·lígena, trasllada perfil amunt el que queda de l'energia de l'ona. No hi abunden les depressions de bogamarins, com tampoc no hi ha marmites sobre la plataforma litoral sotaiguada.

Just de passada la plataforma, a la **zona α** , ens trobam amb un conjunt de pinacles aïllats de dimensions considerables. Els cossos piramidals s'alcen entre 27 i 58 cm amb un ventall de formes –de més cilíndriques a més anguloses– prou variat. S'hi superposa un microrelleu d'alvèols i microalvèols que confereix una estructura esponjosa. Val a dir que just a la transició entre la plataforma i els pinacles, les superfícies horitzontals ofereixen una rugositat ben accentuada lligada a les depressions de les pegellides. També hi trobam alguna depressió d'envans bioconstruïts per *C. stellatus* d'ordre centimètric.

Hi segueix una franja de 3 m on cocons i pinacles, més o menys ben definits, són l'atribut més evident de la **zona β** . Les depressions són de dimensions mitjanes, al voltant dels 60 cm de llargària i els 25,30 cm de profunditat, amb relacions entre els eixos en planta d'1,36 a 1 i en planta respecte la vertical de 2,31 a 1 (Taula 5.2). No hi ha cap cocó que depassi el metre de llargària i un 70% de les observacions corresponen a cocons que estan oberts, en connexió. Alguns (10%) encara conserven restes dels envans que els separaven a mode de petites crestes en el seu interior. La planta dels cocons en aquesta zona és circular (60%) o triangular, tot i que no hi ha un

diaclasament dominant que, de més a més, per la forma dels cocons, també es manifesta pel desenvolupament de les depressions, coincidint en l'encreuament de dues diàclasis (70% de les observacions). També hi trobam marmites pròpiament dites i d'altres que han evolucionat a partir de la depressió prèvia d'un cocó, motiu pel qual encara són més amples que fondes.

A la **zona** δ els cocons no són tan densos, per bé que encara hi trobam formes complexes arran de la seva connexió (un 80% dels casos). L'espectre de formes en planta és més ampli, encara que hi dominen els circulars (40%). Les dimensions són lleugerament superiors amb una llargària mitjana de 75,60 cm i uns valors d'amplària i profunditat semblants als de la zona anterior (Taula 5.2). A diferència de la zona β , aquí els cocons tenen el fons pla, tot i que no hi ha diferències respecte de l'espectre de formes en planta de la zona anterior. Cal destacar que, arran d'una major presència de superfície entre els cocons, es fa més avinent la presència de formes lineals controlades per l'estructura, com esquerdes eixamplades o microfissures.

El darrer mòdul del perfil, **zona** Ω , destaca per un gradient morfològic que arrenca de la presència de cocons aïllats (100% de les observacions), de petites dimensions (47,50 cm de llargària mitjana) i poc profunds (relació d'1,46 a 1 entre llargària i profunditat) fins a la presència de formes d'alvèols i nius d'abella a les parets verticals del perfil. No obstant això allò que crida més l'atenció és l'aspecte ruïniforme del sector arran de les rizoconcrecions de la duna fòssil. A les superfícies més o menys planes, s'hi troben depressions tubulars de pocs cm d'amplària que, per la suavitat de les seves parets i la presència en alguns casos de sòls en el seu interior, s'han considerat com a conductes de subsòl. De fet, pocs metres enrere d'aquesta zona, encara hi ha un sòl no gaire desenvolupat que cobreix l'eolianita.

5.5.3 S'Alavern (SA)

S'Alavern, entre Vallgornera i s'Estalella a Lluçmajor, és un sector de penya-segats verticals tallats a la sèrie deposicional del Miocè Superior i els materials plioquaternaris. Hi destaca una plataforma litoral al peu dels penya-segats desenvolupada a favor del contacte entre estrats horitzontals de diferent textura i resistència. Sobre la plataforma s'aprecia un micromodelat important que s'accentua quan, en contacte amb la mar, hi trobam dunes plistocenes adossades al penya-segat.

El perfil està modelat sobre materials calcarenítics de la Unitat Escullosa del Miocè Superior (Pomar, 1993). És una superfície de 12 m d'amplària mitjana i de

disposició horitzontal (0,25° de pendent), poc més de mig metre per sobre del nivell marí mitjà (Fig. 5.10). Es tracta d'una calcarenita bioclàstica amb abundants foraminífers, que presenta un elevat grau de micritització amb una porositat intergranular ocupada per cristalls de calcita esparítica. És una roca molt porosa, un 28,47%, i relativament resistent amb valors de rebot d'escleròmetre de 41,37. L'onatge i les tempestes tenen una direcció dominant de SW i, a mar oberta, l'alçària mitjana d'ona significant arriba als 2,81 m. Els màxims se situen en 4,40 m. La batimetria és molt suau i guanya profunditat lentament. Aquest fet permet l'entrada de l'onatge alçant la rompent d'ona i agranant la superfície de la plataforma i bona part del penya-segat (vid. capítol 4).

A s'Alavern, hi manca el domini dels pinacles i la geometria del penya-segat no permet el desenvolupament d'una zona de transició terrestre (Fig. 5.10).

Els sectors més propers al mar del perfil són un seguit de superfícies inclinades i replans, amb una intensa alveolització i colonització de pegellides, organismes filtradors i gastròpodes brostejadors. Hi segueix una feixa de prop de 5 m d'amplària amb un bon nombre de cocons que comparteixen envans si no estan connectats els uns amb els altres. Les dimensions mitjanes dels cocons de la **zona** β són de 27,40 cm de llargària, amb màxims que arriben als 61 cm (Taula 5.2). La profunditat oscil·la dels 6 als 30 cm, fet pel qual les relacions de llargària i profunditat són d'1,65 a 1. En general, es tracta de cocons oberts (80%), de planta circular o allargada (66%), límits sinuosos (53,33%) i fons rugós (76,67%).

La següent zona, δ , es caracteritza per la separació entre cocons. La majoria de casos ja no comparteixen envans i estan aïllats els uns dels altres (86,67% de les observacions). Pel que fa a la resta, no presenten gaires diferències respecte dels de la zona anterior. Així, les dimensions mitjanes són 25,30 cm de llargària, 17,40 cm d'amplària i 13,60 cm de profunditat. Les relacions entre els paràmetres morfomètrics són lleugerament superiors a les de la zona β . Plantes circulars, rectangulars i triangulars sumen més del 75% dels casos. Tot i així, el fet que el 70% dels límits dels cocons siguin sinuosos no permet derivar el control de les fractures en la delimitació de les formes. El 76,67% dels cocons, a diferència del domini anterior, tenen el fons pla. En els espais entre cocons, hi destaca una densitat important de microalvèols que, tot i l'aparença de superfície plana, quan es redueix l'escala d'observació, posa en relleu el grau de microrugositat de la superfície de la roca. La coloració de la roca, quasi bé negra, denota la importància de la colonització per cianòfits, fongs i líquens. També són molt abundants els exemplars de *Melarphe neritoides*.

5.5.4

Cap Salines (CSA)

Cap Salines és l'extrem meridional de l'illa de Mallorca. Es tracta d'una costa baixa on afloren eolianites plioquaternàries sobre les quals descansa un potent sistema duna que entra varis quilòmetres terra endins. És un sector de costa, a grans trets, rectilini, tot i que hi ha sortints i entrades menors. L'aparença general és la d'un esglaonament arran de l'alternança de paleosòls i nivells dunars. A 3 m d'alçària, hi trobam una alineació de bloc d'ordre mètric que Butzer (1962) atribueix a dipòsits de platja.

El perfil abraça al voltant de 26 m, amb un desnivell des del pla de la plataforma litoral allà on apareixen les primeres mates de *Limonium sp.* de 2,5 m. Se'n poden distingir clarament dos segments: el que correspon a la plataforma litoral, de traçat subhoritzontal, i el de la part emergida lleugerament inclinat i còncau (Fig. 5.10). Així com als afloraments d'eolianita anteriors, la laminació era tènue, aquí és ben marcada fins al punt de condicionar el desenvolupament de les formes d'erosió i meteorització de la roca.

El sector on s'ha desenvolupat el perfil correspon a la cara de sotavent de la paleoduna, motiu pel qual l'estratificació capbussa cap a terra i vincla cap a mar els pinacles i els sortints de les parets dels cocons. Novament, es tracta d'arenas bioclàstiques ben classificades amb làmines alternants d'arenas gruixudes i arenas fines de 2 a 5 mm de potència. La porositat és del 24,25% i estan poc cimentades. Els valors d'altura d'onada són semblants als de s'Alavern, tot i que en la component de mar i tempestes també tenen un pes important les direccions de Llevant.

Des d'un punt de vista geomòrfic, se'n distingeixen cinc zones. La primera correspon a la **plataforma litoral**, l'amplària de la qual arriba als 6 i 7 m. No es pot apreciar la superfície de la roca a causa de la important colonització biològica, tant d'algues com de pàtines coral·lígenes. La plataforma acaba bruscament i cau a plom dins la mar. El perfil és variable, en el sentit que als sortints no hi trobam *notchs*, mentre que a les entrades n'hi ha de dimensions modestes. Sobre les plataformes, hi trobam alguna marmita de dimensions entre 20 i 60 cm de diàmetre i de 46 a 84 cm de fondària.

La **zona α** es correspon amb la presència dels pinacles aïllats i els replans on l'alveolització ve condicionada per la presència de *Patella rustica*, *P. caerulea* i *Monodonta turbinata*. Els pinacles tenen dimensions variables. N'hi ha de poc més de 20 cm d'alçària, mentre que altres depassen els 50 i 70 cm. La seva forma no és ben bé cònica, arran de la influència de l'estratificació del substrat que en condiciona un

desenvolupament lleugerament inclinat cap a la mar. La seva aparença és esponjosa arran de la densitat de microalvèols que se superposen al gros de la forma. Les dimensions d'aquests són molt constants, entre 0,3 i 0,8 cm de diàmetre i una profunditat semblant. No tenen cap tipus d'orientació preferent i, fins i tot, s'hi dona el cas que, a una mateixa aresta del pinacle, les projeccions dels eixos màxims dels microalvèols són completament oposades.

La **zona β** integra alguns pinacles, però les depressions de planta circular en són l'element més característic. La totalitat dels cocons comparteixen envans, o bé n'han perdut un d'ells i romanen connectats (Taula 5.2). Les seves dimensions són considerables, la llargada mitjana és de 120,4 cm i la profunditat de 32,70 cm. No obstant això, la proporció entre eixos en planta manté els quocients descrits per als altres afloraments d'eolianites quaternàries. No passa el mateix amb la vertical. Així la relació entre llargària i amplària és de 1,40 a 1, i la de llargària i profunditat de 4 a 1. La forma dels cocons és allargada o irregular (60% de les observacions) i els seus límits són mixtos, n'hi ha de rectilinis i de sinuosos. Aquest fet que es tradueix en un control de les diàclasis en la distribució i delimitació de les formes. El 60% dels casos el delimiten la intersecció de vàries fractures, mentre que un 20% es desenvolupa a partir de l'encreuament de dues fractures i el restant 20% ho fa seguint-ne una. El fons dels cocons de la zona β és rugós. L'accidentat del relleu no permet observar la presència de formes lineals que poden quedar emmascarades dins dels cocons. Tot i així, les parets dels verticals de les depressions també presenten un grau de microalveolització notable.

La **zona δ** marca una transició cap a l'isolament dels cocons. Només un 20% està connectat, mentre que la resta de casos, o bé estan aïllats o bé comparteixen algun envà. Les dimensions són lleugerament menors, amb una llargària mitjana de 91,40 cm i una profunditat mitjana de 18,80 cm. S'hi registren màxims de 225 cm de llargària que desplacen la mitjana de les relacions de la llargària respecte de la profunditat a quocients de 5 a 1 (Taula 5.2). La forma dels cocons és allargada, o circular, i els límits majoritàriament són sinuosos (50%). El fons del cocó és pla. Es disposen seguint una fractura (40%), o bé en la intersecció de dues (30%). En els espais entre cocons, de més a més dels microalvèols, s'hi aprecien esquerdes eixamplades que van a morir als espais entre pinacles o als cocons de les zones anteriors.

Finalment, la **zona Ω** destaca per la presència menys densa de cocons completament aïllats els uns dels altres. L'aparença de la superfície de la roca és més suau i en els espais entre cocons es troben alguns conductes de subsòl retreballats i d'altres que encara conserven restes de sòl al seu interior. Aquí els

cocons tenen dimensions mitjanes considerables, amb llargàries de 101,3 cm, amplàries mitjanes de 70 cm i profunditats de 16 cm (Taula 5.2). El fons és suau (90% dels casos) i la planta rectangular (50%) o allargada (20%). Un control estructural també es posa de manifest a partir de la disposició del 50% de les observacions en funció de l'espai que delimiten les fractures. L'altre 50% aprofita la intersecció d'aquestes fractures. Els límits rectes i mixtos es corresponen a la primera meitat i els sinuosos a la segona.

5.5.5

Punta des Sivinar (PS)

A la costa oriental de Mallorca i en el marc morfoestructural dels relleus tabulars de la Marina de Llevant, la Punta des Sivinar es localitza entre Cala Figuera i Mondragó. Es tracta d'un penya-segat de 15 m d'alçària que descansa sobre una rasa de poc més de 20 m d'amplària que, a la vegada, es troba a 3 m sobre el nivell del mar. Els materials que afloren a la costa són una sèrie de calcarenites i calcilitites corresponents a la Unitat Escullosa (Pomar, 1991) i les Calcàries de Santanyí (Fornós, 1987). A la zona són abundants els paleocolapses càrstics (Ginés, 2000) que exerceixen una forta influència en el retall de la línia de costa. L'onatge té una direcció dominant de Llevant i l'alçària mitjana de les onades significatives és de 3,11 m a mar oberta.

El perfil de la Punta des Sivinar coincideix amb l'extensió de la rasa i té una llargària de 26 m, els quals cobreixen un desnivell de 3 m des del pla que defineix la plataforma litoral fins al peu de la façana del penya-segat. El canvi bruscat de pendent es dona just quan acaba la plataforma, i el perfil puja de cop 2,5 m. A partir d'aquí, la component horitzontal és marcada i en poc més de 20 m sols hi ha un ascens de 50 cm (Fig. 5.11).

El rocam consisteix en unes calcarenites de la Unitat Escullosa amb abundants microorganismes (milioids i briozous) i amb una porositat, principalment intergranular, del 26%. La composició és dolomítica (87%) i els valors de rebot de l'escleròmetre, 61,67, corresponen a roques molt resistents.

A la Punta des Sivinar, hi diferenciam cinc unitats en funció del microrelleu. La primera és la **plataforma litoral**, una superfície subhoritzontal de 3,66 m d'amplària i un pendent de 0,67°. Està coberta per concrecions d'algues rodofícies i vermètids on s'instal·len els pradells de *Cystoceria*. No s'hi observen depressions de bogamarins.

La **zona α** queda compresa entre el canvi de pendent de la plataforma cap a terra i la transició de la component vertical del perfil a l'horitzontal. Els segments inferiors d'aquesta zona corresponen a un

seguit d'alvèols i microalvèols i depressions de petites dimensions amb envans bioconstruïts per *Chthamalus stellatus*. La presència de *Patella* sp. i *Monodonta turbinata* és important. Just en el canvi de pendent superior, hi apareixen els primers pinacles aïllats, amb dimensions entorn dels 40 i 60 cm d'alçària. Els pinacles tenen una aparença ruïniforme arran dels nombrosos microalvèols que s'hi superposen. En algunes de les seves crestes, s'hi aprecia la presència de colònies de *Chthamalus stellatus* i *C. depressus*. Els pinacles semblen mantenir una alineació i un distància més o menys constant.

La **zona β** correspon a la presència dels primers cocons, juntament amb algun pinnacle. Les dimensions dels cocons són les majors registrades a tota l'illa. Així, els valors de llargària mitjana depassen els 140 cm i els màxims arriben als 354 cm. L'amplària mitjana és de 83,70 cm i la profunditat de 36,70 cm (Taula 5.3). Són cocons, en la seva majoria, connectats amb d'altres (84,10%), de forma allargada (55,60), límits sinuosos (72%) i fons rugós o amb crestes. Els pinacles sovint apareixen com a envans entre cocons i les seves dimensions abracen des dels 13 fins als 64 cm d'alçària. La superfície entre cocons està completament alveolitzada.

Finalment, la **zona δ** la defineix un pla puntualment solcat per cocons tancats, que no comparteixen envans (70%), tot i que les formes irregulars o complexes (20%) es corresponen amb la coalescència de dos o més cocons. En general, les dimensions són majors que les del mòdul anterior, encara que són menys profunds. Així, la llargària mitjana és de 150,30 cm i la profunditat mitjana de 17,40 cm. Per tant, tot i que no hi ha diferències importants quant a la relació entre llargària i amplària, que es manté d'1,66 a 1, per a la component vertical la relació és de 4,63 a 1. La forma dominant és allargada (50%) i el fons és majoritàriament pla (80%). La intersecció de les fractures condiciona el desenvolupament dels cocons, però no els seus límits, ja que un 60% són sinuosos (Taula 5.3). Als espais entre cocons es pot apreciar la importància del retoc i l'eixamplament de les esquerdes també ben alveolitzades.

5.5.6

Cala Murada (CM)

La localitat on s'ha estudiat la disposició de les formes en el perfil és un sector de penya-segats mitjans i baixos, 2 km al sud de Cala Murada. Es tracta d'un sector de costa esglaonat tallat sobre les calcarenites esculloses del Miocè Superior, també afectat per paleocolapses càrstics. És una localitat exposada a l'onatge i tempestes de Llevant. L'onatge mitjà és de 2,25 m tot i que es registren màxims de 5,60 m a mar oberta.

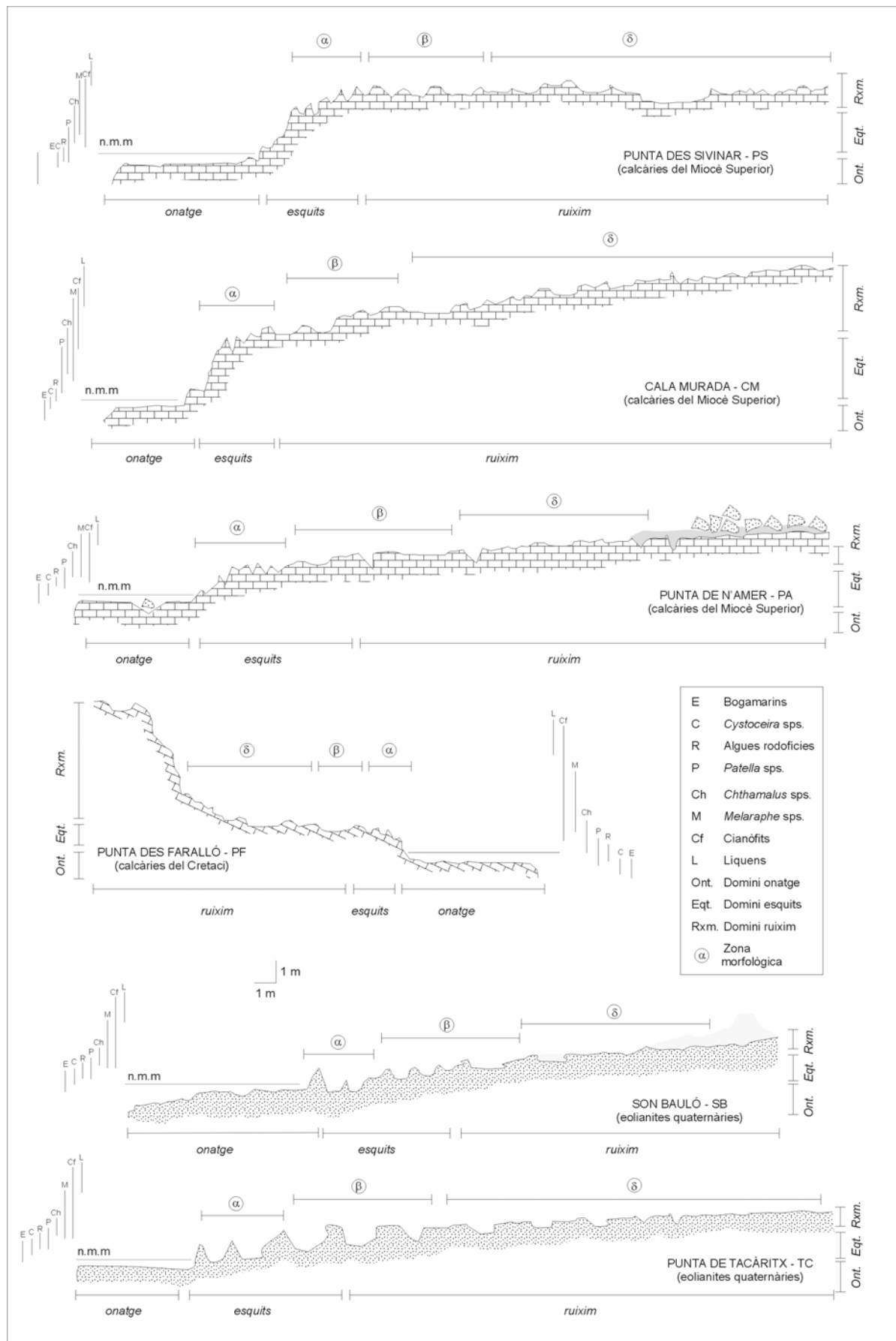


Fig. 5.11 Zonació morfològica, biològica i hidrodinàmica dels perfils estudiats a Mallorca. Localització dels perfils a la figura 1.

El perfil de Cala Murada es perllonga 26 m des del trencament de la **plataforma litoral** fins a la presència de la vegetació més terrestre. El perfil recorda el de la Punta des Sivinar, tot i que el bot de la plataforma litoral fins al primer replà horitzontal suposa una paret més o menys vertical de prop de 4 m (Fig. 5.11).

En altres sectors de la costa, en lloc de la caiguda vertical i una plataforma litoral més o menys desenvolupada, hi apareix un *notch* de dimensions considerables (una obertura de 200 cm i un reculament de 150 cm) que, a la base, o bé presenta una plataforma estreta, o bé una construcció biogènica que es disposa a mode de balda.

La litologia de la roca correspon a unes calcarenites amb una component bioclàstica (fragments de bivalves, equinoderms), característiques de la Unitat Escullosa. La porositat és del 16,90% i el valor de rebot de l'escleròmetre de 49,7, roca força resistent a l'escala de Selby.

El perfil de Cala Murada permet separar cinc zones, la primera de les quals correspon a la **plataforma litoral**, que no presenta diferències significatives respecte dels trets descrits per a la Punta des Sivinar. Aquí l'amplària de la plataforma litoral es redueix a 2,87 m i el seu pendent és de 1,08°.

La **zona α** abraça el segment comprès entre la plataforma litoral i el canvi de pendent, arran de l'esglaonament del perfil. És un sector on l'expressió morfològica dominant són els alvèols i microalvèols lligats a l'activitat biològica. De fet, de més a més de la pàtina d'algues calcàries, també són molt importants les colònies de *Patella rustica* i, a la part alta del perfil, dels crustacis filtradors. Just en el trencament de la component vertical, hi apareixen els primers pinacles, aïllats i de dimensions modestes (entre 13 i 36 cm d'alçària). Les superfícies entre pinacles són relativament suaus i també presenten una colonització biològica important (*Patella caerulea*, *Modonta turbinata*, *Melaraphe neritoides*). S'hi arriben a formar, a les zones de circulació preferent d'aigua, construccions biogèniques amb envans de *Chthamallus stellatus*.

La **zona β** , a més a més dels pinacles, també presenta les primeres depressions de planta allargada (55,60%), connectades entre elles, compartint envans (70%). Les dimensions mitjanes de llargària són de 115,9 cm i les de profunditat de 27,30 cm. Les relacions entre llargària i amplària són de 2 a 1 i les de llargària i profunditat de 4 a 1. Els límits dels cocons són sinuosos i es disposen seguint una línia de fractura. El fons de la totalitat dels cocons és rugós. Els pinacles presents a la zona β mantenen contacte entre les seves bases, mitjançant envans o petites crestes, i l'alçària de les formes piramidals és de 12 a

38 cm. La textura esponjosa continua essent un dels atributs per destacar d'aquest element del relleu litoral.

La **zona δ** marca una clara transició cap a l'aïllament dels cocons. Només el 10% dels casos observats romanen connectats amb altres cocons. El seu fons continua essent rugós i els envans dels cocons presenten sobreploms, els més profunds fins a dos nivells. Les dimensions mitjanes de llargària són de 135,40 mm i les de profunditat de 29 cm. Pel que fa a les relacions entre eixos, són semblants als de la zona anterior (Taula 5.3). La forma dels cocons és variada, tot i que són més habituals les formes allargades (40%), el que es correspon amb les distribucions més o menys homogènies que impliquen un control estructural, com són el tipus de límit del cocó i la disposició respecte els jocs de fractures. Les superfícies entre cocons estan alveolitzades i s'hi identifiquen depressions d'ordre centimètric i pocs mil·límetres de profunditat amb una intensa coloració del seu fons, fet que indica un paper de la component biològica, probablement fongs, en la seva gènesi. També s'hi pot apreciar l'eixamplament de les esquerdes i, sobre superfícies on la roca té una textura molt fina, la presència de microsolcs.

Finalment, la **zona Ω** , al sector més terrestre del perfil, es caracteritza per la disposició aïllada dels cocons i la presència de conductes de subsòl als espais entre depressions. Moltes d'aquestes formes cilíndriques de parets molt suaus, encara conserven restes de sòl al seu interior. D'altres hi tenen arena i restes de *Posidonia oceanica*. En els límits superiors del perfil, s'hi pot apreciar, quasi bé a tocar de la posició del sòl que cobreix la roca, conductes exhumats recentment. Les dimensions dels cocons de la zona Ω són de 92,70 cm de llargària mitjana o de 32 cm de profunditat mitjana (Taula 5.3). Hi ha cocons que arriben als 322 cm de llargària, el que explica que mentre que el quocient entre llargària i amplària es manté en els intervals de les altres localitats i zones del propi perfil, la relació entre llargària i fondària augmenta fins a una relació de 6 a 1. La totalitat de les observacions corresponen a cocons tancats i aïllats, de forma circular (60%) i límits sinuosos (70%). La majoria dels cocons es disposen seguint una fractura (30%), o bé en la intersecció de dues fractures (60%). També cal fer esment de la presència de microsolcs quan apareixen pegats de roca de textura fina i homogènia.

5.5.7

Punta de n'Amer (PA)

La Punta de n'Amer és una petita península que constitueix el límit septentrional dels relleus tabulars de la Marina de Llevant, atès que a partir de la badia de Cala Millor i Cala Bona ja apareixen, a tocar de

Litologia perfils		Punta des Sivinar		Cala Murada			Punta de n'Amer		Punta des Faralló		Son Bauló		Punta de Tacàritx		
		Calcarenites (Miocè Superior)		Calcarenites algals (Miocè Superior)			Calcarenites algals (Miocè Superior)		Calcàries (Cretaci)		Eolianites carbonatades (Quaternari)		Eolianites carbonatades (Quaternari)		
Zonació morfològica		β	δ	β	δ	Ω	β	δ	β	δ	β	δ	β	δ	Ω
Llargària (cm)	Mitjana	139,70	150,30	115,90	135,40	92,70	81,30	104,20	29,90	28,40	93,30	102,60	97,10	120,50	90,70
	SD	90,70	90,60	78,85	59,90	7895	28,60	45,30	14,20	22,50	67,60	45,20	27,80	59,10	61,40
	Mínim	56,00	49,00	49,00	5800	55,00	40,00	66,00	11,00	9,00	40,00	29,00	67,00	48,00	31,00
	Màxim	354,00	405,10	312,00	275,00	32,00	113,00	197,00	72,00	127,00	265,00	186,00	160,00	215,00	210,00
Amplària (cm)	Mitjana	83,70	82,90	60,40	72,30	6250	62,20	67,50	16,13	14,30	64,70	59,70	72,50	79,10	47,00
	SD	51,10	46,80	19,93	22,89	9,60	25,56	33,30	10,32	7,51	41,60	33,70	14,50	37,20	21,40
	Mínim	34,20	37,00	30,00	34,5	48,0	28,00	43,00	4,00	5,00	32,00	23,00	50,00	33,00	24,00
	Màxim	215,10	188,00	90,00	105,80	89,00	104,00	158,00	58,00	32,00	162,00	133,00	96,00	150,00	90,00
Fondària (cm)	Mitjana	36,70	17,40	27,30	29,00	32,00	19,40	22,70	12,55	11,90	9,90	9,60	22,10	27,50	17,90
	SD	13,40	4,50	8,37	7,41	43,80	12,76	3,70	5,25	5,20	3,50	3,40	4,20	6,70	4,70
	Mínim	13,00	11,00	12,00	25,00	12,00	6,00	18,00	6,00	4,00	6,00	4,00	17,00	18,00	12,00
	Màxim	64,20	27,00	38,00	45,0	64,00	42,00	30,00	25,50	25,50	17,00	15,00	30,00	38,00	26,00
Llargària vs. amplària	Mitjana	1,48	1,66	1,93	1,85	1,44	1,37	1,61	2,03	1,92	1,47	1,80	1,35	1,58	1,83
	SD	1,09	0,49	1,11	0,77	0,76	0,37	0,54	0,75	0,61	0,51	0,46	0,32	0,59	0,55
	Mínim	1,07	1,19	1,03	1,06	1,03	1,00	1,12	1,24	1,13	1,08	1,26	1,05	1,07	1,11
	Màxim	5,88	2,61	4,80	3,54	3,60	2,33	2,83	4,00	3,97	2,73	2,83	1,98	2,69	2,69
Llargària vs. fondària	Mitjana	2,15	4,63	4,13	4,91	6,14	5,37	4,51	2,53	2,67	9,76	11,17	4,38	4,20	4,73
	SD	1,08	1,68	1,82	2,63	6,74	2,64	1,51	1,15	1,51	6,66	4,58	0,74	1,43	2,14
	Mínim	0,81	1,85	2,52	1,43	0,46	2,29	3,09	1,10	0,83	4,92	5,80	3,33	2,27	2,58
	Màxim	5,06	7,50	8,21	9,20	24,62	10,27	7,73	6,00	7,47	26,50	19,50	5,33	6,72	9,13
Obertura (%)	Obert	84,10	30,00	70,00	10,00	-	80,00	-	76,67	13,33	80,00	20,00	90,00	30,00	-
	Tancat	16,21	70,00	30,00	90,00	100,00	20,00	100,00	23,33	86,67	20,00	80,00	10,00	70,00	100,00
Forma (%)	Circular	10,08	20,00	20,00	-	60,00	50,00	10,00	26,67	16,67	30,00	10,00	40,00	20,00	20,00
	Rectangular	12,15	10,00	-	20,00	-	-	10,00	16,67	40,00	30,00	20,00	30,00	30,00	20,00
	Triangular	5,52	-	-	20,00	-	-	10,00	20,00	23,33	10,00	20,00	20,00	-	20,00
	Allargat	55,60	50,00	50,00	40,00	20,00	30,00	40,00	36,67	20,00	20,00	40,00	10,00	50,00	40,00
	Irregular	16,67	20,00	20,00	20,00	20,00	10,00	10,00	-	-	10,00	10,00	-	0,00	-
Límits (%)	Rectes	28,00	20,00	10,00	50,00	-	-	40,00	53,33	56,67	60,00	40,00	40,00	30,00	60,00
	Sinuosos	72,00	60,00	70,00	40,00	70,00	50,00	10,00	-	6,67	10,00	30,00	40,00	30,00	20,00
	Indentacions	-	20,00	10,00	10,00	-	-	10,00	10,00	16,67	-	10,00	-	-	-
	Mixtos	-	-	10,00	-	30,00	50,00	40,00	36,67	20,00	30,00	20,00	20,00	40,00	20,00
Fons (%)	Pla	-	80,00	-	-	40,00	10,00	50,00	6,67	76,67	10,00	70,00	-	70,00	70,00
	Rugós	82,33	10,00	100,00	100,00	60,00	60,00	40,00	76,67	23,33	80,00	10,00	80,00	30,00	20,00
	Crestes	17,67	10,00	-	-	-	30,00	10,00	16,67	-	10,00	20,00	20,00	-	10,00
Relació amb fractures (%)	Seguint-ne 1	50,22	80,00	50,00	20,00	30,00	20,00	20,00	30,00	16,67	10,00	10,00	-	20,00	30,00
	Paral·lel a 2	21,00	-	-	10,00	-	-	-	50,00	-	-	10,00	10,00	10,00	-
	Intersecció 2	23,22	-	40,00	50,00	60,00	70,00	60,00	20,00	76,67	50,00	50,00	50,00	40,00	60,00
	Intersec. > 2	4,66	20,00	10,00	20,00	10,00	10,00	20,00	-	6,67	40,00	30,00	30,00	20,00	10,00

Taula 5.3 Paràmetres morfomètrics dels cocons de la Punta des Sivinar a la Punta de Tacàritx (Mallorca).

mar, els rocams plegats de les Serres de Llevant. És un sector de costa baixa amb afloraments de materials del Miocè Superior i d'eolianites quaternàries.

El perfil de la Punta de n'Amer es perllonga poc més de 25 m i representa una diferència en altura de 3 m, respecte la plataforma litoral, en el punt on apareix la vegetació de garriga. L'aparença general és d'una rampa lleugerament còncava (Fig. 5.11). Els materials que hi afloren són calcarenites –fàcies amb rodòlits– corresponents a la Unitat Escullosa del Miocè Superior. La porositat de la roca és molt elevada, 32,67%, i la composició és d'un 61% de calcita i un 39% de dolomita. El valor de rebot de l'escleròmetre és de 45,25, per la qual cosa es torna a considerar un rocam relativament resistent. Exposat a la mar i a les tempestes procedents de Llevant, l'alçària de les onades a mar oberta és de 2,71 m, tot i que s'hi registren màxims de 7,20 m.

A la Punta de n'Amer es poden separar quatre sectors del perfil en funció de les formes. La primera, de mar cap a terra, és la **plataforma litoral**. La seva amplària se situa al voltant de 4,5 m. Entre el tapís algal i les crostes coral·lígenes, hi apareixen algunes crestes d'eolianita que recorden la base de les formes piramidals.

La següent zona, α , la determina la presència dels pinacles, les dimensions dels quals giren entre els 25 i el 60 cm. La seva forma és molt irregular i no arriben a delimitar arestes de forma clara. De més a més dels alvèols i microalvèols sobre les seves parets, hi ha casos en què s'observen petites balms o mossegades. Aquestes semblen estar relacionades amb la textura de la roca i, en particular, amb els patrons de porositat que impliquen les fàcies de rodòlits. Els pinacles ocupen una franja estreta d'1,5 m d'amplària.

Els cocons connectats són l'atribut més característic de la **zona** β . Només un 20% de les observacions corresponen amb cocons que estan completament tancats, tot i que comparteixen envans amb d'altres cocons. Les dimensions mitjanes són de 81,30 cm de llargària i 19,40 cm de profunditat. Les relacions entre eixos en planta és d'1,37 a 1 i respecte la vertical de 5,37 a 1 (Taula 5.3). Els cocons tenen una planta circular (50%), amb límits sinuosos o mixtos, i el fons és rugós (60%). També són significatius els casos on es pot apreciar la presència de crestes i romanents d'antics envans (30%).

De la **zona** δ l'atribut més notable és la disposició aïllada dels cocons. El 100 % de les observacions corresponen a cocons tancats i separats per replans horitzontals d'altres cocons. Els replans entre cocons tenen un aspecte ruïniforme al qual contribueixen tant les fàcies de rodòlits com l'alveolització del rocam. Les dimensions dels cocons són majors que al sector anterior. Així, la llargària mitjana arriba a 104,20 cm i la profunditat a 22,70 cm (Taula 5.3). La majoria dels cocons tenen una planta allargada (40%), o bé triangular (30%). Els seus límits són sinuosos (40%), el fons pla (50%) i bona part de les depressions es disposen en funció de la intersecció de dues fractures (60%). En aquesta zona apareixen conductes de subsòl entre els cocons i superfícies ruïniformes que es perllonguen fins a la posició del sòl i la vegetació de garriga actual. Tot i la textura gratel·losa de la roca, les parets d'aquestes formes cilíndriques són suaus i llises.

5.5.8

Punta des Faralló (PF)

La Punta des Faralló tanca pel nord la badia de Cala Rajada. És un dels sectors on el relleu de les Serres de Llevant entra en contacte amb la mar. A la localitat d'estudi, hi afloren calcàries del Cretaci plegades, amb una important esquistositat horitzontal. El conjunt és un rocam força reticulat. La façana del penya-segat exposada a nord, a l'exterior de la badia, presenta una **plataforma litoral** estreta que, quan la fracturació ho permet, desenvolupa un *notch*. En canvi, a recer de la badia, la façana dels penya-segats entra dins la mar i en destaquen *notchs* de dimensions modestes als quals s'adossen, per sota del nivell marí mitjà, *trottoirs* a mode de balda.

El perfil de la Punta des Faralló té una llargària de 16 m i abasta un desnivell de 6 m. El perfil es pot dividir en quatre segments. Un primer segment correspon a la plataforma litoral, de 3 a 4 m d'amplària. Tot seguit d'un petit canvi de pendent, hi apareix una superfície, també horitzontal, que resta quasi bé 1 m per sobre del nivell marí mitjà, que després continua amb una paret vertical de perfil còncau i un nou replà que el corona (Fig. 5.11).

El perfil està tallat a les calcàries mesozoïques: biocalcarenites amb una dolomitització incipient. La porositat és d'1,29% i el valor de rebot d'escleròmetre de 59,8 que, a l'escala de Selby, correspondria a una roca resistent.

5.4.8.2 Zonació geomòrfica del perfil

El perfil de la Punta des Faralló no destaca per l'espectacularitat de les formes. Els pinacles hi són absents, els cocons tenen dimensions discretes i la intensitat de l'alveolització és menor que a d'altres localitats. Tot i així, deixant de banda la plataforma litoral que no presenta grans diferències respecte de les descrites a d'altres localitats, hi distingim 3 dominis geomòrfics. Sí que són evidents, al llarg de tot el perfil, les formes lineals relacionades amb el control estructural com esquerdes eixamplades o microfractures.

La **zona** α quedaria restringida a la paret vertical que separa la plataforma del primer replà. En destaca l'alveolització i microalveolització de la roca, que ofereix una textura gratel·losa. Allà on no trobam les colònies de *Patella rustica* i *P. caerulea*, les depressions d'ordre mil·límetric donen a la roca una textura esponjosa.

A la **zona** β hi apareixen els primers cocons. Les dimensions són modestes, tot i que hi predominen les formes coalescents (76,67%). La llargària mitjana és de 29,90 cm i la profunditat de 12,55. En general, són formes més compactes i les relacions entre eixos són semblants, de 2,03 a 1 per a la llargària i l'amplària, i de 2,53 a 1 per a la llargària i la profunditat. La forma dels cocons és allargada (36,67%) i circular (26,67%) i els seus límits són rectes (53,33%) seguint l'espai que delimiten fractures paral·leles (50%). Són abundants els exemplars de *Melaraphe neritoides*.

A la **zona** δ els cocons no estan connectats entre ells (86,67%) i presenten un fons pla (76,67%). Les dimensions i les relacions entre eixos són semblants a les de la zona β (Taula 5.3). Hi predominen els cocons de planta rectangular o allargada (60%), controlats per l'estructura que en determina els límits rectes (56,67) i el seu desenvolupament a partir de la intersecció de dues fractures (76,67). Hi apareixen de forma puntual alguns exemples de microsolcs. Entre cocons, la superfície està completament alveolitzada.

5.5.9

Son Bauló (SB)

L'aflorent d'eolianites sobre el qual s'ha dut a terme l'estudi morfomètric es troba al bell mig de la badia d'Alcúdia, pocs metres al sud de l'estany del Torrent de Son Bauló. Sobre l'aflorent, s'hi troba un important sistema de dunar holocènic.

El perfil estudiat es perllonga poc més de 17 m i des del zero relatiu tan sols s'aixeca 1,5 m. El perfil té un traçat de rampa lleugerament còncava. A la part superior, s'hi aprecia un nivell de paleosòls que seguidament és enterrat pel sistema dunar holocènic i la vegetació de garriga que s'hi instal·la. Hi aflora una arenisca bioclàstica, formada per fragments d'algues vermelles, bivalves i gastròpodes, ben classificada i molt porosa (27,32%). Els valors de rebot de l'escleròmetre són de 28,6 a l'interval de les roques poc resistents.

En base a les formes, podem separar quatre zones. La primera correspon a la **plataforma litoral**, l'amplària de la qual arriba als 4 i 6 m. No es pot apreciar la superfície de la roca a causa de la important colonització biològica, tant d'algues com de pàtines coral·lígenes. La plataforma acaba bruscament i cau a plom dins la mar. Sobre les plataformes hi trobam alguna marmita de dimensions entre 30 i 70 cm de diàmetre i de 52 a 84 cm de fondària.

La **zona α** es correspon amb la presència dels pinacles aïllats i els replans on l'alveolització ve condicionada per la presència de *Patella rustica*, *P. caerulea* i *Monodonta turbinata*. Els pinacles de poc més de 32 cm d'alçària tenen una forma cònica, tot i que matisada per la influència de l'estratificació. La seva aparença és esponjosa arran de la densitat de microalvèols que se superposen al gros de la forma. Les dimensions d'aquests són molt constants, entre 0,5 i 1 cm de diàmetre, amb una profunditat semblant. No tenen cap tipus d'orientació preferent i, fins i tot, es dona el cas que a una mateixa aresta dels pinacles les projeccions dels eixos màxims dels microalvèols són completament oposades.

La **zona β** integra alguns pinacles, però les depressions de planta circular en són l'element més característic. La totalitat dels cocons comparteixen envans, o bé n'han perdut un i romanen connectats (Taula 5.3). Les seves dimensions són 93,30 cm de llargada mitjana i 22,10 cm de profunditat. No obstant això, hi ha cocons amb diàmetres màxims de 265 cm. La proporció entre eixos en planta manté els quocients descrits per als altres afloraments d'eolianites quaternàries. No passa el mateix amb la vertical. Així, la relació entre llargària i amplària és d'1,47 a 1, i la de llargària i profunditat de 10 a 1. La forma dels cocons és circular o rectangular (60% de les observacions) i els seus límits són rectes, fet que es tradueix en un control de les diaclàsis en la distribució i delimitació de les formes. El 90% dels casos el delimiten la intersecció de diverses fractures. El fons dels cocons de la zona β és rugós. Tant les parets dels cocons, com els espais que els separen presenten un grau d'alveolització important. En els espais entre cocons, de més a més dels microalvèols, s'hi aprecien esquerdes eixamplades que van a morir als espais entre pinacles o als cocons de les zones anteriors.

La **zona δ** marca una transició cap a la individualització dels cocons. Només un 20% està connectat, mentre que la resta de casos o bé estan aïllats, o bé comparteixen algun envà. Les dimensions són lleugerament majors, amb una llargària mitjana de 102,60 cm i una profunditat mitjana de 27,50 cm (Taula 5.3). La forma dels cocons és allargada, o circular (50%) i els límits majoritàriament són rectes (50%). El fons del cocó és pla i es disposen seguint una fractura (40%), o bé en la intersecció de dues (30%). Les superfícies horitzontals entre cocons tenen un aspecte ruïniforme arran de la presència de rizoconcrecions i arenas soltes procedents del sistema dunar que contribueixen a l'abradió de les formes del perfil. De fet, en relació a altres afloraments d'eolianita, la intensitat de la colonització biològica és menor.

5.5.10

Punta de Tacàritx (PT)

El perfil es troba a la badia de Pollença, a mitjan camí entre el Mal Pas i Cap Pinar. Es tracta d'un aflorament inicialment d'eolianites quaternàries, però amb una forta influència dels processos col·luvials dels vessants propers, motiu pel qual són abundants els clasts mesozoics suportats per una matriu d'arenas bioclàstiques ben classificades. La línia de costa està molt articulada. A grans trets, als caps hi apareixen plataformes que aprofiten els plans d'estratificació de les eolianites per al seu desenvolupament. A les entrades entre els esbaldregalls, s'hi pot apreciar algun *notch* que també aprofita els plans de discontinuïtat per desenvolupar-se.

El perfil de 20 m i escaig de llargària puja al voltant de 2 m des del zero relatiu. El traçat del perfil correspon a una rampa lleugerament convexa. La plataforma adquireix un desenvolupament important, amb una marcada continuïtat lateral. Arran de la presència dels còdols a l'aflorament, l'aspecte general és ruïniforme.

Segons la importància de les formes, s'hi distingeixen cinc zones. La primera destaca pel desenvolupament de la **plataforma litoral**, de 4 a 8 m d'amplària en els sortints, que descomparaix a les entrades de la línia de costa. El pendent és suau, al voltant de 0,34°. La comunitat biològica, a la vegada que redueix l'efecte de les onades per la rugositat que suposa tota la vegetació i la protecció de la superfície rocosa per la pàtina coral·lígena, trasllada perfil amunt el que queda de l'energia de l'ona. Hi abunden les depressions de bogamarins, hi ha marmites sobre la plataforma litoral sotaiguada i hi apareixen restes de pinacles completament coberts de crustacis filtradors de forma aïllada a pocs centímetres per sobre del nivell mitjà del mar.

Just depassada la plataforma, a la **zona α** , ens trobam amb un conjunt de pinacles aïllats de dimensions considerables. Els cossos piramidals s'alcen entre 70 i 150 cm amb un ventall de formes anguloses variat. Tot i que s'hi superposa un microrelleu d'alvèols i microalvèols que confereix una estructura esponjosa, aquesta és més atenuada que a altres afloraments d'eolianites. Val a dir que just a la transició entre la plataforma i els pinacles, les superfícies horitzontals ofereixen una rugositat ben accentuada lligada a les depressions de les pegellides. També hi trobam alguna depressió d'envans bioconstruïts per *C. stellatus* d'ordre centimètric.

Hi segueix una franja on cocons i pinacles, més o menys ben definits, són l'atribut més evident de la **zona β** . Les depressions són de dimensions mitjanes, al voltant dels 97,10 cm de llargària i el 22,10 cm de profunditat, amb relacions entre els eixos en planta d'1,35 a 1 i en planta respecte la vertical de 4,38 a 1 (Taula 5.3). No hi ha cap cocó que depassi els 2 m de llargària i un 90% de les observacions corresponen a cocons que estan oberts, en connexió. Alguns (20%) encara conserven restes dels envans que els separaven, a mode de petites crestes en el seu interior. La planta dels cocons, en aquesta zona, és circular (40%) o rectangular (30%), tot i que no hi ha un diaclament dominant que, de més a més per la forma dels cocons, també es manifesta pel desenvolupament de les depressions coincidint amb l'encreuament de dues diàclasis (80% de les observacions).

També hi trobam marmites pròpiament dites i d'altres que han evolucionat a partir de la depressió prèvia d'un cocó, per la qual cosa encara són més amples que fondes. S'hi observen dues famílies de microalvèols, uns de dimensions majors, que afecten les eolianites, i uns altres, de menors, que afecten els clasts juràssics.

A la **zona δ** els cocons no són tan densos, per bé que encara hi trobam formes complexes a causa de la seva connexió (un 30% dels casos). L'espectre de formes en planta és més ampli, encara que dominen els allargats (50%). Les dimensions són lleugerament superiors amb una llargària mitjana de 120,50 cm i uns valors d'amplària i profunditat semblants als de la zona anterior (Taula 5.3). A diferència de la zona β , aquí els cocons tenen el fons pla (70%), tot i que hi ha diferències respecte de l'espectre de formes en planta de la zona anterior, ja que hi predominen els allargats (50%).

Cal destacar que arran d'una major presència de superfície entre els cocons, es fa més avinent la presència de formes lineals controlades per l'estructura, com esquerdes eixamplades o microfissures. Sobre els clasts juràssics apareixen microsolcs amb una varietat de traçats –sinuosos,

trenats, meandriformes– d'1 mm d'amplària.

El darrer mòdul del perfil, **zona Ω** , destaca per un gradient morfològic que arrenca de la presència de cocons aïllats (100% de les observacions), de dimensions mitjanes (90,70 cm de llargària mitjana) i poc profunds (relació de 4,73 a 1 entre llargària i profunditat), fins a la presència de formes d'alvèols i nius d'abella a les parets verticals del perfil. No obstant això, allò que crida més l'atenció és l'aspecte ruïniforme del sector arran de la textura de la duna fòssil. També hi són abundants els exemples de microsolcs.

5.5.11

Far de Ciutadella (FC)

El Far de Ciutadella és la primera del seguit de localitats que es descriuran de Menorca. La zona d'estudi es localitza a 700 m a l'oest del far del Port de Ciutadella. L'aflorament correspon al Migjorn de Menorca i a les fàcies de la Unitat d'Esculls (Obrador i Pomar, 2004).

El perfil de 12 m de longitud recorda el perfil de la Punta des Sivinar de Mallorca, tot i que amb unes cotes, tant de la rasa com de la façana del penya-segat, menors. De mar cap a terra, hi apareix un planell on es van succeint les formes del *karren* litoral, que puja prop de 2 m sobre el zero relatiu del perfil. La façana del penya-segat puja recta al voltant de 5 m. El planell està format per calcarenites algals –rodòlits– del Miocè Superior i hi abunden els fòssils d'equinoderms. Els materials del penya-segat són de textura més fina i són abundants els motlles de bivalves (Fig. 5.12).

Des d'un punt de vista morfològic, dividim en tres zones el perfil, de més a més de la plataforma litoral que en aquest perfil és de petites dimensions, 2 a 3 m, i duu associat un *notch* de 50 cm d'obertura i altres 50 cm de tirada.

La **zona α** es caracteritza per la presència de pinacles separats per superfícies més o menys planes colonitzades per *Patella sp.* i *Chthamallus depressus*. La superfície dels pinacles és molt rugosa i sobre les seves arestes i parets s'hi superposa una densa xarxa de microalvèols.

La **zona β** destaca per la presència de cocons connectats (84% de les observacions), de fons rugós (83,33%) i amb restes d'envans que individualitzaven els cocons al seu interior (Taula 5.4). Les dimensions mitjanes de llargària són de 137,9 cm i les de profunditat de 3,37 cm, tot i que hi ha depressions que arriben als 353 cm de llargària. Les relacions entre els seus eixos mantenen proporcions al voltant de 2 a 1 per a la llargària i l'amplària i de 4 a 1 per a la llargària i la fondària. La majoria dels cocons tenen

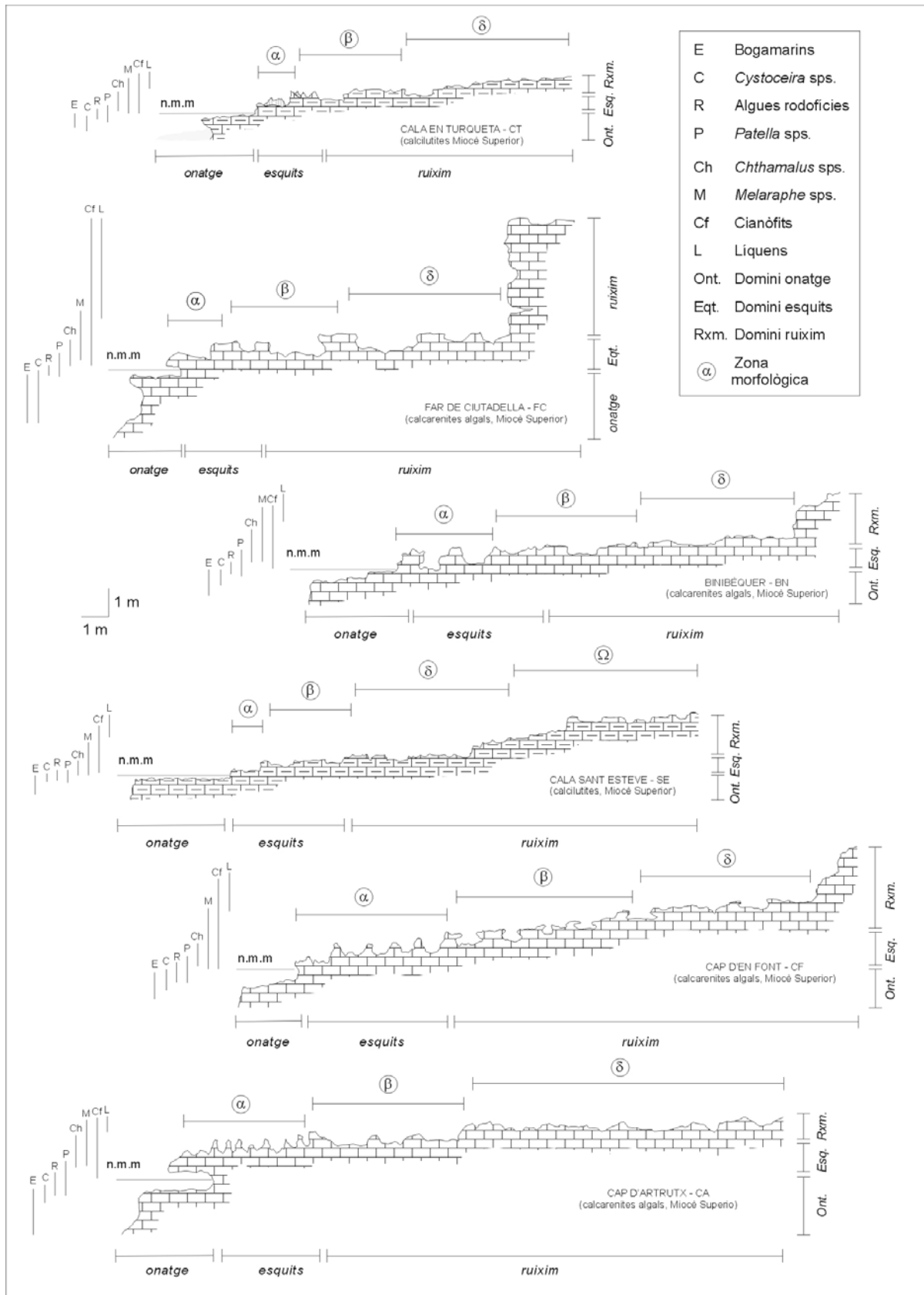


Fig. 5.12 Zonació morfològica, biològica i hidrodinàmica dels perfils estudiats a Menorca. Localització dels perfils a la figura 1.

		Far de Ciutadella		Cap d'Artrutx		Cala Turqueta	Cap d'En Font		Cala Sant Esteve	
Litologia perfils		calcarenites algals (Miocè Superior)		calcarenites algals (Miocè Superior)		calcilutites (Miocè Superior)	calcarenites algals (Miocè Superior)		calcilutites (Miocè Superior)	
Zonació morfològica		β	δ	β	δ	β	β	δ	β	δ
Llargària (cm)	Mitjana	137,90	140,40	125,73	165,90	89,69	115,90	134,30	61,80	93,70
	SD	89,71	101,61	47,09	80,22	23,20	78,85	60,29	24,89	79,95
	Mínim	55,00	49,00	56,00	80,00	54,00	49,00	57,00	38,00	54,00
	Màxim	353,00	400,00	220,00	320,00	130,00	312,00	230,00	123,00	320,00
Amplària (cm)	Mitjana	81,73	82,90	63,00	106,00	60,00	60,40	70,30	41,10	60,50
	SD	52,31	46,80	30,47	40,80	14,36	19,93	21,89	9,24	11,62
	Mínim	33,00	37,00	20,00	60,00	32,00	30,00	34,00	25,00	48,00
	Màxim	212,10	188,00	109,00	207,00	90,00	90,00	106,00	56,00	89,00
Fondària (cm)	Mitjana	37,37	17,40	32,00	32,70	22,77	27,30	30,30	12,70	30,10
	SD	14,44	4,50	6,43	14,85	7,42	8,37	8,41	2,31	45,80
	Mínim	13,00	11,00	20,00	16,00	10,00	12,00	20,00	10,00	10,00
	Màxim	67,00	27,00	40,00	53,00	36,00	38,00	45,00	18,00	160,00
Llargària vs. amplària	Mitjana	1,84	1,66	2,35	1,56	1,54	1,93	1,95	1,52	1,44
	SD	1,16	0,49	1,36	0,47	0,40	1,11	0,77	0,52	0,76
	Mínim	1,08	1,19	1,24	1,05	1,00	1,03	1,06	1,04	1,03
	Màxim	5,88	2,61	6,00	2,29	2,28	4,80	3,54	2,56	3,60
Llargària vs. fondària	Mitjana	2,25	4,63	3,84	3,61	2,94	4,13	4,91	4,99	6,14
	SD	1,12	1,68	0,98	1,37	1,29	1,82	2,63	2,03	6,74
	Mínim	0,83	1,85	2,73	1,72	1,48	2,52	1,43	2,56	0,46
	Màxim	4,92	7,50	5,79	6,30	5,80	8,21	9,20	9,46	24,62
Obertura (%)	Obert	88,89	30,00	63,64	20,00	38,46	70,00	10,00	90,00	10,00
	Tancat	16,67	70,00	36,36	80,00	61,54	30,00	90,00	10,00	90,00
Forma (%)	Circular	11,11	20,00	18,18	-	38,46	20,00	0,00	10,00	60,00
	Rectangular	11,11	10,00	9,09	10,00	-	-	20,00	10,00	-
	Triangular	5,56	-	9,09	-	15,38	-	20,00	10,00	-
	Allargat	55,56	50,00	54,55	30,00	38,46	50,00	40,00	40,00	20,00
	Irregular	16,67	20,00	9,09	60,00	7,69	20,00	20,00	30,00	20,00
Limits (%)	Rectes	27,78	20,00	36,36	20,00	7,69	10,00	50,00	40,00	-
	Sinuosos	72,22	60,00	63,64	30,00	76,92	70,00	40,00	40,00	70,00
	Indentacions	0,00	20,00	-	30,00	-	10,00	10,00	20,00	-
	Mixtos	0,00	-	-	20,00	15,38	10,00	-	-	30,00
Fons (%)	Pla	0,00	80,00	-	80,00	76,92	-	-	90,00	40,00
	Rugós	83,33	10,00	90,91	-	23,08	100,00	100,00	10,00	60,00
	Crestes	16,67	10,00	9,09	20,00	-	-	-	-	-
Relació amb fractures (%)	Seguint-ne 1	50,00	70,00	81,82	30,00	61,54	50,00	20,00	70,00	30,00
	Paral·lel a 2	22,22	10,00	9,09	-	-	-	10,00	-	-
	Intersecció 2	22,22	-	9,09	50,00	38,46	40,00	50,00	30,00	60,00
	Intersec. > 2	5,56	20,00	-	10,00	-	10,00	-	-	10,00

Taula 5.4 Paràmetres morfomètrics dels cocons dels perfils estudiats a Menorca.

una planta allargada (55,56%) i els límits sinuosos (72,22%). El fons és rugós en el 83,33% de les observacions i el 50% de les depressions segueix l'alineació d'una fractura. Mentre que les parets dels cocons estan intensament alveolitzades, les superfícies que els separen són suaus i s'hi poden apreciar nombrosos exemples de descamacions.

A la **zona** δ els cocons apareixen aïllats (70%). El fons és més pla (80%). Les dimensions en planta són semblants a les de la zona anterior, però la profunditat de les depressions disminueix considerablement. Així, la llargària mitjana és de 140 cm i la profunditat de 17,4 cm. Les relacions entre eixos per a la llargària i la profunditat augmenten, en aquesta zona, fins a un quocient de 4 a 1. La forma dels cocons de la zona δ també és allargada (72%) i els seus límits són sinuosos (60%). La majoria de les depressions (70%) es disposen seguint una fractura.

5.5.12

Cap d'Artrutx (CA)

La zona d'estudi es localitza a 1 km del far del Cap d'Artrutx –sud de Ciutadella (Menorca)–, en direcció cap a Cala En Bosch. És una costa baixa amb un salt d'1 m arran de mar que acaba en una plataforma litoral lleugerament inclinada, d'1 a 3 m d'amplària. El perfil està desenvolupat sobre calcarenites algals de textura homogènia. El perfil es perllonga 18 m terra endins i des del zero relatiu arriba a pujar 2 m (Fig. 5.12).

Al perfil del Cap d'Artrutx podem separar un mínim de cinc zones morfològiques. La primera correspon al mòdul **plataforma litoral – notch**. La plataforma litoral és relativament estreta, de 2 a 3,5 m d'amplària i, a partir del trencament de plataforma, cau a plom al voltant de 5 m. La superfície està entapissada per una pàtina de rodofícies, sobre les quals hi ha una densa

mata de macroalgues verdes. Segueix a la plataforma un *notch* amb profunditat propera a 1,5 m i una distància entre el sostre i la base de l'entalladura de 0,87 cm. La base està recoberta per concrecions coral·lígenes, mentre que el sostre i la paret vertical estan intensament alveolitzades. La presència de *Patella rustica* és important.

Per sobre del *notch*, hi ha els primers pinacles aïllats que ocupen una franja de 4 m corresponents a la **zona α** . Els pinacles tenen alçàries de 13 a 67 cm i una aparença esponjosa arran dels microalvèols que s'hi superposen. Els pinacles més propers al mar apareixen recoberts de *Chthamallus stellatus* i *C. depressus*. Els alvèols als pinacles o les parets verticals tenen dimensions d'ordre mil·limètric, mentre que sobre les superfícies subhorizontals són d'ordre centimètric.

A la **zona β** els cocons són més representatius que no els pinacles. Els cocons es capturen els uns als altres (64% de les observacions), motiu pel qual la seva forma és allargada i circular (56% i 17%, respectivament). Les dimensions mitjanes de llargària són de 126 cm i les de profunditat de 32 cm. Les relacions entre eixos són de 2,35 a 1 per a la llargària i l'amplària, i de 4 a 1 per a la llargària i la profunditat. Bona part dels cocons es disposa seguint una fractura (81%) i els seus límits són sinuosos (63%) o rectes (36%). Entre cocons, sovint, hi apareixen formes cilíndriques de parets suaus que es corresponen amb conductes de subsòl. Tot i que suaus, alguns comencen a presentar un aspecte rugós en relació a les mateixes formes presents als sectors més terrestres del perfil.

La presència de cocons aïllats defineix la **zona δ** que ocupa una franja al voltant de 10 m. La topografia és suau i són molt evidents les formes de conductes de subsòl. Algunes conserven restes de sòls bruns al seu interior, o hostatgen vegetació hal·lòfila. Els cocons d'aquesta zona en el 80 % dels casos estan tancats i no comparteixen envans amb d'altres formes. La llargària mitjana és de 166 cm i la fondària de 32,70 cm. La forma dels cocons és irregular (60%) i els límits dels cocons es reparteixen majoritàriament entre les categories de sinuós i indentacions (60%). La majoria dels cocons es desenvolupen a partir de la intersecció de dues fractures.

5.5.13

Cala Turqueta (CT)

El perfil estudiat correspon a un aflorament de calcilitites del Miocè Superior molt bioturbades i riques en fragments de bivalves, just al sector central de la cala i ben encarat a la seva obertura. A diferència dels altres perfils no hi ha una zonació clara. El perfil abasta poc més de 8 m en l'horitzontal,

mentre que el desnivell en vertical és de poc més d'1,5 m. La primera franja que correspondria a la **zona α** dels altres perfils té com a elements morfològics alguns pinacles amb alçàries per sota dels 30 cm, sense gaire alveolitzacions i cocons desventrats cap a la mar, on hi ha abundants *Patella sp.* i *Monodonta turbinata*. Un segon segment ocupa prop de 4 m des d'allà on acaben els pinacles. Aquest es correspondria amb la **zona β** , tot i que la majoria de cocons estan aïllats (62%). Les seves dimensions són menors que els de les calcarenites algals. Així, la llargària mitjana és de 89,69 cm i la profunditat de 22,77 cm. Tot i així, les relacions entre els seus eixos no fugen de les tendències que marquen la resta de localitats (Taula 5.4). Per sobre del domini de les depressions aïllades, l'aspecte general és ruïniforme a causa de la intensitat de la bioturbació.

5.5.14

Cap d'en Font (CF)

La localitat d'estudi es troba a 3 km al sud de Binidali i correspon a un sector de costa baix, amb façanes de penya-segat que tot just arriben als 3 m d'alçària. El perfil, de 17 m de llargària i 4 m d'alçària des del zero relatiu fins allà on apareixen els primers *Limonium sp.*, transcorre sobre calcarenites bioclàstiques del Miocè Superior, texturalment grolleres i de composició majoritàriament coral·loide i amb molta fauna. Tot plegat confereix una gran porositat primària.

Des d'un punt de vista morfològic, es poden separar fins a quatre zones de mar cap a terra. La primera zona correspon amb el domini de la **plataforma litoral**. Al Cap d'en Font, aquesta és relativament estreta, d'1,5 a 2 m d'amplària, i apareix completament encotonada per algues rodofícies i *Cystoceira sp.*

A la **zona α** hi ha pinacles molt ben desenvolupats i exageradament alveolitzats. Les seves dimensions oscil·len dels 12 als 18 cm d'alçària. La base dels cossos piramidals està separada per plans suaus on abunden *Patella sp.* i *Monodonta turbinata*. Així com arrenquen les bases dels pinacles, hi trobam els esculls de *Chthamallus stellatus*. Els pinacles arriben a delimitar algun cocó a partir dels cordons que uneixen les seves bases amb diàmetres entorn dels 49 cm.

La **zona β** arrenca 4 m terra endins des de la plataforma litoral. És una zona on els cocons destaquen per la seva densitat per sobre dels pinacles, els quals redueixen les dimensions i augmenten el grau de connexió de les seves bases. Les dimensions dels cocons són considerables, 116 cm de llargària mitjana, 60,40 cm d'amplària i 27,30 de profunditat mitjana (Taula 5.4). Les relacions entre paràmetres

són de 2 a 1 per als eixos en planta i de 4 a 1 per a la relació planta–component vertical. El 70% dels casos observats estan oberts i la forma és d'irregular a allargada. El fons arran de la litologia és molt rugós i els límits són sinuosos (70%). Bona part dels cocons es disposen seguint una fractura (50%), o bé aprofitant l'encreuament de dues per desenvolupar-se (40%). Les parets dels cocons, així com les superfícies que els separen, tenen una aparença esponjosa arran de la densitat de microal·lèols.

La **zona δ** és el darrer dels sectors per descriure al Cap d'en Font. D'una banda, la menor densitat dels cocons permet apreciar l'eixamplament d'esquerdes i la presència d'altres formes de planta lineal. Així, quan la roca és prou homogènia i té una textura fina, són abundants els exemples de microsols (paral·lels, trenats) i, en alguns casos, les seves alineacions es veuen alterades pel desenvolupament de microal·lèols.

Les depressions de la zona δ en un 90% dels casos romanen tancades i aïllades respecte de les altres formes. Les dimensions mitjanes són de 134,30 cm de llargària mitjana i 30,30 cm de profunditat mitjana. S'hi han registrat màxims de 230 m. Les relacions entre paràmetres morfomètrics són semblants a les de la zona β , així com la resta de paràmetres morfomètrics.

5.5.15

Binibèquer (BN)

El perfil de Binibèquer interessa arran del patró que presenta entre la interacció dels processos marins i els terrestres. És una costa relativament baixa, el traçat del perfil correspon al pendent deposicional de la Unitat Inferior de Barres (Obrador i Pomar, 2004). El perfil es localitza al flanc occidental de la cala, coincidint amb un petit sortint que la tanca. És una zona intensament afectada per la fracturació. L'aspecte general és ruïniforme, fins al punt que no hi ha un desenvolupament efectiu de les formes. Llevat d'uns pocs pinacles de dimensions inferiors als 50 cm en alçària i d'una textura relativament suau, així com d'alguns cocons aïllats de 150 a 210 cm de llargària i 33 cm de profunditat, no hi ha una zonació ni organització clara de les formes. No obstant això, a 5 m de la línia de costa hi apareixen conductes de subsòl amb restes de sòl a les superfícies entre cocons i 2 m més endins del perfil hi apareixen aquestes formes just acabades de desenterrar, a pocs centímetres de distància de la posició del sòl actual que cobreix el rocam (Fig. 5.14).

5.5.16

Cala Sant Esteve (CSE)

La Cala Sant Esteve es troba al sud del Port de Maó.



Fig. 5.13 Aparença ruïniforme del perfil de Binibèquer i contribució de les formes de subsòl en el modelat del *karren* litoral. A la fotografia superior es pot apreciar (a la zona de color blanquinós) la presència dels conductes de subsòl entre pinacles i cocons poc desenvolupats, mentre que a la fotografia inferior es pot apreciar com aquestes formes són desenterrades a pocs metres de la costa.

El perfil estudiat es localitza a la riba meridional de la cala, just davant les mirades del Fort de Malborough. A la zona d'estudi, hi ha una pedrera amb un buit important relacionada amb la construcció de la fortificació, així com també hi ha algunes piscines d'origen antròpic dedicades a la captura i cria artesanal de la llagosta.

El perfil llavorat sobre calcàries de textura fina, amb abundants bioturbacions corresponents a la Unitat Inferior de Barres (Obrador i Pomar, 2004) del Miocè Superior, té una llargària de 10 m i puja un desnivell de 2 m des del zero relatiu. El perfil té forma còncava i se'n poden separar dos nivells horitzontals. Un a 0,60 m de la plataforma litoral i l'altre a 1,30 m d'alçària.

Al perfil de la Cala Sant Esteve podem separar un mínim de cinc zones morfològiques. La primera correspon al mòdul **plataforma litoral**. La plataforma litoral és relativament estreta, de 2 a 3,5 m d'amplària, i a partir del trencament de plataforma cau a plom al voltant de 2 m. La superfície està entapissada per una pàtina de rodofícies, sobre les quals hi ha una densa

mata de macroalgues verdes.

A la **zona α** els pinacles tenen alçàries de 10 a 18 cm i una aparença esponjosa arran dels microalvèols que s'hi superposen. Els pinacles més propers al mar apareixen recoberts de *Chthamallus stellatus* i *C. depressus*. Els alvèols, als pinacles o a les parets verticals tenen dimensions d'ordre mil·limètric, mentre que sobre les superfícies subhoritzontals són d'ordre centimètric.

A la **zona β** els cocons són més representatius que no els pinacles. Els cocons es capturen els uns als altres (90% de les observacions), motiu pel qual la seva forma és allargada i irregular (40% i 30% dels casos respectivament). Les dimensions mitjanes de llargària són de 61,80 cm i les de profunditat de 12,70 cm. Les relacions entre eixos són de 1,52 a 1 per a la llargària i l'amplària, i de 5 a 1 per a la llargària i la profunditat. Bona part dels cocons es disposa seguint una fractura (70%) i els seus límits són sinuosos (40%) o rectes (40%). El fons dels cocons és completament suau i són habituals les entalladures a la base dels seus envans. La superfície entre cocons està completament alveolitzada.

La presència de cocons aïllats defineix la **zona δ** que ocupa una franja al voltant de 5 m. La topografia és suau. Els cocons d'aquesta zona en el 90% dels casos estan tancats i no comparteixen envans amb altres formes. La llargària mitjana és de 93,70 cm i la fondària de 30,10 cm. La forma dels cocons és circular (60%) i els límits dels cocons són sinuosos (70%). La majoria dels cocons tenen el fons rugós arran de la presència dels nivells bioturbats. En relació a la fracturació, es desenvolupen a partir de la intersecció de dues fractures (60% de les observacions). A les superfícies entre cocons es poden seguir les formes lineals controlades per la fracturació, per bé que la seva textura no és tan gratel·losa com a altres localitats.

Per sobre de la zona δ , i coincidint amb el nivell d'exploració antròpica del rocam, s'hi aprecia l'existència d'un nivell més cimentat de la roca on els cocons arriben a tenir un desenvolupament espectacular. La coalescència de formes arriba a permetre la formació de cocons de planta irregular, amb nombroses indentacions i una llargària composta de més de 12 m. Pel que fa a la profunditat, pot arribar als 70 o 80 cm de fondària. Les superfícies entre aquests cocons tenen un aspecte ruïniforme arran de la meteorització diferencial relacionada amb la bioturbació de la roca.

5.6

L'organització de les formes

Els setze perfils de costa estudiats recullen la

casuística tant pel que fa a l'organització espacial de les formes del *karren* litoral, com al tipus de costa on apareixen. En general, es tracta d'un perfil de costa lleugerament inclinat amb una modesta tendència còncava, que supera el desnivell mitjançant esglaons.

L'abast del modelat del *karren* litoral és variable i sembla dependre, d'una banda, de la litologia i, de l'altra, del grau d'exposició als agents marins, principalment l'onatge. Així, a indrets arrecerats, com a l'interior de Cala Turqueta o de Cala Binibèquer a Menorca, i del pegat d'eolianites a la Cala d'en Guixar o el perfil de Cala Blava a Mallorca, la zona afectada pel rascler litoral és d'uns 8 a 10 m terra endins. A zones més exposades, com el Cap d'Artrutx o el Cap d'en Font, a Menorca, i la Cala Murada, la Punta de n'Amer o el Cap Salines, a Mallorca, els perfils s'acosten o depassen la vintena de metres. Tot i així, el *karren* litoral presenta una organització i una gradació interna molt acusada. Comptat i debatut, la gradació de les formes, la fauna i la flora és una de les característiques més destriables de les costes rocoses (Spencer, 1988), que està associada al grau d'humidificació derivat de l'onatge i a la forma del perfil de costa (Palmer *et al.*, 2003). En aquest sentit, la taula 5.5 sintetitza la presència de les formes inventariades a cada perfil en termes d'abundància relativa, a la vegada que s'intenta correlacionar la seva distribució amb les zonacions biològiques i hidrodinàmiques estudiades i descrites en altres capítols d'aquesta memòria. Els termes relatius amb què s'ha dividit cada un dels perfils, quan s'hi aborda en conjunt, aboca un gradient on formes com marmites i alvèols lligats a l'activitat biològica dels bogamarins són característiques del domini de la plataforma litoral, mentre que els alvèols són molt importants a la zona α i disminueixen el seu pes relatiu, així com avança el sector terrestre. És una tendència lleugerament inversa a la dels cocons, o a la dels conductes de subsòl i les microfissures. Els primers són molt abundants als sectors intermedis del perfil, mentre que els altres dos són abundants als sectors més terrestres. Els pinacles queden, també, ben sectorialitzats a l'espai que delimiten, per una banda, la plataforma litoral i, per l'altra, la presència abundant de cocons.

Així doncs, si s'hi integra la zonació morfològica, la hidrodinàmica i la biològica es pot definir una seqüència general pel que toca a l'organització de les formes del *karren* litoral de Mallorca i Menorca en què queden ben definits cinc mòduls (Fig. 5.14).

El primer dels mòduls lliga el domini de l'onatge amb les comunitats biològiques de plataforma litoral (vegeu capítol 3). És el mòdul que queda definit per les **plataformes litorals** i les concrecions orgàniques que duen associades. En aquest segment del perfil de costa, que roman quasi sempre per sota del nivell

marí, és freqüent trobar-hi algunes formes molt característiques d'origen biològic. Es tracta de les cavitats alveolars que deixen els bogamarins i que mantenen una relació geomètrica amb la mida d'aquests individus. La resta de plataforma està entapissada per pradells d'algues verdes (majoritàriament *Cystoceria* sp.), així com també per concrecions d'algues calcàries i vermètids. Aquesta coberta actua com a agent de protecció i evita, en bona part, l'erosió mecànica de la plataforma, desplaçant l'onatge i la seva acció cap a l'interior del perfil. Només quan el perfil subhoritzontal de la plataforma comença a esdevenir vertical, ens trobam amb un *notch* (entalladura), o amb un esglaó a partir del qual comença la zona emergida de la costa rocosa. A grans trets, en ambdós casos, es tracta de superfícies amb abundants microalvèols, completament recoberts de cianobacteris i, a les zones més properes al nivell marí, d'algues calcòfiles i bioherms de musclos (*Mytilus edulis*). Juntament amb els microalvèols descrits a l'inventari, és fàcil trobar formes alveolars creades per gastròpodes com les pegellides (*Patella* sp.) i els poliplacòfors (*Chiton* sp.).

El segon dels mòduls, la **zona α** , coincideix amb l'abast de la rompuda de l'onatge sobre el perfil de costa. Aquest abraça des de la part superior del *notch* o de l'esglaó, fins allà on arriben els esquits amb major intensitat. Hi són presents, amb caràcter dominant, els pinacles amb tot el reguitzell de microalvèols superposats. Les dimensions dels pinacles oscil·len dels 20 cm a quasi bé 1 m en alçària. Les formes són variades, en funció del nombre de diaclàsis i les seves direccions i la intensitat dels microalvèols que se superposen a la forma piramidal base. El color de la superfície de la roca és fosc arran de la intensa colonització per cianòfits i líquens (*Rivularia* sp., *Pynerocollema* sp.). Hi comencen a aparèixer els primers individus de *Melaraphe neritoides* o *Melaraphe punctata*. Les pegellides (*Patella rustica* i *P. caerulea*) són relativament abundants a les superfícies horitzontals entre pinacles, o bé a les parets verticals que s'aixequen just després de la plataforma litoral. El patró també és semblant per a *Monodonta turbinata*. Les esquerdes i fractures eixamplades –*splitkarren*–, que apareixen a la zona α , acostumen a estar intensament colonitzades per crustacis filtradors

Zonació morfològica	Plataforma litoral	Zona α	Zona β	Zona δ	zona Ω	
Planta arrodonida	Cocons	r	+	+++	+++	+
	Alvèols	+	+++	++	+	+
	Microalvèols	-	+++	+++	++	+
	Taffoni	-	-	-	-	+
	Nius d'abella	-	-	-	-	+
	Marmites	++	+	r	r	r
	Conductes subsòl	-	-	-	+	++
Planta lineal control fractures	Microfissures	-	-	r	+	+
	Esquerdes	+	+	+	++	+
Planta lineal control hidrodinamisme	Microsolcs	-	-	-	+	++
	Estries	-	-	r	r	r
	Canals decantació	-	-	r	r	-
Poligèniques	Pinacles	-	+++	+	-	-
	Notch	+	-	-	-	-
	Plataforma	++	-	-	-	-
	Trottoir	+++	+	-	-	-
	Bufadors	+	+	r	-	-
Zonació hidrodinàmica	onatge	rompuda onatge	esquits	ruixim		
Zonació biològica	plataforma	zona a	zona b	zona c		

Taula 5.5 Zonació morfològica del *karren litoral* a les costes de Mallorca i Menorca. Correlació amb les zonacions hidrodinàmica i biològica. Els codis emprats a la taula en relació a les formes signifiquen: (+++) molt abundant, (++) abundant, (+) present, (r) rara i (-) absent.