

# Freqüència, magnitud i escala en la morfodinàmica de les costes rocoses: observacions a s'Alavern (S de Mallorca, Mediterrània occidental)

Lluís GÓMEZ-PUJOL, Pau BALAGUER i Joan J. FORNÓS

## SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA  
NATURAL DE LES BALEARS

Gómez-Pujol, Ll., Balaguer, P. i Fornós, J.J. 2007. Freqüència magnitud i escala en la morfodinàmica de les costes rocoses: observacions a s'Alavern (S de Mallorca, Mediterrània occidental). In: Pons, G.X. i Vicens, D. (Edit.). Geomorfologia Litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerda Barceló. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 14: 181-199. ISBN 84-96376-13-3. Palma de Mallorca.

S'avalua la magnitud dels processos erosius que actuen sobre els penya-segats carbonatats de s'Alavern (Sud de Mallorca) alhora que es detallen les seves components temporals i d'escala. Així el debat actual en geomorfologia litoral sobre la preponderància dels agents marins (acció hidràulica i mecànica) sobre els subaeris o d'alteració o viceversa (alteració física-química-biològica i moviment de masses) queda condicionat per l'escala temporal i l'efecte sobre el relleu. Mentre que a s'Alavern les taxes de denudació globals són de l'ordre de 0,004 a 0,310, les taxes de bioerosió per a les comunitats de gasteròpodes de *Melaraphe neritoides* i per al conjunt de pegellides -majoritàriament *Patella rustica*- són de 0,007 i 0,369. Els texts d'exposició aboquen taxes d'erosió on no hi participa l'abrasió entre 0,18 i 0,50 en funció de la posició respecte a la línia de costa. Les taxes de disgregació granular de la façana del penya-segat de s'Alavern són de l'ordre de 0,117 amb una evident relació amb els episodis de pluges intenses i forts vents. Els moviments de masses han implicat la caiguda de fragments del penya-segat suposa volums d'esbaldregalls al voltant de 40 m<sup>3</sup>, mentre que el trencament de fragments de la plataforma varia de 0,86 m<sup>3</sup> a 10 m<sup>3</sup>. Tot plegat ens ajuda a construir un vector negatiu a un gràfic on contrastam la freqüència (escala temporal) i la magnitud (escala de volum) de retrocés de la costa rocosa, tot posant de manifest que el debat dels agents o processos marins vs. l'alteració és un artefacte que depèn únicament i exclusiva de l'escala d'anàlisi i de la posició dels investigadors en la sistematització de les seves observacions. A la vegada el vector que relaciona freqüència i magnitud ens planteja l'escenari òptim per relacionar els estudis de morfodinàmica de les costes rocoses amb les aproximacions de tipus evolutiu.

**Paraules clau:** taxes d'erosió, costes rocoses, processos marins, processos terrestres.

FREQUENCY, MAGNITUDE AND SCALE IN ROCK COAST MORPHODYNAMICS: OBSERVATIONS AT S'ALAVERN SEA CLIFFS (SOUTHERN MALLORCA, WESTERN MEDITERRANEAN). The goal of this paper is to assess the role of erosion processes at s'Alavern sea cliffs pointing up the temporal and scale components of erosion rates. Thus the current debate concerning with the main role of wave processes (hydraulic and mechanic action) vs. subaerial and weathering (physical, chemical and biological weathering and mass movements) is overthrust by the analysis of the temporal and influence on landform of each process. At s'Alavern denudation rates obtai-

ned through laser scanner and MEM range from 0.004 to 0.310, bioerosion mean rates by small snails (*Melaraphe neritoides*) or limpets (mainly *Patella rustica*) are respectively of 0.007 and 0.369. On the other hand, exposition tests offer erosion rates from 0.18 to 0.50 according to their position across the shore platform. Sediment traps inform us about granular disintegration close to 0.117 triggered by rainfall episodes, seabreezes and winds. Finally, mass movement can imply from cliff wall falls of 40 m<sup>3</sup> to shore rock platform fragments detachment of 0.86 to 10 m<sup>3</sup>. All these erosion rates represented in a frequency vs. magnitude graph help to build a negative vector that point up that the debate on the main role of marine vs. subaerial processes is an artefact because much of the arguments of authors correspond to their position on temporal and spatial scale analysis. Also this vector, relating frequency and magnitude, can help rock coast geomorphologists to link the morphodynamical approach to the evolution approach to the rock coast.

**Keywords:** *erosion rates, rock coasts, marine processes, terrestrial processes.*

Lluís GÓMEZ-PUJOL i Joan J. FORNÓS, *Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, Cra. Váldemossa, km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears); Pau BALAGUER, IMEDEA (CSIC-UIB), Institut Mediterrani d'Estudis Avançats, Miquel Marquès 21, 07190 Esporles (Illes Balears)*

## Introducció

L'estudi dinàmic de les costes rocoses consisteix a identificar els processos i agents de meteorització i erosió; així com quantificar-ne la seva contribució en la formació del relleu. Ara bé, la caracterització dels agents d'alteració i l'erosió sobre substrats rocosos topa amb entrebancs de tipus metodològic i instrumental. En primer lloc existeix certa dificultat per tal de discernir entre els elements del binomi alteració-erosió, de forma intel·ligible, en els processos geomòrfics que operen a les situacions reals; no teòriques (Goudie i Viles, 1999). Aquesta situació respon al fet que l'alteració consisteix en un gran nombre de mecanismes, sovint interrelacionats i encara poc compresos, que contribueixen a l'alteració de la roca. Molts, per no dir bona part dels processos de meteorització -meteorització per sals, per radiació tèrmica, canvis en la fase de l'aigua, etc- i en especial aquells en els quals juga un paper important la biologia, se coneixen en estructura de caixa negra. És a dir, partim de l'estadi inicial i n'intuïm la situació final que se'n deriva; però no sabem ben bé, o de forma instru-

mental, com s'ha produït l'alteració del substrat (Viles, 2004). Fet al qual s'ha d'afegir que molts processos s'han inferit a partir de les formes i aquestes no són sempre un indicador prou sòlid dels processos i la seva importància relativa en els ambients litorals (Trenhaile, 1987; Spencer, 1988 i Stephenson, 2000). Així mateix, també juguen el seu paper en aquesta distorsió les velocitats a les quals els mecanismes de meteorització actuen i la seva materialització com a retrocés o desmanegament de la costa. En efecte, l'alteració desenvolupa un doble paper en l'evolució del relleu: d'una banda hi ha mecanismes d'alteració 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). Un exemple prou evident són els treballs d'Spencer (1981) a la costa de l'Illa de Grand Cayman. Les calcarenites que estudia es desmantellen per desintegració granular. Els agents de meteorització ataquen el ciment que uneix el grans fins que queden solts. Però en termes de canvis en la microtopografia, aquests estan relacionats amb esdeveniments climàtics com les tempestes

o els forts vents. Per si no n'hi havia prou, s'afegeix la complexitat espacial en el sentit de les dificultats que cal considerar quan es pretén relacionar l'escala a la qual s'observa un mecanisme de meteorització o un procés erosiu i l'escala en la qual aquest opera i com afecta, tot plegat, a la formació de relleu (Viles, 2001).

Hom agrupa els processos que actuen a les costes rocoses en cinc grans grups, tot i que a vegades no sigui senzill discernir on comença l'acció d'un o on acaba la de l'altre, o les sinèrgies que es donen entre ells (Griggs i Trenhailes, 1994; Woodroffe, 2003). Aquests són l'acció hidràulica, l'acció mecànica, l'acció físico-química, l'acció biològica i l'acció gravitatòria de més a més d'altres processos propis dels vessants subaeris.

Les forces hidràuliques produïdes per l'onatge inclouen la pressió hidrostàtica, relacionada amb la massa d'aigua, i les pressions dinàmiques relacionades amb el moviment de l'aigua. La pressió hidrostàtica s'exerceix per la columna d'aigua que hi ha sobre una superfície de roca submergida i augmenta així com ho fa la profunditat. Així a la costa hi ha superfícies de roca que romanen tot el temps submergides, però d'altres que experimenten la pressió hidrostàtica de forma alterna; de manera que aquest joc de càrrega i descàrrega de la superfície rocosa pot contribuir al seu debilitament (Trenhaile, 1987). La pressió dinàmica com a agent de la meteorització-erosió de les costes rocoses involucra a les forces de tensió i fricció de l'aigua amb la roca i amb el material solt. L'acció d'impacte continuat sobre la façana del penya-segat amb onatges de tipus estacionari -clapoteig- es coneix com a martelleig o impacte hidràulic (*water hammer*), aquest procés també actua en situacions de rompent; tot i que en un segon terme després de l'abració hidràulica o aquàtica (*wave quarrying*) que es produeix arran de les for-

ces de compressió, fricció i tensió que exerceix el moviment de l'aigua. Sunamura (1982) mitjançant simulacions de laboratori posa de manifest que l'acció de l'onatge, per ell mateix és baix i que la capacitat erosiva augmenta -com a mínim el doble- si implica transport de material. És a dir, facilita els processos d'erosió mecànica. Les dades empíriques de Blackmore i Hewson (1984) apunten en la mateixa línia, si bé destaquen que com més turbulent sigui l'onatge se redueix la pressió del seu impacte sobre la roca arran de la gran quantitat d'aire capturat dins la massa d'aigua; o bé que la distribució de la pressió mitjana en la vertical de la rompent és més o menys constant. A les forces estrictament hidràuliques cal confegir les pneumàtiques derivades de la interacció entre aigua i aire, especialment a esquerdes, canals i conductes amb grans efectes sobre les comunitats biològiques (Gaylord, 1999) o en el desmatellament de fragments de roca de mida variable, a la seva vegada afavorit pel diaclassament o la presència d'esquerdes (Noormets *et al.*, 2004; Trenhaile i Layzell, 1981); o els efectes del col·lapse de la bombolles d'aire a gran pressió que es coneix com a cavitació i al que se li suposa una acció de desgast de la roca de caràcter físic i també químic (Kaye, 1957).

L'acció mecànica la duu a terme l'onatge quan carrega o desplaça material sedimentari; aquesta inclou els processos d'abració i d'atricció marines. L'abració marina és l'erosió de la roca causada pel frec i el xoc pels materials transportats per les ones (Jones i Williams, 1991); mentre que l'atricció marina és el procés pel qual les partícules de sediment colpejant la roca i arran de l'impacte la fragmenten (Williams i Roberts, 1995). La comparació de les taxes d'erosió entre costes rocoses (penya-segats i plataformes litorals) amb presència de materials susceptible d'actuar com a agents ero-

sius (e.g. arenes i graves de platja) posa de manifest la importància de l'acció mecànica. Així a la costa oriental d'Anglaterra Robinson (1977) posa de manifest que les taxes d'erosió sobre un substrat de turbidites liàssiques és quinze vegades major a les localitats amb disponibilitat de sediments, que no allà on no apareixen platges. En la mateixa línia apunten els resultats de Trudgill (1976) tot i que amb ordres de magnitud menors, d'1/4 per a les costes rocoses de l'illa oceànica d'Aldabra desenvolupades sobre calcarenites força més dures.

Els processos físics i químics relacionats amb l'aigua marina queden sota l'epígraf d'acció físico-química. Són molts els processos d'alteració que actuen sobre el rocam a la costa, i no sempre en tenim un coneixement ni complet, ni prou sòlid. De més a més, sovint estan tan interrelacionats que costa destriar-los (Bland i Rolls, 1998). La meteorització per l'acció de l'aigua a baixes temperatures és un clàssic a latituds on les temperatures fluctuen amb freqüència per sobre i per sota del punt de congelació. L'aigua pot augmentar un 9% el seu volum quan es congela, generant una acció de fatiga de la roca que pot arribar a donar taxes d'erosió de 0,3 a 2,5 mm/a (Hall, 1988). La meteorització per sals és un dels processos més recurrents a les costes rocoses (Goudie i Viles, 1997) i té el seu origen en el creixement de cristalls de sals a partir de les solucions que circulen per les esquerdes o saturen la porositat de la roca. Són molts els factors que hi intervenen des dels canvis en els paràmetres ambientals com la temperatura (Goudie, 1994) o la humitat (Goudie, 2000), tot augmentant les dimensions dels cristalls i la pressió que exerceixen sobre la porositat de la roca. Mottershead (1989) dona taxes d'erosió relacionades amb l'aportació de sals pel ruixim marí de l'ordre de 0,6 mm/a. Un altre procés d'alteració física fa referèn-

cia a la humidificació i dessecació de la superfície de les roques arran dels cicles mareals, curts períodes de pluja o temporals. És especialment significativa sobre minerals argilosos o roques amb una porositat baixa; i està interrelacionat amb la meteorització per sals (Hall i Hall, 1996). L'alteració per humidificació i dessecació s'empra tot sovint com argument de la meteorització de les costes rocoses, tot i que no hi ha cap evidència empírica de la seva efectivitat sobre substrats més o menys durs (Stephenson i Kirk, 2000b). Entre els processos químics hom en destaca la hidratació, la dissolució, la carbonatació, la hidròlisi així com els processos d'oxidació i reducció. Pel que toca a les costes rocoses trobam pocs treballs que analitzin o intentin caracteritzar instrumentalment els processos químics d'alteració. De la mateixa manera com passava amb alguns processos físics, aquests s'expliquen o s'interpreten des d'una estructura conceptual de caixa negra. Tal vegada la carbonatació és un dels processos que agrupa més estudis, especialment a partir de l'impuls dels estudis del micromodelat de les costes rocoses carbonatades (Lundberg, en premsa). La carbonatació està relacionada amb els efectes del diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>) present en solucions aquoses i que interacciona amb el carbonat càlcic en un conjunt de reaccions reversibles en funció de la saturació respecte CO<sub>2</sub> o CaCO<sub>3</sub>. En principi l'aigua de mar està sobresaturada de carbonat càlcic (Trudgill, 1985) pel que no té capacitat de dissoldre la roca; no obstant si que té capacitat agressiva pel que toca al Mg (Trugill, 1979).

L'acció biològica fa referència a la influència dels organismes en l'alteració, erosió i forma de la costa rocosa. Aquesta acció pot tenir diferents signes pel que hom parla de bioerosió, bioprotecció i bioconstrucció (Naylor *et al.*, 2002) tant per als pro-

cessos de tipus bioquímics com per als biomecànics. Alguns organismes poden entapissar -rodofícies, crustacis filtradors, esculls de bivalves- la superfície de la costa i protegir-la de l'acció mecànica i de la hidràulica; d'altres arran del seu comportament etològic agraten la roca per tal d'obtenir el seu aliment o bé n'ataquen la superfície amb àcids orgànics (Andrews i Williams, 2000; McLean, 1967). També hi ha organismes que tenen el seu nínxol ecològic a la roca i per tal de protegir-se dels depredadors o arran el seu creixement alteren la roca (Pohl i Schneider, 2002; Viles, 1987).

Finalment cal esmentar l'acció dels processos subaeris i de vessant. Aquells que desenvolupen la seva acció als penya-segats i plataformes litorals abracen des de la caiguda de petits fragments de roca o la reptació dels vessants fins als grans moviments de masses. Els processos subaeris que operen a les costes estan relacionats amb l'aportació d'aigua de precipitació i d'escolament. De fet bona part dels moviments de masses semblen ser la resposta a la càrrega

hidràulica de la roca (Duperret et al., 2002) mediatitzada per l'estructura i el diaclasmament de la roca (Blanco, 2001; Dibb et al., 1983; Jones i Williams, 1991). Cal posar de manifest que tant l'aigua d'escolament, com la de precipitació també juga un paper important pel que fa als mecanismes d'alteració físico-química.

Un dels debats encara vigents entre les diferents escoles que aborden la morfodinàmica de les costes rocoses és el de la preponderància dels processos de meteorització subaeris i/o físico-químics-biològics sobre l'acció hidràulica i viceversa (Trenhaile, 2002; Stephenson i Kirk, 2000a; Stephenson i Brander, 2003). Així doncs el present treball pretén avaluar el paper dels processos subaeris i de meteorització, respecte els hidràulics i mecànics als penya-segats carbonatats meridionals de Mallorca.

## Àrea d'estudi

La costa a s'Alavern destaca per la presència d'una línia contínua de penya-

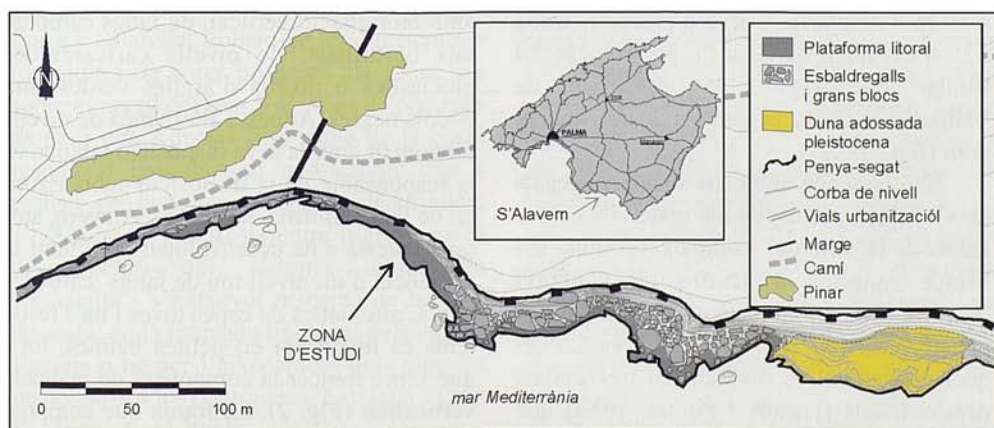
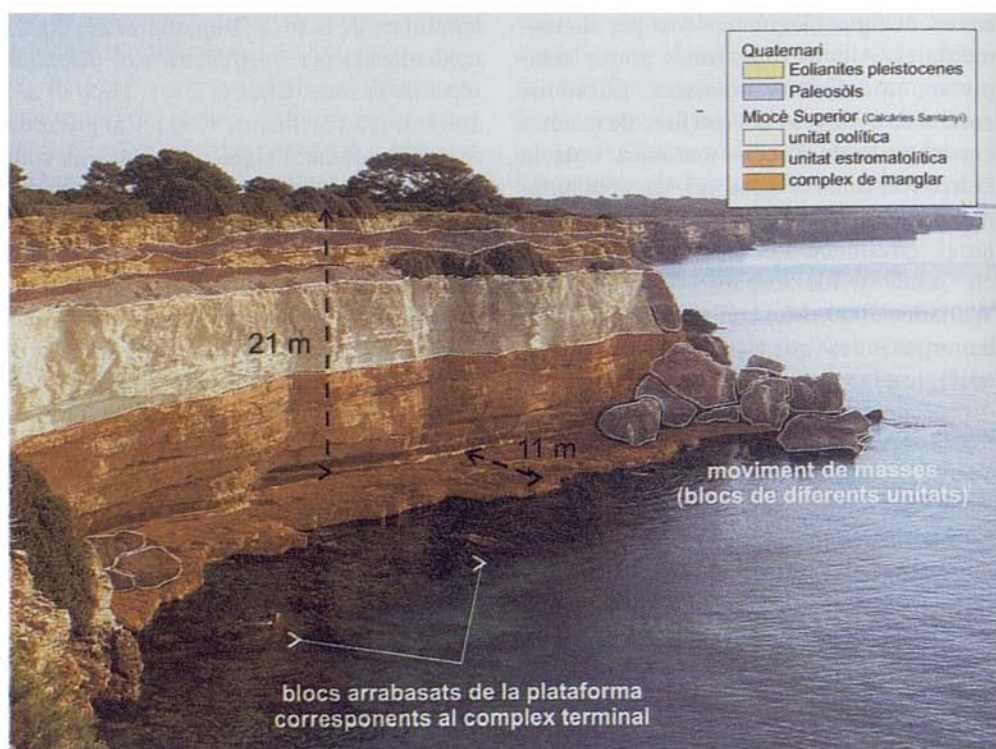


Fig. 1. Croquis geomorfològic de s'Alavern.  
Fig. 1. Geomorphological sketch of s'Alavern.



**Fig. 2.** Croquis geològic de s'Alavern.  
**Fig. 2.** Geological sketch of s'Alavern.

segats verticals de 15 a 20 m d'alçària que descansen sobre una plataforma litoral de 3 a 10 m d'amplària. L'àrea d'estudi es troba a l'est del nucli de Cala Pi, just a tocar del llindar que separa la possessió de Vallgornera de la urbanització del mateix nom (Fig.1).

El rocam que dona cos als penya-segats de s'Alavern correspon als materials carbonatats de la sèrie del Complex Terminal del Miocè superior -Calcàries de Santanyí (Fornós, 1983)- així com a les eolianites pleistocenes (Nielsen *et al.*, 2004). La seqüència general es divideix en tres unitats deposicionals (Fornós i Pomar, 1983) que de base a sostre són: el Complex de Manglar, que a la zona d'estudi, s'alça a prop de 8 m des del nivell marí. És un nivell

poc uniforme i l'integren diferents nivells d'estructura tabular bé de biocalcarenites amb bioturbació vertical, de fangs carbonatats bioturbats, de nivells calcarenítics bioclàstics o nivells d'argiles verdes amb còdols negres. Aquesta alternança de nivells juntament amb la seva disposició tabular, és la responsable de la disposició subhoritzontal de la plataforma litoral de s'Alavern, atès que aquesta s'ha desenvolupat aprofitant la presència d'un nivell tou de fangs carbonatats. L'alternança de capes toves i més resistents es manifesta en petites balmes, tot i que sense trencar la component de marcada verticalitat (Fig. 2). La franja que comprèn dels 8 als 11 m snm correspon als materials de la següent unitat, l'Estromatolítica Inferior, sobre els quals amb una potència

que oscil·la des dels 13 als 16 snm tenim els materials de la Unitat Oolítica; unes biocalcarenites amb abundants estructures de corrent d'aparença cohesiva que accentuen la verticalitat dels penya-segats. Sobre elles i després d'un contacte erosiu topam amb la seqüència alternant de paleosòls i nivells dunars del Pleistocè mitjà (Cuerda, 1975; Nielsen *et al.*, 2004). Són abundants, encara que d'extensió reduïda, els exemples de dunes adossades als penya-segats que fossilitzen antigues posicions d'aquests o de la pròpia plataforma litoral que apareix activa a d'altres indrets. Aquestes dunes, probablement, podrien correspondre al Pleistocè Superior atenent a criteris de context (Clemmensen *et al.*, 2001). Aquest fet, juntament amb la presència de marmites fossilitzades a les plataformes antigues, apunta cap a la conclusió que les plataformes litorals de s'Alavern són formes heretades que han estat reactivades per l'actual nivell marí.

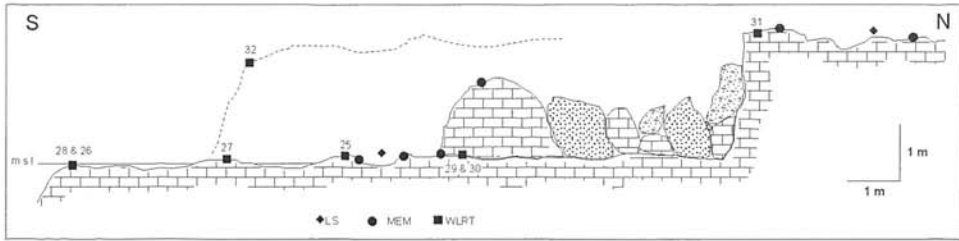
La línia de costa de s'Alavern és força rectilínia, quasi bé controlada exclusivament per fractures de direcció de 058° que sols queden articulades per una segona família de fractures de menys importància amb 137° de direcció mitjana. L'alçària del penya-segat disminueix des de Vallgornera fins a s'Estalella, trobant-se les dunes pleistocèniques de cotes properes als 15 m per sobre el nivell del mar a alçàries de poc més de pocs cm. Aquesta disposició de la costa respon al basculament neotectònic cap a ponent de la zona (Servera i Rodríguez, 1998) que es manifesta entre d'altres en la desconnexió del sistema dunar de s'Estalella - s'Estanyol respecte de la línia de costa; en la marcada linealitat dels cursos fluvials o bé per l'aixecament dels dipòsits quaternaris a les contrades s'Estalella i Cala Pi (Zazo *et al.*, 2003).

Pel que fa als agents climàtics, les temperatures mitjanes són de l'ordre de 17,5°C

i les precipitació anual de 700 mm (Guijarro, 1986). Durant els mesos freds les temperatures mitjanes no són inferiors als 7,4°C, mentre que els més calorosos arriben a mitjanes de 30,2°C. Pel que fa a les condicions marines es tracta d'un ambient relativament tranquil amb alçària d'onada significativa de l'ordre de 0,73 m, tot i que els paràmetres més freqüents de 0 o 0,5 m. Això no obstant, durant els temporals, amb direccions de propagació habituals de SW i SE, l'alçària màxima d'ona pot arribar als 5,12 m a mar oberta.

## Mètode

El treball desenvolupat als penya-segats de s'Alavern integra des de tècniques instrumentals per a la monitorització de la denudació del rocam, tests d'exposició, trampes de sediments, càlcul de la magnitud de la bioerosió i la quantificació de la tipologia i els volums de roca mobilitzats en els moviments de masses (Fig. 3). Els principis operatius de les tècniques instrumentals utilitzades es troben descrits a Gómez-Pujol *et al.* (2002c); es tracta de la monitorització de la denudació de la roca mitjançant el micròmetre d'erosió de dial fix (High i Hanna, 1970) en intervals d'1 a 1,5 m al llarg d'un perfil transversal de la plataforma litoral durant un any i mig. També s'han monitoritzat dues superfícies de 400 cm<sup>2</sup> mitjançant l'escàner làser (Swantesson, 1994) i el càlcul de les diferències de microtopografia entre aixecaments successius de la mateixa superfície. Els tests d'exposició (*weight-loss rock tablets*) consisteixen en sotmetre una peça de roca a un determinat ambient dinàmic, la diferència en pes de la peça de roca n'indica l'ordre de magnitud dels processos (Moses, 2000). A la zona d'estudi s'han exposat un total de 105 pastilles de 20 mm



**Fig. 3.** Dispositiu de mostreig a s'Alavern. LS: escàner làser; MEM: micrómetre d'erosió; WLRT: tests d'exposició

**Fig. 3.** *Sampling desing at s'Alavern: LS: laser scanner; MEM: micro-erosion meter; WLRT: weight-loss exposition tests*

de diàmetre i 5 mm d'alçària; la roca utilitzada és la mateixa que constitueix la plataforma litoral, una biocalcarenita amb un elevat grau de micritització i una porositat intergranular parcialment ocupada per cristalls de calcita amb un contingut en carbonats del 70% i una porositat del 28% (Gómez-Pujol i Fornós, 2004). Les pastilles s'han ubicat protegides per una xarxa de niló, amb un ordit de 63  $\mu\text{m}$ , i subjectades per una placa de PVC al llarg d'un perfil perpendicular a la mar i amb dispositius de 15 pastilles en intervals de 2 a 3 metres. Per al càlcul de la desintegració granular contínua s'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 i 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 i Fornós (2003). Els moviments de masses o despreniment 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 de

derrubis 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, 2003). Finalment, el càlcul de les taxes relacionades amb l'activitat dels organismes -bioerosió- s'han centrat en els gasteròpodes perquè són els més abundants a la zona d'estudi, i s'han obtingut a partir del recompte de les densitats dels organismes al llarg del perfil, la zonació d'aquest i l'obtenció d'una mostra representativa d'individus per a cada una de les zones i el càlcul del contingut lític de les seves restes fecals d'acord amb Torunski (1979) i Gómez-Pujol *et al.* (2000b).

## Resultats

### *Taxes de denudació*

Les taxes d'erosió relatives a la denudació general de la plataforma litoral són poc significatives en el sentit que els ordres de magnitud resultant són propers a la pròpia font d'error del MEM (Stephenson i Kirk, 1996), de més a més s'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 (Taula 1) no canvien gaire i s'han d'interpretar amb precaució.



	Distància al mar (m)	Taxa erosió (mm any <sup>-1</sup> )	Zonació biològica	Zonació hidrodinàmica	Observacions
MEM 1	1,50	n.a.	A	batuda	Afectat per blocs caiguts
MEM 2	3,07	- 0,0036	A	batuda	
MEM 3	4,01	+ 0,0002	B	esquits	
MEM 4	4,92	- 0,0035	C	ruixim	
MEM 5	8,76	- 0,0008	C	ruixim	
MEM 6	11,84	+ 0,0032	C	ruixim	
LS 1	4,00	- 0,310	B	esquixs	Presència gasteròpodes
LS 2	10,50	- 0,250	C	ruixim	

**Taula 1.** Taxes d'erosió obtingudes mitjançant micròmetre (MEM) i escàner làser (LS) a S'Alavern.

**Table 1.** Micro-erosion meter (MEM) and laser scanner (LS) erosion rates at s'Alavern.

L'erosió tant al domini de batuda com al d'esquits és de l'ordre de 0,0035 mm/a, mentre que a la zona d'abast del ruixim hi tenim des de taxes d'erosió nul·les, 0,0008 mm/a i per sota de l'interval de confiança instrumental, fins a increments -moviment en positiu- de la superfície equivalents a les taxes de denudació. Aquest fet s'ha identificat a d'altres ambients litorals (Mottershead, 1989; Stephenson i Kirk, 2001) i es coneix com a bombament de la superfície rocosa o variacions de microtopografia (Gómez-Pujol et al., en premsa); tot i que no es té un coneixement prou exhaustiu del que succeeix sovint s'atribueix aquesta fluctuació de superfície als fenòmens tèrmics de contracció i expansió de la roca, la variació de volum de les sals o al creixement de biofilms sobre i sota els primers mil·límetres de la superfície de la roca. 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'esquits la taxa és de 0,310 mm/a, mentre que la superfície de la zona afectada sols pel ruixim és de 0,250 mm/a (Swanteson et al., en premsa). La representació grà-

fica 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 (Taborossi et al., 2004).

#### Taxes de bioerosió

A la zona d'estudi sols s'ha calculat la taxa d'erosió relativa als dos gasteròpodes majoritaris, *Melaraphe neritoides* i *Patella* sp., principalment *P. rustica*, encara que també abunden els 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 m<sup>2</sup>, amb una densitat més elevada durant la primavera i l'hivern (Taula 2). Ben important és la presència d'aquest petit gasteròpode a la zona afecta pels esquits de l'onatge on s'arriben a comptar densitats mitjaneres de

Zonació biològica	Densitat <i>Melaraphe neritoides</i> (ind m <sup>-2</sup> )				Taxes d'erosió (mm any <sup>-1</sup> )				Mitjana mm any <sup>-1</sup>
	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

**Taula 2.** Densitat de *Melaraphe neritoides* i taxes d'erosió associades a S'Alavern.

**Table 2.** *Melaraphe neritoides* abundance and erosion rates at s'Alavern.

Zonació biològica	Densitat <i>Melaraphe neritoides</i> (ind m <sup>-2</sup> )				Taxes d'erosió (mm any <sup>-1</sup> )				Mitjana mm any <sup>-1</sup>
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern	
A	183	151	126	150	0,107	0,074	0,100	0,088	0,369

**Taula 3.** Densitat de *Patella* sp. i taxes d'erosió associades a S'Alavern.

*Table 3.* *Patella* sp. abundance and erosion rates at s'Alavern.

1000 a 2000 exemplars per m<sup>2</sup>. A la zona de batuda els exemplars de *M. neritoides* disminueixen la seva presència dramàticament fins al centenar d'individus, mentre el grup de les *Patella* sp. apareix amb nivells de 125 a 200 individus per m<sup>2</sup> (Taula 3). Aquesta distribució que respon a la forma del perfil de costa i a la humedificació 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 i les de *M. neritoides* de 0,001 mm/a; ja a la zona d'esquits les taxes mitjanes d'erosió de *M. neritoides* són de 0,008 mm/a i a la zona de ruixim de 0,005 mm/a (Taula 2 i 3).

#### Taxes d'erosió per tests d'exposició

A s'Alavern les diferències de volum de les peces de roca exposades durant un any tenen valors mitjans de 0,25 mm/a; tot i que el rang fluctua de 0,004 mm/a a 0,765 mm/a. Des del contacte mar-terra s'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, mentre que aquelles que es troben quasi bé al peu del penya-segat són de l'orde d'una tercera

o quarta part menors, amb valors mitjans de 0,180 mm/a (Taula 4).

#### Taxes d'erosió per desintegració granular

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 ens presenten taxes que oscil·len entre 0,009 mm/a i 0,248 mm/a, situant-se les taxes d'erosió mitjanes en 0,080 mm/a. Les taxes màximes de retrocés es registren durant els intervals temporals on augmenta la mitjana o bé la intensitat de les precipitacions (Fig. 4). El material recollit a les trampes de sediment de s'Alavern és de textura grollera, grànuls i palets de forma laminar i aparença angulosa, tot i que també hi ha una component 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 en permet fer-ne l'assignació en aquestes unitats del penya-segat.

Distància al mar	0 a 2 m	2 a 4 m	4 a 6 m	6 a 8 m	8 a 10 m
Taxa mitjana (mm any <sup>-1</sup> )	0,4957	0,1753	0,2470	0,2143	0,1808
Taxa mínima (mm any <sup>-1</sup> )	0,2892	0,0380	0,0188	0,0731	0,0827
Taxa màxima (mm any <sup>-1</sup> )	0,7658	0,7156	0,3813	0,4796	0,2482

**Taula 4.** Taxes de meteorització obtingudes mitjançant tests d'exposició a S'Alavern.

*Table 4.* Weight-loss exposition tests (WLT) erosion rates at s'Alavern.

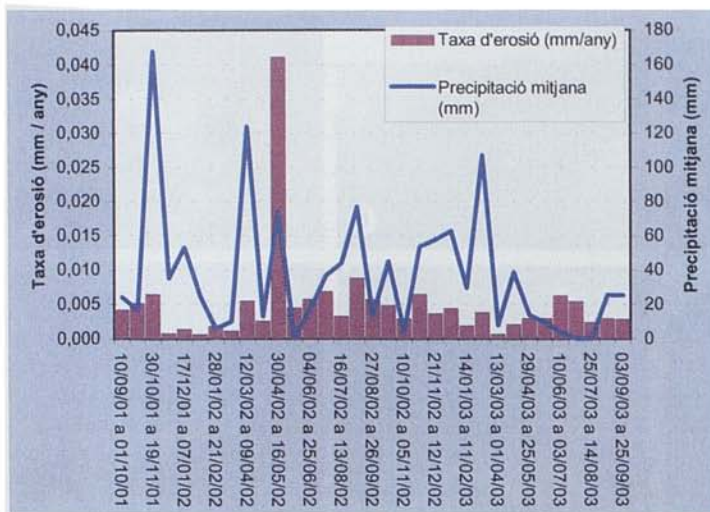


Fig. 4. Relació entre desintegració granular i precipitacions intenses a s'Alavern.

Fig. 4. Relationship between granular desintegration and intense rainfalls at s'Alavern.

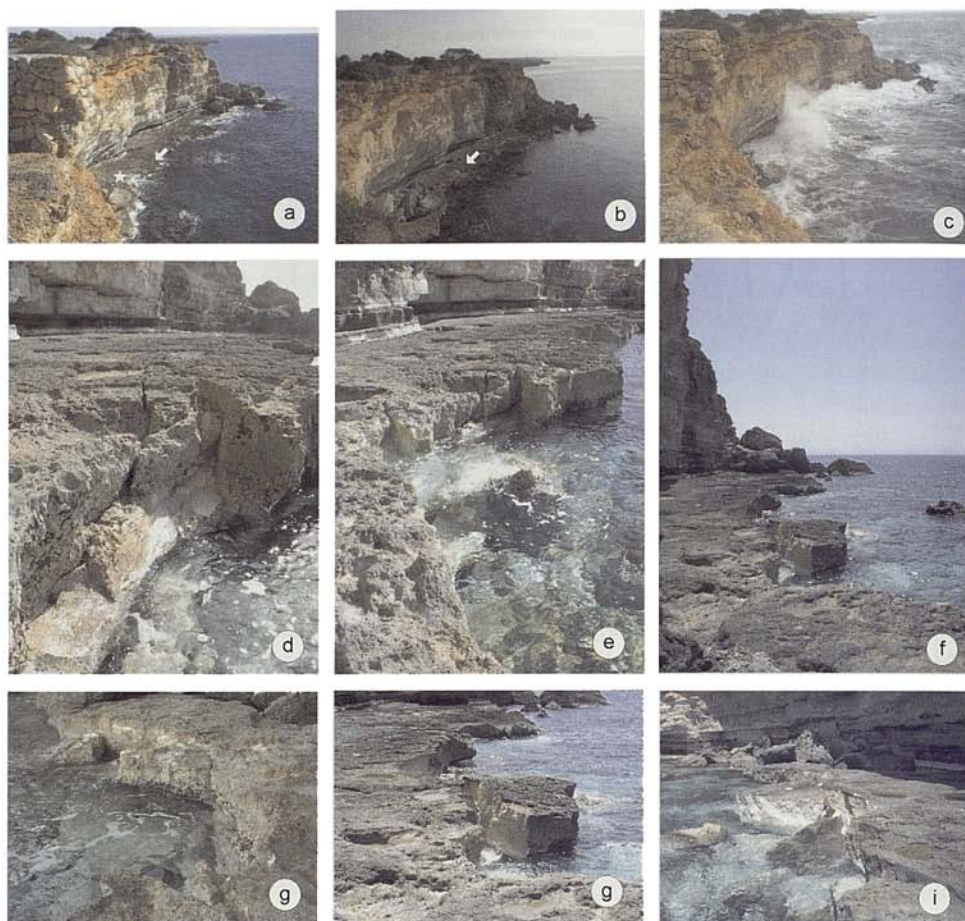
*Taxes relacionades amb l'acció mecànica de l'aigua*

La visita periòdica als penya-segats de s'Alavern ha permès comprovar l'acció de dinàmica marina. Durant la darrera setmana de febrer i primera de març del 2002 es succeïren varis episodis de mar grossa que es traduïren a la línia de costa amb varies mossegades d'entre 8 i 16 m<sup>3</sup>. Amb posterioritat s'han anat arrabassant altres blocs, alguns de dimensions ben considerables com el del mes de maig de 2003 que suposa un volum de 35 m<sup>3</sup> (Fig. 5). Les mossegades i l'arrabassament de blocs té un marcat control estructural. D'una banda l'onatge aprofita 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 diaclasi de 058° i 137°.

*Moviment de masses*

El mes de desembre de 2001 a s'Alavern es produí una caiguda de blocs que afectà a 40 m<sup>3</sup> de materials procedents dels nivells superiors quaternaris de la sèrie

del penya-segat (paleosòls, encrostaments i dunes). Tres sistemes de fractures amb direccions mitjanes 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 catalitzadors de la inestabilització dels vessants. Els valors de precipitació mitjana de s'Alavern són de 342 mm (Guijarro, 1986) però la mitjana per a l'any 2001 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 2001s'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. Només 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.



**Fig. 5.** Moviments de massa i blocs arrasats a s'Alavern. a) març 2002; b) desembre 2004; c) temporal del gener de 2003; d, g, i) detall de les cicatrius dels blocs arrasats; e i f) trencament i desplaçament d'un fragment de plataforma de grans dimensions. Imatges corresponent al març de 2002 i el juny de 2004.

**Fig. 5.** Mass movements and rock detachment at s'Alavern shore platforms. a) march 2002; b) december 2004; c) sea storm during January 2003; d, g, i) detached rock platform fragments and scars details. e and f) Detachment of a big rock platform fragment. Images correspond to march 2002 and july 2004.

## 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. 6) 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 fisico-químics, 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, aquest gradient s'inverteix en el

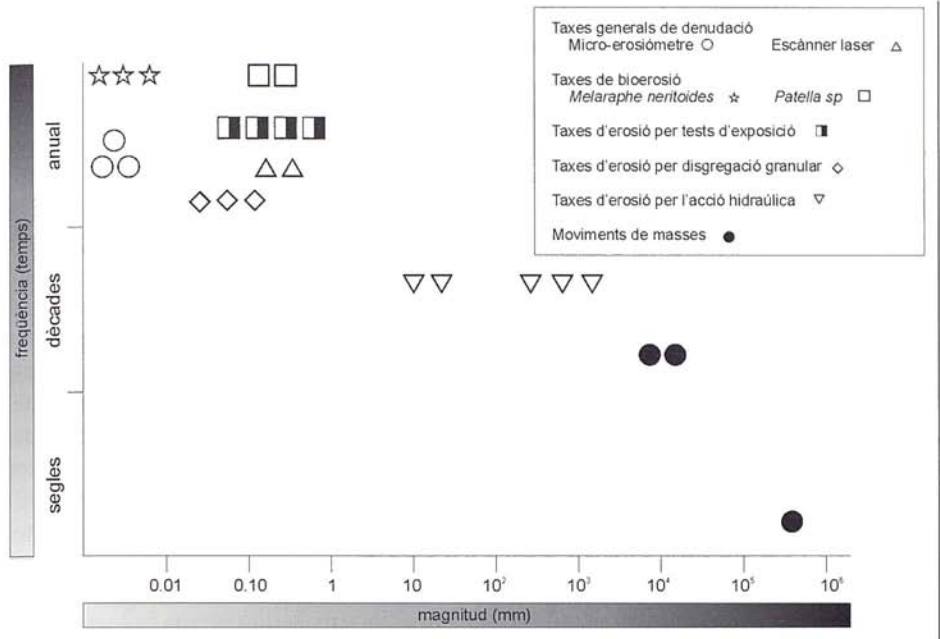


Fig. 6. Freqüència i magnitud en la morfodinàmica de les costes rocoses.  
 Fig. 6. Frequency and magnitude in rock coast morphodynamics.

vector temporal. Els processos i agents d'alteració i erosió físico-químics o biològics actuen a una escala diària, sinó d'hores (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 (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 entre episodis relativament llarga, d'anys, dècades o segles i que estan relacionats amb la ciclicitat i recurrència de fenòmens climàtics (Viles i Goudie, 2003). Des de 1998 els autors monitoritzen la costa meridional mallorquina i són pocs els moviments de masses inventariats (Balaguer *et al.*, 2002); en el cas de s'Alavern tant els moviments de masses com l'acció hidràulica alliberen materials

fins que el volum de roca alterada o el pla de fractura queden completament desmantellats i exposat el rocam fresc als processos i agents de meteorització que actuen amb major freqüència i que impliquen la remonició de volums de material discrets. En termes d'ecologia podríem parlar d'un període de reixtàsia molt acotat en el temps i separat per llargs períodes biostàtics (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-trenta anys. Així doncs ens trobam davant dos grups d'agents i processos en el binomi alteració-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, ens trobam amb dues sèries temporals d'erosió superposades de període i longitud diferents. La de menor amplitud i període -alteració físico-química, biològica, etc.- 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 rexistàsia ininterrompuda; mentre que els moviments de masses que representarien la sèrie temporal de major amplitud i longitud pateix episodis de biostàsia ben definits, com succeeix en d'altres medis on l'alteració-erosió disminueix en funció de la variable temps (Colman, 1981).

La consideració de les variables de freqüència i magnitud en les taxes calculades ens ajuda a plantejar el debat entorn 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 en què la preponderància d'un o altre depèn de la posició de l'investigador en l'escala temporal i la resolució dels estudis. El desplaçament en el vector negatiu que indica la Fig. 6 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 la desintegració granular un paper suficient per explicar el retrocés de la costa (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 com-

ponents, 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) i arrenca de les diferents tècniques emprades, del seu grau de resolució i error i d'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 i preferentment a superfícies planes. Per tant queden excloses del mostreig esquerdes, superfícies verticals, extraploms i zones on abunden els organismes com *Melaraphe neritoides* o *Patella* sp. amb taxes d'erosió més grans que les del MEM. L'escàner làser amb una capacitat de mostreig 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, etc. 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 (Trudgill, 2000). En

aquest sentit allò que 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'assigna al resultat del escàner làser (Williams *et al.*, 2000). La preponderància de l'alteració no ve de nou perquè és manifesta en el mateix modelat de la costa de s'Alavern, destacant-ne 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'homogeneïtzessin, això seria assignar el volum de roca després de forma homogènia a la superfície de plataforma, considerant-ne una recurrència que d'acord amb la bibliografia ens donaria taxes a comparar de l'orde de la centèsima de mil·límetre de rebaixament. Ordre de magnitud que convergeix amb el domini de l'alteració 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, no permet d'estudiar la façana dels penya-segats com es fa amb la component horitzontal. Així doncs, tot i que els estudis de desintegració 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 d'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 físico-química tenen una importància igual o molt semblants als descrits a les zones de ruïnim de la plataforma litoral.

## Conclusions

A la costa de S'Alavern s'han quantificat dos grups de processos erosius d'acord amb els seus patrons temporals i la magnitud de la seva acció. L'erosió relacionada amb l'acció biològica, la meteorització físico-química i la desintegració granular de les façanes dels penya-segats oscil·len entre la centèsima del mil·límetre i el mil·límetre anual de denudació i actuen d'una forma contínua en una escala temporal diària o mensual. En canvi, l'erosió quantificada a partir dels moviments de masses o l'acció hidràulica de l'onatge, tot i implicar ordres de magnitud força majors que els descrits anteriorment (de l'ordre de deu i cent vegades majors), no tenen una abast temporal tan continu i el seu comportament és més episòdic. Aquestes circumstàncies permeten dibuixar un vector entre l'erosió freqüent i poc important en termes de denudació i l'esporàdica i a considerar com a retrocés de costa, que posa en entredit el debat entre la preponderància dels processos mecànics vs. els de meteorització en funció de l'investigador a un o altre extrem d'aquest vector. Les diferents tècniques utilitzades posen de manifest la necessitat de gestionar les taxes obtingudes amb certa cura, i considerar més l'ordre de magnitud de la taxa d'erosió que no el valor per ell mateix.

## Agraïments

El present treball és una contribució al projecte de la Direcció General d'Investigació del Ministeri de Ciència i Tecnologia CGL2006-11242-C03-01 i BTE2002-04552-C03-02: "El modelado kárstico y la evolución morfológica y sedimentaria del litoral en las Baleares, Valencia y Cerdeña, como resultado de las oscilaciones del nivel

marino". Lluís Gómez-Pujol és becari del programa FPI de la Direcció General de R+D+I del Govern de les Illes Balears.

## Bibliografia

- Andrews, C. i Williams, R.B.G. 2000. Limpet erosion on chalk shore platforms in southeast England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1371-1381.
- Balaguer, P. i Fornós, J.J. 2003. Processos erosius als penya-segats costaners del SE de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània Occidental): dades preliminars de l'erosió contínua per disgregació granular. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 46: 37-50.
- Balaguer, P., Fornós, J.J. i Gómez-Pujol, L. 2002. Retroceso de los acantilados del Mioceno Superior en la costa del sureste de Mallorca: los casos de Estret des Temps i S'Alavern. In Serrano, E., García de Celis, A., Guerra, J.C., Morales, C.G. i Ortega, M.T. (eds). *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, Montaña, Dinámica Territorial*: 341-350. SEG, Universidad de Valladolid. Valladolid.
- Blackmore, P.A. i Hewson, P.J. 1984. Experiments on full-scale wave impact pressures. *Coastal Engineering*, 8: 331-346.
- Blanco, R. 2001. Procesos de erosión en costas rocosas. *Xeogràfica*, 1: 39-59.
- Bland, W. i Rolls, D. 1998. *Weathering, an Introduction to the Scientific Principles*. Arnold. London. 271 pp.
- Brunsdén, D. 2001. A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. *Catena*, 42: 99-123.
- Clemmensen, L.B., Lisborg, T., Fornós, J.J. i Bromley, R.G. 2001. Cliff-front aeolian and colluvial deposits, Mallorca, Western Mediterranean: a record of climatic and environmental change during the last glacial period. *Bull. Soc. Geol. Denmark*, 48: 217-232.
- Colman, S.M. 1981. Rock weathering rates as functions of time. *Quaternary Research*, 15: 250-264.
- Dibb, T.E., Hughes, D.W. i Poole, A.B. 1983. The identification of critical factors affecting rock durability in marine environments. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 16: 149-161.
- de Boer, D.H. 1992. Hierarchies and spatial scale in process geomorphology: a review. *Geomorphology*, 4: 303-318.
- Duperret, A., Genter, A., Mortimore, R.N., Delacourt, B., de Pomerai, M.R. 2002. Coastal rock cliff erosion by collapse at Puys, France: The role of impervious marl seams within chalk of NW Europe. *Journal of Coastal Research*, 18: 52-61.
- Fornós, J.J. 1983. *Estudi sedimentològic del Miocè Terminal de l'illa de Mallorca*. Tesi de Llicenciatura. Universitat de Barcelona. Barcelona.
- Fornós, J.J., Balaguer, P., Gelabert, B. i Gómez-Pujol, L. 2005. Pleistocene formation, evolution, retreat rates and processes in carbonate coastal cliff (Mallorca Is., Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research. Special Issue 49*: 15-21.
- Fornós, J.J. i Pomar, L. 1983. Mioceno superior de Mallorca: Unidad Calizas de Santanyí (Complejo Terminal). In: Pomar, L., Obrador, A., Fornós, J.J. i Rodríguez-Perea, A. (eds). *El Terciario de las Baleares*. Guía de las Excursiones del X Congreso de Sedimentología: 177-206. Institut d'Estudis Balearics, Universitat de les Illes Balears. Palma.
- Gaylord, B. 1999. Detailing agents of physical disturbance: wave-induced velocities and accelerations on a rocky shore. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 239: 85-124.
- Guijarro, A. 1986. *Contribución a la bioclimatología de las Baleares*. Tesi de Doctorat. Universitat de les Illes Balears. Palma.
- Gómez-Pujol, L. Balaguer, P. i Fornós, J.J. 2002a. Meteorización del patrimonio histórico en ambientes costeros marinos: el caso de la Torre d'en Beu (Santanyí, Mallorca). In: Serrano, E., García de Celis, A., Guerra, J.C., Morales, C.G. i Ortega, M.T. (eds). *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, Montaña, Dinámica Territorial*: 403-413. SEG, Universidad



- de Valladolid. Valladolid.
- Gómez-Pujol, L., Balaguer, P., Baldo, M., Fornós, J.J., Pons, G.X. i Villanueva, G. 2002b. Patronos y tasas de erosión de *Melaraphe neritoides* (Linneo, 1875) en el litoral rocoso de Mallorca: resultados preliminares. In: Pérez-González, A., Vegas, J. i Machado, M. (eds). *Aportaciones a la Geomorfología de España en el Inicio del Tercer Milenio*: 351-354. ITGME. Madrid.
- Gómez-Pujol, L., Balaguer, P., Baldo, M., Fornós, J.J., Pons, G.X. i Villanueva, G. 2002c. Técnicas instrumentales para el estudio de la meteorización y la erosión de las costas rocosas. In: Pérez-González, A., Vegas, J. i Machado, M. (eds). *Aportaciones a la Geomorfología de España en el Inicio del Tercer Milenio*: 345-350. ITGME. Madrid.
- Gómez-Pujol, L. i Fornós, J.J. 2004a. Forma, procesos y zonación en el lapiaz -karrenlitoral del sur de Menorca, 2: observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). In: Benito, G. i Díez Herrero, A. (eds). *Contribuciones Recientes Sobre Geomorfología*: 357-364. SEG, CSIC. Madrid.
- Gómez-Pujol, L. i Fornós, J.J. 2004b. Tasas de meteorización química en la costa carbonatada de Mallorca. Evaluación preliminar mediante tests de exposición (weight-loss rock tablets). In Blanco, R., Pérez, A. i López, J. (eds). *Procesos geomorfológicos y evolución costera. Actas de la II Reunión de Geomorfología Litoral*: 405-414. Universidad de Santiago de Compostela. SEG. Santiago de Compostela.
- Gómez-Pujol, L., Stephenson, W.J. i Fornós, J.J. En prensa: Two-hourly rock surface change on supra-fidal rock (Marengo, Victoria, Australia).
- Goudie, A.S. 1994. Salt attack on buildings and other structures in arid lands. In: Fookes, P.G. i Parry, R.H.G. (eds). *Engineering Characteristics of Arid Soils*: 15-28. Bakelma. Rotterdam.
- Goudie, A.S. 2000. Experimental physical weathering. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*, 120: 133-144.
- Goudie, A.S. i Viles, H.A. 1997. *Salt Weathering Hazards*. John Wiley & Sons, Chichester, 241 pp.
- Goudie, A.S. i Viles, H.A. 1999. The frequency and magnitude concept in relation to rock weathering. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.* 115: 175-189.
- Griggs, G.B. i Trenhaile, A.S. 1994. Coastal cliffs and platforms. In: Carter, R.W.G. i Woodroffe, C.D. (eds). *Coastal Evolution. Late Quaternary shoreline morphodynamics*: 425-450. Cambridge University Press. Cambridge.
- Hall, K. 1988. A laboratory simulation of rock breakdown due to freeze-thaw in maritime Antarctic environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 369-382.
- Hall, K. i Hall, A. 1996. Weathering by wetting and drying: some experimental results. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 365-376.
- High, C.J. i Hanna, F.K. 1970. A method for the direct measurement of erosion on rock surfaces. *Brit. Geomorph. Res. Group. Tech. Bull.*, 5: 1-25.
- Jones, D.G. i Williams, A.T. 1991. Statistical analysis of factors influencing cliff erosion along a section of the West Wales coast, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16: 95-111.
- Kaye, C.A. 1957. The effect of solvent motion on limestone solution. *Journal of Geology*, 65: 35-46.
- Lahousse, P. i Pierre, G. 2003a. The retreat of chalk cliffs at Cape Blanc-Nez (France): autopsy of a erosional crisis. *Journal of Coastal Research*, 19: 431-440.
- Lahousse, P. i Pierre, G. 2003b. Vitesse, rythme et modalités du recul des falaises crayeuses du cap Blanc-Nez (Pas de Calais, France). *Z. Geomorph. N.F.*, 47: 215-234.
- Lundberg, J. En prensa. Coastal karren. In: Dreybrodt, W., Ginés, A. Knez, M. i Slabe, T. (eds). *Karst Rock Features. Karren Sculpturing*. ZRC SAZU. Postojna.
- McLean, R.F. 1967. Measurement of beach rock erosion by some tropical marine gastropods. *Bulletin of Marine Science*, 17: 551-561.
- Moses, C.A. 2000. Field rock block exposure trials. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*, 120:

- 33-50.
- Mottershead, D.N. 1989. Rates and patterns of bedrock denudation by coastal salt spray weathering: a seven year record. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 383-398.
- Naylor, L.A., Viles, H.A. i Carter, N.E.A. 2002. Biogeomorphology revisited: looking towards the future. *Geomorphology*, 47: 3-14.
- Nielsen, K.A., Clemmensen, L.B. i Fornós, J.J. 2004. Middle Pleistocene magnetostratigraphy and susceptibility stratigraphy: data from a carbonate aeolian system, Mallorca, Western Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*, 23: 1733-1756.
- Noormets, R., Crook, K.A.W. i Felton, E.A. 2004. Sedimentology of rocky shorelines, 3: Hydrodynamics of megaclasts emplacement and transport on a shore platform, Oahu, Hawaii. *Sedimentary Geology*, 172: 41-65.
- Palmer, M., Fornós, J.J., Balaguer, P., Gómez-Pujol, L., Pons, G.X. i Villanueva, G. 2003. Spatial and seasonal variability of the macro-invertebrate community of a rocky coast in Mallorca (Balearic Islands): implications for bioerosion. *Hydrobiologia*, 501: 13-21.
- Pohl, W. i Schneider, J. 2002. Impact of endolithic biofilms on a carbonate rock surfaces. In: Siegesmund, S., Weiss, T. i Vollbrecht, A. (eds). *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*. Geological Society, London. Special Publications, 205: 177-194.
- Robinson, L.A. 1977. Marine erosive processes at the cliff foot. *Marine Geology*, 23: 257-271.
- Servera, J. i Rodríguez-Perea, A. 1999. Geomorfologia costanera de s'Estalella. *L'entorn de Lluçmajor: estudis i comentaris*, 1: 9-30.
- Spencer, T. 1981. Microtopographic change on calcarenites, Grand Cayman Island, West Indies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6: 85-94.
- Spencer, T. 1988. Limestone coastal geomorphology: the biological contribution. *Progress in Physical Geography*, 12: 66-101.
- Stephenson, W.J. 2000. Shore platforms: a neglected coastal feature?. *Progress in Physical Geography*, 24: 311-327.
- Stephenson, W.J. i Brander, R.W. 2003. Coastal geomorphology into the twenty-first century. *Progress in Physical Geography*, 27: 607-623.
- Stephenson, W.J. i Kirk, R.M. 1996. Measuring erosion rates using the micro-erosion meter: 20 years of data from shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. *Marine Geology*, 131: 209-218.
- Stephenson, W.J. i Kirk, R.M. 2000a. Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand, 1: the role of waves. *Geomorphology*, 32: 21-41.
- Stephenson, W.J. i Kirk, R.M. 2000b. Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand, 2: the role of subaerial weathering. *Geomorphology*, 32: 43-56.
- Stephenson, W.J. i Kirk, R.M. 2001. Surface swelling of coastal bedrock on inter-tidal shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. *Geomorphology*, 41: 5-21.
- Stephenson, W.J., Taylor, A.J., Hemmingsen, M.A., Tsujimoto, H. i Kirk, R.M. 2004. Short-term microscale topographic changes of coastal bedrock on shore platforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 1663-1673.
- Sunamura, T. 1982. A wave tank experiment on the erosional mechanism at a cliff base. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7: 333-343.
- Swantesson, J.O.H. 1994. Micro-mapping as a tool for the study of weathered rock surfaces. In: Robinson, D.A. i Williams, R.G.B. (eds). *Rock weathering and landform evolution*: 209-222. Wiley. Chichester.
- Swantesson, J.O.H., Gómez-Pujol, L., Cruslock, E., Fornós, J.J. i Balaguer, P. En premsa. Processes and patterns of erosion and down-wearing on micro-tidal rock coasts in

- Sweden and the Western Mediterranean. 14 pp. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*
- Taborossi, D., Jenson, J.W. i Mylroie, J.E. 2004. Karren features in island karst: Guam, Mariana Islands. *Z. Geomorph. N.F.*, 48: 369-389.
- Torunski, H. 1979. Biological erosion and its significance for the morphogenesis of limestone coasts and for nearshore sedimentation (Northern Adriatic). *Senckenbergiana Marit.*, 11: 193-265.
- Trenhaile, A.S. 1987. *The Geomorphology of Rock Coasts*. Oxford University Press. Oxford 384 pp.
- Trenhaile, A.S. 2002. Rock coast, with particular emphasis on shore platforms. *Geomorphology*, 48: 7-22.
- Trenhaile, A.S. i Layzell, M.G.J. 1981. Shore platform morphology and the tidal duration factor. *Transactions of the Institute of British Geographers N.S.*, 6: 82-102.
- Trudgill, S.T. 1976. The marine erosion of limestone on Aldabra atoll, Indian Ocean. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*, 26: 164-200.
- Trudgill, S.T. 1977. Problems in the estimation of short-term variations in limestone erosion processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2: 251-256.
- Trudgill, S.T. 1979. Spitzkarren on calcarenites, Aldabra Atoll, Indian Ocean. *Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd.*, 32: 67-74.
- Trudgill, S.T. 1985. *Limestone Geomorphology*. Longman. London.
- Trudgill, S.T. 2000. Weathering overview: measurement and modelling. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*, 120: 187-193.
- Trudgill, S.T. i Viles, H.A. 1998. Field and laboratory approaches to limestone weathering. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 31: 333-341.
- Viles, H.A. 1987. Blue-green algae and terrestrial limestone weathering on Aldabra atoll: an SEM and light microscope study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 319-330.
- Viles, H.A. 2001. Scale issues in weathering studies. *Geomorphology*, 41: 63-72.
- Viles, H.A. 2004. Implications of future climate change for stone deterioration. In: Siegesmund, S., Weiss, T. i Vollbrecht, A. (eds). *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservations and Case Studies. Geological Society, London, Special publications*, 205: 407-418.
- Viles, H.A. i Goudie, A.S. 2003. Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science Reviews*, 61: 105-131.
- Viles, H.A., Spencer, T., Teleki, K. i Cox, C. 2000. Observations on 16 years of microfloral recolonization from limestone surfaces, Aldabra Atoll, Indian Ocean: Implications for biological weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1355-1370.
- Williams, A.T. i Roberts, T.G. 1995. The measurement of pebble impacts and wave action on shore platforms and beaches: the swash force transducer (swashometer). *Marine Geology*, 129: 137-143.
- Williams, R.B.G., Swantesson, J.O.H. i Robinson, D.A. 2000. Measuring rates of surface downwearing and mapping microtopography: the use of micro-erosion meters and laser scanners in rock weathering studies. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*, 120: 51-66.
- Woodroffe, C.D. 2003. *Coasts. Form, Process and Evolution*. Cambridge University Press. Cambridge. 623 pp.
- Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Bardají, T., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., González-Delgado, J.A., Soler, V. 2003. Pleistocene raised marine terraces of the Spanish Mediterranean and Atlantic coasts: records of coastal uplift, sea-level highstands and climate change. *Marine Geology*, 194: 103-133.