

EL MÓN SUBTERRANI I LES CALES

LES CALES DEMANEN UN LITORAL CALCARI: L'EXEMPLE DE LES BALEARS

Joan J. Fornós

La cala és una geoforma litoral complexa on convergeixen una sèrie de processos que interaccionen amb una gran variabilitat. El carst, provocat per la dissolució de les roques calcàries i responsable de la formació de la majoria de coves, n'és un dels més destacats.

La línia de costa és una zona en permanent evolució i canvi com a efecte de la interacció entre el medi sòlid que correspon a la terra, el medi líquid, que correspon a la mar i l'aigua dolça, i el medi gasós, que correspon a l'atmosfera. Les dinàmiques pròpies que afecten cada un dels tres, juntament amb la variable temps, fan que els diferents processos que hi actuen o hi han actuat quedin reflectits en la morfologia costanera.

Un dels més vistosos accidents litorals, la cala, és una geoforma complexa deguda a la convergència de diversos factors essencials en la seva gènesi que interfereixen amb una considerable variabilitat.

El primer factor, el més important i bàsic, és l'eustàsia, és a dir, la variació del nivell de la mar més o menys uniforme a escala mundial, causada per les fluctuacions del gel acumulat a les zones continentals i polars, o pel canvi de la capacitat de les conques oceàniques i marines. En períodes freds, quan la mar minva perquè hi ha grans acumulacions de gel a les zones continentals, el nivell de base que condiciona els cursos fluvials també davalla i en conseqüència els rius tendeixen a la incisió de les valls per acomodar-se a la nova situació. De la mateixa manera, si tenim buits o cavitats que s'hagin format a l'interior de les formacions geològiques, la pèrdua del suport hidrostàtic en davallar el nivell freàtic pot provocar-ne el col·lapse. Per contra, en períodes càlids el gel continental es fon i l'aigua torna a l'oceà, i la corresponent pujada del nivell de la mar inunda les parts baixes de les valls fluvials encaixades, que a la llarga –però no sempre– podran ser reblertes per dipòsits sedimentaris, ja siguin continentals, de transició o marins.

**«UN DELS MÉS VISTOSOS
ACCIDENTS LITORALS ÉS
LA CALA. UNA GEOFORMA
COMPLEXA DEGUDA A
LA CONVERGÈNCIA DE
DIVERSOS FACTORS
ESSENCIALS EN LA SEVA
GÈNESI»**

El segon factor que afavoreix el desenvolupament d'una cala és el component fluvial. Encara que en l'actualitat els processos lligats a la circulació fluvial a les illes són molt poc visibles, en algun moment poden haver exercit el seu paper amb l'establiment d'una curta xarxa de drenatge, ara relict, que es pot reconèixer tot i que mai no assoleix les característiques típiques d'un estuari.

L'estructura tectònica és el tercer factor i actua com a condicionant bàsic de les línies de debilitat aprofitades per tots els processos erosius que acabaran modelant el paisatge. La debilitat es tradueix en el trencament de la roca, les fractures o falles, com a conseqüència dels esforços mecànics que es produeixen a l'escorça terrestre (els processos tectònics), i com que tenen un component direccional, el seu paper es traduirà en la linealitat de les formes resultants. A les cales sovint els encaixaments s'entrecreuen en diversos angles i mostren una característica planta quadriculada.

Comentats aquests aspectes, podem dir que les cales s'han associat tradicionalment a la incisió fluvial que es va produir durant el darrer estadi glacial –culminat, ara fa 100.000 anys–, que, amb la posterior pujada del nivell de la mar, va crear un ambient d'estuari envoltat de penya-segats. Ara bé, la variabilitat morfològica de les cales que veiem si en fem una acurada observació ens indica que la linealitat dels recorreguts dels torrents i del front litoral (condicionada per la fractura) no acaba d'encaixar amb el traçat de la majoria de les cales i de bona part dels torrents, i per tant, s'ha de postular algun altre procés que contribueixi al desenvolupament i evolució d'aquestes formes. Així

A l'esquerra, Anna Sanchis. Sèrie «La cala encantada», 2012. Argila, escaiola i acrílics sobre taula, 21 x 28 cm.

doncs, hi ha un nou model d'evolució de les cales en el qual els processos relacionats amb el carst assumeixen un paper important.

■ EL CARST I LA DEPENDÈNCIA DEL ROCAM

La paraula *carst* prové del terme *karra*, que té un origen preindoeuropeu i ve a significar qualsevulla cosa relacionada amb pedra. Bona part de l'actual Eslovènia occidental i del Trieste italià mostra un paisatge pedregós, estèril, sense escolament superficial, que li confereix unes característiques molt específiques. A partir de la denominació toponímica de la zona, a finals del segle XVIII, l'escola geogràfica i geològica vienesa va germanitzar i internacionalitzar el terme des d'un punt de vista científic. Les característiques paisatgístiques, doncs, de la zona del Karst (o Kras) serviren als científics per a definir els fenòmens càrstics i, a partir d'aquest moment, es va estendre el terme arreu on es repetien les característiques geomorfològiques, és a dir, els paisatges carbonàtics, afectats per la porositat i la solubilitat de la roca.

Entenem per carst tot aquell conjunt de processos que deriven d'aquestes característiques hidrològiques distintives i donen un paisatge que resulta de la combinació entre una roca amb elevada solubilitat i una ben desenvolupada porositat secundària (deguda a la fractura de la roca). El fet de l'elevada porositat (espai buit a l'interior de la roca) implica que l'aigua s'infiltra ràpidament cap al subsòl, per tant, desapareix l'escolament superficial. A la vegada, aquesta infiltració multiplica el possible contacte de l'aigua amb la roca, que, en presentar una elevada solubilitat, es va dissolent. Amb això la roca es buida i adopta unes formes molt característiques. A la vegada, aquesta dissolució incrementa més la porositat (els buits s'eixamplen) i podem dir que el procés s'autoalimenta. De solubles en són totes les roques, en major o menor mesura, però només unes quantes són susceptibles d'alimentar fenòmens càrstics. Aquests fenòmens seran remarcables quan altres processos geomòrfics físics, tant els hidrodinàmics com els aerodinàmics (com per exemple els que incideixen en el modelat fluvial, glacial o eòlic) tinguin una intensitat menor. Entre les roques més solubles, les evaporites (sals i guixos) i sobretot les roques calcàries ens mostren els exemples més espectaculars.

Les formes càrstiques per excel·lència generades en aquestes roques són les dolines (un tipus de depressions



© Joan J. Fornós

Els penya-segats carbonàtics miocènics de les Balears són la base fonamental on conflueixen amb la seva màxima intensitat el carst i les cales.

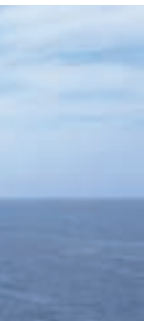
**«LES CALCÀRIES SÓN
ROQUES RESISTENTS
A L'EROSIÓ. AIXÒ FA
PREVEURE QUE AL
LITORAL LA FORMA MÉS
CARACTERÍSTICA SIGUIN
ELS PENYA-SEGATS»**

tancades circulars en forma d'embut, *foies* al País Valencià, *comes* a les Illes), les coves (o cavitats subterrànies) i les formes acanallades del rascler (*karren* o *lapiaz*) que s'observen als afloraments rocosos superficials.

Qualsevol procés geomòrfic requereix un substrat material, de manera que les característiques químiques i, sobretot, texturals de la roca condicionen en primer grau les formes resultants. A això hi hem d'afegir el trencament de la roca, que ofereix espais de debilitat per on ataca preferentment l'acció erosiva dels processos físics, i a la llarga condiciona també l'acció dels processos càrstics o de dissolució, ja que s'utilitzen aquests plans que dona la fractura com a conductes preferents de l'aigua. D'aquesta manera, amb l'exercici de la seva tasca de dissolució, l'aigua va eixamplant els plans creant conductes i cavitats que van debilitant l'estructura global d'una formació geològica.

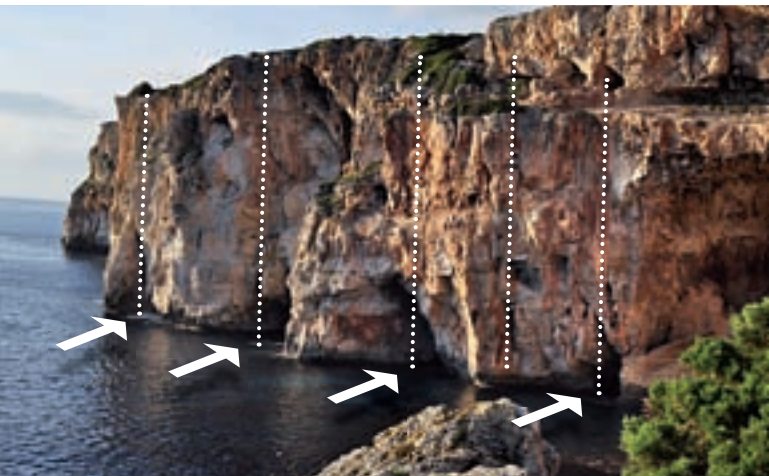
A les illes Balears, les roques calcàries hi són omnipresents. Ens trobam en una zona amb clima temperat i amb una pluviometria estacional més o menys regular, per la qual cosa és fàcil pensar que un dels processos més importants que afecten el modelat de les illes serà el càrstic. Les calcàries són roques que podríem considerar *dures*, o sia, resistents a l'erosió produïda pels processos físics. Això fa preveure que al litoral





la forma més característica siguin els penya-segats. La variabilitat que hi trobarem dins vindrà donada pels aspectes geològics, entre els quals els de caràcter tectònic o estructural, deguts als processos de deformació i trencament que han sofert al llarg dels temps geològics, seran els principals. Una altra cosa són els processos químics.

El major desenvolupament de cales a les Balears es dona principalment associat als materials carbonatats del Miocè superior (d'11,6 a 5,3 milions d'anys).



© Joan J. Fornós

Els conductes càrstics freàtics a la base dels penya-segats (fletxes) relacionats amb la fractura (línies de punts) afavoreixen la dinàmica erosiva marina.



© Joan J. Fornós

La fractura marca els punts de debilitat a la roca on incideixen tant els processos de dissolució per les aigües freàtiques com la fallida mecànica de la roca que dona lloc a col·lapses i esclavissades.

Es tracta d'un conjunt de dipòsits que afloren de forma extensa al migjorn de Menorca i al migjorn i zona oriental de Mallorca, configurant el que denominem les marines. Corresponen a un relleu estructural integrat per un conjunt de formacions de calcàries i calcarenites ben estratificades en un relleu tabular horitzontal i que, en arribar a la línia de costa, queden tallats per espadats verticals. Aquests materials es van sedimentar en un ambient de plataforma marina sota amb un gran desenvolupament dels esculls de corall i un clima molt més càlid que l'actual.

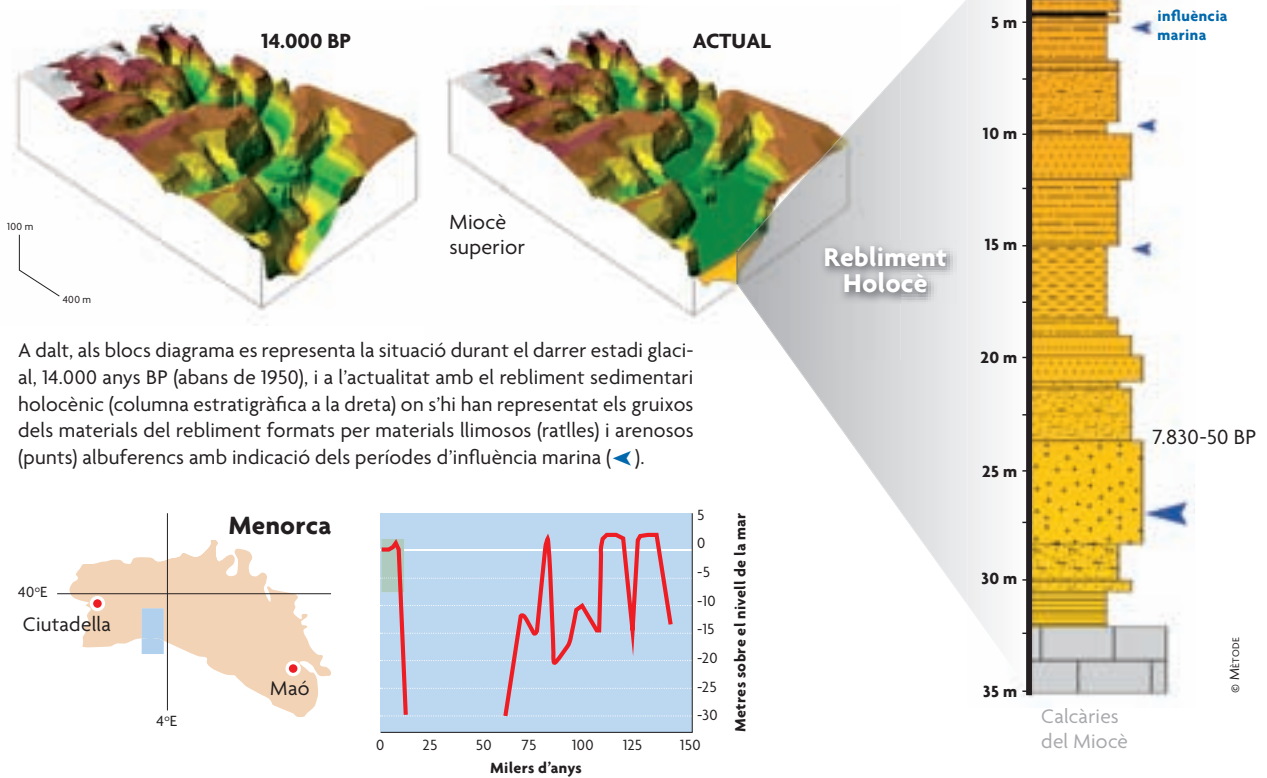
■ EL PAPER DE L'ESTRUCTURA I LA FRACTURA

Els materials al·ludits del Miocè superior, tal i com indica la seva disposició, són postorogènics, és a dir, no han sofert cap deformació compressiva important com la que afecta els materials més antics que afloren a les Illes (originada pel xoc entre la placa africana i l'europea durant l'orogènia alpina) i que ens donen els relleus més importants. Aquests materials, però, sí que estan afectats per una tectònica distensiva produïda pel subsegüent relaxament després de la compressió. El resultat és un conjunt de fractures i diàclasis (trencament sense moviment vertical) amb una orientació molt constant, d'acord amb el camp d'esforços que les ha produïdes. S'hi poden reconèixer diverses direccions que s'entrecruen donant en superfície una mena de reticulat. Una d'aquestes direccions coincideix amb la predominant de la línia de costa i és la responsable dels penya-segats i del seu retrocés amb l'ajuda de la dinàmica marina; les altres direccions, amb un angle més o menys normal a la línia de costa, tendeixen a donar les formes escairades, fàcilment observables en la major part del litoral.

Com ja s'ha comentat, la fractura actua de camí preferent per on penetra l'aigua i per tant s'hi concentra la dissolució de la roca. Pel mateix motiu, allà on es produeix l'encreuament de fractures s'incrementa aquesta penetració i per tant la dissolució. Esdevé el lloc preferent de formació d'avencs, engolidors i també de depressions tancades o dolines.

Alguns exemples paradigmàtics de cales, els tenim a l'illa de Menorca, on podem observar els diversos estadis evolutius, des del seu inici, amb el cas de cala Sant Llorenç, fins a l'estadi més desenvolupat de la ben coneguda cala Galdana. En el primer cas, un barranc de fort pendent i curt trajecte meandritzant està envoltat de penya-segats importants la linealitat dels quals depèn de les direccions de fractura, que presenten formes còncaves penetrants. Aquestes concavitats mostren senyals de desmantellament gravitacional recents amb cicatrius delapsionals i acumulació de blocs al seu

Model evolutiu del rebliment sedimentari en el cas del barranc d'Algendar (cala Galdana).



A dalt, als blocs diagrama es representa la situació durant el darrer estadi glacial, 14.000 anys BP (abans de 1950), i a l'actualitat amb el rebliment sedimentari holocènic (columna estratigràfica a la dreta) on s'hi han representat els gruixos dels materials del rebliment formats per materials llimosos (ratlles) i arenosos (punts) albuferencs amb indicació dels períodes d'influència marina (◀).

En la gràfica es detalla la corba d'oscil·lació del nivell de la mar a la zona de les Balears des del darrer estadi interglacial, és a dir, durant els últims 150.000 anys.

peu. L'observació de conductes freàtics, lligats al nivell actual de la mar, que desemboquen a la línia de costa i que coincideixen amb els punts de debilitat estructural, permet lligar aquests amb la formació de dolines. La seva captura, juntament amb les cavitats subjacents, per part de la mar provoca el col·lapse de les parets, afavorit per les esquerdes verticals, generant-hi les formes còncaves i donant lloc de forma repetitiva i coalescent al retrocés del penya-segat. El procés fluvial iniciaria aquí probablement la seva incisió.

Un cas ja totalment desenvolupat és el de cala Galdana. Lligat a un curs d'aigua perenne, presenta un clar aspecte de desembocadura fluvial, però amb un fons pla a causa del rebliment sedimentari de la darrera pujada del nivell de la mar. La forma de la cala és típicament circular, delimitada per timbes verticals que mostren formes còncaves que es van succeint amb continuïtat, tant al tram final del barranc com aigües amunt, on queden realçades pel traçat meandrizant del riu. Les formes còncaves coincideixen amb punts de debilitat estructural de les parets (fractures verticals), aprofitades per enfonsaments de tipus càrstic. Els col·lapses o

enfonsaments són provocats per dolines amb conductes verticals afavorits per la fractura i que són captats per d'altres d'horizontals, situats al nivell de la mar.

■ COM POT EVOLUCIONAR UNA CALA

Podem dir que una cala representa la interacció total entre el modelat fluvial, l'estructura de la formació geològica, la dinàmica marina i el procés càrstic. A la zona litoral, les cavitats càrstiques hi són molt abundants. Es coneix la presència de tota una sèrie de conductes i cavitats més o menys desenvolupats que segueixen un traçat paral·lel al litoral, com també de canals que prolonguen a una certa profunditat la llera dels torrents i barrancs. Aquesta situació és explicable pel fenomen hidrològic que en aquestes situacions produeix la mescla d'aigua marina, que penetra terra endins gràcies a la porositat, i l'aigua meteòrica d'infiltració que alimenta els aqüífers subterranis. La trobada d'aquestes aigües de composició química diferent fa que esdevinguin molt més agressives i justifica en aquest indret una major corrosió de la roca calcària i provoca la formació

de grans buits. Per tant, tendrem com a conseqüència tot un reguitzell de cavitats i conductes al llarg del contacte entre el tascó d'intrusió marina i l'aquífer d'aigua dolça. Les característiques i traçat d'aquesta intrusió dependran evidentment del cabal freàtic i fluvial i del grau de porositat de la roca.

Per altra banda, el procés càrstic es relaciona també amb la fractura distensiva que canalitza preferentment el flux de l'aigua a través de les discontinuïtats que representen les fractures. Aquest mecanisme provoca la digitació de les cavitats i afavoreix l'activitat erosiva marina que tendirà a anar capturant (o interceptant) les cavitats i els conductes, donant lloc d'aquesta manera a l'inici d'entrades marines (les digitacions) que podrien acabar en cales.

En aquest punt s'ha de tenir present la variabilitat del nivell marí durant el Quaternari. El màxim desenvolupament de cavitats i conductes es degué produir en els moments d'estabilització marina, quan l'activitat de dissolució permetria el desenvolupament dels buits relacionats amb el corresponent nivell de la mar. La variabilitat del nivell, deguda al glacioeustatisme, pot explicar la superposició de pisos de dissolució a diferents cotes, cosa que probablement afavoriria la formació de dolines i el posterior col·lapse per pèrdua de suport hidràulic en moments de davallada de la mar (períodes glacials o regressius). Les formes finals de les cales, limitades per parets verticals i amb una planta circular o el·líptica, i també de bona part del trajecte dels barrancs, especialment en els darrers trams, així

ho fan pensar. En resum, les etapes de davallada del nivell de la mar implicarien el col·lapse i acceleració dels processos de desmantellament de cavitats i conductes, mentre que durant els períodes de pujada del nivell marí tindríem la invasió per part de la mar de les zones més excavades durant l'encaixament dels torrents i també la tendència al rebliment sedimentari.

De l'anàlisi acurada de les cales de les illes Balears, podem dir que la major part tenen molt a veure amb l'aprofitament de conductes i cavitats càrstiques. No vol dir això que el seu mecanisme de formació sigui únic i degut exclusivament al fenomen del carst, sinó que la interacció dels diferents processos, entre ells el fluvial, derivaria en una cala i el seu barranc associat. La gran diversitat observada en la morfometria de les cales seria el fruit d'aquesta interacció amb altres factors, com la dinàmica marina, l'estructura geològica, la variació litològica de les roques carbonatades i, finalment, l'evolució del nivell de la mar durant el Quaternari. ☺

BIBLIOGRAFIA

- FORD, D. i P. WILLIAMS, 2007. *Karst Hidrology and Geomorphology*. Wiley. Chichester.
- FORNÓS, J. J. *et al.*, 2004. «Història natural del Migjorn de Menorca. El medi físic i l'influx humà». *Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 11.
- FORNÓS, J. J. *et al.*, 2007. «Geomorfologia litoral. Migjorn i Llevant de Mallorca». *Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 15.
- ROSSELLÓ, V. M., 2005. «Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica». *Cuadernos de Geografía*, 77: 1-18.

Joan J. Fornós. Professor titular i investigador del Grup de recerca sobre el carst i la geomorfologia litoral. Universitat de les Illes Balears.



Vista aèria de cala Galdana (Menorca) amb les característiques càrstiques associades: (A) Conducte freàtic dependent de la fractura; (B) dolines de col·lapse relacionades amb conductes freàtics; (C) incidència de la fractura en la localització dels processos càrstics.