

Aigües subterrànies i endocarst: un patrimoni hidrogeològic ocult, enigmàtic i màgic

La paraula *carst* s'empra en geomorfologia per fer referència als paisatges en què predominen les formes derivades de la dissolució de les roques. Per extensió, se sol fer servir el mot *carstificació* com a sinònim de dissolució congruent, una de les diverses reaccions que provoca la meteorització química. En sentit estricte, però, és més correcte dir que els processos de carstificació afecten els minerals que constitueixen les roques, ja que cadascun dels components minerals d'una roca heterogènia presenta un grau de dissolució i una reacció específics. Tanmateix, com que la majoria de minerals que es carstifiquen són també formadors de roques (calcita i calcària, dolomita i dolomia) i, fins i tot alguns tenen el mateix nom que la roca (halita, silvita, guix), sovint es parla de *roques carstificables*.

Text > **CARLES ROQUÉ**, professor de geologia del Departament de Ciències Ambientals de la Universitat de Girona

ANNA MENCÍO, professora d'hydrogeologia del Departament de Ciències Ambientals de la Universitat de Girona

Fotos > **CARLES ROQUÉ**

Quines roques es poden carstificar? Les que es carstifiquen més freqüentment són les sedimentàries carbonàtiques formades per calcita (calcària, tova calcària, travertí, etc.) i per dolomita (dolomia); les sedimentàries evaporítiques (guix, halita, silvina, epsomita, glauberita, etc.); les roques metamòrfiques que tenen com a protòlit roques sedimentàries carbonàtiques (marbres); i les sedimentàries detrítiques si tenen una proporció gran de components de carbonat, siguin clasts, matriu o ciment (gresos, conglomerats).

La intensitat de la dissolució està en funció de la solubilitat específica del mineral i de diversos factors ambien-

tals (estructura de la roca, precipitació, temperatura, pressió de CO_2 , règim del flux, contingut de salts dissoltes en el flux, cabal, activitat biològica, etc.). En general, els carbonats es dissolen més lentament (sovint a una velocitat inapreciable a escala de temps humà) que les roques evaporítiques. I d'aquestes darreres, el guix es dissol molt més lentament que els clorurs (halita, silvina, etc.).

El massís del Montgrí i les Medes

La dissolució de les evaporites es produeix directament en presència d'aigua, i és més efectiva a una temperatura alta, amb règim de flux turbulent i amb aigua amb un contingut baix de sals dissoltes. La dissolució dels car-

bonats és més complexa, ja que necessita que hi hagi un àcid dissolt en l'aigua per produir-se. Els més habituals són l'àcid carbònic i l'àcid sulfúric. El primer sol derivar de la barreja de CO_2 (atmosfèric, edàfic o d'origen profund) amb aigua, i reacciona amb el carbonat de calci (o calci i magnesi) per formar bicarbonat, que és soluble en aigua. La reacció, que és reversible, és més efectiva a temperatures baixes. Aquesta és l'explicació de per què a regions temperades com Catalunya la formació de cavitats càrstiques es relaciona amb les fases paleoclimàtiques fredes (episodis glacials), mentre que els edificis de toves calcàries i els espeleotemes (dipòsits de precipitació de carbonat fora i dins de les coves,

respectivament) es formen durant les fases climàtiques càlides (episodis interglacials). Un exemple interessant d'això són les coves càrstiques que avui dia estan totalment o parcialment submergides en el mar, com les calcàries mesozoiques del massís del Montgrí i de les illes Medes, entre les quals destaquen les d'en Sala, dels Arquets i de la Vaca, amb noranta-set, vuitanta i quaranta-cinc metres de recorregut, respectivament. Aquestes coves es van formar durant els episodis glacials, quan el nivell del mar estava un centenar de metres per sota de la cota altimètrica que té actualment. Les temperatures baixes van afavorir la dissolució dels carbonats i la formació de coves. La pujada del nivell del mar posterior a la darrera glaciació, que es va establir en la cota actual fa uns

6.500 anys, va fer que aquestes coves quedessin submergides.

Unes coves de grans dimensions

L'altre àcid implicat en la dissolució dels carbonats, l'àcid sulfúric, és menys abundant en el medi geològic, però té més capacitat de dissoldre'ls. Tanta, que avui dia es considera que moltes coves de grans dimensions d'arreu del món en són un resultat directe. Aquest àcid sol derivar de reaccions d'oxidació de minerals del grup dels sulfurs (pirita, calcopirita, esfalerita, arsenopirita...) disseminats en les roques o bé concentrats en filons. L'aigua que hi circula els oxida i s'acidifica, i dona lloc als drenatges àcids, que poden ser subterranis o superficials, i que tenen capacitat per dissoldre no només els carbonats, sinó

també molts altres minerals, fins i tot alguns silicats. En contacte amb els carbonats, la reacció és molt efectiva, i típicament comporta la precipitació de sulfat de calci hidratat (guix) i l'alliberament de diòxid de carboni.

Independentment del tipus de mineral i de l'àcid implicat en el procés de dissolució, els paisatges càrstics es caracteritzen per presentar en superfície un reguitzell de formes típiques: algunes de dimensions centimètriques, com el rascler; altres d'escala mètrica i decamètrica, com les dolines, i fins i tot algunes d'escala quilomètrica, com els pòlies. El modelatge superficial o epicàrstic és, però, només la part visible de la carstificació. Cal tenir present que les regions càrstiques es caracteritzen per un drenatge vertical i subterrani, amb una infiltració molt ràpida de les

>> El Forat de l'Embut, a Queralbs, és un exemple d'engolidor en el tàlveg d'un torrent (Queralbs).



aigües d'escolament superficial. Això implica que les valls tinguin un desenvolupament escàs, amb predomini de valls seques, a vegades amb engolidors en el tàlveg pels quals el cabal superficial s'infiltra totalment o parcialment en el subsol. Un magnífic exemple d'engolidor és el Forat de l'Embut, a Querol, una cavitat situada al bell mig del torrent, oberta en marbres, per la qual s'escola tot el cabal del torrent que baixa de la coma de l'Embut. Aquesta cavitat es pot recórrer per espai d'uns 124 metres. A una cota inferior hi ha altres cavitats semblants, amb un recorregut total de 542 metres. Probablement, aquest sistema càrstic està associat amb els drenatges àcids que es formen als vessants del Puigmal.

Aigua dins les roques

El progrés de la dissolució dins el massís rocós està governat pel sistema de discontinuïtats que l'afecten (fractures, superfícies d'estratificació, plans d'esquistositat, etc.). És a través d'aquestes discontinuïtats per on l'aigua pot circular subterràniament dins les roques. A mesura que hi circula, les discontinuïtats es van engrandint a causa de la dissolució, fins que esdevenen cavitats subterrànies que poden atènyer milers de metres de longitud i desenes de metres d'altura i amplada. L'aigua subterrània circula fàcilment per aquest medi subterrani endocàrstic de porositat elevada, i pot recórrer distàncies de desenes a centenars de quilòmetres des de la zona de recàrrega (on hi ha la infiltració) fins a la de descàrrega. Un exemple clàssic d'aquesta dinàmica és la surgència càrstica que alimenta l'estany de Banyoles, que correspon a un típic cas de carst hipogènic del tipus aquífer confinat. L'aigua que alimenta l'estany de Banyoles prové majoritàriament de les precipitacions que hi ha a les muntanyes de l'Alta Garrotxa, que s'infiltra i circula subterràniament de manera confinada a través de l'endocarst format en roques calcàries i evaporítiques (guixos). Finalment, després d'un recorregut d'una vintena de quilòmetres, l'aigua ascendeix des de sota l'estany fins que arriba a la superfície. El concepte de carst hipogènic implica que l'aigua que prové de l'interior de l'escorça ascendeix cap a la superfície a través de les fractures, i dissol les roques solubles a mesura que puja. En origen és aigua de precipitació



>> Cova de fractura associada a un esclavissament translacional en capes de gresos a les balmes d'en Caxurma (Castellfollit de la Roca).

que s'ha infiltrat fins a uns quants centenars de metres, i que ha estat a l'interior de l'escorça durant un període de temps que pot ser de l'ordre de desenes a centenars d'anys. En canvi, en el carst epigènic, l'aigua de pluja s'infiltra en el subsol des de la superfície, i circula a través de les zones vadoses (no saturades d'aigua) i freàtiques (saturades d'aigua) de l'interior del massís rocallós. Eventualment, igual que els fluxos hipogènics, l'aigua pot reaparèixer a la superfície i donar lloc a fonts càrstiques.

Formació de coves

L'endocarst està constituït per un conjunt de cavitats subterrànies de for-

ma i dimensions molt variables. Si les dimensions són prou grans per permetre-hi l'accés dels humans, reben el nom de *coves*. Cal tenir present que a banda de la dissolució, hi ha altres processos geològics capaços de formar coves. Entre aquests, i si només ens cenyim als que podem trobar a les comarques gironines, destaca, en primer lloc, l'acumulació mecànica, que correspon a coves de talussos d'enderrocs i a coves de caos de boles granítiques, i n'hi ha mostres al Rocar de Santa Coloma de Farners. En segon lloc, l'erosió mecànica de regolita, de la qual són exemples típics les coves litorals formades per erosió concentrada de les onades seguint filons de roques

prèviament fracturades i meteoritzades. Aquest és el cas de la majoria de coves del litoral granític de la Costa Brava, entre les quals destaca la cova d'en Gispert, a Begur, una cavitat lineal de cent seixanta metres de recorregut. En tercer lloc, la precipitació química, que forma coves per l'evolució (creixement) dels dipòsits de travertins i de toves calcàries. En són exemples les coves obertes a la cascada travertínica del salt de la Caula, a les Escaules, i les coves de Serinyà, riques en jaciments prehistòrics. En darrer lloc, el procés de moviment gravitatori forma coves de fractura lligades a l'expansió gravitatòria de vessants o bé a esllavissaments. Al primer tipus pertany el sistema de cavitats obertes en marbres del recses Graies, a la costa de Begur, amb uns quatre-cents cinquanta metres de passadissos disposats en paral·lel a un penya-segat de cent vint-i-cinc metres d'altura; al segon tipus corresponen les balmes d'en Caxurma, a Castellfollit de la Roca, un conjunt de cavitats que assoleix 387 metres de recorregut, i que s'han obert en capes de gresos afectades per un lliscament translacional.

Les coves formades per dissolució són molt variables quant a llargada, profunditat i forma, i poden ser molt canviants fins i tot en una mateixa cavitat. N'hi ha de lineals, de meandri-

formes, de ramificades i de laberíntiques; algunes són molt altes, mentre que d'altres tendeixen a ser planes. En general, la morfologia està controlada per l'estructura de la roca, la disposició dels estrats, la dinàmica hidrogeològica i l'evolució mateixa de la cavitat. Cal tenir present que el temps que triga a formar-se una cova depèn en primera instància de la solubilitat dels minerals. En el cas dels carbonats, pot representar un lapse temporal de milions d'anys, per això moltes coves obertes en calcàries o marbres han tingut una evolució molt complexa i en conseqüència també ho són quant a morfologia. Les coves es poden formar en qualsevol roca susceptible de patir dissolució. En el cas particular de les terres gironines, n'hi ha bons exemples en guixos, calcàries i marbres.

La cova de la Mosquera (Beuda), de 962 metres de longitud, és una cavitat desenvolupada en guixos. Es tracta d'un conducte format inicialment en condicions freàtiques, que posterior-

ment, a causa de l'encaixament de la riera de Capellada, va passar a funcionar en condicions vadoses. També obert en guixos, el sistema de les Bores del Borró (Sales de Llierca) ateny 1.315 metres de recorregut, i és la cavitat més llarga de les comarques gironines. És una cova de morfologia complexa, formada per passadissos sinuosos i entre-

llaçats, que se situen a tres nivells topogràfics que enllancen amb les terrasses al·luvials del riu Borró.

De les moltíssimes cavitats obertes en calcàries, deixant a banda les submarines ja esmentades del Montgrí i les Medes, cal destacar les coves d'en Salvi (o del Galeró) i del Far (Susqueda), de tres-cents trenta metres i cent set metres de llargada, respectivament;

la cova Gran d'Olopte (Isòvol), de dos-cents trenta-dos metres de longitud; la cova de Rocafesa (Sant Martí de Llémena), amb cent sentanta-un metres de recorregut; i les coves de l'Orri, d'Ermitons i del Bisbe (Sales de Llierca), amb cent cinquanta-set, sentanta-set i seixanta-vuit metres de llargada, respectivament.

Les coves desenvolupades en marbres també són abundants. Molt interessant és el Cau dels Lliris, a cap Norfeu (Roses), de quatre-cents seixanta metres de recorregut. La cova està formada per passadissos situats a cinc nivells, connectats per pous verticals i rampes. Al voltant seu s'apleguen les coves del Traire i de les Ermites, de cinquanta-quatre i trenta-tres metres, respectivament. Per les dimensions, també destaquen el sistema de cavitats de Rialb (Queralbs), la cova del Pasteral (la Celler de Ter) i les balmes d'en Borrasser (Molló), de quatre-cents seixanta, dos-cents noranta i cent cinquanta-set metres de recorregut, respectivament.

Precipitació química: espeleotemes

A l'interior de les coves hi ha diversos tipus de formes d'escala mètrica o inferior que es relacionen amb processos d'erosió i sedimentació hídrica, gravitatoris, de dissolució per con-

La cavitat més llarga de les comarques gironines és al sistema de les Bores del Borró de Sales de Llierca i ateny 1.315 metres de recorregut



>> Conducte freàtic de la cova de la Mosquera (Beuda), formada en guixos.



>> Cova d'en Salvi (Susqueda). El conducte freàtic va col·lapsar, segurament a causa de l'activitat sísmica de la falla d'Amer, i va quedar parcialment colgat de blocs caiguts del sostre. Posteriorment, s'hi van formar els espeleotemes.

densació, biològics i antròpics. Sens dubte, però, les més conegudes són les que es deriven de la precipitació química, que en conjunt s'anomenen *espeleotemes*. Aquests dipòsits minerals són fruit de la reacció contrària a la dissolució, i solen ser a conseqüència de processos d'evaporació i de canvis en la química de l'aigua (variacions de pH, temperatura, pressió de CO₂, etc.). S'associen a punts de degoteig, d'estancament d'aigua, a fluxos i a filtracions. La majoria d'espeleotemes són de carbonat de calci (calcita i aragonita), però també poden ser de guix, òpal, goethita i moltes altres substàncies minerals. Habitualment es classifiquen segons la morfologia, si bé aquesta característica no sempre respon a un únic mecanisme de formació. De manera molt simplificada es poden agrupar en dos grups: de formes cilíndriques i de formes no cilíndriques.

Les estalactites són espeleotemes cilíndrics que pegen del sostre de les cavitats. Típicament, tenen la part interna porosa, ja que hi circula aigua. Si tenen pocs mil·límetres de diàmetre per algunes desenes de centímetres de llargada, s'anomenen *palletes* (*soda straw*). Les estalactites creixen verticalment per la precipitació que es pro-

dueix al voltant de les gotes d'aigua que queden retingudes a la punta (creixement primari). L'aigua que s'escola per les parets de l'estalactita també precipita material, i això fa que l'estalactita guanyi gruix (creixement secundari). Les estalagmites són espeleotemes cilíndrics que creixen des de la base de les cavitats. Habitualment són massisses, i es formen per la precipitació química de les substàncies dissoltes en les gotes que cauen des del sostre de les cavitats. En funció de l'energia de les gotes (altura de què cauen), les estalagmites poden tenir la punta cònca, plana o convexa. La unió d'una estalactita amb una estalagmita dona lloc a una columna. Les helictites (o excèntriques) són espeleotemes de tendència cilíndrica amb creixement antigravitatori, recorbat o caòtic.

Cortines i banderes

Entre els espeleotemes d'aspecte no cilíndric destaquen les cortines i banderes, que semblen unes teles ondulades que pegen del sostre de les cavitats; les colades, que són uns dipòsits formats a partir d'un flux d'aigua que recobreixen les parets de les coves i que s'assemblen a una colada de lava fluida; els *gours* o represes esglaonades, unes piscines petites limitades per res-

alts, que són típics de la base de les cavitats per on circula aigua lentament; i les perles o pisòlits, que són concrecions de carbonat de forma més o menys esfèrica que es formen dins els *gours* i a punts on impacten gotes des del sostre de la cavitat.

A les entrades de les coves i en cavitats poc profundes, on la llum permet la presència d'organismes que fan la fotosíntesi, es formen bioespeleotemes, uns dipòsits a mig camí entre les toves calcàries i els espeleotemes, en els quals els organismes intervenen activament en la precipitació del carbonat de calci. Són especialment interessants els de ses Falguerines, al cap de Begur, on formen estalactites, estalagmites i columnes.

El món endocàrstic és, en síntesi, el resultat d'un conjunt complex de processos geològics que en essència són fruit de la interacció entre l'aigua subterrània i els minerals que formen les roques, i que han tingut lloc en el transcurs de mil·lennis. Cada cova constitueix per si mateixa un registre únic que permet reconstruir aquests processos, les condicions climàtiques en què van succeir, la interacció amb els éssers vius, i la relació amb els humans que hi van cercar refugi, que hi van enterrar els morts o que hi van retre culte.