

LLUÍS GÓMEZ-PUJOL<sup>a</sup>

## EL MACRO-MODELAT DE LA COSTA CARBONÀTICA DE VICTÒRIA (AUSTRÀLIA): PARAL·LELISMES I DIFERÈNCIES AMB LES CALES BALEÀRIQUES

*A Vicenç M. Rosselló i Verger  
en gratitud pel seu mestratge  
i com a testimoni d'admiració.*

### RESUM

Les cales són penetracions marines, preferentment a un litoral carbonàtic de caràcter tabular, arran de la inundació eustàtica d'un antic curs fluvial en la morfogènesi de les quals, de més a més del paper de la fracturació distensiva i la carstificació, també hi participen els mecanismes de col·lapse i la dinàmica litoral, així com les variacions glacio-eustàtiques del nivell marí, especialment durant el Quaternari. El present treball aborda la tipologia i característiques dels elements del macro-modelat de la costa rocosa de Victòria (sud d'Austràlia) i les compara amb els antecedents i el coneixement obtingut en l'estudi de les cales de la Mediterrània occidental, principalment les de les Illes Balears. Els resultats posen de manifest que, de més a més del control estructural, les components fluvials i càrstiques o del retoc associat a l'erosió marina –tot incorporant les fluctuacions del nivell marí–, hi ha altres factors que ajuden a explicar la diferència i el grau de maduresa en l'evolució morfològica del macro-meso modelat de les costes rocoses carbonàtiques. Resulta important considerar el paper dels heretatges geològics en el sentit que, esdeveniments de gran transcendència, com per exemple la crisi de salinitat del Messinià a la Mediterrània, poden deixar una empremta que condicioni i governi el desenvolupament i les característiques de les cales i així es puguin explicar les diferències entre planells carbonàtics

---

a Grup de Recerca de Ciències de la Terra, Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears  
Crta. Valldemossa, km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears)  
E-mail: lgomez-pujol@uib.cat

Fecha de recepción: marzo 2019. Fecha de aceptación: junio 2019.

relativament semblants. Així doncs, un altre factor ha de considerar-se entre els controls-components agents que governen la forma de les cales: els heretatsges geològics.

PARAULES CLAU: Austràlia; cala; carst litoral; heretatge geològic; Illes Balears.

#### ABSTRACT

### THE MACRO-FORMS OF THE CARBONATE ROCKY COAST OF VICTORIA (AUSTRALIA): COMPARISON ESSAY WITH THE CALAS OF THE BALEARIC ISLANDS

Calas are characteristic embayed rocky coastline landforms related to steep-sided drowned valleys that were deeply incised during low sea-level stages into carbonate plateaus driven by the structural control. Karst collapse, dolines, and valley infilling associated with Quaternary sea-level oscillations are also important in shaping and sizing calas. This paper studies the presence and factors that control cala features in Southern Australia and compare the results with the background from the Western Mediterranean, specially with the Balearic Islands knowledge. Results show that other factors-controls contribute to the cala morphology rather than the structural control, the fluvial and karst components or the marine erosion –including glacioeustatic sea-level variations–. The major differences between the calas development and mature, once discarded the differences regarding to rock control, fracture patterns and Quaternary sea-level history, are related to the contribution of geological inheritance in terms of the imprint of particular geological events such as the Mediterranean Salinity Crisis. Then another factor should be introduced in the calas controls and components: the geological inheritance.

KEY WORDS: Australia; Balearic Islands; cala; coastal karst; geological inheritance.

#### INTRODUCCIÓ

Un dels elements més característics del macro, mesomodelat litoral dels rocams carbonatats són les cales. Però no enteses com una indentació o raconada en la línia de costa, sinó, en el seu sentit més estrictament geomòrfic, com a penetracions marines, preferentment en un litoral carbonàtic de caràcter tabular, arran de la inundació eustàtica d'un antic curs fluvial en la morfogènesi de les quals, de més a més del paper de la fracturació distensiva i la carstificació, també hi participen els mecanismes de col·lapse càrstic i la dinàmica litoral (Rosselló, 1995).

D'ençà de la seva entrada a la literatura geomorfològica de la mà de Penck (1894) –presumiblement per la influència de l'obra baleàrica de l'arxiduc viatger i mallorquí d'adopció Lluís Salvador d'Àustria-Toscana (1869-91) (Rullan, 2016)–, les cales han estat objecte de l'atenció de nombroses referències per part de geòlegs i geògrafs. Això sí, particularment a la conca mediterrània (Butzer, 1964, Chardonnet, 1948; Corbel, 1956; Nicod, 1951; Paskoff i Sanlaville, 1978; Rosselló, 1964, 1995, 2004, 2005; Rosselló *et al.*, 1997 i 2002; Gómez-Pujol

*et al.*, 2013), per bé que han acabat transcendent als manuals de geomorfologia litoral o càrstica tost més internacionals (Bird, 2008; Ford i Williams, 1989; Furlani *et al.*, 2014; Goudie, 2018; Jennings, 1985; Trenhaile, 1987 and Woodroffe, 2003).

Els factors genètics implicats en l'evolució de les cales s'articulen entorn de quatre categories: D'una banda, hi tenim les fluctuacions eustàtiques marines que condicionen el nivell de base i, per tant, l'excavació dels sistemes fluvials o la seva inundació durant les pulsacions transgressives (Fornós *et al.*, 1998; Rosselló, 2005). D'altra banda l'activitat fluvial, controlada per variables paleoclimàtiques i litològiques, és la responsable de la incisió dels barrancs (Segura *et al.*, 2007; Rosselló, 2007). Com no pot ser d'altra manera, la naturalesa carbonàtica del substrat imposa un caràcter específic als cursos fluvials amb trajectòries típicament encaixades de les quals no són alienes la captura de dolines o l'esfondrament de cavitats (Fornós *et al.*, 1998; Gómez-Pujol *et al.*, 2013; Segura *et al.*, 2007). El tercer dels factors genètics és l'estructural o tectònic que pot condicionar l'orientació dels cursos, afavorint des de la pròpia presència de les cales, fins a l'encaixament de la xarxa, d'acord amb les alineacions estructurals (Gelabert *et al.*, 2005; Gómez-Pujol *et al.*, 2013). Finalment, la dinàmica litoral es concreta en retocs morfo-sedimentaris com la presència de cossos sedimentaris a la desembocadura de les cales (Fornós *et al.*, 1998; Fornós i Segura, 2004) o la captura i destrucció de cavitats càrstiques litorals (Fornós, 2004; Fornós *et al.*, 2007; Gracia *et al.*, 2011). La classificació dels diferents tipus de cala, doncs, respon a la preponderància o a la contribució sobre la resta de cada un dels anteriors factors, donant lloc a cales estructurals, cales de captura –de les quals per ventura caldria separar aquelles que habitualment designem com a olles– i cales fluvials (Rosselló, 2005). Val a dir, tanmateix, que tot sovint la convergència de processos o la seva superposició al llarg de l'evolució geomòrfica d'aquests elements del paisatge, fa difícil d'encabir-les estrictament en una o altra categoria.

Les cales han estat descrites i estudiades principalment dins l'àmbit calcari de la Mediterrània occidental (Kelleter i Scheffers, 2009). Especialment a Malta (Nicod, 1951; Paskoff i Sanlaville, 1978; Rosselló, 2005; Magri, 2006), Croàcia i Eslovènia (George, 1948; Ambert, 1978), la Provença francesa (Blanchard, 1911; Berard, 1927; Denizot, 1934; Chardonnet, 1948 i 1950; Corbel, 1956; Froget, 1963), Còrsega (Chardonnet, 1948) i a les Illes Balears (Butzer, 1962; Rosselló, 1964, 1995, 2005; Gómez-Pujol *et al.*, 2013). L'existència d'unitats geològiques formades per paquets de disposició horitzontal de calcarenites i calcilitites tabulars (Miocè Superior) –que no són exclusives del marc geogràfic de la Mediterrània– són el rerefons necessari per a la formació de les cales; això, de més a més del mudadís nivell marí Plio-quaternari. Tanmateix, en aquest context geogràfic hi ha un esdeveniment cabdal que condiona la configuració i desenvolupament d'aquesta macro-mesoforma. Es tracta del tancament de la Mediterrània i la crisi de salinitat del Messinià (Mas *et al.*, 2018), ja que resulta bàsic per tal d'entendre la formació i l'encaixament de la xarxa de drenatge prèvia a les successives inundacions Plio-quaternàries. De fet, el paper dels heretatges en la morfologia i la dinàmica de les costes rocoses contemporànies és un marc de treball sobre el qual, els da-

rrers anys es posa l'èmfasi arran de la seva transcendència (Trenhaile *et al.*, 1999; Gómez-Pujol *et al.*, 2014). Tant és així, que ho paga d'explorar altres planells calcaris fora del context mediterrani per tal d'avaluar quin paper juga la història geològica en el desenvolupament i on hi ha el grau de maduresa del macromodelat de les costes carbonatades.

La presència de planells calcaris d'edat miocènica al sud d'Austràlia –a l'Estat de Victòria–, juntament amb el fet de gaudir d'un clima mediterrani similar al de la Mediterrània occidental, així com un rocam i tipologies d'espadats semblants als de Balears, permet de contrastar els mecanismes i els processos implicats en la formació de les cales i la seva evolució. Així doncs, l'objectiu del present treball malda per descriure els principals trets morfològics de la costa rocosa carbonàtica de Victòria i establir-ne els paral·lelismes i les diferències amb el coneixement acumulat a propòsit de les cales baleariques.



Figura 1. Localització de l'àrea d'estudi i principals trets fisiogràfics.

## ZONA D'ESTUDI, MATERIALS I MÈTODE

La zona d'estudi està localitzada a l'extrem meridional de la unitat fisiogràfica de les terres altes orientals d' Austràlia d'acord amb la divisió de Jennings i Mabbutt (1986). Una unitat que corre paral·lela a la costa oriental del continent australià des de Cap York –el punt més septentrional del continent– a Tasmània –l'extrem més meridional–. En el seu vessant sud-oriental, tot abastant una superfície de 150.000 km<sup>2</sup>, s'obre la conca d'Otway. És precisament en el planell que tanca la conca d'Otway en el seu extrem meridional on topam amb el tram de costa que ens ocupa. Es tracta d'un segment riberenc que s'estén des del cap d'Otway a la badia de les Illes –prop de Peterborough–, a ponent de l'àrea metropolitana que envolta la ciutat de Melbourne (Fig. 1). Aquesta costa té cert renom internacional atès que ha esdevingut un paisatge de referència en l'imaginari col·lectiu, tant de la comunitat geomorfològica, com de la marca turística de la costa meridional del continent australià. La carretera oceànica (Great Ocean Road, androna litoral que voreja tota la ribera del SE de Victòria), el parc natural de Port Campbell (declarat el 1964) i els famosos *Twelve Apostles* –un seguit d'estaques litorals de les quals s'han esbaldregat alguns exemplars en sengles episodis el 1990 i el 2009– són el referent de la zona (Baker, 1943; Bird, 1993; Bezore *et al.*, 2016).

A grans trets es tracta d'un segment de costa de prop de 60 km. La continuïtat de penya-segats tallats a la formació de les calcarenites i les calcilitites cenozoïques de Port Campbell, que presenten uns perfils d'acusat pendent o simplement una disposició de la façana del penya-segat marcadament vertical (*plunging cliffs*), en són els trets definitoris (Fig. 2). No són gens estranyes les cotes de 15 i 30 metres d'alçària, tot i que les timbes més espectaculars assoleixen al voltant dels 50 metres d'alçària. Aquest segment de costa pateix l'acció d'un medi marí altament energètic en què domina la mar de fons oceànica procedent del sud-oest i de les grans tempestes que agranen la plataforma continental meridional d' Austràlia. Fins i tot els dies amb onatges de vent suaus, el mar de fons oceànic enriqueix l'espectre d'onatges amb ones de 2 a 3 m d'alçària màxima i períodes de 8-12 segons (Flocard *et al.*, 2016; Bezore, 2016). La carrera de marea mitjana és de 0,6 m (Bureau of Meteorology, 2017). Les temperatures mitjanes de la zona són de 13,9 °C i la precipitació assoleix els 923 mm anuals (Bureau of Meteorology, 2017).

Els resultats que es presenten són el fruit de tres campanyes realitzades el 2003, el 2004 i el 2009 amb l'objecte d'aixecar els croquis geomorfològics, assistits per les col·leccions de fotografia aèria del Departament de Geografia de la Universitat de Melbourne i la cartografia 1:100.000 del *Royal Australian Survey Corps*. En paral·lel s'ha dut a terme una exhaustiva revisió bibliogràfica dels aspectes geològics, geomorfològics i antropològics de la zona d'estudi a partir de les col·leccions de la Universitat de Melbourne, la Royal Victoria Society i de Graduate House.



Figura 2. Aspecte general del planell costaner entre Port Campbell i Portland (esquerra); Penya-segats continus i verticals tallats en calcarenites i calcilutites cenozoiques a l'est de Port Campbell. El conjunt d'estaques de la imatge rep popularment el nom de *The Twelve Apostles* (dreta).

#### EL REREFONS GEOLÒGIC

Un planell o altiplà lleugerament inclinat cap al mar amb un cantell força rectilini, que cau a plom sobre l'oceà Austral, caracteritza la fisiografia de la zona d'estudi que, tot i mantenir una hipsometria mitjana al voltant dels 50-60 m sobre el nivell del mar actual, en el seu contacte amb les serralades d'Otway, o bé en els relleus aturonats sobre els materials cretàtics i cenozoics, a tocar de Princetown, assoleix cotes màximes de 80 m d'alçària. La Plana costanera (Hills, 1940) o la Plana “disseccionada” (Jenkin, 1988), segons els autors, és una superfície més o menys contínua amb pocs barrancs o valls encaixades. Llevat de les rambles o petits rierols de Latrobe Creek, Sherbrook River o Port Campbell Creek, la resta d'accidents en forma de rambla o curs efímer, a tot estirar superen 1 o 2 km de tirat amb un grau d'incisió discret. La naturalesa arcaica d'aquest planell s'ha atribuït a la l'alta porositat de les calcàries de la Formació de Port Campbell (Tickell *et al.*, 1992). Freqüentment, la Plana Costanera presenta en superfície arenes i nivells ferruginosos –Hanson Plain Sand–, als que s'assigna una edat pliocènica (Bock i Glenie, 1965) i que afavoreixen la formació de xaragalls i cursos efímers discrets; quan en són absents la topografia càrstica és ben palesa, tot arribant-se a formar una densa xarxa de dolines (Jenkin, 1991; Tickell *et al.*, 1992).

De totes les formacions geològiques, la que contribueix de forma substancial com a rocam en els penya-segats i els afloraments de la zona d'estudi és la Formació de les Calcàries de Port Campbell. Es tracta d'unes calcàries i calcilutites ocre i/o grogues, poc cimentades i relativament ben estratificades, amb uns nivells marcats per concrecions amb una continuïtat lateral que es pot resseguir força quilòmetres al llarg de la costa. A la seqüència hi ha alguns nivells de calcarenites mitjanes a gruixades (Tickell *et al.*, 1992). Tot sovint, coronant els penya-segats construïts per les calcàries de Port Campbell, hi apareixen les eolianites pleistocenes de la Formació Bridgwater (Tickell *et al.*, 1992). Es tracta de calcarenites bioclàstiques,

riques en quars (ca. 25%) que han estat datades entre 400.000 i 110.000 anys i que s'associen al descens del nivell marí durant els períodes glacials (Gill i Amin, 1975). Finalment adossats al peu dels penya-segats o a l'interior de les indentacions de la costa, s'hi troben un conjunt de cordons dunars no consolidats i platges quaternàries formats per arenes de mitjanes a gruixades, resultat de l'erosió del rocam dels penya-segats (Jenkin, 1991).

#### EL CONDICIONANT ESTRUCTURAL, L'ALINEACIÓ DE LA COSTA I ELS PENYA-SEGATS

Del cap de Moonlight a Port Campbell (Fig. 3), més de 20 km d'una costa acusadament lineal i amb una traça SE130°, que torna a repetir-se altres 37 km entre Peterborough i Warranbool (Fig. 1), permet capir un control estructural a escala quilomètrica de la línia de costa. Aquesta direcció coincideix amb els eixos dels successius monoclinals que caracteritzen l'altiplà costaner (Tickell *et al.*, 1992). De més a més, la xarxa de drenatge, amb un patró de tipus rectangular, reforça la idea del control estructural (Fig. 4). Els cursos de major ordre i recorregut es disposen seguint l'alineació NW-SE mentre que els rius i/o xaragalls cataclinalns sempre són d'un ordre i llargària menors. Drossos (1989) i Tickell *et al.* (1992) identifiquen un conjunt de falles orientades de nord a sud (entre N340° i N005°) com les que aprofiten el cursos de Port Campbell Creek o el riu de Sherbrook per assolir la costa (Fig. 4).

Per la seva banda, la costa sota estudi està quasi exclusivament formada per espadats als peus dels quals puntualment s'arrecera alguna platja o, si l'encreuament i densitat de diàclasis ho permet, els penya-segats retranquegen tot cedint espai per a l'acomodació d'un cordó-restinga. Es tracta de penya-segats de parets verticals, amb alçàries modals entre 30 i 50 m (Jenkin, 1991) i dels que es poden distingir tres variants principals (Fig. 5): (a) els penya-segats verticals llavorats sobre les calcàries de Port Campbell que entren aplomats dins el mar, tot acumulant-se blocs al seu peu. Sovint la seva corona es troba entapissada per cossos arenosos quaternaris no consolidats. La batimetria de detall presentada per Ierodiaconou *et al.* (2007) apunta que la base d'aquests penya-segats es troba entre 3 i 8 m part davall del nivell de la mar actual. També, tallats a les calcàries de Port Campbell, hi apareixen penya-segats de parets verticals però que descansen sobre una plataforma litoral de pendent suau –tipus A– (b), sovint entapissada per una petita platja penjada (*perched beach*) (Fig. 5b). La cresta d'aquests penya-segats pot aparèixer nua, deixant al descobert el rocam miocè, o bé estar coberta per eolianites pleistocenes. Aquestes dues tipologies de penya-segat són les definitòries del tram de costa entre els Gibson Steps i Port Campbell. De l'anterior fins als voltants de Peterborough, hi predomina una tercera tipologia de penya-segat (c) on el gruix del perfil l'integren les calcàries de Port Campbell, però a la base, aprofitant nivells més endurits de les margues de Gellibrand, s'hi desenvolupen plataformes litorals horitzontals. A la cresta del penya-segat, és possible trobar-hi mantells arenosos holocènics. La naturalesa poc cimentada de les calcàries de Port Campbell i la intensa laminació no permet la formació d'entalladures al peu dels penya-segats perquè la seva dinàmica de desmantellament és ràpida. Bezore *et al.* (2016)

estimen taxes d'erosió mitjanes per al període 1947-2014 de 0,22 m/any a l'àrea. Bird (1994), per la seva banda, ha inventariat diferents moviments de masses que afecten les façanes dels penya-segats i als quals el paper de les diàclasis sembla determinant.

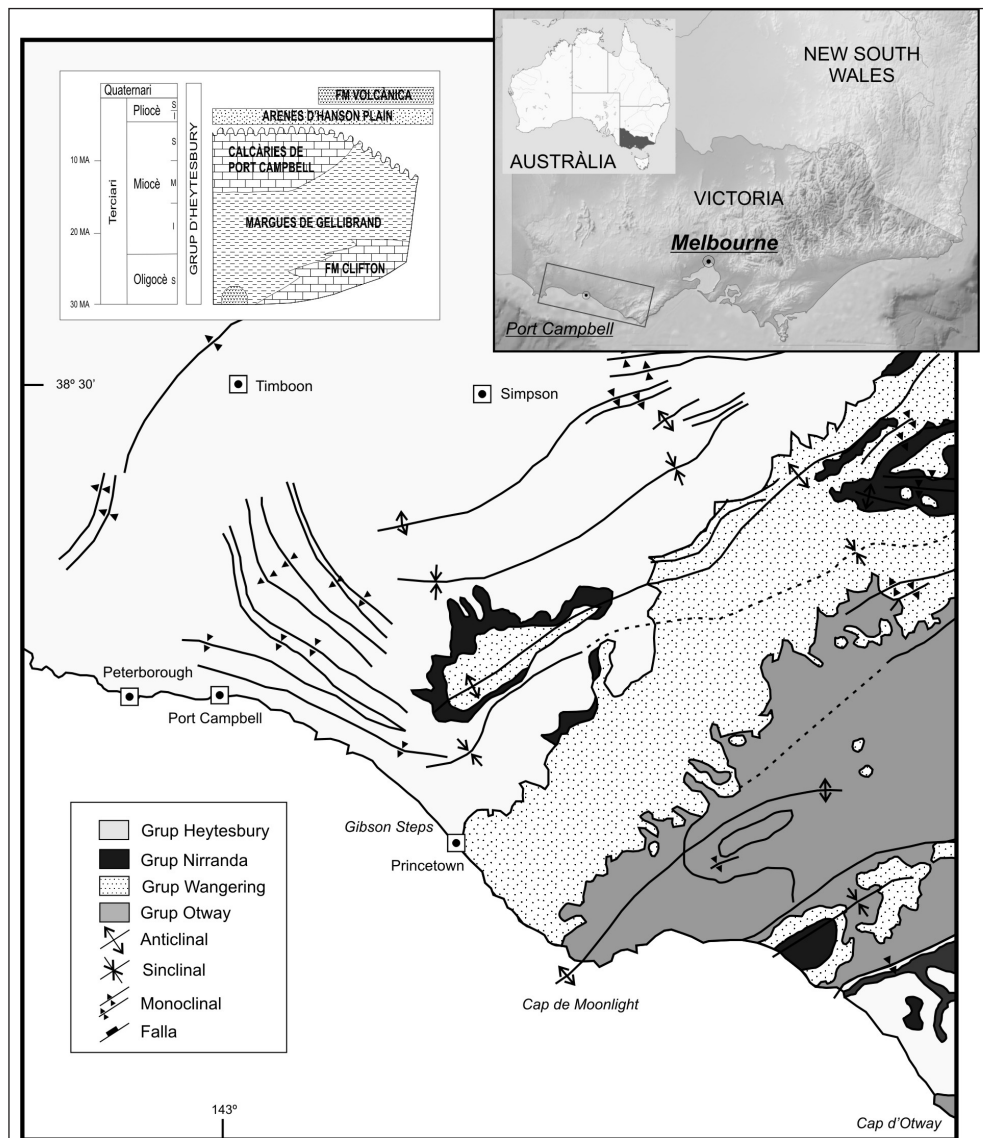


Figura 3. Esquema litoestructural de l'àrea d'estudi i columna estratigràfica simplificada de l'àrea d'estudi. Modificat de Jenkin (1991) i Tickell et al. (1992).



Tanmateix la linealitat de la costa a escala quilomètrica presenta matisos. En reduir l'ordre de magnitud i passar a una escala hectomètrica i decamètrica sobre la traça NW-SW dominant es van superposant nombrosos accidents, unes vegades aïllats, d'altres amb major densitat, de manera que s'alternen els segments de penya-segats rectilinis amb segments crenulats, tot i que de timbes verticals. Un joc de diàclasis amb direcció SW-NE (NE045°) condiciona el desenvolupament i disposició de la majoria d'accidents que trenquen la costa. Juntament amb una altra família de direcció (E090°) i una tercera família (S180°) –tot i que de menor importància– acaben per definir el reticulat amb què cales, olles, arcs i farallons trenquen la naturalesa lineal de la costa (Fig. 4).

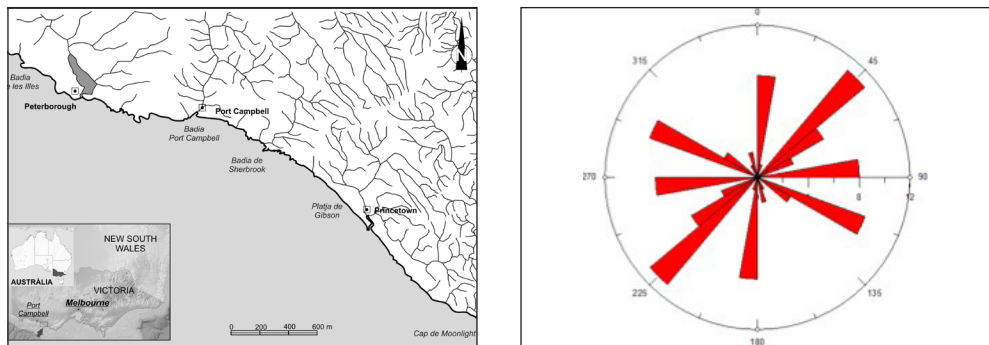


Figura 4. Control estructural de la xarxa de drenatge (esquerra); Direccions de les fractures i dels accidents del macro i mesomodelat de la costa rocosa carbonatada de Victòria (dreta).

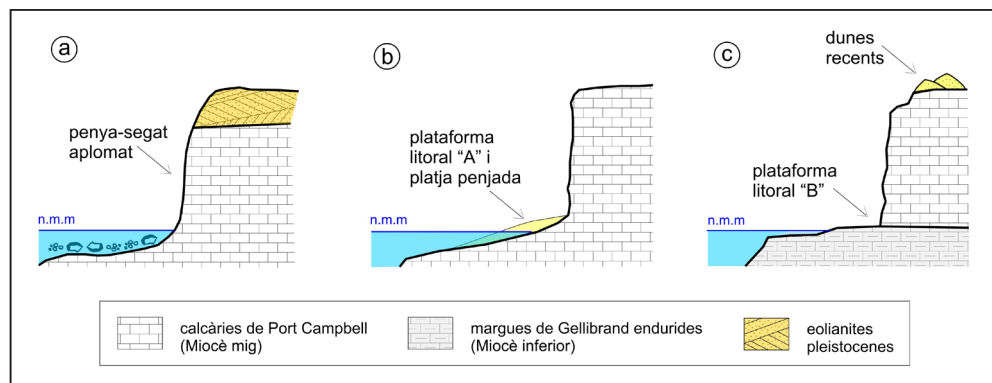


Figura 5. Tipologia i distribució dels penya-segats a la zona d'estudi.

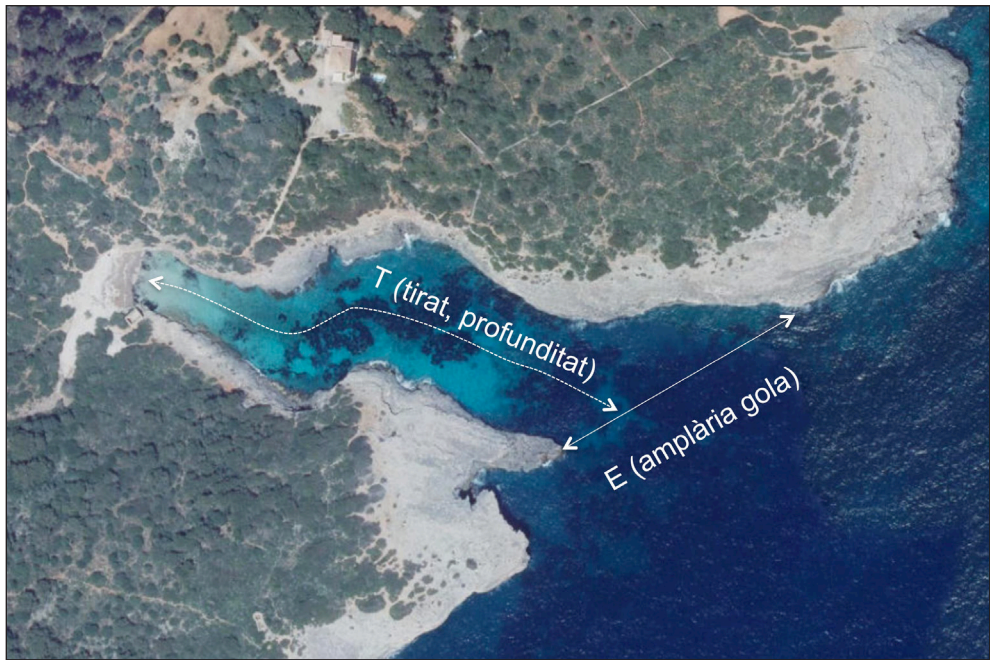


Figura 6. Paràmetres morfomètrics proposats per Rosselló (1995, 2005). E, amplària de la gola; T, tirat. C es calcula com l'amplària mitjana de la indentació.

Deixant de banda el devesall d'estaques i farallons que apareixen al llarg de la costa, s'han individualitzat 52 accidents d'ordre hectomètric i/o decamètric que trenquen la vorera del planell carbonàtic, tot adoptant els paràmetres d'amplària de gola (E), profunditat–tirat (T) i amplària mitjana (C) proposats per Rosselló (1995; 2005) (Fig. 6) i descartats aquells accidents que no superen els 10 m, tant d'obertura com de profunditat respecte de la línia de costa. Es tracta d'indentacions o raconades que de mitjana tenen obertures de 50 a 10 m (40,4% dels casos) i profunditats-tirats d'entre 100 i 200 m (50% dels casos), amb un rang que oscil·la entre 14 i 560 m per a la seva obertura i de 47 a 450 m per al seu tirat (Taula 1). Totes, però, comparteixen una característica definidòria: estan flanquejades per parets d'una acusada verticalitat. La forma en planta d'aquestes indentacions és més variable tot i que la majoria de les raconades acaben en forma d'amfiteatre –unes obren l'amfiteatre directament al mar, altres el precedeixen d'un estret passadís de parets verticals–, també n'hi ha de més complexes amb dos amfiteatres o una planta irregular producte de la concatenació de concavitats a la línia de costa.

Taula 1. Paràmetres morfomètrics de les indentacions de la costa carbonatada de Victòria (Austràlia).

Localitat	E (m) (amplària)	T (m) (tirat)	C (m) (amplària mitjana)	Orientació (graus)	Platja	T/E	T/C	C/E
The Razoback # 1	99,7	229,84	65,3	45	no	2,31	3,52	0,65
The Razoback # 2	228,73	323,63	162,31	49	no	1,41	1,99	0,71
Island Arc # 1	189,64	310,65	87,9	47	no	1,64	3,53	0,46
Island Arc # 2	102,58	339,59	83,05	55	no	3,31	4,09	0,81
Loch Ard	128,59	309,2	46,12	43	si	2,40	<b>6,70</b>	0,36
Mutton Bird # 1	62,47	220,21	51,72	65	no	3,53	4,26	0,83
Mutton Bird # 2	63,06	234,21	44,82	65	no	3,71	5,23	0,71
Blowhole # 1	43,8	209,2	37,46	45	no	<b>4,78</b>	5,58	0,86
Blowhole # 2	93,16	54,77	44,5	43	no	0,59	1,23	0,48
Sherbrook # 1	94,2	119,37	93	55	si	1,27	1,28	0,99
Sherbrook # 2	55,73	111,59	43,49	55	si	2,00	2,57	0,78
Sherbrook mouth	267,25	131,8	267,25	115	si	0,49	0,49	1,00
Bakers Oven # 1	460,6	130,52	269,31	115	no	0,28	0,48	0,58
Bakers Oven # 2	160,95	54,6	49,2	115	no	0,34	1,11	0,31
Bakers Oven # 3	121,73	113,46	110,02	115	no	0,93	1,03	0,90
Bakers Oven # 4	171,5	71,2	53,06	125	no	0,42	1,34	0,31
Bakers Oven # 5	163,43	75,17	64,75	115	no	0,46	1,16	0,40
Sparkers gully # 1	62,88	150,22	66,72	65	si	2,39	2,25	1,06
Sparkers gully # 2	75,03	105,98	40,32	55	no	1,41	2,63	0,54
Port Campbell # 1	126	59,91	51	90	no	0,48	1,17	0,40
Port Campbell # 2	215,95	63,82	60	90	no	0,30	1,06	0,28
Port Campbell # 3	181,43	57,03	52	90	no	0,31	1,10	0,29
Port Campbell # 4	84,22	47,53	45	90	no	0,56	1,06	0,53
Port Campbell # 5	174,68	138,74	59,68	165	no	0,79	2,32	0,34
Port Campbell # 6	282,29	115,09	102	165	no	0,41	1,13	0,36
The Arch	<b>560,15</b>	<b>451,9</b>	<b>328,06</b>	155	no	0,81	1,38	0,59
London Arch # 1	77,74	117,99	47,19	0	no	1,52	2,50	0,61
London Arch # 2	333,58	201,02	198	125	si	0,60	1,02	0,59
London Arch # 3	372,48	178,46	162,3	125	no	0,48	1,10	0,44

Localitat	E (m) (amplària)	T (m) (tirat)	C (m) (amplària mitjana)	Orientació (graus)	Platja	T/E	T/C	C/E
London Arch # 4	50,29	105,63	44,79	115	no	2,10	2,36	0,89
London Arch # 5	74,33	136,66	64,27	5	no	1,84	2,13	0,86
London Arch # 6	86,25	233,06	82,51	0	no	2,70	2,82	0,96
Grotto # 1	88,63	85,97	43,35	120	no	0,97	1,98	0,49
Grotto # 2	92,67	121,29	43,73	5	no	1,31	2,77	0,47
Grotto # 3	103,52	109,21	45,71	5	no	1,05	2,39	0,44
Grotto # 4	112,74	129,36	61,77	5	no	1,15	2,09	0,55
Newford bay # 1	305,46	113,72	302	115	no	0,37	0,38	0,99
Newford bay # 2	117,32	113,41	81,78	55	no	0,97	1,39	0,70
Newford bay # 3	13,75	64,44	26,33	5	si	4,69	2,45	1,91
Petterborough	57,93	163,82	62,42	45	si	2,83	2,62	1,08
Halladale Point	82,76	138,16	45,79	45	blocs	1,67	3,02	0,55
Worm bay	120,93	103,11	108,89	90	si	0,85	0,95	0,90
Bay of Martirs	226,96	179,37	253,32	15	si	0,79	0,71	1,12
Masacre bay # 1	121,16	131,08	75,06	0	no	1,08	1,75	0,62
Masacre bay # 2	115,56	112,13	69,3	45	si	0,97	1,62	0,60
Masacre bay # 3	59,02	102,76	57,09	45	no	1,74	1,80	0,97
Masacre bay # 4	70,48	65,49	70,48	115	si	0,93	0,93	1,00
Bay of islands # 1	129,84	139,84	148,91	90	no	1,08	0,94	1,15
Bay of islands # 2	82,81	73,16	85,73	90	si	0,88	0,85	1,04
Bay of islands # 3	41,3	69,77	33,43	85	no	1,69	2,09	0,81
Bay of islands # 4	48,14	71,49	33,63	55	si	1,49	2,13	0,70
Bay of islands # 5	52,52	78,61	34,42	45	si	1,50	2,28	0,66

Una descripció en detall del sector de costa a llevant de Sherbrook bay (Fig. 7) permetrà aprofundir en els condicionants i en elements morfològics que participen en la formació d'aquestes indentacions. Els creuaments de les traces NE045° i SE0115° controlen la disposició de les raconades que apareixen en aquest sector, en el sentit que la friabilitat de les calcàries de Port Campbell afavoreix l'erosió de la costa tot aprofitant la debilitat de les diàclasis. Això es tradueix en unes timbes verticals de 15 a 30 m d'alçària amb màxims de 50 m, a ambdós costats de les raconades. Tanmateix, crida l'atenció que raconades com la de Loch Ard Gorge, Mutton Bird Island o Arc Island –només per citar-ne alguns exemples– acabin

en forma d'amfiteatre, o particularment en el cas de la primera en forma de doble amfiteatre. El perquè d'aquestes concavitats està relacionat amb la naturalesa carbonàtica i porosa del planell. Hi abunden els accidents càrstics com són, respectivament, dolines decamètriques i cavitats de col·lapse. Per exemple, al fons de Loch Ard Gorge (Fig. 8), al circ més septentrional, hi trobam tres cavitats (Pearce Cave, Carmichael Cave i Alcove Cave) riques en decoració espeleotèmica i amb una particularitat com són els espeleotemes arenosos (Grimes, 1998), testimonis de nivells més alts de la mar i del remanegament associat a les mareas. Aquestes coves han estat desventrades per l'acció marina, tot i que avui romanen arrecerades per una platja d'arenes ocre, de prop de 40 m d'amplària, i per una duna holocènica. En la mateixa línia, cap a ponent, hi trobam l'illa de Mutton Bird amb una entrada circular que tanca quasi bé 330° de circumferència. De més a més, a la cresta dels penya-segats, hi són evidents els perfils còncaus, que apunten una dolina prèvia. Més al nord s'hi troba un col·lapse càrstic (*cenote*) de forma ovalada seguint el control la traça NE045°, amb un eix màxim de 52 m i un mínim de 19 m que, tot i restar a 150 m de la línia de costa, està connectat amb el mar per l'onatge (Fig. 9). La raconada propera, coneguda com a The Blowhole, no és més que una captura càrstico-marina.

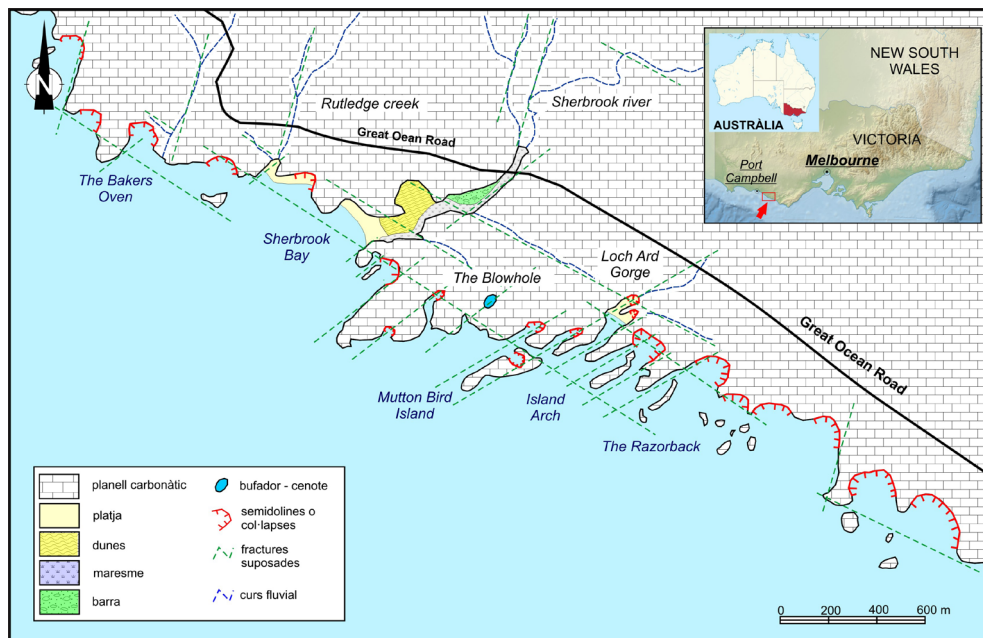


Figura 7. Croquis geomorfològic simplificat de la zona de Sherbrook Bay.



Figura 8. Penya-segats i cavitats a Loch Ard Gorge.



Figura 9. El cenote de Blowhole.

El procés càrstic s'ha de relacionar forçosament amb la fracturació i/o el diaclasament. La formació de porositat i buits associats a la carstificació del planell calcari, juntament amb l'escassa cimentació de la formació que ens ocupa, debilita el rocam i n'afavoreix l'activitat erosiva marina amb la conseqüent captura de les cavitats i els conductes càrstics per la mar. També cal incidir en la variació litològica que pot arribar a emmascarar el control estruc-

tural, com ho demostra la configuració del sector Massacre Bay – Bay of the Islands al NW de Peterborough (Fig. 10), on una litologia menys margosa afavoreix la formació de nombrosíssimes dolines que s'expressen en superfície, i que en ser capturades per la mar acaben resultant en una costa molt rugosa i accentuada a escala hecto i decamètrica. Difícilment poden apreciar-se en aquest sector alineació o control estructural.

Així doncs, bona part dels accidents de la costa no són altra cosa més que olles, dolines o col·lapses càrstics capturats per l'erosió marina tot aprofitant les debilitats estructurals del rocam, la forma de les quals depèn del paper que hi juga la fracturació, la carstificació i l'erosió marina. En qualsevol cas, les concavitats de la planta de les estaques, l'abundant nombre d'arcs i els farallons i les seves alineacions testimonien una seqüència evolutiva (Fig. 11). Sobre el terreny (Fig. 7), Blowhole representaria l'estadi inicial en la formació del macromodelat de la costa amb una erosió tot seguint les diàclasis que remunten i estan a tocar d'un col·lapse interior (Fig. 11b) i l'estadi més madur s'identificaria amb illots com el de Razorback, una paret de 150 m de llargària, 11 m d'amplària i una alçada mitjana de 20 m, el desballestament de la qual suposaria el darrer estadi evolutiu i del qual en resultaria l'aparició d'estaques com a romanents de les parets i illots prèvies i a la formació de farallons i esculls, com a restes d'estaques anteriors (Fig. 11e). Bezore *et al.* (2016) han trobat a la zona terrasses marines a profunditats de 58 i 62 m que han de ser interpretades com a antigues posicions de la línia de costa i, per extensió, també del nivell marí.

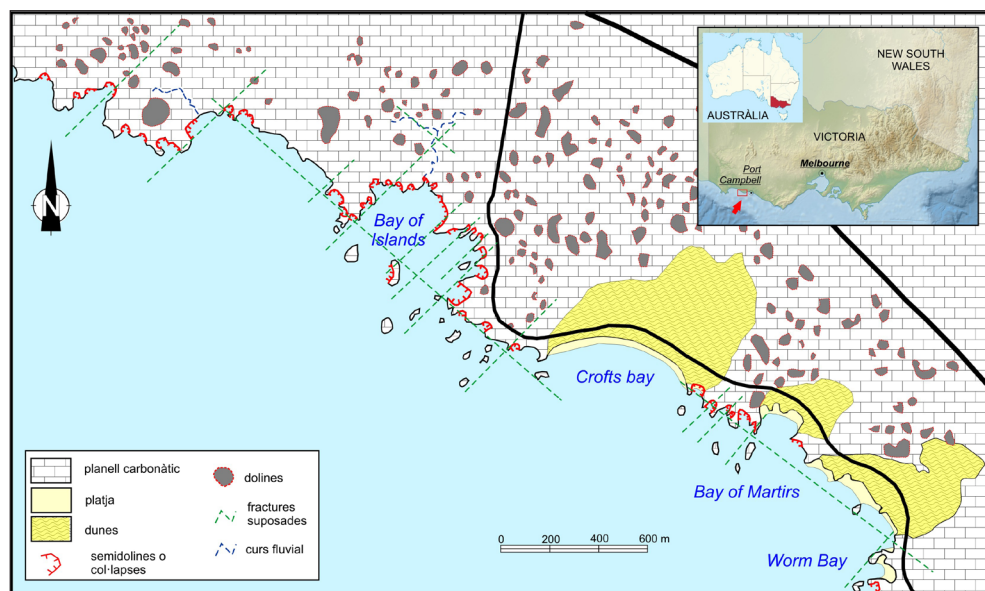


Figura 10. Croquis geomorfològic simplificat de la zona de Bay of Islands.

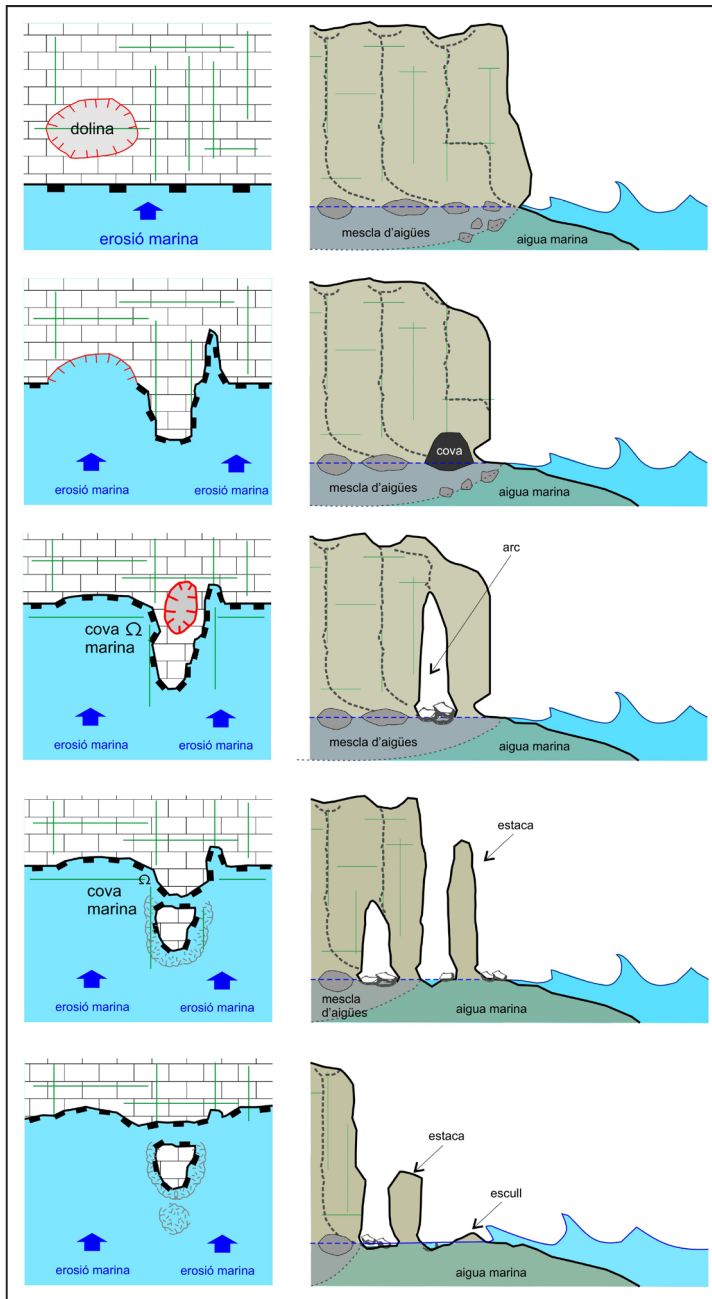


Figura 11. Model evolutiu del meso-modelat de la costa carbonàtica de Victòria. La columna de l'esquerra representa l'evolució en planta i la de la dreta l'evolució en perfil.



## UN APARELL FLUVIAL DISCRET I POQUES CALES CANÒNIQUES

Un pendent dominant inferior al 5% (Segura et al., 2007), com el que es registra a la zona d'estudi, dificulta la formació d'una xarxa fluvial sobre el rocam calcari. Ocasionalment, petits xaragalls, sense un grau d'encaixament i incisió massa pregon, arriben al cul de sac de les olles o de les penetracions a favor de les fractures, tot i que queden penjats a les parets dels penya-segats. En són bon exemple el xaragall estructural a ponent de l'olla de Bakers Oven o, a llevant, la desembocadura de Rutledge Creek a mitjan penya-segat (+15 m) d'una badia resultat de la coalescència de diverses olles i la captura d'un col·lapse-cenote interior; molt semblant al s'ha format al flanc occidental de la badia de Port Campbell (Fig. 7). No es tracta, doncs, d'una xarxa fluvial prèvia inundada, sinó d'unes captures càrstico-marines ben evolucionades a les quals amb posterioritat s'hi ha afegit l'acció d'una erosió associada a la dinàmica fluvio-torrencial.

Al llarg dels 57 km de costa, només apareixen dues desembocadures fluvials ocupades per la mar que entrarien dins la definició estricta de cala. Es tracta de les badies de Sherbrook, la de Port Campbell i, tot forçant el grau de desenvolupament, Boat Bay a dins el conjunt de la Bay of the Islands.

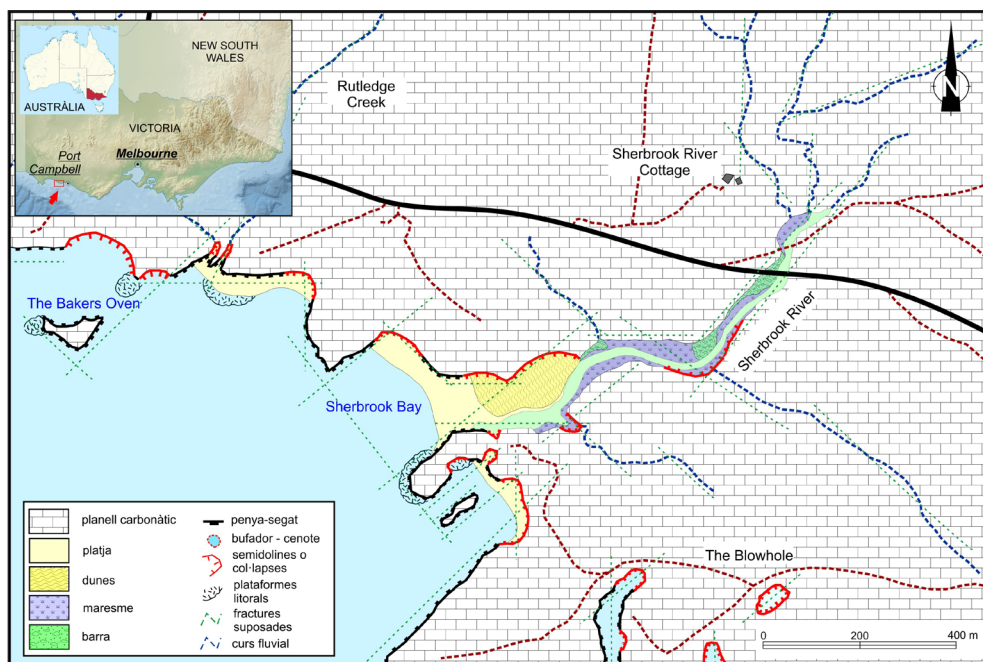


Figura 12. Croquis geomorfològic de la cala de Sherbrook Bay.

El riu Sherbrook neix prop de la vila de Cooriemungle i amb 12,2 km de llargària supera un desnivell de 100 m. Es tracta d'un riu amb un pendent suau que solca la plana costanera primer seguint l'eix dels monoclinals SE 115° i després, afavorit per la família de diàclasis associades a la falla de Port Campbell, una direcció N045°. Tot i que el caràcter és lineal, sobre la forma primària se superposen petites ondulacions en forma de meandres. Quan el riu assoleix les calcàries de Port Campbell s'encaixa i a 700 m de la costa adopta una morfologia típica de barranc amb fons pla (Fig. 12). A la desembocadura del riu, després dels revolts associats a dos meandres governats per la fracturació, s'hi instal·la un estany separat del mar per un cordó litoral. La badia de Sherbrook és més allargada que profunda i el control estructural és ben palès atesos els angles quasi normals que presenten les parets laterals de la badia, de més de 20 m d'alçària, respecte les del fons d'aquesta raconada.

Per la seva banda la riera de Port Campbell neix a Newfield a 36,8 m sobre el nivell de mar i té un recorregut de 7,5 km. El seu traçat segueix una fractura de direcció N-S fins que a 1 km de la costa experimenta un desplaçament a favor de la família de diàclasis NE 045°. Els darrers quilòmetres de la riera es caracteritzen pel seu fons pla, la presència d'una albufera tancada per un cordó dunar i unes timbes verticals a ambdós costats que alternen segments rectilinis amb la presència d'olles. La badia de Port Campbell té una obertura de 475 m i un tirat de 675 m (Fig. 13). A llevant de la bocana criden l'atenció la presència de dolines de col·lapse associades a conductes freàtics, així com el conjunt d'enderrocs que descansen sobre una plataforma litoral llavorada aprofitant una discontinuïtat litològica a 2 m s.m.m. Val la pena destacar que dos xaragalls capturen els amfiteatres de les olles del flanc occidental de la badia i que queden penjats en el penya-segat. Igualment crida l'atenció la prolongació del barranc per sota del nivell marí actual amb formes meandriformes i que, com succeeix en superfície, serien falsos meandres associats al control estructural i al retoc del modelat exocàrstic.

Malgrat l'alta densitat de dolines i la irregularitat de la línia de costa a la Bay of the Islands, s'hi ha pogut desenvolupar un xaragall de poc més de 600 m, que té un traçat marcat pel joc de diàclasis al qual el desventrament de dolines acaba donant l'aparença de falsos meandres. Aquest aparell raquític s'encaixa i s'aboca dins una estructura de col·lapse, quasi bé rodona a Boat bay i queda penjat a 4 m part damunt del nivell mitjà del mar. Les parets d'aquesta olla continuen essent verticals i assoleixen els 15 m d'alçària. Alineada i just per sota el curs fluvial que aboca a l'olla, hi ha una cova d'abració marina.

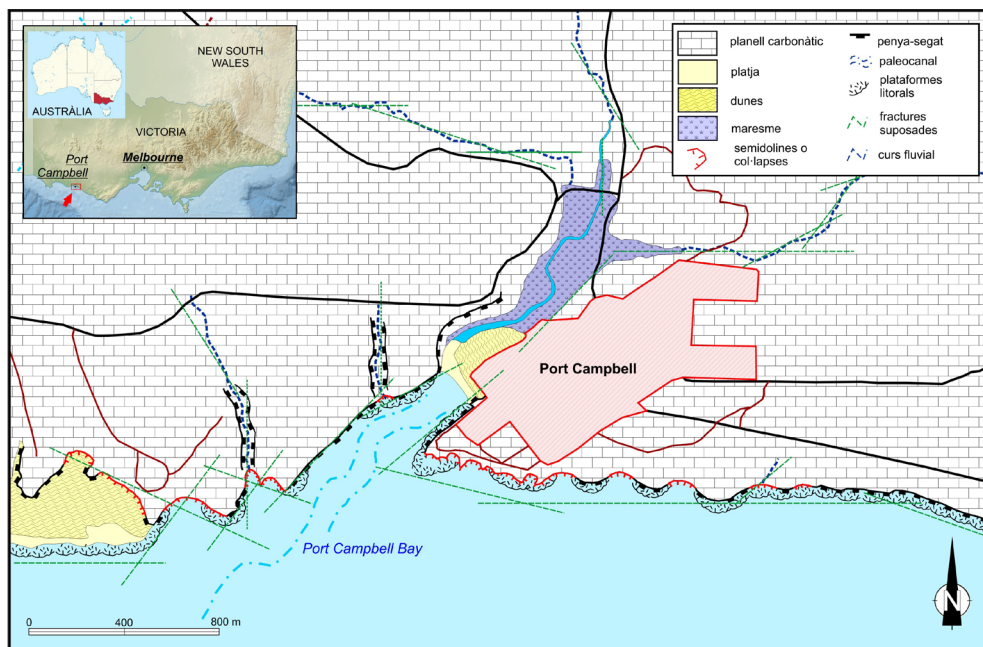


Figura 13. Croquis geomorfològic de la cala de Port Campbell.

### CANVIS DEL NIVELL MARÍ I CARSTIFICACIÓ

Estudis recents, com els de Pan *et al.* (2018), posen de manifest l'existència de testimonis erosius o sedimentaris transgressius part damunt del nivell marí actual, així com Brooke *et al.* (2017) n'identifiquen alguns de transgressius o bé de regressius sotaiguats i que, en concret, a la nostra zona d'estudi es materialitzen en romanents de penya-segats, plataformes litorals i estaques a mitjan plataforma continental, entre 46 i 60 m de profunditat. Les corbes glacioeustàtiques d'abast global, contrastades a l'àmbit regional d'estudi, apunten que els darrers 500 ka BP el registre del nivell marí ha experimentat un mínim de cinc períodes glacials (Grant *et al.*, 2014). El darrer interglacial (MIS5e) arribaria a ubicar les posicions màximes del paleonivell marí gairebé a 5 m part damunt del nivell actual (ca, 135 ka BP), tot i que la majoria dels registres resten entre 2, 4 i 3 m respecte del nivell de referència hidrogràfic (Pan *et al.*, 2018). Entre el darrer interglacial i prèviament a l'Holocè s'han donat 3 estadis de nivell marí alt (ca. 60 ka, 80 ka i 100 ka BP), amb sengles estadis de nivell marí baix (ca. 20 ka, 70ka, 90 ka i 105 ka BP). Tanmateix tots els *highstands* posteriors al MIS 5e han assolit posicions part davall o bé semblants a l'actual. Els 60 metres de profunditat mitjana estimats per al MIS3 (ca. 60 ka BP) a partir de les corbes i estudis isotòpics de sediments

marins profunds, semblen coincidir amb el nivell de base de les estagues i penya-segats que han aparegut fossilitzats en les batimetries de detall dels estudis eco-batimètrics i que arrossegaria paral·lelismes amb la dinàmica actual de desballestament de la costa 2 km mar endins (Bezore *et al.*, 2016; Brooke *et al.*, 2017).

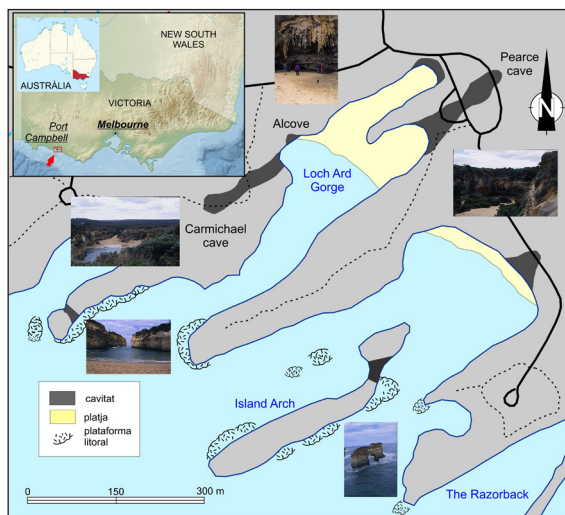


Figura 14. Les captures càrstico-marines i els col·lapses càrstics de Loch Ard Gorge.

En el context d'un planell carbonàtic d'edat Miocè Superior, amb una arquitectura deposicional horitzontal o subhoritzontal, quasi bé no alterada per la neotectònica, les variacions quaternàries del nivell marí de motivació glacioeustàtica han assolit un paper remarcable en la morfogènesi litoral de l'àrea d'estudi arran de la posició del nivell marí i la interacció i agressivitat de les aigües de mescles. Un dels exemples més il·lustratius seria el grup de cavitats de la gorja o raconada Loch Ard (Fig. 14), ja que com apunta Grimes (1998) la geometria de les cavitats és típica d'un buit desenvolupat a la zona de mescla d'aigües meteòriques tot i que també s'observen elements típics de cavitats d'abradió marina fruit de la interacció de l'erosió marina amb conductes i/o cavitats càrstics. Altres exemples de la interacció carst amb el nivell marí en són el cenote de Blowhole o les nombroses olles descrites anteriorment.

#### ASSAIG DE COMPARACIÓ AMB LES CALES BALEÀRIQUES

Per a les cales baleàriques Gómez-Pujol *et al.* (2013) han avaluat els elements que determinen la presència, el caràcter i l'aspecte, de les cales a partir d'un estudi morfomètric i l'anàlisi dels patrons i direccions de fracturació. En primer lloc, cal, o és condició indispen-

sable, l'existència d'un planell o altià calcarí amb una xarxa de drenatge controlada per un sistema de fracturació la traça dominant del qual no sigui paral·lela a costa. En segon lloc, cal tant una alçària mínima del planell calcarí que permeti per diferències d'energia potencial l'erosió i la incisió de l'aparell fluvial, com una superfície mínima de l'altià per fer d'im-pluvi i permetre el desenvolupament d'una xarxa mínima de drenatge. Finalment, resulta determinant per a la forma i dimensions de la cala la densitat i l'interval entre fractures o diàclasis, així com el desenvolupament de formes càrstiques que acaba trencant la linealitat del control estructural.

El primer dels condicionants es dona a la nostra zona d'estudi. La plana costanera construïda principalment per les Calcàries de Port Campbell reuneix tots els requisits "canònics" per al desenvolupament de les cales: unes calcàries no deformades i de disposició horitzontal o subhoritzontal i una fracturació de caràcter distensiu amb una família de traces importants, que com s'ha posat en evidència, interseccionen i en molts casos són normals a la disposició de la línia de costa. Comparades amb les calcarenites i calcilitites de les Unitats del Miocè Superior dels planells calcaris del Migjorn i Llevant de Mallorca, Migjorn de Menorca i Formentera (Fornós i Gelabert, 2011), les Calcàries de Port Campbell no estan tan ben cimentades i per margoses són més friables, si de cas més semblants a les *Globigerina Limestone* i l'*Upper Coralline limestone* que integren el planell calcarí de Malta on també hi trobam cales (Magri, 2006). Com en el cas de Balears, a les raconades de la costa rocosa carbonatada de Victòria el control estructural també contribueix al caràcter vertical de les parets dels penya-segats i dels flancs de les cales.

Les dimensions del continent australià depassen, i amb escreix, les dels mons insulars mediterranis, i el planell objecte d'estudi, amb més de 50 km de longitud i una amplada mitjana entre 4 i 7,5 km, és equiparable al de la marina de Llevant de Mallorca, si no fos que al darrera no s'hi troba una serralada com la del Llevant mallorquí. Aquest fet implicaria una major semblança a la casuística que es dona al Migjorn mallorquí o al de Malta. En qualsevol cas, els 923 mm anuals a la zona d'estudi, que poden haver estat més humits en els subestadis MIS 5e, 5c i 5a o el propi MIS3 (Murray-Wallace *et al.*, 2005), al cap i a la fi, suposen una superfície i una pluviositat suficient per a generar una mínima xarxa de drenatge. L'alçada dels penya-segats sud-australians, habitualment entre 15 i 30 m, no presenta gaires diferències, respecte dels equivalents del món mediterrani, com tampoc no s'allunyen gaire les cotes màximes dels planells calcaris (ca. 60-80 m).

S'han enumerat nombrosos exemples de cavitats de col·lapse, dolines i la seva captura tant per la mar com per la xarxa fluvial que podrien ser calcs dels nombrosos casos descrits per al Migjorn de Menorca (Rosselló, 2004; Fornós, 2004) o per al Llevant de Mallorca (Fornós *et al.*, 2007; Rosselló, 2007). La figura 15 reproduïx la comparativa entre les relacions de tirat-penetració (L), amplària de la gola (E) i amplària mitjana (C) de les raconades o petites badies de la costa objecte d'estudi amb les de les baleàriques, malteses i provençals recollides per Rosselló (2005). Crida l'atenció que hi ha un conjunt d'observacions que coincideixen

amb les de les cales baleàriques, especialment amb aquelles en què el tirat i l'amplada són semblants i la forma de la cala és rectilínia, de parets paral·leles o bé acabada en forma d'embut i que tenen una relació tirat gola (T/E) que no és inferior a 1 o 2, ni superiors a 5. De fet, els indicadors morfomètrics i les observacions d'algunes cales baleàriques que entren en aquesta franja estan relacionades amb els enfonsaments o negaments de *cockpits* càrstics i una intensa fracturació que també influeix el model cala-barranc (Rosselló, 2005). En el cas australià la majoria de raconades que per morfometria entren dins aquest interval, bàsicament, són col·lapses càrstics capturats per la mar, però amb una forma en planta complexa arran de la intersecció de les diferents famílies de diàclasis. Tanmateix, val a dir que molt poques tenen el caràcter de cala-barranc del món mediterrani malgrat que hi ha raconades on una xarxa fluvial s'ha encaixat fins a capturar col·lapses i dolines, però sense arribar al nivell de base actual, motiu pel qual són cursos penjats. Tant és així, que només unes poques badies poden ser descrites estrictament com a valls fluvials inundades i queden part damunt de la relació  $T/E > 3$  (Fig. 15), tot coincidint amb les grans cales de caràcter estructural i fluvial descrites a Mallorca, Menorca, Malta i Provença. La majoria d'observacions fetes a Austràlia queden per sota del llindar  $T/E < 1$  (Fig. 15) i responen al model de forma en planta de raconades més obertes que tancades o relativament isomètriques que coincideixen estrictament amb la tipologia d'olles o coalescència d'olles descrites en apartats anteriors.

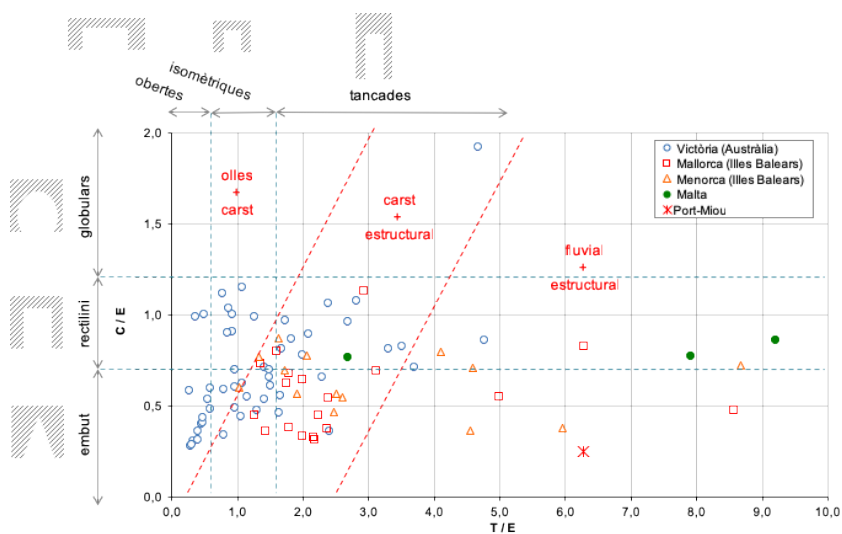


Figura 15. Paràmetres morfomètrics dels accidents de la costa carbonatada de Victòria (Austràlia) i de les cales de Mallorca, Menorca, Malta i la Provença a partir de les dades de Rosselló (2005). E: amplària de la gola de la cala; C: amplària mitjana de la cala; T: Tirat de la cala segons Rosselló (1995, 2005).

Així doncs, la comparativa posa de manifest que la interacció entre processos càrstics, litorals –sense oblidar les variacions glacioeustàtiques– i fracturació dels planells calcaris costaners produeix un meso-modelat molt semblant tant a l'àmbit Mediterrani com al continent australià (Fig. 16). Tanmateix si els condicionants i els agents semblen reproduir-se a una i altra banda, com així als 60 km estudiats amb prou feines poden definir-se tres cales canòniques –entenem per cala canònica aquella vall de parets verticals inundada en què les components fluvial, estructural i càrstiques són evidents i participen en l'expressió morfològica– mentre que dins l'àmbit mediterrani per a una línia de costa de longitud semblant en trobam 34 a Mallorca i 18 a Menorca?

Un factor a considerar en aquesta diferència són les propietats texturals i de cimentació de les calcàries de Port Campbell, però com es pot apreciar a la Fig. 16 això no és impediment per a què raconades australianes trobin l'equivalent a les cales baleàriques més tost càrstiques. Fins al punt que a la Bay of Islands, a l'oest de Peterborough, la densitat de col·lapses i dolines capturades per l'erosió marina ha arribat a desdibuixar la linealitat de la línia de costa. En aquest sentit la friabilitat del rocam i una major velocitat en l'erosió de la costa i el retrocés dels penya-segats també podria ser un criteri a considerar. Tanmateix, en el cas de les Balears apareixen platges del MIS5 a la mateixa posició de la línia de costa actual i per alguns subestadis, fins i tot, a la mateixa altura (Vicens *et al.*, 2012). No debades, sí que alguns accidents estructurals han permès de calcular el retrocés de la costa mitjà en 0.007 m/a dels MIS 5 cap aquí (Fornós *et al.*, 2005). Una aproximació no gaire diferent a la desenvolupada per Bezore *et al.* (2016) a partir dels testimonis d'estaques sotaiguades a 60 m de profunditat i a 655 m de la costa actual i que fa recular els espadats de Port Campbell a raó de 0.010 m/any des del MIS3. La velocitat de reculada dels penya-segats australians és més ràpida que la de Balears, però un ordre de magnitud superior per ell mateix no seria suficient per atribuir-hi la manca de formació de cales exclusivament a la velocitat del retrocés dels penya-segats, per bé que això explicaria perquè a mesoescala són tan abundants les captures càrstico-marines i els col·lapses que donen les olles i les posteriors formes del seu desmantellament (arcs, estaques, farallons i esculls), especialment quan no queden protegits per platges que ajudin a dissipar l'energia de l'onatge.

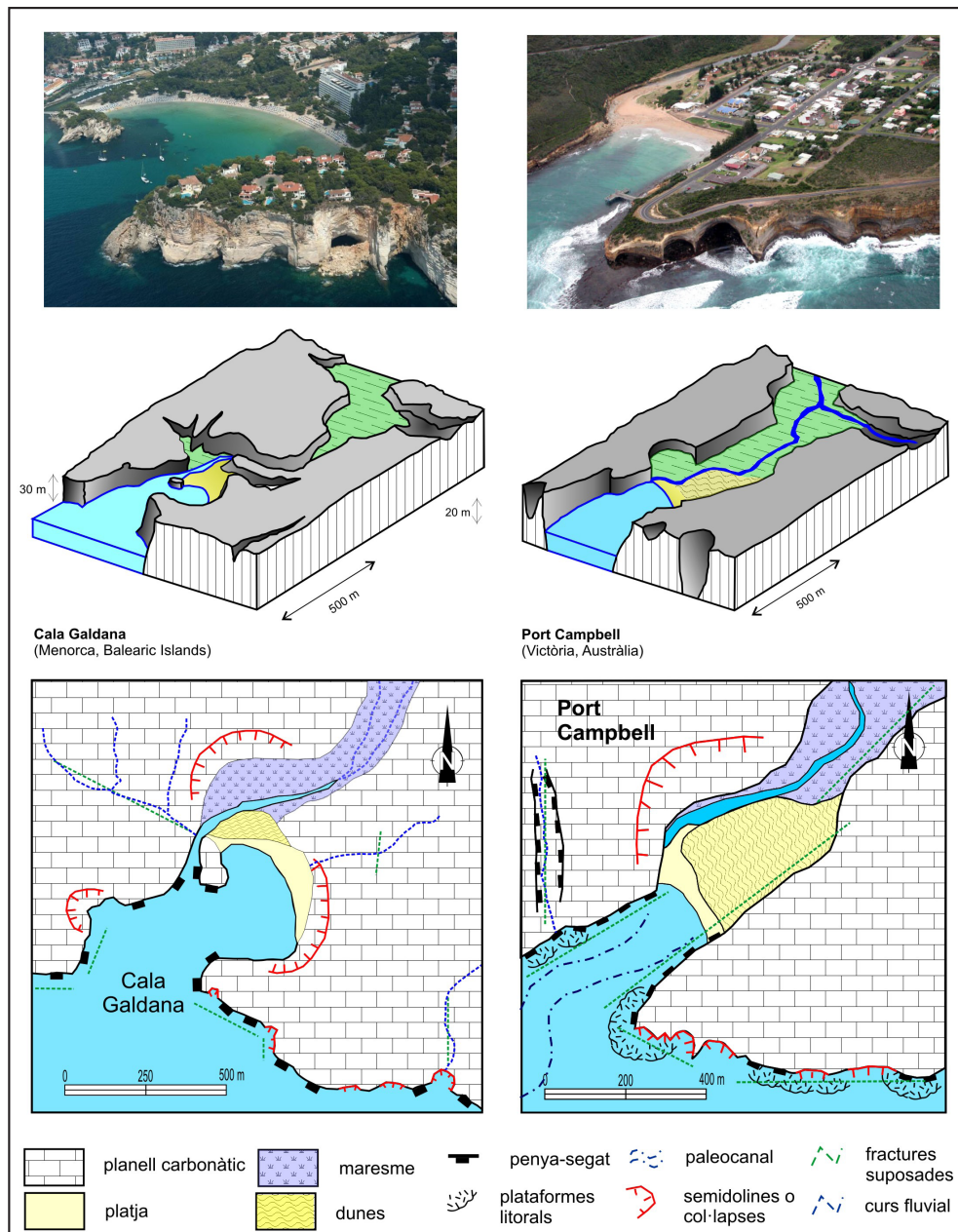


Figura 16. Comparació de les configuracions i trets morfològics de les cales de Cala Galdana (Menorca, Illes Balears), modificat de Fornós i Segura (2004), i Port Campbell Bay (Victòria, Austràlia)



Queda reflexionar sobre el paper estructural o, específicament, sobre un efecte menys palès de la fracturació que a les cales baleàriques, però ja s'ha posat de manifest com són d'abundants les diàclasis i com afavoreixen la formació d'entrades allargades o l'alineació de dolines. Les cales que s'han descrit a la costa australiana, així com el curs de rius com el de Port Campbell o Sherbrook s'alineen amb les fractures més importants descrites en el context regional (Tickell *et al.*, 1992). També el registre glacioeustàtic, tant per a la Mediterrània com per la plataforma australiana, dona descensos màxims de 120 m part davall del nivell actual (Murray-Wallace *et al.*, 2005; Camoin *et al.*, 2017; Dorale *et al.*, 2016) per la qual cosa els dos àmbits geogràfics durant el Pliocaternari haurien assolit el mateix nivell de base i en ambdós casos la influència sobre la incisió de la xarxa fluvial hauria d'haver estat la mateixa. Tickell *et al.* (1992), que a hores d'ara és el treball de síntesi geològica més complet de la zona d'estudi, no recull evidències d'aixecament per a la zona, així com tampoc s'han trobat treballs recents al respecte.

Segura *et al.* (2007) ja havien advertit que amb pendents inferiors al 5% difícilment es pot organitzar una xarxa de drenatge sobre rocams carbonàtics. Arribats en aquest punt val a dir que hom reconeix que en la formació de la xarxa fluvial que ha incidit en els marges continentals de la Mediterrània occidental –i per extensió planells calcaris de les Balears, els de la ribera francesa i de l'illa de Malta– hi ha jugat un paper molt transcendent la dessecació de la Mediterrània durant la crisi messiniana (Just *et al.*, 2011). Durant el Messinià l'aixecament tectònic causà el tancament de la connexió entre la Mediterrània i l'Atlàntic i es traduí en una caiguda del nivell marí a tota la conca i l'exposició subaèria de grans extensions que resultaren en una erosió massiva del talús continental (Bertoni i Cartwright, 2007). S'estima que el nivell de base caigué per sota dels 2000 m part davall del nivell actual (Meiher i Krihgsman, 2005) i els rius respongueren incidint-se en la topografia com s'ha demostrat per a la vall del Roina (Loget *et al.*, 2006). Rosselló (2007) apuntava que la xarxa fluvial que aboca a les cales mallorquines era una xarxa relictiva ja que els règims actuals i les dimensions de les conques actuals no justifiquen ni el traçat ni la incisió relativament acusada que presenten, a no ser que es compti amb un buidatge càrstic perllongat. En aquest sentit, Ginés *et al.* (2011) a partir de tot el conjunt de dades espleocronològiques disponibles sobre l'illa de Mallorca suggereixen que l'edat de les fases principals de carstificació i espeleogènesi que configuraren l'endocarst mallorquí es remunten, amb tota probabilitat, al Pliocè o fins i tot a la transició Miocè-Pliocè, just després de la crisi del Messinià. Així doncs, la incisió lligada a un nivell de base llunyà i molt baix, juntament amb una carstificació que aprofità les condicions vadoses en que restà el planell calcari del Miocè Superior condicionaria la configuració i evolució de les cales baleàriques –i per extensió de les cales mediterrànies– que després s'amplificarien i adjectivarien en funció de les oscil·lacions glacioeustàtiques plioquaternàries (Ginés *et al.* 2011).

En el cas de l'androna litoral australiana no hi ha cap esdeveniment geològic equiparable a la crisi del Messinià. La descripció de les formes del macro i mesomodelat de la costa car-

bonatada de Victòria i l'anàlisi morfològica de les raconades litorals, aboquen uns resultats que indueixen a considerar que l'àrea d'estudi, des d'un punt de vista geomòrfic, es troba en un estadi evolutiu menys madur que el de les cales baleàriques. D'aquí el predomini de les olles, del carst desventrades per l'erosió marina, la manca de cales ben desenvolupades i que la xarxa que es troba incidint i capturant els col·lapses marinocàrstics no arribi a assolir el nivell de base actual.

En la tradició de recerca a propòsit de les cales, la història geològica com un element o un factor, no ha estat considerat per ell mateix. De fet, es diferencien entre els factors estructurals, litològics, càrstic i d'erosió marina i dins d'aquests darrers, es recorre a les fluctuacions glacioeustàtiques com un factor ulterior més dins de l'acció marina; a tot estirar, com a motors de la carstificació o del retoc sedimentari de la gola de les cales. Fins ara, com que la recerca sobre les cales s'havia circumscrit a la Mediterrània, i particularment a l'occidental, els heretatges no havien aflorat com un element a considerar la història geològica en un sentit més enllà de les pulsacions Plio-quadernàries. Val a dir que aquesta no era una situació diferent a la resta del corpus teòric sobre les costes rocoses, ja que com apunten Gómez-Pujol *et al.* (2014) el paper dels heretatges geològics sempre s'associa a plataformes litorals i penya-segats amb un modelat associat a nivells marins més alts que l'actual. La comparativa del meso i macro-modelat entre les costes rocoses carbonatades mediterrànies i les de Victòria (Austràlia) fa aflorar els esdeveniments puntuals de la història geològica –en aquest cas la crisi de salinitat del Messinià– com un element significatiu i amb un pes equiparable al dels processos fluvials, càrstics, marins o del control estructural en la formació i configuració tipològica de les cales.

### CONCLUSIÓ

La convergència de processos o el fet que causes diverses produeixin efectes semblants és un axioma pel que fa a les cales. Els factors genètics implicats invasió marina-submersió, l'acció dels processos fluvials, els càrstics, l'erosió litoral o el control de les trames estructurals, defineixen segons el seu grau de contribució la naturalesa de les cales i que les raconades de parets verticals relacionades amb un barranc, o amb d'altres amb elements estructurals o les típicament càrstiques acabin classificades com a cales.

El macro-modelat de la costa carbonàtica de Victòria respon a les coordenades d'interacció entre carst, diàclisis i erosió marina amb algun retoc fluvial. Tanmateix, la comparació entre el macro i el mesomodelat de la costa carbonatada de Victoria (Austràlia) i la de Balears introdueix un nou element entre els controls i factors que determinen l'existència, natura i evolució de les cales. Es tracta dels heretatges geològics, en el sentit que esdeveniments puntuals poden accentuar o esdevenir factors-controls anteriorment descrits i condicionar-ne l'evolució i la importància. Així, de la comparativa entre el modelat austral i el de la Mediterrània aflora la crisi de salinitat del Messinià i l'encaixament associat de la xarxa de drenatge, com l'element necessari per donar un major pes al factor fluvial i afavorir una major presència de

les cales-barranc a les Balears; al contrari del que succeeix a Victoria on, en absència d'aquest factor, prima l'accent càrstic i l'erosió marina tot i que amb un fort control estructural.

#### AGRAÏMENTS

El treball de camp i la consulta bibliogràfica dels treballs històrics a propòsit de l'àrea d'estudi fou possible arran de les successives estades que l'autor desenvolupà a la Universitat de Melbourne el 2003 i el 2004 en el marc de les ajudes del programa FPI de la CAIB i, el 2009, gràcies a les ajudes a la mobilitat del CSIC. L'autor manifesta el seu deute de gratitud amb el Dr. Wayne J. Stephenson per la seva acollida a la Universitat de Melbourne. L'article es beneficià de la col·laboració dels bibliotecaris de la *Royal Society of Victoria* i *Graduate House* que posaren a l'abast molts dels materials i treballs històrics relatius a les exploracions geològiques de Victòria.

El present article és una contribució al projecte de recerca CGL2016-79246P (AEI-FEDER, UE). L'autor agraeix els comentaris i suggeriments de Joan J. Fornós (UIB) i Francesca Segura (UV), així com dels dos revisors anònims que han millorat substancialment el manuscrit inicial.

#### REFERÈNCIES

- Ambert, M. (1978): Le littoral de l'Istrie: Premières observations géomorphologiques. *Méditerranée*, 1-2, 47-56.
- Baker, G. (1943): Features of a Victorian limestone coastline. *Journal of Geology*, 51, 359-386.
- Berard, L. (1927): La morphologie côtière de Marseille à Toulon et l'origine des calanques. *Annales de Géographie*, 36, 67-70.
- Bertroni, C. i Cartwright, J.A. (2007): Major erosion at the end of the Messinian Salinity Crisis: evident from the Levant Basin, Eastern Mediterranean. *Basin Research*, 19, 1-18.
- Bezore, R., Kennedy, D.M. i Ierodiaconou, D. (2016): The drowned Apostles: the longevity of sea stacks over eustatic cycles. *Journal of Coastal Research*, SI75, 592-596.
- Bird, E.C.F. (1993): *The coast of Victoria: the shaping of scenery*. Melbourne University Press, Carlton, 312 pp.
- Bird, E.C.F. (1994): Cliff Hazards and Coastal Management. *Journal of Coastal Research*, SI12, 229-309.
- Bird, E.C.F. (2008): *Coastal Geomorphology. An introduction*. 2nd edition. Wiley, Chichester, pp. 411.
- Blanchard, R. (1911): La côte de Provence. *La Géographie*, 24, 201-224.
- Bock, P.E. i Glenie, R.C. (1965): Late Cretaceous and Tertiary depositional cycles in southwestern Victoria. *Proceedings of the Royal Society of Victoria*, 79, 153-163.
- Brooke, B.P., Nichol, S.K., Huang, Z., i Beaman, R.J. (2017): Palaeoshorelines on the Australian continental shelf: Morphology, sea-level relationship and applications to environmental management and archaeology. *Continental Shelf Research*, 134, 26-38.

- Bureau of Meteorology (2017): *Tide predictions for Australia, South Pacific and Antarctica: Port Campbell, VIC*. Bureau of Meteorology, Australian Government. <http://www.bom.gov.au/australia/tides/#!/vic-port-campbell> consultada a 25.10.18.
- Butzer, K.W. (1962): Coastal Geomorphology of Mallorca. *Annals of the Association of American Geographers*, 52, 191-212.
- Camoin, G.F., Webster, J.M. (2015): Coral reef response to Quaternary sea-level and environmental changes: state of the science. *Sedimentology*, 62, 401-428.
- Chardonnet, J. (1948): Les calanques provençales. Origine et divers types. *Annales de Géographie*, 57, 2889-297.
- Chardonnet, J. (1950): La côte française de Marseille à Menton. *Bulletin Société Royale Géographique Egypte*, 23, 185-261.
- Corbel, J. (1956): Un karst Méditerranéen de basse altitude: le Massif des Calanques et a formation de son relief. *Revue de Géographie Lyon*, 29, 1-28
- Denizot, G. (1934): Description des massifs de Marseilleveyre et de Puget. *Annales Musée Historie Naturelle Marseille*, 26, 1-237.
- Dorale, J.A., Onac, B.P., Fornós, J.J., Ginés, J., Ginés, A., Tuccimei, P. i Peate, D.W. (2010): Sea-level highstand 81,000 years ago in Mallorca. *Science*, 327, 860-863.
- Drossos, S. (1989): *The sedimentology and structure of the Early Cretaceous Moonlight Head Member, Moonlight Head region, southwest Victoria*. BSc Thesis, Latrobe University, Melbourne.
- Flocard, F., Ierodiaconou, D. i Coghlan, I.R. (2016): Multi-criteria evaluation of wave energy projects on the south-east Australian coast. *Renewable Energy*, 99, 80-94.
- Ford, D. i Williams, P. (2007): *Karst hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester, 562 pp.
- Fornós, J.J. (2004): Morfologia costanera i processos litorals: el paper de la fracturació i el karst. In Fornós, J.J., Obrador, A. i Rosselló, V.M. (eds.): *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11, 201-212. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.
- Fornós, J.J., Balaguer, P., Gelabert, B. i Gómez-Pujol, L. (2005): Pleistocene formation, evolution and retreat rates of a carbonate coastal cliff (Mallorca Island, Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research* SI49, 15-21.
- Fornós, J.J. i Gelabert, B. (2011): Condicionants litològics i estructurals del carst a les Illes Balears. *Endins*, 35/ Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 17, 37-52. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.
- Fornós, J.J., Fumanal, M.P., Pons, G.X., Barón, A., Fornés, A., Pardo, J.E., Rodríguez-Perea, A., Rosselló, V.M., Segura, F. i Servera, J. (1998): Rebliment holocènic a la vall incisa del barranc d'Al-gendar (Cala Galdana, sud de Menorca, Mediterrània Occidental). *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 41, 173-189.
- Fornós, J.J., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Riquelme, J. i Rosselló, V.M. (2007): Descripció geomòrfica des Màrmols fins as Balç (Santanyí): un segment modèlic del litoral marinenc a Mallorca. In Pons, G.X. i Vicens, D. (eds.): *Geomorfologia Litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerda Barceló*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 14, 259-286. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.

- Fornós, J.J. i Segura, F. (2004): El reblliment holocènic dels barrancs del Migjorn. In: Fornós, J.J., Obrador, A. i Rosselló, V.M. (eds.): *Història Natural del Migjorn de Menorca. El medi físic i l'influx humà. Monografies de la Societat d'Història Natural de Balears*, 11: 169-200. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.
- Froget, G. (1963): La morphologie et les mécanismes d'érosion du littoral rocheux de la Provence occidentale. *Recueil Travaux de la Station Marine d'Endoume*, 30, 165-243.
- Furlani, S., Pappalardo, M., Gómez-Pujol, L. i Chelli, A. (2014): The rock coast of the Mediterranean and Black seas. In Kennedy, D., Stephenson, W.J. i Naylor, L. (eds.): *Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis*: 89-123. The Geological Society, London.
- Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo, J.E., Rosselló, V.M. i Segura, F. (2005): Structurally controlled drainage basin development in the south of Menorca (Western Mediterranean, Spain). *Geomorphology*, 65, 139-155.
- George, T.N. (1948): Quelques formes karstiques de la Croatie occidentale et de la Slovénie méridionale (Yougoslavie). *Annales de Géographie*, 57, 298-307.
- Gill, E.D. i Anim, B.S. (1975): Interpretation of 7.5 and 4 metre last interglacial shore platforms in southeast Australia. *Search*, 6, 394-396.
- Ginés, J., Ginés, A. i Fornós, J.J. (2011): *Dades sobre el paleocars i espeleocronologia de les Illes Balears. Endins 35 / Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 17: 213-226. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.
- Gómez-Pujol, L., Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Segura i F. Onac, B.P. (2013): Structural control on the presence and character of cales: observations from Balearic Islands limestone rock coasts macroforms. *Geomorphology*, 194: 1-15.
- Gómez-Pujol, L., Pérez-Alberti, A., Blanco-Chao, R., Costa, S., Neves, M. i Del Río, L. (2014): The rock coast of continental Europe in the Atlantic. In Kennedy, D., Stephenson, W.J. i Naylor, L. (Eds.) *Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis*, 77-88. The Geological Society, London.
- Goudie, A. (2018): Rias: Global Distribution and causes. *Earth-Science Reviews*, 177, 425-435.
- Gracia, F., Clamor, N., Gamundí, P., Fornós, J.J., i Vicens, D. (2011): Relació genètica i hidrològica entre coves, cales i altres entrants al Migjorn de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 54, 161-176.
- Grant, K.M., Rohling, E.J., Bronk, C., Cheng, H., Edwards, R.L., Florindo, F., Heslop, D., Marra, F., Roberts, A.P., Tamisiea, M.E. i Williams, F. (2014): Sea-level variability over five glacial cycles. *Nature Communications*, 5, 5076. Doi: 10.1038/ncomms6076.
- Grimes, K.G. (1998): Sand speleothems: An Australian example. *Helicite*, 3, 11-16.
- Hills, E.S. (1940): *The Physiography of Victoria*. Whithcombe and Tombs, Melbourne.
- Ierodiaconou, D., Laurensen, K., Burq, S. i Reston, M. (2007): Marine benthic habitat mapping using multibeam data, georeferenced video and image classification techniques in Victoria, Australia. *Journal of Spatial Science*, 52, 94-104.
- Jenkin, J.J. (1988): Flaxmans Hill to Prince town. Quaternary. In Douglas, J.G. i Ferguson, A. (eds.), *Geology of Victoria*: 380-382. Geological Society of Australia, Melbourne.

- Jenkin, J.J. (1991): Geomorphology. In Cochrane, G.W., Quick, G.W. i Spencer-Jones, D. (1991): *Introducing Victorian Geology*, 57-96. Geological Society of Australia, Melbourne.
- Jennings, J.N. (1985): *Karst Geomorphology*. Basil Blackwell, Oxford, 293 pp.
- Jennings, J.N. i Mabbutt, J.A. (1986): Physiographic outlines and regions. In Jeans, D.N. (ed.). *The Natural environment*, 80-96. Sydney University Press, Sydney.
- Just, J., Hübscher, C., Betzler, C., Lüdmann, T. i Reicherter, K. (2011): Erosion of continental margins in the Western Mediterranean due to sea-level stagnancy during the Messinian Salinity Crisis. *Geo-Marine Letters*, 31, 51-64.
- Kelletat, D. i Scheffers, A. (2009): Europe, coastal geomorphology. In Schwartz, M.L. (ed.). *Encyclopedia of Coastal Sciences*, 452-462. Springer. Berlin.
- Loget, N., Davy, P. i Van Den Driessche, J. (2006): Mesoscale fluvial erosion parameters deduced from modelling the Mediterranean Sea level drop during the Messinian (late Miocene). *Journal of Geophysical Research*, 111. F03005. Doi: 10.1019/2005JF000387.
- Magri, O. (2006): A geological and geomorphological review of the Maltese Islands with special reference to the coastal zone. *Territoris*, 6, 7-26.
- Mas, G. (2018): *Quan la Mediterrània es va evaporar. Evidències de la crisi de salinitat messiniana a l'illa de Mallorca*. Palma, Edicions UIB. 86 pp.
- Meiher, P.T. i Krijgsman, W. (2005): A quantitative analysis of the desiccation and re-filling of the Mediterranean during the Messinian Salinity Crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 240, 510-520.
- Murray-Wallace, C.V., Ferland, M.A. i Roy, P.S. (2005): Further amino acid racemisation evidence of glacial age, multiple lowstand deposition on the New South Wales outer continental shelf, southeastern Australia. *Marine Geology* 214, 235-250.
- Nicod, J. (1951): Le problème de la classification des 'calanques' parmi les formes de côtes de submersion. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 2, 120-127.
- Pan, T.Y., Murray-Wallace, C.V., Dosseto, A. i Bourman, R.P. (2018): The last interglacial (MIS5e) sea level highstand from a tectonically stable far-field setting, York Peninsula, Southern Australia. *Marine Geology*, 398, 126-136.
- Paskoff, R. i Sanlaville, P. (1978): Observations géomorphologiques sur les côtes de l'archipel Maltais. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 22, 310-328
- Penck, A. (1894): *Morphologie der Erdoberflächen*. Engelhorn. Stuttgart.
- Rosselló, V.M. (1964): *Mallorca. El Sur y Sureste*. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, Palma, 588 pp.
- Rosselló, V.M. (1995): Les cales, un fet geomòrfic epònim de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 38, 167-180.
- Rosselló, V.M. (2004): El litoral i les cales. In Fornós, J.J., Obrador, A. i Rosselló, V.M. (eds). *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11, 177-200. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Rosselló, V.M. (2005): Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfològica. *Cuadernos de Geografía*, 77, 1-18.

- Rosselló, V.M. (2007): Cales, torrents, fractures i carst a Mondragó (com a pretext). In Pons, G.X. i Vicens, D. (eds): *Geomorfologia Litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerda Barceló*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 14, 287-298. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Fumanal, P., Pardo-Pascual, J.E. i Rodríguez-Perea, A. (1997): Elementos morfogénéticos de cales y barrancos del sur de Menorca. In: *Dinámica litoral-interior*. Actas XV Congreso de Geógrafos Españoles (Santiago, 15-19 septiembre 1997), 245-255. Santiago de Compostela, Asociación de Geógrafos Españoles.
- Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Gelabert, B., Giménez, J., Ginés, J., Pardo, J. i Segura, F. (2002): El papel del karst en el macromodelado litoral: el ejemplo de las calas de las Islas Baleares. In Carrasco, F., Durán, J.J. i Andreo, B. (eds). *Karst and Environment*, 329-335. Nerja, Fundación Cueva de Nerja.
- Rullan, O. (2016): El archiduque Luis Salvador Habsburgo-Lorena (1847-1915), Geógrafo. In: Vera, J.F., Olcina, J. i Hernández, M. (eds.), *Paisaje, cultura territorial y vivencia de la Geografía. Libro homenaje al profesor Alfredo Morales Gil*, 895-920. Alicante, Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Segura, F.S., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Fornós, J.J. i Gelabert, B. (2007): Morphometric indices as indicators of tectonic, fluvial and karst processes in calcareous drainage basins, South Menorca Island, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1928-2946.
- Tickell, S.J., Edwards, J. i Abele, C. (1992): *Port Campbell Embayment*. *Geological Survey Report*, 95. Department of Energy and Minerals. Government of Victoria, Melbourne, 97 pp.
- Trenhaile, A.S. (1987): *The Geomorphology of Rock Coast*. Clarendon Press, London, pp. 384.
- Trenhaile, AS., Pérez-Alberti, A., Martínez-Cortizas, A., Costa-Casais, M. i Blanco-Chao, R. (1999): Rock coast inheritance: an example from Galicia North-western Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 605-621.
- Vicens, D., Gràcia, F. & Ginés, A. (2012): Quaternary beach deposits in Mallorca: paleontological and geomorphological data. In Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Onac. B.P., Fornós, J.J. (eds.), *Mallorca: A Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18, 55-84. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.
- Woodroffe, C. (2003): *Coasts. Form, Process and Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge. 617 pp.

Cómo citar este artículo:

Gómez-Pujol, L. (2019). El macro-modelat de la costa carbonàtica de Victòria (Austràlia): paral·lelismes i diferències amb les cales baleàriques. *Cuadernos de Geografía*, 102, 7-38.  
<https://doi.org/10.7203/CGUV.102.14323>



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

