

# Geomorfología Litoral de Menorca

Dinámica, evolución y prácticas de gestión

Lluís GÓMEZ-PUJOL  
Guillem X. PONS  
(Eds.)

# **GEOMORFOLOGÍA LITORAL DE MENORCA**

Dinámica, evolución y prácticas de gestión

Lluís GÓMEZ-PUJOL  
Guillem X. PONS  
(Eds.)



Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 25

**2017**



**Cita recomendada para el volumen:**

GÓMEZ-PUJOL, L. Y PONS, G.X. (eds) 2017. *Geomorfología Litoral de Menorca. Dinámica, Evolución y Prácticas de Gestión*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 25. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma. 296 pp. ISBN. 978-84-697-5311-8.

**Cita recomendada para los capítulos:**

Balaguer, P., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A. y Carreras, D. 2017. El litoral de Menorca: marco fisiográfico y tipos de costa. En: Gómez-Pujol, L. y Pons, G.X. (eds) *Geomorfología Litoral de Menorca: Dinámica, Evolución y Prácticas de Gestión*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 25: 13-28. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.

Primera edición: Septiembre de 2017

© del texto: los autores

© de la edición: Societat d'Història Natural de les Balears  
c/ Margalida Xirgú 16 baixos  
07011 Palma (Illes Balears)  
Tel. / Fax. 971 719 667

© fotografía de la portada: C. Troupin

ISBN 978-84-697-5311-8

DL: PM 960-2017

Impresión: GBR Produccions Gràfiques  
c/ Porto 4  
07014 Palma (Illes Balears)  
Telf. 871 946 327

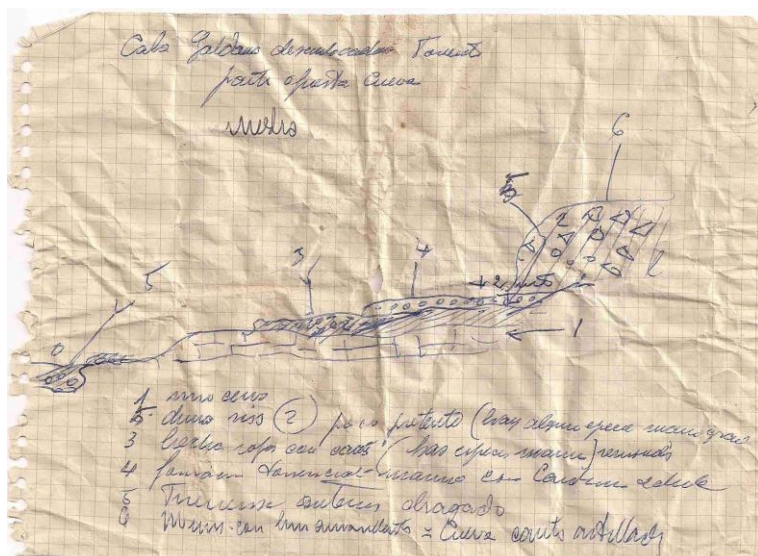
# GEOMORFOLOGÍA LITORAL DE MENORCA

Dinámica, evolución y prácticas de gestión

Lluís GÓMEZ-PUJOL

Guillem X. PONS

(Eds.)



Cala Galdana (Menorca), croquis inédito de J. Cuerva  
Colección J. Cuerva, SHNB



Societat d'Història Natural de les Balears

2017

## El presente volumen ha contado con las ayudas de:

DG d'Espais Naturals i Biodiversitat, Conselleria de Medi Ambient, Govern de les Illes Balears  
DG d'Innovació i Recerca, Conselleria d'Innovació, Recerca i Turisme, Govern de les Illes Balears  
ICTS SOCIB, Sistema d'Observació i Predicció Costaner de les Illes Balears (MINECO-CAIB)  
Consell Insular de Menorca, Agència Menorca Reserva de la Biosfera  
Institut Menorquí d'Estudis (IME)



Esta publicación ha sido cofinanciada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) 2014-2020

## La presente monografía así como buena parte de los trabajos publicados en ella son una contribución a los proyecto de investigación:

**CGL2013-48441-P**, *Morfogénesis endokárstica y registro sedimentario en relación al clima y evolución del nivel marino Plio-Cuaternario en el litoral carbonatado balear, PLIOKAR I*. Agencia Estatal de Investigación (AEI), Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

**CGL2016-79246-P**, *Morfogénesis endokárstica y registro sedimentario de Mallorca. Relación entre la topografía dinámica y los cambios de nivel del mar desde el Plioceno, PLIOKAR II*. Agencia Estatal de Investigación (AEI), Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

**CSO2015-64468-P**, *Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español*. Agencia Estatal de Investigación (AEI), Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).



## ÍNDICE

AUTORES .....	7
PRÓLOGO .....	9
<b>PARTE 1: TEMAS DE GEOMORFOLOGÍA LITORAL DE MENORCA</b>	
<b>EL LITORAL DE MENORCA: MARCO FISIOGRÁFICO Y TIPOS DE COSTA</b> P. Balaguer, F. Roig-Munar, J.Á. Martín-Prieto y D. Carreras .....	13
<b>LAS COSTAS ROCOSAS DEL MIGJORN DE MENORCA: ACANTILADOS Y CALAS</b> J.J. Fornós, L. Gómez-Pujol, V.M. Rosselló, B. Gelabert, F. Segura, J.E. y Pardo-Pascual .....	29
<b>PRESENCIA DE BLOQUES DE TSUNAMI EN LAS COSTAS ROCOSAS DE MENORCA: ANÁLISIS MORFOMÉTRICO</b> F.X. Roig-Munar, A. Rodríguez-Perea, J.Á. Martín-Prieto, J.M. Vilaplana y B. Gelabert .....	47
<b>LAS PLAYAS DE MENORCA: NATURALEZA Y DISTRIBUCIÓN</b> L. Gómez-Pujol, A. Compa, A. Orfila, A. Álvarez-Ellacuría, P. Balaguer, F.X. Roig-Munar, J.J. Fornós y J. Tintoré .....	67
<b>LOS SISTEMAS DUNARES COSTEROS DE MENORCA</b> G.X. Pons, J.Á. Martín-Prieto, M. Mir-Gual y A. Rodríguez-Perea .....	87
<b>LAS EOLIANITAS CUATERNARIAS DE MENORCA Y LOS DEPÓSITOS ASOCIADOS</b> F. Pomar, J.J. Fornós, L. Gómez-Pujol y L. Del Valle .....	111
<b>MANTOS EÓLICOS EN LA COSTA SEPTENTRIONAL DE MENORCA: NATURALEZA Y DISTRIBUCIÓN</b> J.Á. Martín-Prieto, G.X. Pons, F.X. Roig-Munar, P. Fraga, A. Rodríguez-Perea, B. Gelabert y M. Mir-Gual .....	137
<b>REGISTRO FÓSIL DEL CUATERNARIO LITORAL DE MENORCA</b> D. Vicens y G.X. Pons .....	157
<b>GESTIÓN LITORAL EN MENORCA: UN MODELO BASADO EN CRITERIOS GEOMORFOLÓGICOS</b> F.X. Roig-Munar, J.Á. Martín-Prieto, A. Rodríguez-Perea y P. Balaguer .....	191
<b>ACTIVIDAD HUMANA EN EL LITORAL DE MENORCA DURANTE LA PREHISTORIA</b> M. Anglada, A. Ferrer y D. Ramis .....	213

**PARTE 2: ITINERARIOS DE GEOMORFOLOGÍA LITORAL DE MENORCA**

DIAGNÓSTICO GEOMORFOLÓGICO Y GESTIÓN TERRITORIAL LITORAL EN EL MARCO DEL PROYECTO LIFE-RENEIX A. Rodríguez, I. Estaún, J. Solà, M. Comas, P. Fraga y E. Cardona .....	257
BLOQUES EN PLATAFORMAS ROCOSAS Y ACANTILADOS DEL SE DE MENORCA: TIPOLOGÍA Y PROCESOS F.X. Roig-Munar, J.Á. Martín-Prieto, A. Rodríguez-Perea, B. Gelabert y J.M. Vilaplana .....	251
DINÁMICA EÓLICA Y SEDIMENTARIA EN EL SISTEMA DUNAR DE CALA TIRANT (COSTA N DE MENORCA) M. Mir-Gual, G.X. Pons, J.Á. Martín-Prieto, B. Gelabert y A. Rodríguez-Perea .....	263
KARST, ACANTILADOS Y CALAS EN EL MIGJORN DE MENORCA J.J. Fornós, L. Gómez-Pujol, V.M. Rosselló, B. Gelabert, F. Segura y J.E. Pardo-Pascual .....	293

## AUTORES

**Amaya ÁLVAREZ-ELLACURÍA** – ICTS SOCIB, Sistema d'Observació i Predicció Costaner de les Illes Balears (MINECO-CAIB), ParcBit Ctra. Valldemossa km 7.4, 07121 Palma (Illes Balears). E-mail: aalvarez@socib.es

**Montserrat ANGLADA** – Associació Arqueologia i Patrimoni, Josep M. Quadrado 32, 07760 Ciutadella de Menorca.

**Pau BALAGUER** – ICTS SOCIB, Sistema d'Observació i Predicció Costaner de les Illes Balears (MINECO-CAIB), ParcBit Ctra. Valldemossa km 7.4, 07121 Palma (Illes Balears). E-mail: pablo.balaguer@socib.es

**Eva CARDONA** – IME, Institut Menorquí d'Estudis, Camí des Castell 28, 07702 Maó (Illes Balears).

**David CARRERAS** – OBSAM, Observatori Socio-Ambiental de Menorca, Camí des Castell 28, 07702 Maó (Illes Balears). E-mail: snm.obsam@cime.es

**Mireia COMAS** – IME, Institut Menorquí d'Estudis, Camí des Castell 28, 07702 Maó (Illes Balears).

**Montserrat COMPA** – Centre Oceanogràfic de Balears (IEO), Moll de Ponent s/n, Ap. Cor. 291, 07015 Palma (Illes Balears). E-mail: montserratcompa@gmail.com

**Laura del VALLE** – Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears).

**Irene ESTAÚN** – Agència Menorca Reserva de la Biosfera, Consell Insular de Menorca, Pl. Biosfera 5, 07703 Maó (Illes Balears). E-mail: reserva.biosfera@cime.es.

**Antoni FERRER** – IME, Institut Menorquí d'Estudis, Camí des Castell 28, 07702 Maó (Illes Balears).

**Joan J. FORNÓS** – Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears). E-mail: joan.fornos@uib.cat

**Pere FRAGA** – IME, Institut Menorquí d'Estudis, Camí des Castell 28, 07702 Maó (Illes Balears).

**Bernadí GELABERT** – Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears). E-mail: bernadi.gelabert@uib.cat

**Lluís GÓMEZ-PUJOL** – ICTS SOCIB, Sistema d'Observació i Predicció Costaner de les Illes Balears (MINECO-CAIB), ParcBit Ctra. Valldemossa km 7.4, 07121 Palma (Illes Balears). E-mail: lgozmez-pujol@socib.cat

**José Ángel MARTÍN-PRIETO** – Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears). E-mail: josean33@gmail.com



**Miquel MIR-GUAL** – Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears).

**Alejandro ORFILA** – IMEDEA, Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (CSIC-UIB). Miquel Marquès 21, 07190 Esporles (Illes Balears). E-mail: aorfila@imedea.uib-csic.es

**Josep E. PARDO-PASCUAL** – Departament d'Enginyeria Cartogràfica i Fotogrametria, Universitat de València, Av. Blasco Ibañez 28, 46010 València (País Valencià). E-mail: jepardo@cgf.upv.es

**Francesc POMAR** – Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears).

**Guillem X. PONS** – Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears). E-mail: guillemx.pons@uib.cat ; IME, Institut Menorquí d'Estudis, Camí des Castell 28, 07702 Maó (Illes Balears); Societat d'Història Natural de les Illes Balears, Margalida Xirgú 16 baixos, 07014 Palma (Illes Balears).

**Damià RAMIS** – Associació Arqueologia i Patrimoni, Josep M. Quadrado 32, 07760 Ciutadella de Menorca.

**Agustí RODRÍGUEZ** – Geoservei, Projectes i Gestió Ambiental, S.L., Carrer Oriol Martorell i Codina 40, 17003 Girona (Catalunya)

**Antonio RODRÍGUEZ-PEREA** – Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears). E-mail: arperea@uib.es

**Francesc Xavier ROIG-MUNAR** – Q4TRE Consultoria Ambiental, Carritxaret 18-6, 07749 Es Migjorn Gran (Illes Balears). E-mail: xiscoroig@gmail.com

**Vicenç M. ROSSELLÓ** – Departament de Geografia, Universitat de València, Avinguda Blasco Ibañez 28, 46010 València (País Valencià). E-mail: vicent.rosselló@uv.es

**Francesca SEGURA** – Departament de Geografia, Universitat de València, Avinguda Blasco Ibañez 28, 46010 València (País Valencià). E-mail: francisca.segura@uv.es

**Joan SOLÀ** – IME, Institut Menorquí d'Estudis, Camí des Castell 28, 07702 Maó (Illes Balears).

**Joaquim TINTORÉ** – ICTS SOCIB, Sistema d'Observació i Predicció Costaner de les Illes Balears (MINECO-CAIB), ParcBit Ctra. Valldemossa km 7.4, 07121 Palma (Illes Balears). E-mail: jtintore@socib.es e IMEDEA, Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (CSIC-UIB). Miquel Marquès 21, 07190 Esporles (Illes Balears). E-mail: jtintore@imedea.uib-csic.es

**Joan Manuel VILAPLANA** – Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Universitat de Barcelona. Martí i Franquès, s/n, 08028 Barcelona (Catalunya)

**Damià VICENS** – Societat d'Història Natural de les Illes Balears, Margalida Xirgú 16 baixos, 07014 Palma (Illes Balears).

# Prólogo

*Com una mà  
de fina arena, el temps  
esculpeix monstres.*

*Ponç Pons  
(Post-it, El Salobre, 1997)*

No le han pasado desapercibidos al que seguramente es uno de los mejores poetas actuales en lengua Catalana, el poder de los agentes y procesos costeros, aunque los utilice para evocar el tópico literario del *tempus fugit*. Difícilmente pueden pasarle por alto al menorquín, en una isla que de norte a sur apenas alcanza los 20 km de ancho, la influencia del mar que, al fin y al cabo, condiciona-matiza todos los aspectos del medio físico, de la vida y de la cultura. Pero la cita no encabeza este prólogo sólo por inspirarse en una sugestiva imagen de la costa, del sedimento, del factor tiempo y el del modelado resultante como si se tratara del rezo de un geomorfólogo litoral. La utilizamos, también, porque el poeta menorquín ha acuñado en su prolífica obra dos términos que para los editores y autores de los capítulos de esta monografía son una realidad recurrente, una verdad. El poeta de *Lô* –Alaior– frecuentemente se define como un *illòman* (un “islómano”) que se redime gracias al *escriviure* (juego de palabras que sincopa los verbos escribir y vivir). Ese, precisamente ese, es el *leitmotiv* que une a todos los autores de la presente monografía: el amor, la estima a una isla, a sus gentes, que si no es la cuna de origen o la tierra de acogida se ha convertido en una segunda patria, en una bahía en la que recalar recurrentemente. De ahí la necesidad de estos “islómanos” de “escrivivir”, de ahondar y dar a conocer el patrimonio geomorfológico de Menorca y su contribución al conocimiento universal.

Aprovechando la efeméride de la celebración de las IX Jornadas de Geomorfología Litoral, en el marco de la isla de Menorca (Maó, del 13 al 15 de Septiembre de 2017), organizadas por el *Institut Menorquí d'Estudis* (IME), la *Agència Menorca Reserva de la Biosfera* del *Consell Insular de Menorca*, el *Departament de Geografia de la Universitat de les Illes Balears* (UIB), el Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (SOCIB, MINECO-CAIB) y la *Societat d'Història Natural de les Balears* (SHNB), era irresistible e inevitable pensar en la edición de un libro que pasara revista a la geomorfología litoral menorquina y complementara otras dos monografías ya existentes sobre la Geografía Física y la Historia Natural de la mitad meridional de la isla, ya que durante los últimos veinte años Menorca ha sido el escenario de numerosas campañas y proyectos de investigación. De esta manera se pondría al alcance de los especialistas, así como del público en general, las líneas de trabajo y los avances que, especialmente, durante el último lustro se han desarrollado en el marco de la isla de Menorca.

El presente volumen se articula en dos partes. Una primera aborda –capítulo a capítulo– el estado de la cuestión de diversos aspectos del litoral de Menorca, desde su extensión y tipología, a los procesos y dinámica de acantilados y playas, el transporte eólico y los sistemas dunares o, ya en el campo de los estudios evolutivos, la existencia

de mantos eólicos holocenos, el registro fósil litoral cuaternario de la isla y la presencia de campos de bloques o bloques aislados en las costas rocosas. No podía faltar, por haberse convertido en un referente y desde de la menor de la Gimnesias haberse exportado mar allá, un capítulo que explicitara y resumiera el amplio bagaje de lo que se ha venido a conocer como el modelo ‘Menorca’ de gestión litoral. La segunda parte consiste en una colección de itinerarios científicos que pretenden acercar al lector hasta localidades en las que pueda apreciar con detalle los temas abordados en la primera parte del libro, así como conocer los resultados de las actividades de investigación más recientes desarrolladas en la isla de Menorca.

Como editores quisiéramos poner en valor un aspecto que no siempre es habitual en la comunidad científica: la transversalidad y la colaboración entre diferentes grupos de investigación y/o profesionales-aficionados para contribuir al avance del conocimiento del litoral menorquín. No debería pasar desapercibida la nómina de geógrafos, geólogos, oceanógrafos, biólogos, arqueólogos, historiadores y otros diletantes que bien desde la *Universitat de les Illes Balears*, el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (CSIC), el Sistema de Observación y Predicción Costero de las Islas Baleares (SOCIB), la *Universitat de València* o la *Universitat Politècnica de València*, amén de las instituciones naturalísticas y culturales menorquinas o bien desde consultorías ambientales u organizaciones no gubernamentales, han participado en la presente monografía o que en la actualidad y a la espera de futuros resultados están trabajando en el marco de las costas menorquinas.

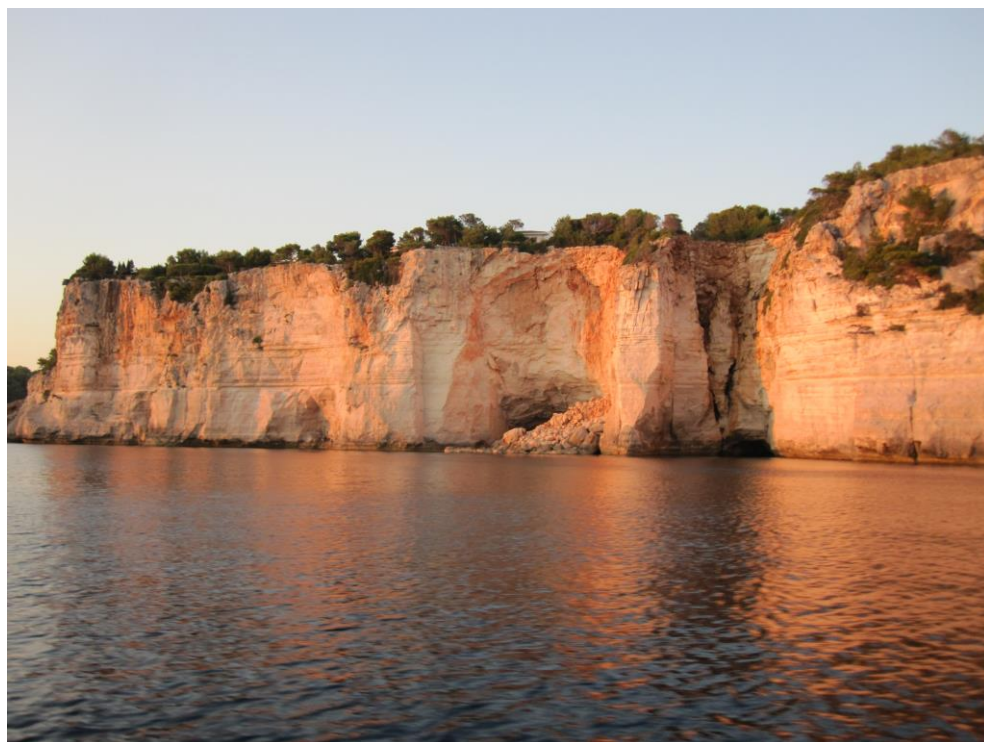
Los editores y la nómina de autores de la monografía quisieran agradecer el apoyo y la colaboración de instituciones culturales, responsables políticos y académicos que de una manera u otra han apoyado la iniciativa de la presente monografía. Nuestro más sincero agradecimiento a las distintas entidades colaboradoras y especialmente a Cristina Gomila, Sònia Sintés y Clemen García del *Institut Menorquí d'Estudis* (IME); Irene Estaún, Directora de la *Agència Menorca Reserva de la Biosfera del Consell Insular de Menorca*; a Carolina Desel, Directora del *Museu de Menorca*; a Conxa Juanola y Laia Obrador, alcaldesa y regidora respectivamente del *Ajuntament de Maó*; al Dr. Miquel Mir-Gual, Director General de *Espais Naturals i Biodiversitat* de la *Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca* del *Govern de les Illes Balears*; a la Dra. Bàrbara Terrasa, *Cap de Servei* de la *Direcció General d'Innovació i Recerca de la Vicepresidència i Conselleria d'Innovació, Recerca i Turisme* del *Govern de les Illes Balears* y miembro del *Instituto Menorquí d'Estudis* (IME); a la Sociedad Española de Geomorfología y a la Sociedad Geológica Española.

Esperamos que esta obra colectiva, aparte de constituir en sí misma un estado de la cuestión sobre la Geomorfología Litoral de Menorca, pueda suponer un estímulo para posteriores investigaciones y el lector, también, ya por la lectura, ya por la visita y conocimiento de las localidades que se abordan, acabe convertido en auténtico *illòman*, seducido por la isla y las gentes de Menorca. Una isla que esperamos que mantenga ese “*retard virtuos*”, esa distancia respecto del modelo turístico del resto de las Baleares, que describía el economista Sergi Marí (2003) y que la convierte en una isla tan especial.

Lluís Gómez-Pujol y Guillem X. Pons  
Palma – Es Castell, Agosto de 2017



# Parte I: Temas de Geomorfología Litoral de Menorca



Societat d'Història  
Natural de les Balears



# El litoral de Menorca: marco fisiográfico y tipos de costa

Pau Balaguer<sup>1</sup>, Francesc X. Roig-Munar<sup>2</sup>, José Á. Martín-Prieto<sup>3</sup> y David Carreras<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ICTS SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (MINECO-CAIB), Palma.

<sup>2</sup> Q4atre Consultoria Ambiental, Es Migjorn Gran.

<sup>3</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>4</sup> OBSAM, Observatori Socio-Ambiental de Menorca, Maó.

## RESUMEN

En este trabajo se realiza un inventario de los principales tipos de costas de la Isla de Menorca. Los datos que se presentan emanan de una clasificación de la línea de costa en función de su altura, naturaleza y de la edad geológica de los materiales que la constituyen. Se realiza un inventario exhaustivo de los sistemas dunares litorales dada su elevada frecuencia en las costas menorquinas y el “elevado” grado de protección que les confiere la normativa ambiental. La isla está dividida en dos unidades o regiones morfoestructurales y fisiográficas (*Tramuntana* y *Migjorn*) cuyos materiales y estructura geológica dan lugar a unas características geomorfológicas muy diferenciadas de las que el litoral no es ajeno. De acuerdo con esta característica también se han desglosado los datos de tipos de costa para cada unidad o región. Los resultados se presentan compilados en forma de tablas y figuras con la finalidad que constituyan una herramienta de fácil manejo de cara a la consulta.

**Palabras clave:** tipos de costa, gestión litoral, Menorca

## ABSTRACT

This work shows an inventory of the main types of coasts of the Menorca island. The data calculated and presented are shoreline classifications according to height of coasts, nature and geological age of the materials, which forms the coasts. It has been realized an exhaustive list of the coastal dune fields, because these geomorphological features are quite abundant in the Island and because the high degree of legal protection of this features in Menorcan coasts. The island is divided in two main structural and physiographic regions (*Tramuntana* and *Migjorn*) and the materials that form each one and their coasts are quite different. The coastal classifications and data calculated are also presented for each region. Results are compiled as tables and figures in order to be an easy tool for coastal managements and the broad audience.

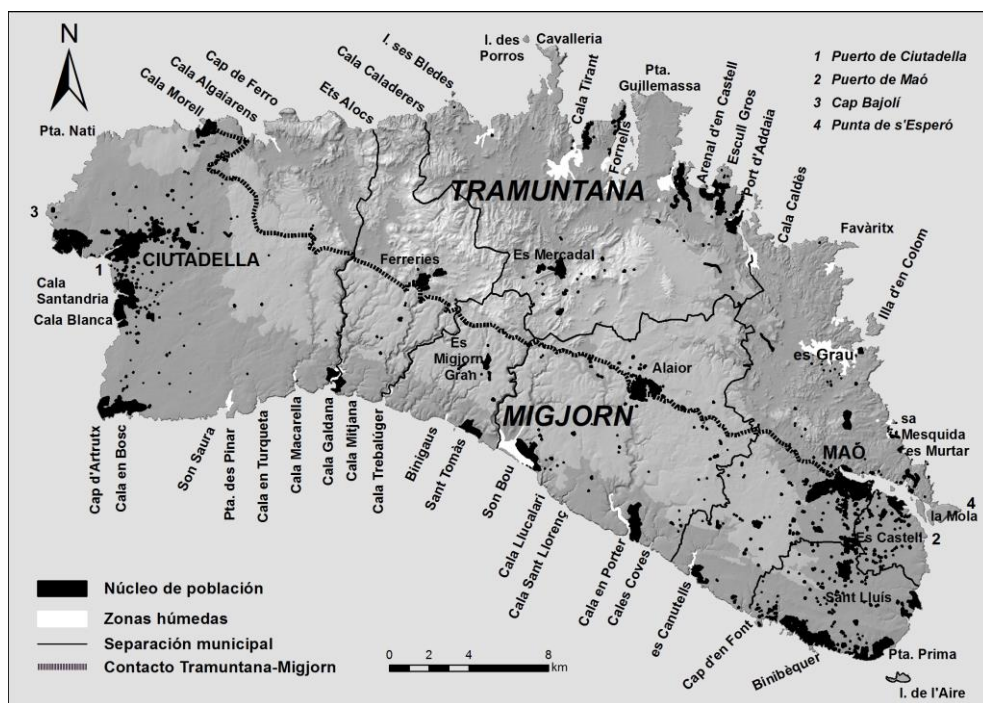
**Keywords:** coast type, coastal management, Menorca

## 1 | Introducción

Este trabajo tiene la intención de describir los tipos de costa de la isla de Menorca y ofrecer al lector un inventario y datos generales de su litoral de acuerdo con sus principales características genéticas y morfológicas. La enumeración y explicación de los diferentes procesos y agentes que afectan a la costa se enumerarán o bien solamente serán relatados a lo largo del trabajo, puesto que la profundización de éstos se reserva para otros capítulos de este volumen en los que son descritos con mayor detalle.

La isla de Menorca, después de la isla de Mallorca con 3.636 km<sup>2</sup>, es la segunda en extensión de las Islas mayores del Archipiélago Balear con una extensión de 695 km<sup>2</sup>. Le siguen las islas de Ibiza con 572 km<sup>2</sup> y Formentera con 82 km<sup>2</sup> (www.ibestat.com). En cuanto a longitud de línea de costa, Menorca también es la segunda con 433 km después de la isla de Mallorca con 842 km, seguida de las islas de Ibiza con 340 km y Formentera con 114 km (*ibid.*). En cuanto a superficie y a longitud de costas, Menorca es también la segunda isla de las Baleares concentrando un 25 % de la línea de costa y un 14 % de la superficie del total de las Islas Baleares.

Desde el punto de vista cartográfico, Menorca presenta una forma que a grandes rasgos parece un trapecio isósceles (Figura 1). Se localiza en el extremo nororiental del archipiélago constituyendo al mismo tiempo la isla más septentrional. Desde un contexto Balear, Menorca es la isla en la que aparecen los materiales más antiguos de las Islas Baleares con abundantes afloramientos de materiales relativos al estadio superior del paleozoico (Devónico, Carbonífero y Pérmico), en contraposición con la isla de Formentera que es la isla más meridional y que en su conjunto presenta los materiales más recientes, mayoritariamente atribuibles al Mioceno Superior y Cuaternario. La isla de Menorca además de presentar los materiales más antiguos de las Baleares, afectados por la Orogenia Herciniana y plegados de nuevo por la Orogenia Alpina (materiales del Devónico y Carbonífero), también presenta vastas extensiones de territorio -alrededor de la mitad de la isla- cuyos materiales pertenecen al Mioceno Superior y Cuaternario. Estos materiales presentan una sedimentación post-tectónica, con una estructura tabular, manteniendo la misma geometría en la que fueron depositados. Ambos paquetes de materiales están claramente separados por una falla de orientación NWW-ESE y que divide la isla en dos regiones fisiográficas que son: *Tramuntana* (en el Norte) y *Migjorn* (en el Sur) (Obrador, 1998; Gelabert, 2003 y Fornós y Obrador, 2003). El extremo occidental de la falla que separa ambas regiones se localiza en Cala Morell (término de Ciutadella) y el



**Figura 1.** Mapa general de la isla de Menorca, distribución de los principales núcleos de población, zonas húmedas, delimitación de los términos municipales e ilustración del contacto entre las regiones fisiográficas/morfoestructurales de Tramuntana (N) y Migjorn (S).

**Figure 1.** General map of Menorca with the main towns, lagoons, administrative borders and the two major landscape and morphostructural regions, Tramuntana northward and Migjorn southward.

extremo oriental lo constituye el Port de Maó. Dicha fracturación ha permitido la configuración de este puerto natural considerado uno de los más puertos naturales más largos y más seguros de todo el Mediterráneo.

La configuración del litoral de Menorca está condicionada por la existencia de las dos unidades morfoestructurales/fisiográficas en las que se divide la isla *Tramuntana* al Norte y *Migjorn* al Sur. Una de las principales diferencias entre ambas unidades es que la septentrional está básicamente constituida por materiales plegados, afectados por estructura compresiva atribuible a las orogénias Herciniana y Alpina, exceptuando los depósitos cuaternarios. En cambio la unidad meridional está formada por materiales post-orogénicos, únicamente afectados por una tectónica de distensión y de reajuste. Estas características se traducen en una variabilidad de líneas de costa, siendo la de *Tramuntana* más variada en cuanto a formas y perfiles de costa alterándose formas cóncavas, convexas, acantilados rectos y profundos, costas rocosas bajas, costas con formas escalonadas y playas de longitudes de costa nunca superior al kilómetro. La costa de *Migjorn* por su parte, presenta costas bajas de forma escalonada, costas bajas y altas con un perfil escalonado, acantilados en su mayoría de perfil recto, calas y playas que en la parte central alcanzan la máxima longitud de costa (Binigaus, Sant Tomàs y Son Bou). Fruto del mayor grado de estructuración de los materiales de *Tramuntana* con fallas direccionales WNW-ESE y un sistema de cabalgamientos de direcciones ortogonales NE-SW y NW-SE (Gelabert, 2003), resulta a una costa más recortada con presencia de calas de formas variables, y en muchos casos de recorrido sinuoso, al mismo tiempo que el desarrollo de puertos naturales como es el caso de Fornells y Addaia. La zona de *Migjorn* está formada por materiales carbonatados, en su mayoría calcareníticos del Mioceno Medio-Superior relacionados con el desarrollo de arrecifes coralinos (Obrador, 1998; Fornós y Obrador, 2003; Obrador y Pomar, 2004). De acuerdo con Gelabert (2003), el *Migjorn* se puede definir como un anticlinal laxo debido a la presencia de una falla inversa NNE-SSW en su parte central. La cresta de dicho anticlinal -zona central del *Migjorn*- es la que presenta las costas con mayores alturas. El sistema de fracturación de esta unidad, con una tendencia a presentar direcciones E-W en los flancos occidental y oriental y dirección N-S en el sector central, controla el trazado de los cursos fluvio-torrencales que, juntamente con los procesos cársticos, configuran cañones y capturas de dolinas. Esta concurrencia de factores en la línea de costa da lugar a la formación de las calas del *Migjorn* (Gelabert, 2003; Segura y Pardo, 2003; Rosselló, 2003b, 2004; Gómez-Pujol *et al.*, 2013a).

Desde el punto de vista poblacional y administrativo es una isla de carácter bicéfalo con dos núcleos de población: Maó y Ciutadella, localizados en los extremos oriental y occidental respectivamente, cuyos municipios concentran más del 50% de la población. La isla se divide en 8 municipios (Figuras 1 y 3) que de Este a Oeste y de acuerdo con los datos el Padrón de Población de 2016 del Instituto Balear de Estadística (IBESTAT) son Sant Lluís con 7.313 hab., es Castell con 7.455 hab., la capital Maó con 28.099 hab., Alaior con 8.959 hab., es Migjorn Gran con 1.419 hab., es Mercadal con 5.098 hab., Ferreries con 4.617 hab. y Ciutadella (el primero en extensión y segundo en población) con 28.641 hab.

En cuanto a clima marítimo de Menorca, la localización de la isla en el extremo septentrional de las islas Baleares explica que durante los meses de invierno la costa de la región de *Tramuntana* reciba habitualmente los embates de los fuertes temporales de viento y, en consecuencia, de oleaje de dirección Norte provenientes

del Golfo de León (Cañellas, 2010; Balaguer *et al.*, 2015). En cambio durante los meses de verano la intensidad de los mismos se atenúa. En la costa Sur de la isla (región de Migjorn), los oleajes predominantes tienen direcciones provenientes de Suroeste y Sureste durante todo el año, llegándose a alcanzar alturas significativas de oleaje de más de 3 m durante los meses de invierno (*ibid.*). La preeminencia de los fuertes vientos y oleajes del Norte, junto con la compleja estructura geológica de la región de Tramuntana, principalmente configurada por materiales muy fracturados (Rosselló, 2003a), da lugar a una línea de costa muy recortada y expuesta continuamente a los agentes de erosión marina que la modelan constantemente.

## 2 | Materiales y métodos

La descripción de los tipos de costa de la isla de Menorca se ha basado mayoritariamente en el análisis de las características de las bases cartográficas digitales a escala 1/5000, en el uso de fotografía oblicua de la línea de costa y en la observación directa en el campo. El manejo y la gestión de toda la información cartográfica se ha realizado mediante la utilización de los programas de Sistemas de Información Geográfica ArcMap y gvSIG.

Las bases cartográficas utilizadas han sido el Mapa Topográfico Balear 1/5.000 (MTB) correspondiente a las colecciones realizadas en 1995 y en el año 2008. La colección de 2008 es la más actual y de la que se extraen los datos oficiales referentes a superficie y longitud de costa de las islas Baleares ofrecidos por el Instituto Balear de Estadística (IBESTAT. [www.ibestat.es](http://www.ibestat.es)). El cálculo de la altura de la línea de costa se ha realizado a partir de un Modelo Digital del Terreno, utilizando el MTB 3d 1/5.000 correspondiente a la colección de 2008 basándose en la creación de contornos (*contours*) de 3, 5, 15, 30, 50 y 100 m y la creación de áreas de influencia (*buffers*), hacia el interior, de la línea de costa de 25 y 40 m. La altura de la costa se ha determinado mediante el solapamiento de los contornos de 3, 5 y 15 m con el área de influencia de 25 m y el solapamiento de los contornos de 30, 50 y 100 con el área de influencia de 40 m (Tabla 2).

La determinación de tipos genéricos de costa se ha realizado a partir de la cartografía referente a la sensibilidad ambiental de la línea de costa del Sistema de Observación y Predicción Costero de las Islas Baleares (SOCIB) (Balaguer *et al.*, 2006; 2015). Para la clasificación de costas de acuerdo con las características geológicas, se ha partido de la base cartográfica correspondiente a geología y litología del Observatorio Socio Ambiental de Menorca (OBSAM) consultable en la Infraestructura de Datos Espaciales del Observatorio Ambiental de Menorca (IDE Menorca). La fotografía oblicua de la línea de costa, cedida por la Demarcación de Costas de las Islas Baleares, fue tomada en 2001 y está realizada en una escala de base aproximada de 1/5.000. A pesar del tiempo transcurrido desde la toma de las fotografías, se considera que las características físicas y rasgos geomorfológicos de la línea de costa no han variado, de modo que constituyen una herramienta útil para llevar a cabo este estudio.

Se han calculado los porcentajes de tipos de costa según la altura (Tabla 2) y litología atendiendo a las características estructurales y geomorfológicas de acuerdo con la zonificación propuesta por Bourrouilh (1983) para las regiones de *Tramuntana* y *Migjorn* (Figura 3). Diferenciando 4 zonas para la región de *Tramuntana*: Sector 1,

entre el Port de Maó y Addaia; Sector 2, entre Addaia y Mola de Fornells; Sector 3, de la Mola de Fornells al W del T.M. de Ferreries y Sector 4, NE del T.M. de Ciutadella. Para la región de *Migjorn* diferencia tres zonas: Sector 1 u oriental, desde el Port de Maó hasta la zona de Cala en Porter; Sector 2 o central, zona central entre Cala en Porter y Cala Macarella y Sector 3 u occidental, entre Calla Macarella y Cala Morell (en el NNW de la isla).

De manera paralela, se han utilizado herramientas de libre consulta como son el Google Earth ([www.googleearth.com](http://www.googleearth.com)), el visor cartográfico de la Infraestructura de Datos Espaciales del Sistema de Información Territorial de las Islas Baleares (SITIBSA) (<http://ideib.caib.es/visualitzador/visor.jsp>) y el visor cartográfico de la línea de costa (SACOSTA) del SOCIB (<http://gis.socib.es/sacosta/composer>).

En cuanto al formato de los valores en forma porcentual mostrados en las tablas de clasificación de la línea de costa, éstos han sido calculados con bases cartográficas de escala 1/5.000 correspondientes a la colección de 1995 con un nivel de resolución algo inferior y por tanto menor longitud de la línea de costa respecto a la última colección de 2008. Este es el caso de la determinación de los tipos genéricos de costa y de la determinación de clasificación de acuerdo con la era geológica. Para la determinación de la clasificación de la línea de costa de acuerdo con la altura, los valores también se expresan en porcentaje, ya que al haber sido calculados a partir de un modelo digital del terreno (MDT), la mayor parte de islotes de menor entidad no han sido correctamente modelizados (47.2 km menos de línea de costa, lo que supone un 11% del total de la longitud de costa de Menorca).

La determinación de la rugosidad de la línea de costa se ha realizado a partir de la simplificación de la línea de costa escala 1/5.000 correspondiente a la colección de 2008 utilizando la herramienta de generalización (simplificar línea) del paquete de herramientas cartográficas del programa ArcGis 10.3. El cálculo de la rugosidad de la línea de costa persigue ilustrar mediante datos empíricos el elevado grado de rugosidad/articulación del litoral de Menorca. Para recalcar esta característica, también se han calculado los valores correspondientes para las otras islas y para las unidades morfoestructurales análogas a la región del *Migjorn* presentes en la isla de Mallorca, como es el caso de la *Marina de Migjorn* y la *Marina de Llevant* (Gómez-Pujol *et al.*, 2007).

La localización y determinación de las principales características de los sistemas dunares litorales de la isla de Menorca se ha realizado a partir de los trabajos de Servera (1997), Roig *et al.* (2007, 2008, 2009a-b) y Roig (2011). La superficie de dichos sistemas se ha consignado de acuerdo con los resultados de los trabajos anteriores, así como también a partir del cálculo directo sobre la cartografía digital 1/5.000 del MTB en los casos en los que este dato no existía y, en otros casos, de acuerdo con los datos disponibles en la Demarcación de Costas de las Baleares o en la *Infraestructura de Dades Espaciales de Menorca (IDE Menorca)*.

### 3 | Resultados

Menorca tiene 433 km de línea de costa de los cuales 370 km corresponden a la “isla” mayor (Menorca) y los 63 km restantes a los islotes, entre los cuales la Illa d'en Colom e Illa de l'Aire son los que tienen mayor recorrido de línea de costa con 5,8 km y 3,8 km respectivamente. El 79% del litoral menorquín es de naturaleza rocosa, un 9 %

de costas no consolidadas formadas por materiales tamaño arena, un 3,1% de costas constituidas por guijarros y el 8,5% restante corresponde a líneas de costa modificadas por el hombre mediante diques, puertos, escolleras y paseos marítimos, entre otros tipos de infraestructuras (Tabla 1, Figura 2). De los 433 km lineales de costa, 259 km corresponden a la vertiente de *Tramuntana*, de los cuales 49 km lo constituyen islotes y 174 km corresponden a la vertiente de *Migjorn*, de los que 14 km corresponden a islotes. De acuerdo con la Tabla 1, la distribución de los tipos genéricos de costa de la isla de Menorca es similar a la media de las Islas Baleares. Llama la atención que a pesar de la relativa abundancia de costas rocosas (todas las islas de las Baleares presentan proporciones iguales o superiores al 80% de costas rocosas), Menorca es la segunda isla en longitud de costa formada por materiales de tamaño arena después de la isla de Formentera (Tabla 1).

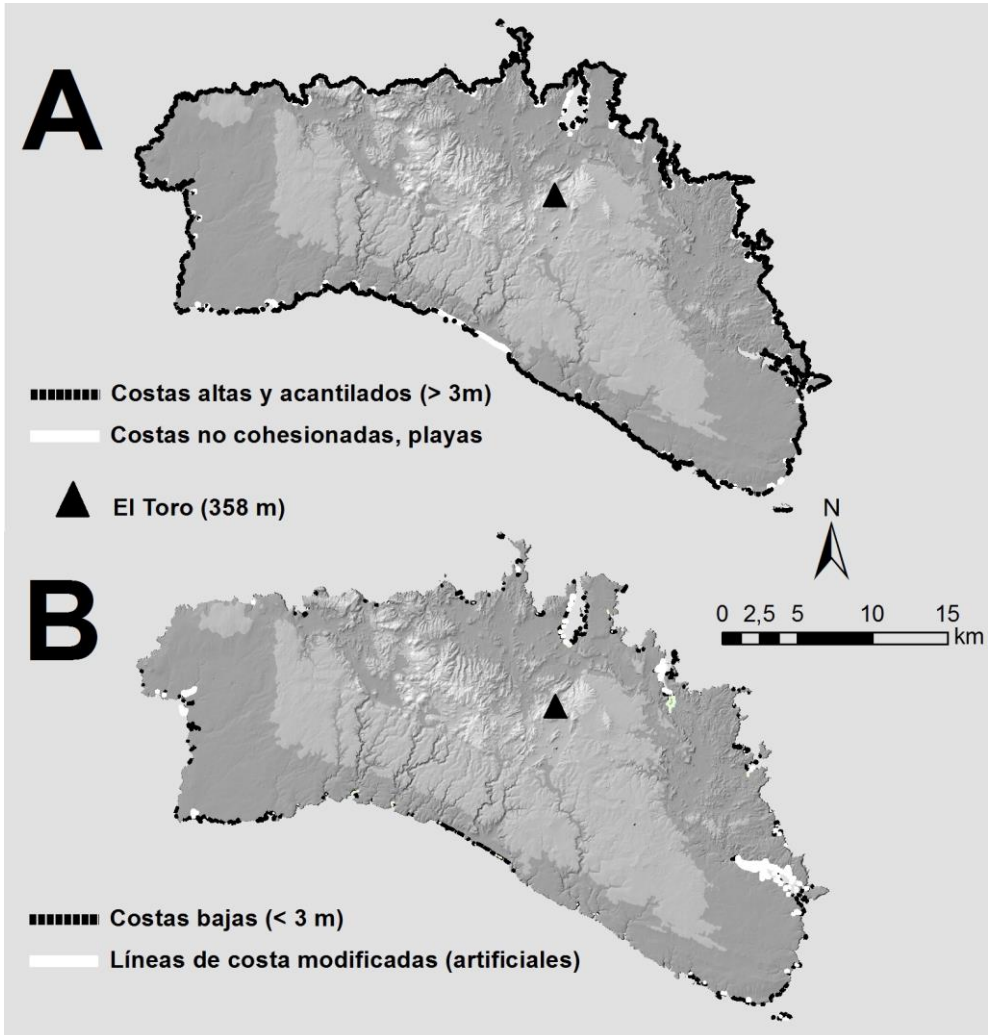
El cálculo de la rugosidad de la línea de costa se suele utilizar, para determinar su grado de articulación. En estudios relativos a sensibilidad ambiental, el grado de rugosidad/articulación se suele explotar como un indicador que refleja el grado de complejidad de limpieza de la línea de costa, en caso de verse afectada por algún episodio de contaminación marina. A mayor rugosidad y/o articulación las tareas a priori serán más laboriosas que en una costa completamente rectilínea. En estudios de geomorfología, el cálculo de esta variable suele realizarse para resaltar el dominio de algún proceso que condiciona la configuración de la línea de costa (indentaciones fluvio-torrenciales, aspectos relacionados con la estructura, erosión marina, etc.). Los datos reflejados en la Tabla 1, muestran que la isla de Menorca es la que presenta una mayor rugosidad de la línea de costa en comparación con el resto de las Islas Baleares.

<b>LONGITUD DE COSTAS (km)</b>				
<i>Menorca</i>	Mallorca y Cabrera	Eivissa	Formentera	Illes Balears
<b>433</b>	842	334	115	1.723
<b>TIPOS GENÉRICOS DE COSTAS (%)</b>				
Isla	Rocosas	Playas Arena	Playas Cantos	Artificiales
<i>Menorca</i>	79,4	9,0	3,1	8,5
Mallorca	75,6	7,8	1,8	14,8
Eivissa	81,6	5,6	4,2	8,6
Formentera	83,2	14,5	0,1	2,2
Archipiélago de Cabrera	95,6	1,0	2,9	0,4
Islas Baleares	78,9	7,9	2,5	10,7
<b>RUGOSIDAD DE LA LÍNEA DE COSTA (longitud costa / longitud costa simplificada)</b>				
<i>Menorca</i>	1,9	Mallorca y Cabrera		1,6
<i>Tramuntana</i>	2,1	Mallorca		1,6
<i>Migjorn</i>	1,7	Marina de Migjorn		1,4
Pitiüses	1,5	Marina de Llevant		1,6
Eivissa	1,6	Archipiélago Cabrera		1,4
Formentera	1,3	Illes Balears		1,6

**Tabla 1.** Características generales de las costas de Menorca y comparación con el resto de las Islas Baleares.

**Table 1.** Menorcan coast main attributes and comparison with the Balearic Islands.





**Figura 2.** Tipología de costa de la isla de Menorca. (a) acantilados y costas no cohesionadas (playas) y, (b) costas bajas y líneas de costa modificadas (diques, escolleras, puertos, paseos marítimos, etc.).

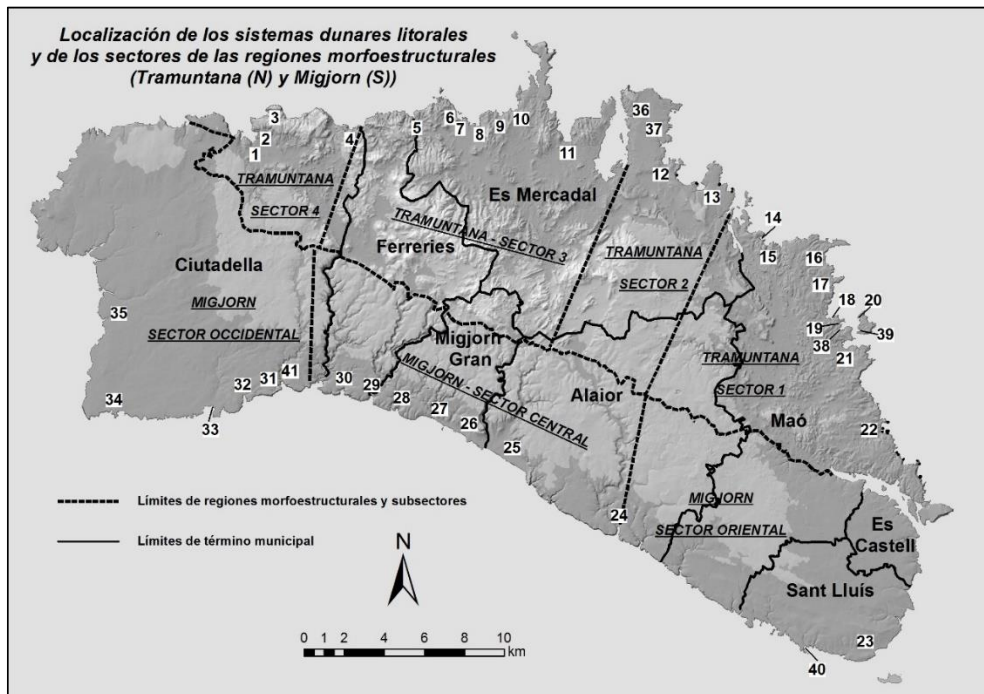
**Figure 2.** Menorcan coast types: (a) rocky coasts and beaches; (b) low rocky coasts and human modified coasts (dikes, harbours, etc.).

El litoral de *Tramuntana* es con diferencia el más recortado (Rosselló, 2003a), además de presentar una gran articulación también posee gran cantidad de islotes de pequeño tamaño, muchos de naturaleza olistostrómica (Tabla 1).

La línea de costa de *Migjorn*, aparentemente más rectilínea con una ligera forma de arco desde una perspectiva macroescalar, tiene un valor de rugosidad/articulación bastante elevado. El valor de rugosidad de *Migjorn* es considerablemente más elevado que el de la *Marina de Migjorn* y análogo al de la *Marina de Llevant* de Mallorca (Tabla 1), que poseen características geomorfológicas similares, aunque con diferencias litológicas y de orientación del tramo costero. Este hecho responde a la presencia

elevada de calas de gran recorrido, algunas de ellas con formas complejas y digitadas debido a la conjunción de procesos cársticos y a las características de la fracturación de la plataforma en la que se desarrollan (Gelabert; 2003; Rosselló, 2003b, 2004; Gómez *et al.*, 2013a).

En cuanto a la naturaleza de las playas de Menorca, existen claras diferencias entre las que se localizan en la costa de *Tramuntana* respecto a las de *Migjorn* (Gómez-Pujol *et al.*, 2013b). A nivel general, las playas de las Islas Baleares están constituidas principalmente por bioclastos –restos de organismos marinos relacionados con la presencia de praderas de fanerógamas marinas (Canals y Ballesteros, 1997; Fornós y Ahr, 2006)– cuya proporción supera de media el 80% y en muchos casos es muy cercana al 100%. La isla de Menorca presenta una proporción relativa elevada de líneas de costa constituidas por guijarros (Tabla 1). La mayor parte de esta tipología de costa se localiza en la región de *Tramuntana*, lo que se explica por la acción del oleaje sobre los relieves costeros formados por materiales muy fracturados dando lugar a playas con una elevada proporción de litoclastos y una mayor tendencia a presentar materiales con diámetros correspondientes a gravas y cantos. Gómez-Pujol *et al.* (2013b), mediante un estudio granulométrico de detalle de las playas de la isla



**Figura 3.** Localización de los sistemas dunares de la isla de Menorca y distribución de las subsectores en los que se dividen las unidades de morfoestructurales de *Tramuntana* (N) y *Migjorn* (S) de acuerdo con Borrouilh (1983). Los números se corresponden con los sistemas dunares litorales señalados en tabla 2.

**Figure 3.** Location of dunes systems along the coast of Menorca and spatial representation of the morphostructural units and subunits according to Borrouilh (1983). Numbers indicate the dune systems listed in Table 2.

de Menorca, concluyen que las playas de las costas de la región de *Tramuntana* presentan una mayor proporción de litoclastos con elevada presencia de materiales de origen silíceo (relacionados con la presencia de los materiales atribuibles al Paleozoico). Por el contrario, las playas de la región de *Migjorn* tienen menor presencia de litoclastos y mayor presencia de bioclastos (generalmente más del 80%). Alguna de las particularidades que destaca el trabajo de Gómez-Pujol *et al.* (2013b), es que en aquellas playas de la zona central de *Migjorn* en la que desembocan cursos fluvio-torrenciales cuyo origen se localiza en la región de *Tramuntana*, presentan las mayores proporciones de litoclastos y materiales de origen silíceo (granos de cuarzo).

Por otra parte, los sistemas dunares litorales están intrínsecamente relacionados con líneas de costa formadas por playas. En Menorca se han diferenciado hasta 41 sistemas dunares (Figura 3) de los cuales 26 se localizan en el litoral de *Tramuntana* (Tabla 2) y 16 en *Migjorn* (Tabla 4). El sistema dunar litoral de mayor extensión se localiza en Son Saura del Sud, ubicado en el Suroeste de la isla (*Migjorn*) con más de 200.000 m<sup>2</sup>, le siguen Son Bou (*Migjorn*) y Cala Pilar (*Tramuntana*) con alrededor de 170.000 m<sup>2</sup>. De los 10 sistemas dunares con mayor extensión, 7 se localizan en la vertiente de *Tramuntana* y los 3 restantes en *Migjorn*. El elevado número de sistemas dunares litorales o largo del litoral (1 sistema dunar litoral cada 10,5 km de costa) guarda relación con el grado de conservación y bajo desarrollo urbano de las áreas costeras que la convierte en la isla, en términos relativos, menos transformada del conjunto de las Islas Baleares. Actualmente, un 81,6% del litoral se encuentra protegido por alguna regulación legal en la parte terrestre. El 53,3% de la línea de costa está protegida por alguna regulación legal en la parte marina y el 49,2% de costa está afectada por alguna figura de protección marina y terrestre de forma simultánea (Balaguer *et al.*, 2015; SOCIB, 2016).

En lo que respecta a las alturas de la línea de costa, se puede considerar que Menorca es una isla en la que dominan las costas altas con alturas superiores a 3 metros (Tabla 3, Figura 2). Las costas bajas representan el 22% (aprox. 87 km), que corresponden a los fondos de calas, ensenadas, puertos naturales y sistemas dunares litorales. El 18% (ca. 47 km) de la vertiente de *Tramuntana* son costas bajas (< 3m), que se distribuyen a lo largo del interior de los puertos naturales de Maó (vertiente septentrional) Addaia y Fornells (tanto costas rocosas como de materiales no consolidados), costas de playa, muchas de ellas localizadas en el interior de ensenadas, entrantes y calas, algunos sectores de costa rocosa del Cap de Favàritx, el ámbito de Punta Pentiner (costa rocosa), el S de la Illa des Porros y tramos de costa rocosa de la zona de Cala Viola de Ponent de la Península de Cavalleria. El 28% de la costa de *Migjorn* es costa baja (< 3m) (ca. 40 km) que se dispone en el interior de calas (costas rocosas en los flancos y playas en el fondo). A grandes rasgos y de W a E se distribuye de la siguiente manera: a) el ámbito rocoso del sector comprendido entre Cap del Mal Passar, Cap d'Artrutx y Punta de s'Alzina Dolça, b) los sectores de playa de Binigaus, Sant Tomás y Son Bou, c) algunos sectores costeros rocosos de Binisafúller, Binibèquer y Biniancolla, d) costa rocosa del N de la Illa de l'Aire y Punta Prima (este último tramo se combina con playas expuestas), y e) algunos sectores de la vertiente S del Port de Maó.

El 78% (aprox. 346 km) de la línea de costa de Menorca puede considerarse como costa alta, con alturas mayores a 3 m (Tabla 3). El 82% (aprox. 212 km) de la costa de *Tramuntana* tiene alturas mayores 3 m y en *Migjorn* representan el 72% (aprox. 134

Núm.	Nombre	Foredune	Sistema Dunar	Municipio	Extensión (m <sup>2</sup> )
1	Algaiarens, T	SI	SI	Ciutadella	28.854 a
2	Es Bot, T	SI	SI	Ciutadella	154.181 c
3	Cala Carbó, T		SI	Ciutadella	38.408 c
4	Cala Pilar, T	SI	SI	Ciutadella	168.490 a
5	Cala Calderer, T	SI	SI	Es Mercadal	9.648 b
6	Pregonda, T	SI	SI	Es Mercadal	163.712 c
7	Pregondó, T	SI	SI	Es Mercadal	3.989 c
8	Binimel·là, T	SI	SI	Es Mercadal	33.166 a
9	Cala Mica, T	SI	SI	Es Mercadal	6.700 c
10	Cavalleria, T	SI	SI	Es Mercadal	116.754 a
11	Tirant, T	SI	SI	Es Mercadal	86.909 a
12	Son Saura del Nord, T	SI	SI	Es Mercadal	106.590 a
13	Arenal d'en Castell, T	SI	SI	Es Mercadal	2.316 a
14	Mongofre, T	SI	SI	Maó	46.339 c
15	S'Enclusa, T	SI	SI	Maó	5.856 a
16	Presili, T		SI	Maó	8.392 a
17	Morella, T	SI	SI	Maó	26.633 a
18	Torraeta, T	SI	SI	Maó	42.963 a
19	Tamarells del Nord, T	SI	SI	Maó	4.053 a
20	Caló Moro, T	SI	SI	Maó	13.253 a
21	Es Grau, T	SI	SI	Maó	93.813 a
22	Cala Mesquida, T	SI	SI	Maó	2.551 a
23	Punta Prima, M		SI	Sant Lluís	1.712 a
24	Cala'n Porter, M		SI	Alaior	9.672 c
25	Son Bou, M	SI	SI	Alaior	169.274 a
26	Sant Tomàs, M	SI	SI	Es Migjorn Gran	24.147 c
27	Binigaus, M	SI	SI	Es Migjorn Gran	3.293 a
28	Escorxada, M	SI	SI	Es Migjorn Gran	19.507 b
29	Trebalúger, M	SI	SI	Es Migjorn Gran	113.691 b
30	Cala Mitjana, M		SI	Ferrieres	981 a
31	Macarelleta, M	SI	SI	Ciutadella	3.853 c
32	Turqueta, M	SI	SI	Ciutadella	916 c
33	Son Saura del Sud, M	SI	SI	Ciutadella	204.257 c
34	Cala en Bosch, M		SI	Ciutadella	13.484 c
35	Cala Blanca, M		SI	Ciutadella	2.596 c
36	Cabra Salada, T	SI	SI	Es Mercadal	sin datos
37	Cala Pudent, T	SI	SI	Es Mercadal	sin datos
38	Tamarells Sud, T	SI	SI	Maó	sin datos
39	Tamarells, T	SI	SI	Maó	sin datos
40	Binibèquer, M		SI	Sant Lluís	894 c
41	Macarella, M	SI	SI	Ciutadella	sin datos

**Tabla 2.** Relación de los sistemas dunares litorales y principales atributos. Fuentes: a) Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (2008), b) Roig et al. (2007, 2008, 2009a,b,c) y c) IDE Menorca. M y S indican respectivamente las unidades de Migjorn y Tramuntana.

**Table 2.** Menorcan dune systems and their main features. From: a) Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (2008), b) Roig et al. (2007, 2008, 2009a,b,c) y c) IDE Menorca). T and M indicate the Tramuntana and the Migjorn geomorphic domains.

km). En *Tramuntana*, a nivel general, las mayores alturas se localizan en los sectores 2 y 4 (Tabla 3, Figura 3). En esta región destacan las costas con alturas comprendidas entre 30 y 50 m en la zona de la Mola del Port de Maó y Pla de s'Esperó formadas principalmente por materiales del Carbonífero (Figura 4), Mola de Fornells y N de la península de Cavalleria con mayoría de materiales del Jurásico y en el sector NW el tramo comprendido entre Cap Gros (E) y Cala Morell (W) donde afloran materiales del Triásico y Jurásico (Figura 4). Las mayores alturas, entre 50 y 100 m, están localizadas en el ámbito de Cala en Caldes (W de de Cap de Favàritx), Mola de Fornells (Jurásico), Canal d'en Sintes/Racó des Llenyam (Permotrias) y E de la Punta de l'Anticrist (Permotrias). En la costa de *Migjorn* las mayores alturas se localizan en el sector 2 (Tabla 3) o sector central (Figura 3). En los sectores 1 y 3 (oriental y occidental respectivamente) hay un predominio de acantilados bajos (< 15 m) (Tabla 3) y en el sector 2 o central son las costas de alturas mayores a 15 m las que adquieren un mayor protagonismo. Los tramos costeros con las mayores alturas están constituidos por calcáreas y calcarenitas del Mioceno Superior y se localizan en el tramo comprendido entre Cala Morell y Punta Nati (Sector Occidental, con afloramientos puntuales de materiales del Jurásico), en las inmediaciones de sa Punta de na Gall (Sector Central, entre Cala Turqueta y Cala Macarella, en el flanco oriental de Cala Trebalúger en el tramo comprendido entre Llucalari y Cala en Porter y entre Cales Coves y es Canutells (Sector Oriental) (Tabla 3, Figura 3).

En cuanto a las características geológicas y litológicas de los materiales que constituyen la línea de costa (Tabla 3, Figura 4), cabe destacar que los materiales correspondientes al Mioceno Superior son los que sustentan el mayor porcentaje de línea de costa, y le siguen los materiales Paleozoicos del Carbonífero y los del Jurásico. En la costa de *Tramuntana* los materiales predominantes, por orden de importancia, son los del Carbonífero, Jurásico y Cuaternario. En la costa de *Migjorn* los predominantes son los del Mioceno Superior y del Cuaternario (Tabla 3, Figura 4).

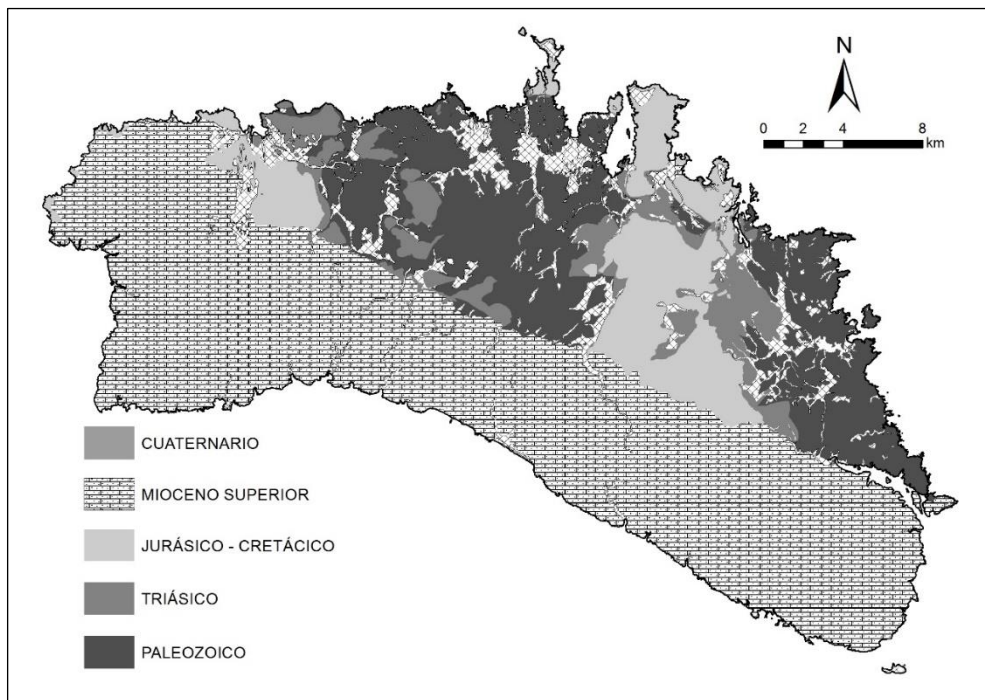
La litología que encontramos en la línea de costa de Menorca distribuida por sectores según la propuesta de Bourrouilh (1983) (Figura 3) es la siguiente:

*Tramuntana Sector 1*: costa mayoritariamente formada por turbiditas calcáreas y

Ámbito geográfico		Intervalos de altura de la línea de costa (%)					
		0 a 3 m	3 a 5 m	5 a 15 m	15 a 30 m	30 a 50 m	> 50 m
<b>Menorca</b>		22	32,5	25,9	13,3	5,8	0,5
<b>Tramuntana</b>	<b>Total</b>	17,6	30,9	31,1	14,7	4,9	0,8
	<i>Sector 1</i>	20,5	30,5	30,1	17,8	1,0	0,1
	<i>Sector 2</i>	7,1	41,2	32,1	10,6	6,3	2,6
	<i>Sector 3</i>	19,9	37,5	30,6	7,9	4,0	---
	<i>Sector 4</i>	7,0	6,1	30,1	28,7	23	5,1
<b>Migjorn</b>	<b>Total</b>	27,9	34,6	19	11,3	7,2	---
	<i>Sector occident.</i>	35,3	40,2	15	7,8	1,8	---
	<i>Sector central</i>	22	13,8	22,7	22,1	19,3	---
	<i>Sector oriental</i>	25,3	39,3	20,8	8,4	6,2	---

**Tabla 3.** Clasificación de la línea de costa de Menorca por intervalos de altura. La localización de los diferentes ámbitos geográficos está descrita en la Figura 3.

**Table 3.** Menorcan coast height classification. The different units are described at Figure 3.



**Figura 4.** Mapa geológico simplificado de la isla de Menorca.

**Figure 4.** Simplified geological map of Menorca.

siliciclásticas propias de facies de canal y de desbordamiento del Carbonífero a lo largo de todo el tramo costero, depósitos de playa y calcarenitas (arenas de playa y duna fosilizadas) del Cuaternario, turbiditas diluidas del Devónico en la zona del Port d'Addaia, dolomías y calcáreas del Jurásico en los islotes del Port d'Addaia, afloramientos puntuales de areniscas y pelitas en la zona de Addaia conjuntamente con margas, evaporitas y areniscas del Triásico Inferior.

*Tramuntana Sector 2:* Algunos de los afloramientos más destacables se encuentran en la línea de costa de la Mola de Fornells donde afloran materiales del Jurásico Inferior (dolomías y calcáreas), conformando los acantilados más elevados de la isla. También afloran en la vertiente E del interior del Port de Fornells. Se observan materiales del Cretácico (magocalcáreas) entre el Arenal de Son Saura y Cala en Tosqueta; calcáreas del Triásico Medio (*Muschelkalk*) en la zona de ses Llantaines al W de s'Arenal d'en Castell; afloramientos del Mioceno Superior (depósitos conglomeráticos), correspondientes al Tortoniense, entre s'Arenal d'en Castell y s'Arenal de Son Saura.

*Tramuntana Sector 3:* Se trata del más diverso en cuanto a variedad de afloramientos. En este sector, de nuevo, aparecen materiales del Carbonífero (turbiditas y facies de *debris flow*) en la línea de costa comprendida entre Cala Mica y Punta des Carregador (W); las facies volcánicas del Carbonífero (principalmente basaltos y doleritas) en el área de Calesmorts y N de Cala Barri; costas formadas por turbiditas diluidas del Devónico entre Punta Negra y Cala Tirant y, puntualmente, en varios segmentos de costa a E y W de la península de Cavalleria; calcáreas y dolomías

del Jurásico en la bocana W del Port de Fornells y en la mayor parte de la península de Cavalleria, constituyendo los acantilados más altos; costas formadas por materiales del Pérmico en segmentos costeros comprendidos entre Cala Barril y Cala Calderer. Se trata de areniscas, conglomerados y pelitas. Los materiales correspondientes al Triásico Inferior (*Buntsandstein*, sobretudo areniscas cuarcíticas) conforman líneas de costa del sector suoriental del interior del Port de Fornells. En cuanto al Triásico Medio (*Muschelkalk*), destacan los afloramientos localizados en Cala Torta y el Triásico Superior (*Keuper*) aflora puntualmente (margas y evaporitas) al W de Cala Fornells y en algunos puntos de la península de Cavalleria.

*Tramuntana Sector 4:* En este sector destacan las líneas de costa formadas por pelitas y areniscas del Pérmico que afloran de forma bastante continua en el sector comprendido entre el W de Cala del Pilar y Cap des Ferro/Cala Carbó. Facies volcánicas del Carbonífero que afloran puntualmente en las costas de Algaiarens i Pla de Mar. Triásico Inferior (*Buntsandstein*) que aflora en el área de la Punta de l'Anticrist, el Cap Gros y el sector comprendido entre Punta Roja y Cala Algaiarens. Este sector es en el que más presencia tienen las costas formadas por las calcáreas y dolomías del Triásico Medio (*Muschelkalk*) y se localizan en el sector comprendido entre la zona de Algaiarens y Cala Fontanelles. Las dolomías y calcáreas del Jurásico constituyen un importante tramo de costa comprendido entre s'Escala (W de Cala Algaiarens) y Cala Morell. Es preciso señalar que a lo largo de esta vertiente costera afloran materiales correspondientes al Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno) que constituyen principalmente costas de playa y depósitos de eolianitas relacionados con playas y sistemas dunares litorales fósiles depositados con niveles marinos diferentes al actual.

La línea de costa del *Migjorn* de Menorca no presenta tanta variabilidad de litología

ERA	PERÍODO / SERIE	% costa Menorca	% costa Migjorn	% costa Tramuntana	
Cenozoico	CUATERNARIO	15,7	14,9	16,3	
	NEÓGENO Mioceno Superior	Mesiniense	24,6	53,7	0,5
		Tortonense	11,6	24,2	1,1
Mesozoico	Cretácico superior	1,9	no consta	3,5	
	Jurásico	17,6	6,8	26,5	
	Triásico superior ( <i>Keuper</i> )	0,4	no consta	0,7	
	Triásico medio ( <i>Muschelkalk</i> )	1,4	no consta	2,6	
	Triásico inferior ( <i>Buntsandstein</i> )	2,3	no consta	4,2	
Paleozoico	Pérmico	2,1	no consta	3,9	
	Carbonífero	21,4	0,4	38,8	
	Devónico	1,1	no consta	2,0	

**Tabla 3.** Clasificación de la línea de costa de Menorca por intervalos de altura. La localización de los diferentes ámbitos geográficos está descrita en la Figura 3.

**Table 3.** Menorcan coast height classification. The different units are described at Figure 3.

correspondiente a diferentes eras geológicas como ocurre en la zona de *Tramuntana* (Tabla 4 y Figura 4). Los materiales que constituyen la plataforma carbonatada del *Migjorn*, y por tanto la mayor parte de su línea de costa, corresponden a calcáreas, conglomerados y facies de *lagoon* del Tortoniense (estadio inferior del Mioceno Superior), calcarenitas correspondientes a facies de talud del Mesiniense (estadio superior del Mioceno Superior), depósitos de playa, depósitos de fondo de valle, eolianitas y calcarenitas del Cuaternario correspondientes a paleosuleos y registros fósiles de playas y sistemas dunares fósiles (Obrador, 1998; Fornós y Obrador, 2003; Obrador y Pomar, 2004) (Figura 4). Cabe señalar, de acuerdo con la cartografía litológica de Menorca disponible en la IDE Menorca, la presencia de sectores de línea de costa mayoritariamente formadas por facies propias de bioconstrucciones del Mesiniense, entre la Punta de Cala Fonda y la Cala des Sac des Blat (SW de Menorca, Sector 3 de *Migjorn*) y en las inmediaciones des Cap d'en Font y Caló d'en Fus (SE de Menorca, Sector 1 del *Migjorn*) (Figura 3).

## 5 | Conclusiones

Menorca tiene 433 km lineales de costa de acuerdo con la fuente cartográfica de mayor detalle a la que se ha podido acceder. De las cuales, alrededor del 80% son rocosas: un 9% están formadas por playas de arenas y un 3% son playas de guijarros de las cuales la mayor parte se localizan en el litoral septentrional (*Tramuntana*). Aproximadamente un 9% de la línea de costa ha sido modificada por el hombre, las mayores concentraciones de estos tipos de costa se localizan en el interior de puertos naturales como Maó, Ciutadella, Fornells, Cala en Bosc y Addaia. Existe una clara diferencia entre las vertientes litorales de *Migjorn* y de *Tramuntana* a raíz de la composición litológica, estructura geológica y geomorfología de la línea de costa. Menorca presenta una línea de costa muy articulada (abundancia de entrantes, radas y calas) y uno de los principales rasgos que diferencian ambas vertientes es el grado de articulación de la línea de costa, siendo sensiblemente más recortada la costa septentrional que la meridional. En cuanto a las litologías que constituyen la línea de costa, existe una mayor heterogeneidad de materiales en la costa de *Tramuntana* (serie incompleta que abarca desde el Devónico al Holoceno), mientras que en la costa de *Migjorn* existe una mayor uniformidad (serie incompleta que abarca desde el Mioceno Superior hasta el Holoceno).

El 22% de la línea de costa de la isla es baja, con alturas menores a 3 metros, de las que más de la mitad son costas de playa y costas modificadas por el hombre. El 78% restante son costas altas, cuyas mayores alturas (entre 30 y 100 metros) suponen algo más del 6% del total de la línea de costa. Menorca es una isla con un número considerable de sistemas dunares litorales (41). La relación entre sistemas dunares por km de costa es de 1 sistema dunar litoral cada 10 km lineales de costa. Dichos sistemas presentan diferentes grados de conservación dependiendo de la presión humana ejercida sobre ellos.

## Bibliografía

Balaguer, P., Vallespir, J., Vizoso, M., Ruiz, M., Cañellas, B., Fornós, J.J. y Tintoré, J. (2015): *Atles de Sensibilitat Ambiental del Litoral de les Illes Balears. Edición 2015*. Palma, SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costero de las Illes Balears. 149 pp.



- Balaguer, P., Vizoso, G., Ferrer, M.I., Ruíz, M., Orfila, P., Basterretxea, G., Jordi, A., Fornós, J.J., Satorres, J., Roig-Munar, F.X. y Tintoré, J. (2006): Zonificación del litoral Balear frente a un posible derrame o vertido de hidrocarburos. Establecimiento de un Índice de Sensibilidad Ambiental (ISA) de la línea de costa. En: Pérez-Alberti, A. y López-Bedoya, J. (eds.), *Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología. Santiago de Compostela*: 311-322. Santiago de Compostela, Universidad de Santiago de Compostela.
- Bourrouilh, R. (1983): *Estratigrafía, sedimentología y tectónica de la isla de Menorca y del Noreste de Mallorca (Balears). La terminación Nororiental de las Cordilleras Béticas en el Mediterráneo Occidental*. Madrid, Memoria del Instituto Geológico y Minero de España. 2 Vol. 672 pp.
- Canals, M. y Ballesteros, E. (1997): Production of carbonate particles by phytobenthic communities on the Mallorca-Menorca shelf, northwestern Mediterranean Sea. *Deep Sea Research*, 44 (3-4): 611-629.
- Cañellas, B. (2010): *Long-term extreme wave height events in the Balearic Sea: characterization, variability and prediction*. Tesis Doctoral. Palma, Universitat de les Illes Balears. 85 pp.
- Fornós, J. J. y Ahr, W. M. (2006): Present-day temperate carbonate sedimentation on the Balearic Platform, western Mediterranean: compositional and textural variation along a low-energy isolated ramp. *Geological Society, London, Special Publications*, 255(1): 71-84.
- Fornós, J.J. y Obrador, A. (2003): Geología de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 31-38. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Gelabert, B. (2003): La estructura geológica de Menorca: Las zonas de Tramuntana y de Migjorn. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 39-48. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Gómez-Pujol, L., Balaguer, P. y Fornós, J.J. (2007): El litoral de Mallorca: síntesis geomorfológica. En: Fornós, J.J., Ginés, J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Geomorfología litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 17-37. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Gómez-Pujol, L., Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Segura, F.S. y Onac, B.P. (2013a): Structural control on the presence and character of calas: Observations from Balearic Islands limestone rock coast macroforms. *Geomorphology*, 194: 1-15.
- Gómez-Pujol, L., Roig-Munar, F.X., Fornós, J.J., Balaguer, P. y Mateu, J. (2013b): Provenance-related characteristics of beach sediments around the island of Menorca, Balearic Islands (western Mediterranean). *Geo-Marine Letters*, 33 (2-3): 195-208.
- Obrador, A. (1998): Un cop d'ull a la geología menorquina. En: Fornós, J.J. (ed.), *Aspectes geològics de les Balears*: 39-66. Palma, Universitat de les Illes Balears.
- Obrador, A. y Pomar, L. (2004): El Miocè de Migjorn. En: 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: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Roig-Munar, F. X. (2011): *Aplicació de criteris geomorfològics en la gestió dels sistemes litorals arenosos de les Illes Balears*. Tesis doctoral. Palma, Universitat de les Illes Balears. 366 pp.
- Roig-Munar, F.X., Fraga, P., Martín-Prieto, J.Á., Pons, G.X. y Rodríguez-Perea, A. (2009c): Fixació i estabilització de sistemes dunars a les Illes Balears per processos de forestació: el cas de Menorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 52: 129-140.
- Roig-Munar, F.X., Fraga, P., Martín-Prieto, J.Á., Pons, G.X. y Rodríguez-Perea, A. (2009a): Descripció del sistema dunar de Cala Escorxada (Sud de Menorca, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 52: 155-168.
- Roig-Munar, F.X., Fraga, P., Martín-Prieto, J.Á., Pons, G.X. y Rodríguez-Perea, A. (2009b). Descripció del sistema platja-duna de dunar de Trebalúger i Sant Llorenç (S de Menorca, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 52: 141-154.

- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A. y Fraga, P. (2007): Descripció del sistema dunar de Cala en Carbó (NW Menorca, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 50: 77- 85.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á., Fraga, P., Pons G.X. y Rodríguez-Perea, A. (2008): Descripció del sistema dunar de l'Arenal de Sant Jordi (cala'n Calderer, Nord de Menorca, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 51: 117-130.
- Rosselló, V.M. (2003a): Geomorfología general de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducció a la Geografia Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 49-64. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Rosselló, V.M. (2003b): Las calas y las costa del Migjorn. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds), *Introducció a la Geografia Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 87-100. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Rosselló, V.M. (2004): El litoral y les cales. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 177-122. Palma, Societat d'Història Natural de Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Segura, F. y Pardo, J.E. (2003): Los Barrancos del Migjorn de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducció a la Geografia Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 71-86. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Servera, J. (1997): *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesis Doctoral. Palma, Universitat de les Illes Balears, 904 pp.
- SOCIB (2016): Algunos datos útiles sobre líneas de costa en les Illes Balears. Nota interna dl SOCIB, 8pp. Palma, SOCIB. Inédito.

# Las costas rocosas del Migjorn de Menorca: acantilados y calas

Joan J. Fornós<sup>1</sup>, Lluís Gómez-Pujol<sup>1,2</sup>, Vicenç M. Rosselló<sup>3</sup>, Bernadí Gelabert<sup>4</sup>,  
Francesca Segura<sup>3</sup> y Josep E. Pardo-Pascual<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Grup de Ciències de la Terra (Geologia i Paleontologia “Guillem Colom”). Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>2</sup> ICTS SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (MINECO-CAIB), Palma.

<sup>3</sup> Departament de Geografia, Universitat de València, València.

<sup>4</sup> Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>5</sup> Departament d'Enginyeria Cartogràfica i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València, València.

## RESUMEN

La zona meridional de Menorca (Migjorn) se caracteriza por ser una plataforma carbonatada desarrollada en un ambiente arrecifal durante el Mioceno superior. Está surcada por una serie de cursos torrenciales fuertemente encajados que en su desembocadura al mar dan lugar a una forma de bahía denominada “cala” que está delimitada por paredes de elevada pendiente. La fracturación y la diaclasación penetrativa que afecta a la alternancia de materiales calcareníticos y calcisiltíticos miocenos, junto con la distribución de éstos, es el principal factor que condiciona el trazado de los cursos fluviales, así como el desarrollo de los procesos de tipo kárstico asociados a la circulación preferencial y la formación de conductos. La interacción en la zona litoral de los procesos endokársticos, en los cuales la mezcla de aguas favorece los procesos de disolución, la actividad torrencial, así como la dinámica marina –teniendo presente la variabilidad glacio-eustática acontecida durante el Cuaternario– favorece el desarrollo y dinamismo del propio karst (i.e. colapso de cavidades, formación de dolinas, etc.) lo que se traduce, finalmente, en la configuración de la geoforma tan característica y compleja que es la cala.

**Palabras clave:** acantilados, Mioceno superior, fracturación distensiva, barrancos, karst, cala

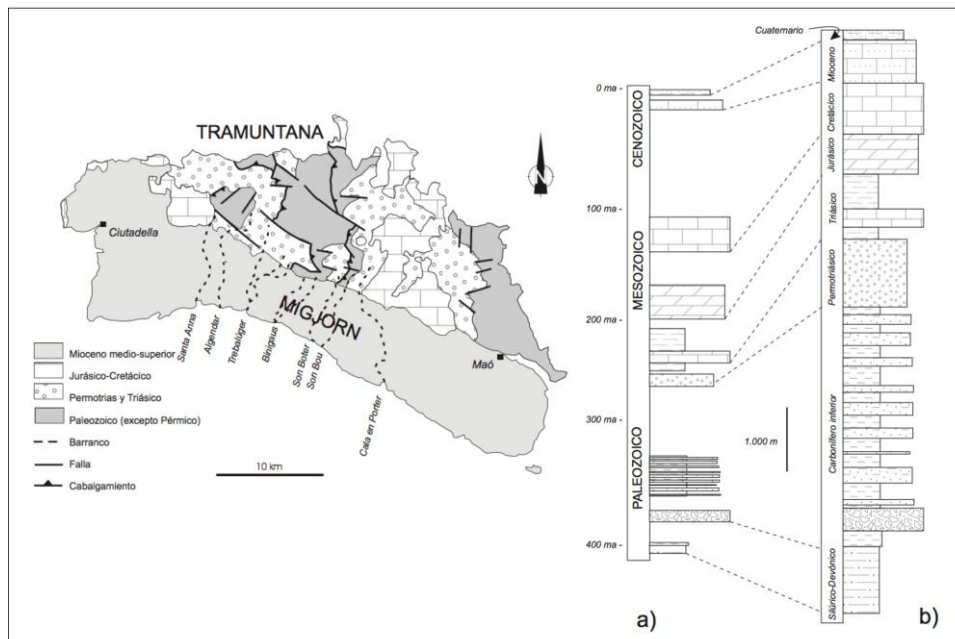
## ABSTRACT

The southern region of Menorca –Migjorn– is built up by a carbonate platform developed in a reef environment during the Upper Miocene. This structural platform is dissected by a set of canyon-like creeks that when reach the coast result in narrow and cliffy bays known as “cala”. Joints and penetrative fractures that affect the Upper Miocene calcarenites and calcilutites rock outcrops exert the main control of the streams pathway and direction. Karst processes also play a critical contribution related to the preferential circulation and void formation. The interaction at the coast between marine and endokarstic processes –where mixing zone waters enhance rock solution–, between the fluvial processes and sea level (including sea level fluctuations during Quaternary times– enhance the dynamics and the development of karst (i.e. cave collapse, dolines formation, etc.) and this, finally, results in the configuration of a very representative rock coast macroform such as the “cala”.

**Keywords:** cliffs, Upper Miocene, fractures, streams, karst, cala

## 1 | Introducción

La línea de costa, como zona de interacción entre los procesos marinos y terrestres junto con la presencia de la capa atmosférica, experimenta un conjunto de dinámicas propias que se caracterizan por una acusada variabilidad temporal (Woodroffe, 2003). El resultado es que la línea de costa se convierte un ente dinámico que se encuentra en continua evolución. Desde un punto de vista geomorfológico, tal variabilidad temporal y espacial de procesos resulta en la génesis de un espectro amplio de formas, de configuraciones del relieve, como consecuencia de la interacción de los procesos físicos -ya sean hidrodinámicos o atmosféricos- o químicos. En el caso de Menorca y concretamente en el de su mitad meridional, dada la omnipresencia del substrato carbonatado, la disolución juega un papel importantísimo en el modelado de la costa



**Figura 1.** Mapa geológico simplificado de la isla de Menorca y registro sedimentario (a) y columna estratigráfica de los materiales que afloran en Menorca (b). Modificado de Rosell y Llompart (2002).

**Figure 1.** Menorca simplified geological map and sedimentary register (a) and Menorcan stratigraphic log (b). After Rosell y Llompart (2002).

rocosa. A lo que hay que añadir el papel, nada desdeñable, de la textura del roquedo, así como los parámetros estructurales o la contribución de determinados organismos y su acción bioerosiva o de bioprotección (Gómez-Pujol y Fornós, 2004a y b).

Una visión simplificada de la geología de la isla de Menorca (Obrador *et al.*, 1983; Rosell y Llompart, 2002; Fornós *et al.*, 2002) evidencia la clara división de la isla en dos mitades siguiendo una dirección oeste–este. Así, la zona septentrional (*Tramuntana*) está formada por materiales estructurados, en su mayor parte paleozoicos y mesozoicos, con un predominio de las litologías silíceas (con la excepción de los materiales jurásicos), mientras que la mitad meridional (*Migjorn*) está compuesta por materiales post-tectónicos pertenecientes al Mioceno –superior en su mayor parte– que se caracterizan por su composición carbonatada, presentando una amplia variedad textural, desde calizas a calcarenitas o calcilitas.

El dominio de los materiales carbonatados en el Migjorn de Menorca (Fig. 1) condiciona la interacción entre los procesos físicos y químicos. La resistencia inicial a la erosión mecánica de las rocas calizas, consideradas duras, explica el predominio de los acantilados en la línea de costa, más o menos bien desarrollados en función de los aspectos estructurales, tectónicos, aunque también sedimentológicos que afectan a los materiales miocenos. Así pues, los acantilados son una forma básica y omnipresente del litoral meridional menorquín. Por otra parte, el clima del Mediterráneo occidental, donde se sitúa la isla de Menorca, se caracteriza por un clima templado suave y una pluviometría estacional, relativamente importante. Lo que conlleva un claro

desarrollo de los procesos de disolución de las litologías carbonatadas y, por tanto, el desarrollo del modelado kárstico en todas sus versiones: ya sea a modo de exokarst o a modo de endokarst (García-Senz, 1985; Fornós, 2003; Ginés, 2003; Ginés y Fornós, 2004; Gómez-Pujol y Fornós 2004c)

Los objetivos del presente trabajo se centrarán en la revisión de las investigaciones publicadas hasta la fecha sobre las costas rocosas del Migjorn menorquín, aportando algunos datos nuevos que enfatizan la estrecha interrelación entre la tectónica (fracturación) y los procesos de acento kárstico, sin olvidar el esporádico funcionamiento fluvial de los barrancos que drenan el sur de la isla.

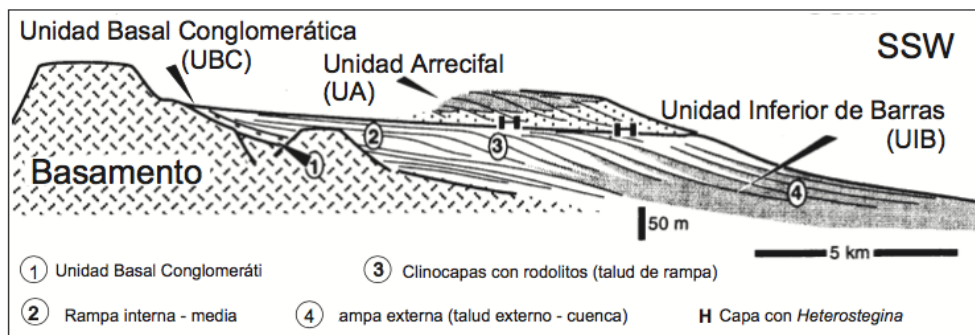
En este sentido, este estado de la cuestión no dejará de tratar una de las formas más características de la isla: la cala. Expresión morfológica de todos los procesos anteriormente mencionados y de las oscilaciones del nivel del mar a lo largo del Plioceno y, muy especialmente, durante los cambios climáticos del Pleistoceno-Cuaternario.

## 2 | La estructura geológica del Migjorn de Menorca (litología y tectónica)

Si hay un lugar donde se hace más evidente el condicionamiento estructural y litológico, junto con la interacción de diferentes procesos geomórficos, ese lugar es la costa meridional de la isla de Menorca.

Desde un punto de vista litológico las rocas que afloran en los acantilados costeros que forman la costa del Migjorn menorquín son carbonatadas y pertenecen al Mioceno superior (Pomar *et al.*, 2002). Están formadas por una alternancia de calizas arrecifales, calcarenitas y calcisiltitas que son el resultado de la evolución sedimentológica neógena y del ambiente deposicional en el que se formaron. Su amplia variabilidad textural es uno de los aspectos a tener en cuenta en el desarrollo y evolución morfológica de dicho litoral.

Rosell y Llompart (2002), así como Obrador y Pomar (2004), describen de forma detallada las características, tanto estratigráficas como sedimentológicas, de dichos depósitos, aunque no de forma del todo coincidente (Fig. 2). Para nuestros propósitos



**Figura 2.** Esquema deposicional de las unidades del Mioceno postorogénico de Menorca. Modificado de Pomar *et al.* (2002).

**Figure 2.** Depositional units sketch at the Upper Miocene from Menorca. After Pomar *et al.* (2002).

seguiremos la descripción de estos últimos, especialmente lo relacionado con las unidades de mayor presencia en la franja litoral meridional de la isla (Obrador *et al.*, 1983).

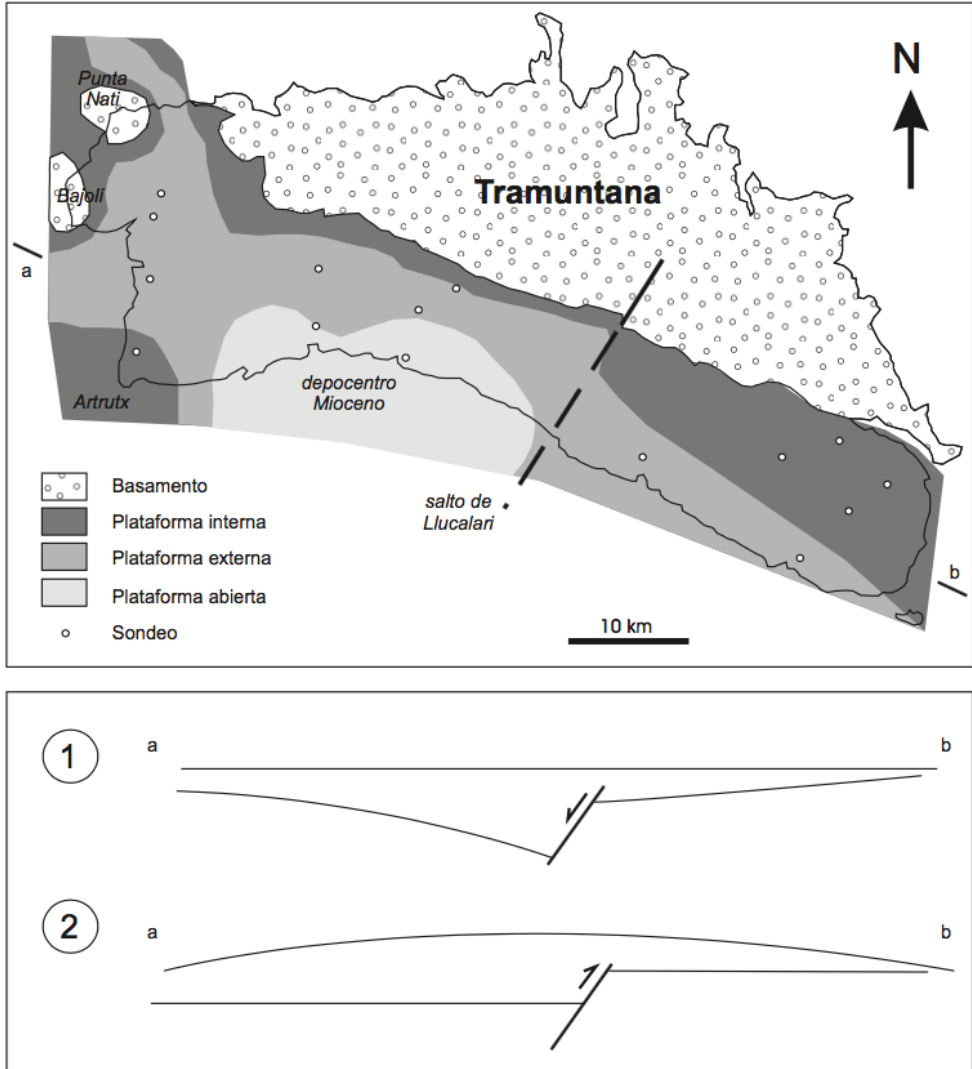
Así, la unidad inferior aflorante en la línea de costa y presente, especialmente, en la zona central de la isla, corresponde a la denominada Unidad Inferior de Barras. Ésta se generó en un ambiente de rampa progradante desarrollada en una plataforma somera y sus componentes principales, casi exclusivamente, son bioclásticos (en su mayor parte fragmentos de algas coralíneas). El conjunto muestra una marcada estratificación que alterna los niveles calcareníticos (*grainstones* y puntualmente *rudstones*) con los calcisiltíticos (*packstones*), con ligera pendiente en dirección sur, y que localmente pueden presentar estructuras internas tractivas (i.e. barras), así como niveles intensamente bioturbados. La unidad superior, Unidad Arrecifal, siempre dispuesta sobre la anterior, corresponde a un ambiente de plataforma arrecifal, también progradante, con diversas facies deposicionales relacionadas con dicho ambiente (frente, talud o *lagoon*) pero que, en general, está dominada por las calcarenitas de grano grueso (*rudstones*) –que se corresponden con los taludes y en los cuales la laminación presenta una mayor pendiente– y las calizas (*framestones*) que presentan un aspecto más masivo siendo la estratificación menos evidente.

Los materiales del Mioceno superior son postorogénicos. Es decir, se depositaron después de la estructuración correspondiente a la orogénesis alpina que articuló el cinturón bético y con él su continuación nororiental; el denominado Promontorio Balear, en el cual se enmarca la isla de Menorca. Los efectos de la estructuración alpina son visibles en la zona de *Tramuntana* de Menorca, donde, en los materiales anteriores al Mioceno superior, puede apreciarse un complejo sistema de cabalgamientos (Roca, 1992).

Los depósitos neógenos presentan tan sólo fracturación extensiva (Gelabert *et al.*, 2005). Se trata de dos sistemas con orientaciones distintas: una más general de dirección NW-SE, con saltos superiores al orden decamétrico y una longitud kilométrica con un ligero buzamiento preferente hacia el SW; así como un segundo sistema, de dirección NNE-SSW, en el que destaca la falla de Santa Eulàlia-Son Bou. (Bourrouilh, 1983; Roca, 1992; Rosell y Llopart, 2002)

Según Gelabert (2003) y Gelabert *et al.* (2005), esta falla extensiva de edad miocena habría actuado de forma compresiva con posterioridad (Plio-Cuaternario), dando un fenómeno de inversión tectónica y provocando la formación de un anticlinal muy laxo con eje aproximado N-S y que definiría la estructura general del *Migjorn* de Menorca. Como consecuencia del cual, aflorarían en la línea de costa del sector central del sur de la isla, las facies del Mioceno superior más profundas (Unidad Inferior de Barras), mientras que en los extremos (Maó y Ciutadella) aflorarían los niveles superiores (Unidad Arrecifal) (Fig. 3). Relacionada con la estructura anticlinal, se observan un conjunto importante de diaclasas con orientaciones variables en función de su localización en el anticlinal suave. Así en los flancos oriental y occidental predominan unas direcciones E, ENE y ESE, mientras que en el sector central los trazados N, NNE y NNW son los predominantes.

Es destacable, también, la fracturación presente con una dirección paralela a costa, responsable, en su mayor parte, de su trazado y de la formación de los imponentes acantilados, así como el trazado característico en forma de semicírculo en las inmediaciones de la albufera de Son Bou asociado a una falla extensional de tipo *rollover*.

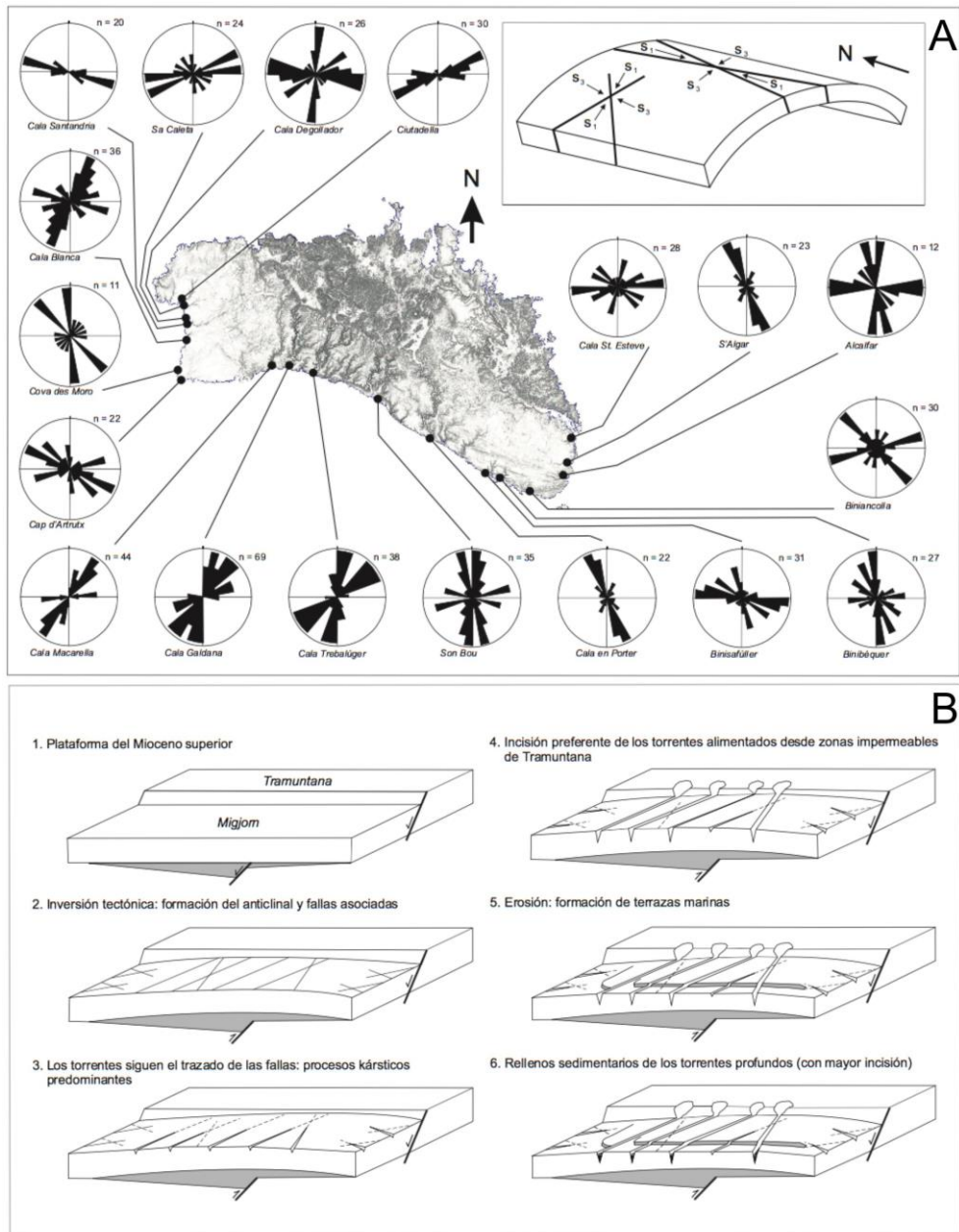


**Figura 3.** Esquema de la distribución de la paleotopografía durante el Mioceno superior. Corte W-E de la zona del Migjorn durante el Mioceno superior (1) y su posterior evolución durante el Plio- Cuaternario (2). Modificado de Gelabert (2003).

**Figure 3.** Paleotopography during the Upper Miocene. W-E Migjorn section during the Upper Miocene (1) and its evolution during the Plio-Quaternary (2). After Gelabert (2003).

### 3 | El papel de la estructura en el modelado del litoral menorquín

La forma anticlinal de eje N-S que caracteriza la plataforma carbonatada del Mioceno superior del Migjorn de Menorca controla, como hemos comentado, la distribución y características de la fracturación y diaclasamiento de los materiales miocenos. Así quedan perfectamente delimitadas tres áreas con una red drenaje de ca-



**Figura 4.** A) Situación de las estaciones de fracturación realizadas sobre el mapa de pendientes de Menorca. Diagrama en rosa de las orientaciones de falla. En el recuadro, asociación ideal de fallas y sistema de esfuerzos en un anticlinal. B) Esquema de la evolución geodinámica del sistema de torrentes del Migjorn de Menorca Modificado de Gelabert (2003).

**Figure 4.** A) Fracture rose directions along the Migjorn of Menorca. Faults and joints schema in the upper-right box. B) Migjorn streams geodynamic evolution. After Gelabert (2003).



racterísticas bien diferenciadas (Gelabert *et al.*, 2005; Segura *et al.*, 2007): a) la parte central, más elevada, destaca por un sistema de barrancos, con cauces muy encajados y paredes muy verticalizadas, que siguen el trazado de la fracturación debida a la inversión tectónica de la falla normal de Son Bou-Santa Eulàlia. El grado de incisión y encajamiento es variable en función de la proporción de rocas impermeables expuestas en cada una de las cuencas de drenaje); b) los sectores oriental y occidental, muy diferenciados, presentan barrancos de pendientes suaves y escasa incisión de los cauces, además de un trazado con tendencias E-W, que encaja también con la estructuración del antifórme.

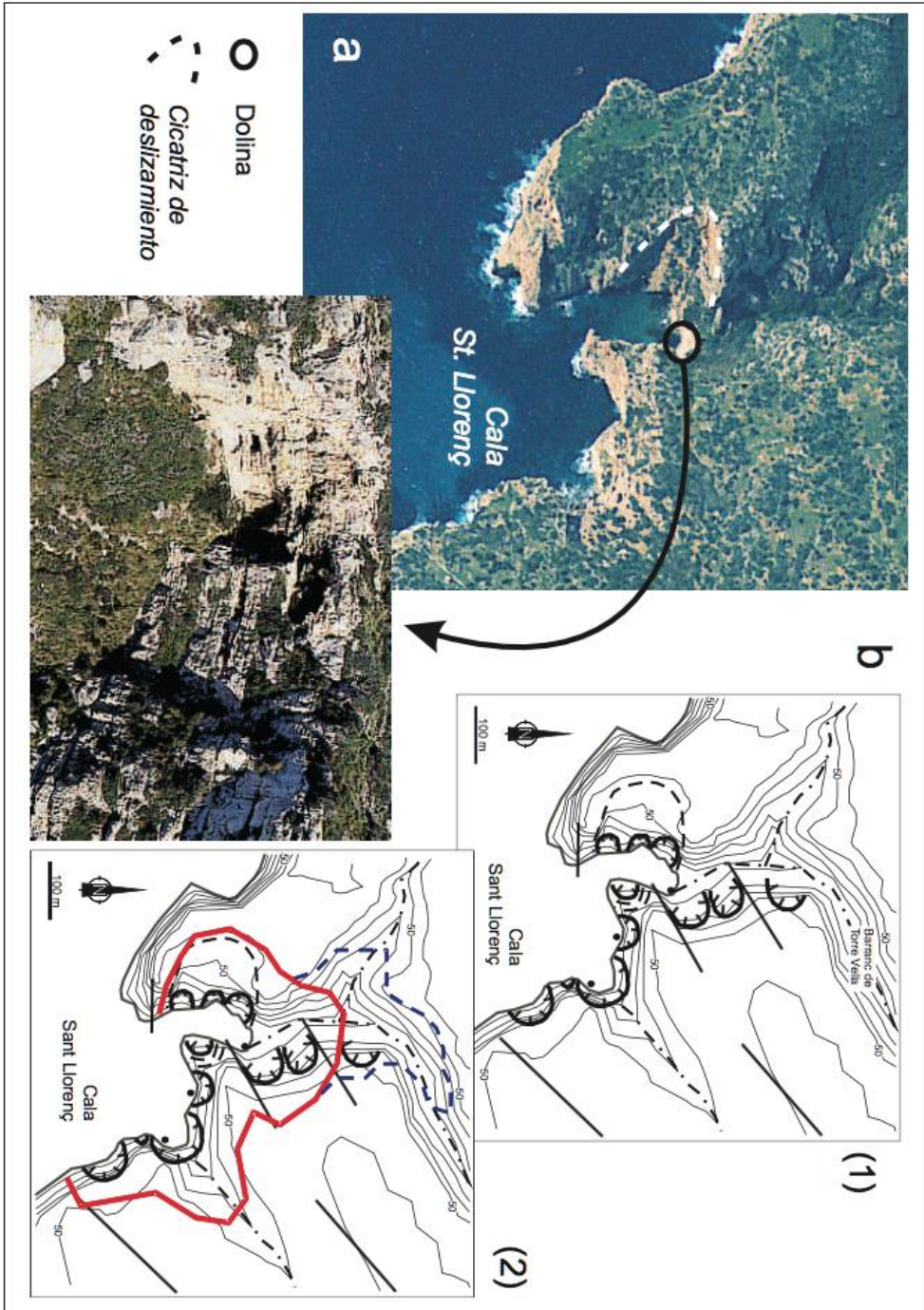
La principal orientación del cauce de los barrancos coincide claramente con las principales orientaciones de las fracturas medidas en la plataforma carbonatada miocena (Fig. 4). La fracturación es no tan sólo visible en el desarrollo y trazado de los torrentes y en el de la línea de costa o en las desembocaduras de los barrancos, sino que, al favorecer la circulación del flujo freático, también controla el desarrollo y evolución de los conductos kársticos del subsuelo, así como de su evolución y distribución de las formas superficiales, principalmente las de colapso. De toda esa conjunción de procesos e interferencia entre modelado fluvial, kárstico, litoral y tectónica, es ejemplo paradigmático una macroforma, tan característica en el Mediterráneo, como la cala.

#### 4 | El papel del karst en la evolución del litoral menorquín

En el *Migjorn* de Menorca, los procesos de modelado producto de la disolución kárstica –tanto del endokarst como del exokarst– son básicos para entender las morfologías presentes, especialmente en la zona litoral. La climatología templada, con una pluviometría más o menos regular y marcado carácter estacional, favorece la evolución de los procesos kársticos (García-Senz, 1985). Eso, sin menoscabo de la interferencia con otro tipo de procesos, como puedan ser los fluviales y los marinos, actuando siempre sobre los depósitos tabulares miocenos que presentan una importante diaclasación estructural que condiciona el flujo hídrico.

Podemos considerar las diversas formas de tipo kárstico a diferentes escalas. En nuestro caso ponderamos dos escalas que definen los principales accidentes del litoral. Una primera que podemos encasillar como de macroescala y que, en su vertiente más simple, relacionamos con las calas. Así, en otro orden de magnitud, la microescala, en la que englobaríamos todas las morfologías desarrolladas sobre el sustrato rocoso de la línea de costa asociadas al lapiaz o *karren* litoral.

Las calas, tradicionalmente, se han asociado a la incisión fluvial que tuvo lugar durante el último o últimos periodos glaciales. La posterior inundación y conversión a un ambiente de estuario durante la transgresión holocena habría dado lugar a esta forma de costa entre acantilados (Rosselló, 2005). Sin dejar de lado el importante papel que pueda jugar la red de fracturación en el trazado –especialmente en el final del recorrido de los torrentes así como en el de la línea de costa y la forma de las calas (Rosselló, 1995)–, la gran variabilidad morfológica y el papel poco claro de los actuales procesos fluviales hacen pensar en la intervención de otros procesos para explicar el desarrollo y evolución de los barrancos y sus cauces y, por consiguiente, de las calas. En este sentido se aboga por una clara interrelación entre la cala y el modelado kárstico (Fig. 5).



Un claro ejemplo lo podemos focalizar en Cala Galdana. Aunque muy modificada en la actualidad, puesto que se trata de un importante centro turístico, la apariencia del conjunto, es claramente de desembocadura fluvial con un importante relleno sedimentario y un ambiente de albufera y restinga originado en la última transgresión flandriense (Fornós *et al.*, 1998). El barranco presenta, en esta zona baja, una trayectoria meandriforme, de perfil cóncavo. En la cala, propiamente dicha, las paredes verticales muestran también estas formas cóncavas delimitadas claramente por paredes muy verticalizadas y favorecidas por una diaclasación (fracturación) vertical de direcciones N50-60° y N120-140°, así como muy relacionadas con hundimientos y colapsos de tipo kárstico. Dichos hundimientos son muy visibles en la línea de costa actual y también es muy patente su relación con la fracturación las paredes de los acantilados. La relación entre dolinas, conductos verticales, fracturación y, en general, formas endokársticas horizontales es muy evidente en todo el sector (Rosselló *et al.*, 2002).

Exploraciones recientes en el endokarst sumergido litoral (Gràcia *et al.*, 2000) ponen de manifiesto un cierto paralelismo entre la presencia de conductos endokársticos y el trazado de los actuales lechos de los barrancos. Este fenómeno abogaría por el clásico modelo de evolución de litoral carbonatado como producto de la zona de disolución preferente en la zona de mezcla de aguas en los acuíferos marinos carbonatados (Smart y Whitaker, 1991), donde la cuña de agua marina interacciona con las aguas freáticas continentales (Whitaker y Smart, 1990; Mylroie y Carew, 1990). La presencia de fracturación y/o diaclasamiento importante, transversal a la línea de costa, en la zona central del *Migjorn* de Menorca, favorece la canalización del flujo a través de dichas discontinuidades (Back *et al.*, 1984), ahondándose de esta manera en los procesos de disolución de forma digitada e incrementándose así la porosidad kárstica que, a la larga facilitará la actividad abrasiva marina gracias a los puntos de debilidad creados, bien sea en forma de conductos o depresiones.

A este proceso hay que añadir la variabilidad del nivel del mar durante el Pliocuatnario debido a las fluctuaciones glacio-eustáticas. Dicha variabilidad, con oscilaciones de orden superior a los cien metros, daría lugar a la superposición de varios niveles de disolución que se relacionarían con momentos de estabilidad del nivel del mar y que, en su proceso evolutivo, darían lugar a la formación de cavidades asociadas a depresiones kársticas o dolinas y cañones kársticos. El colapso de buena parte de estas cavidades se daría en momentos de descenso del nivel marino, como respuesta a la pérdida de soporte hidráulico. El mecanismo no se desarrollaría de forma única, sino que el resultado final suele ser una concurrencia de procesos fluviales, kársticos y, en última instancia, marinos que derivan en una serie de formas entre las que destaca, por su singularidad, la cala que abordaremos más adelante.

Desde el punto de vista kárstico -a microescala- tampoco puede obviarse la presencia de un modelado como el del lapiaz o karren litoral (Ginés, 2000; Gómez-Pujol y Fornós, 2004c) recurrente en buena parte del litoral carbonatado del sur y que

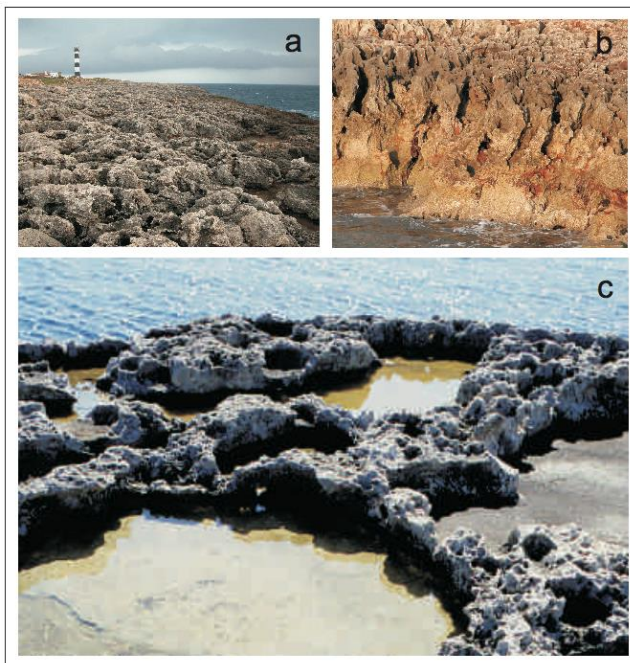
(página anterior)

**Figura 5.** Modelo evolutivo de formación de una cala y barranco asociado por coalescencia de dolinas de colapso. Ejemplo de Cala Sant Llorenç. Modificado de Fornós (2003).

**Figure 5.** *Cala and stream evolution model. Notice that the stream is associated to the coalescence of different collapse doline. Example from Cala Sant Llorenç. After Fornós et al. (2003).*

**Figura 6.** Lapiaz o karren litoral bien desarrollado sobre los niveles calcareníticos del Mioceno superior de la zona del Migjorn de Menorca. (a) Aspecto general en la zona del Cap d'Artrutx, (b) desarrollo de los pináculos en Cala Blanca, (c) cubetas o kame-nitzas en el área de Punta Prima. Modificado de Fornós (2003).

**Figure 6.** Coastal karren intensively developed at the Upper Miocene calcarenitic rock outcrops along the Menorcan Migjorn coast. (a) General overview at Cap d'Artrutx, (b) Pinnacles forms at Cala Blanca, (c) basin pools at Punta Prima. After Fornós (2003).



y abarca todas las formas de alteración desarrolladas sobre las rocas carbonatadas en ambientes litorales en los cuales la disolución, junto con la actividad biológica y otros procesos como la haloclástia, ejercen un papel esencial (Gómez-Pujol y Fornós, 2009).

Se puede observar una clara relación entre el desarrollo del lapiaz litoral y la forma general de los acantilados o costa rocosa en general, así como de los aspectos texturales que presenta la roca sobre la que se generan. Así, el máximo desarrollo se da en la zona de Migjorn tanto en las calcarenitas del Mioceno superior como en las eolianitas cuaternarias cuando éstas están presentes. Especialmente llama la atención el grado de evolución del lapiaz que se da en la costa baja rocosa tanto occidental (Ciutadella) como Oriental (Maó), mientras que, en la zona central, tanto por la altura y verticalidad de sus acantilados como por su textura más calcisiltítica, el lapiaz costero presenta un desarrollo más moderado.

En la zona litoral del Migjorn de Menorca se pueden observar prácticamente todas las formas que se han descrito relacionadas con el lapiaz litoral, desde la más frecuente y característica como son las cubetas, pozas o *kamenitza*, hasta los alveólos o microalveólos (*pits*) o los pináculos (*pinnacles*) (Gómez-Pujol *et al.*, 2009). Todas ellas se distribuyen formando un claro gradiente resultado de la interacción de los procesos marinos, continentales y, en función de ello, de los parámetros ecológicos y de microhábitats generados (Fig. 6).

## 5 | Una macroforma emblemática: la cala

Si por una cosa destaca en general el paisaje del litoral calcáreo mediterráneo y, muy especialmente, el balear, del cual el menorquín es un ejemplo paradigmático, es



por la presencia de calas (Kelleat and Scheffers, 2009; Furlani *et al.*, 2016). El término cala tiene unos orígenes pre-indoeuropeos (Kranj, 1998) y se puede definir, a grandes rasgos, como una forma de bahía en el litoral rocoso de la que ya Penck (1894) destacó como característica básica, la presencia de paredes verticalizadas y la inundación marina posterior a la profunda incisión acaecida durante periodos de descenso del nivel marino (Fig. 7). Aunque esta forma puede darse en cualquier litología, se ha venido considerando la aplicación de dicho término, tan sólo cuando está asociada a plataformas carbonatadas (Rosselló, 2001; Gómez-Pujol *et al.*, 2013), y en algunos casos teniendo presente que buena parte de los cursos fluviales a los que están asociados no son funcionales (Rosselló, 2005).

En el caso de las calas presentes en el *Migjorn* de Menorca, parece evidente que el desarrollo y evolución de las mismas es compleja, con la intervención de diversas agentes y controles, entre los cuales la influencia kárstica jugaría un rol importante. Así, la evolución del modelado kárstico en una plataforma carbonatada tabular (con marcada estratificación prácticamente horizontal y con fracturación y/o diaclasación más o menos regular y distensiva), desarrollada en la zona del endokarst litoral por influencia de la corrosión preferente en la zona de mezcla de aguas, junto con la repetitiva oscilación glacioeustática del nivel marino, implicaría una subordinación de la evolución de la red de drenaje, a la captura de depresiones kársticas (dolinas) (Fornós, 2004), favoreciéndose el retroceso de los acantilados y configurando en los valles incisos la forma de cala.

Uno de los aspectos sedimentológicos y de forma asociados a las calas y a los barrancos –a tratar en detalle en el próximo apartado– es el relleno sedimentario de



**Figura 7.** Un típico ejemplo de cala delimitado por paredes verticalizadas. Cala en Porter.  
**Figure 7.** A paradigmatic example of cliffy-sided cala at Cala en Porter.

sus fondos que es muy variable en función del espacio de acomodación. A su vez, éste está intrínsecamente relacionado con la incisión del cauce fluvial-torrencial y con el estadio de desarrollo evolutivo de la cala (Segura *et al.*, 2007).

Desde un punto de vista morfométrico la relación entre longitud (anchura de la bahía) y penetración de la cala presenta una distribución de valores característica y diferenciada de otros tipos de costas-valles de inundación, que en el caso de Menorca no depende tanto del grado de incisión fluvial, como del espaciado de la fracturación y del retoque kárstico (Gómez-Pujol *et al.*, 2013).

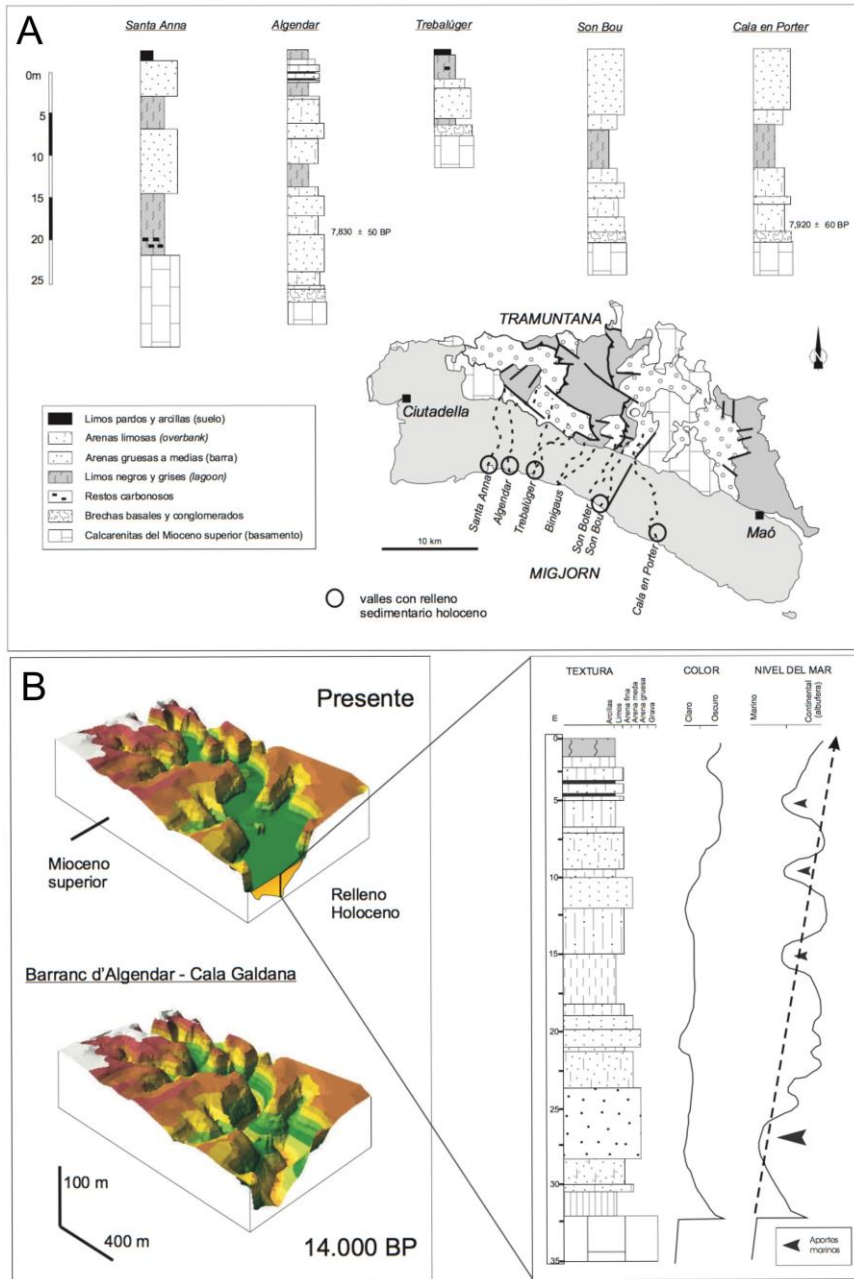
## 5 | El relleno de los fondos de los barrancos

Los aspectos hidrogeomorfológicos estudiados en el *Migjorn* de Menorca así como diversos estudios sedimentológicos de sondeos de reconocimiento han permitido conocer la magnitud del relleno sedimentario y las características de los valles encajados (Fornós *et al.*, 1998; Fornós, 1999).

Las características de estos cursos fluviales presentan diferencias a lo largo de toda la costa meridional, pudiéndose diferenciar claramente dos sectores en base a sus atributos. Así, en los márgenes oriental (zona de Maó) y occidental (zona de Ciutadella) los barrancos presentan un recorrido longitudinal relativamente corto –en pocas ocasiones superior al kilómetro– y los cauces son sólo apreciables cerca de la línea de costa, aunque allí, con una incisión importante y con rasgos kársticos que ensombrecen el modelado fluvial (i.e. valles colgados, dolinas, poljes). En cambio, en la zona central del *Migjorn*, los barrancos presentan trazados fluviales de mayor recorrido, atravesando todo el altiplano meridional e incluso, en muchos de ellos, adentrándose en la zona de *Tramuntana*. La característica más interesante de dichos barrancos es la presencia en sus tramos finales de unos fondos planos, relativamente anchos (debidos al relleno sedimentario), que vienen delimitados por paredes verticales, relativamente altas. Estas paredes verticales están esculpidas en los típicos materiales calcareníticos que constituyen toda la zona del *Migjorn* y que presentan una marcada estratificación con una suave pendiente en dirección sur.

De oeste a este, los barrancos que presentan fondos planos con relleno sedimentario importante son: el Barranc de Santa Anna que desemboca en Cala Macarella, el Barranc d'Algendar que vierte sus aguas en Cala Santa Galdana, el Barranc de Trebalúger que da nombre a la cala homónima, el Barranc de Son Bou y Barranc de Son Boter que vierten sus aguas en la Albufera de Son Bou y, finalmente, el Barranc de Cala en Porter que finaliza en la cala de su mismo nombre (Fig. 8). Todos ellos tienen su cabecera en los materiales impermeables de la zona de *Tramuntana* y siguen un curso relativamente rectilíneo en dirección sur. En esta zona central se localizan algunos otros torrentes de características geomórficas similares, aunque relativamente más cortos, como el de Binigaus o el de Sa Torre, pero que en sus desembocaduras no presentan rellenos sedimentarios.

Desde un punto de vista geomorfológico, los rellenos sedimentarios de los barrancos adoptan en la parte baja de los mismos una topografía plana asociada a una sedimentación de materiales finos que queda limitada por unas paredes prácticamente verticales cortadas en los materiales miocenos calcareníticos y/o calcisiltíticos. Ese fondo de las calas-barrancos, subhorizontal, no supera en ningún caso los 4-5 m sobre la actual cota del nivel del mar.



**Figura 8.** A) Esquema geológico y geomorfológico de la isla de Menorca con el trazado de los principales torrentes de la zona central, y las columnas estratigráficas esquemáticas de los rellenos sedimentarios en algunos de ellos. B) Modelo evolutivo en 3D del Barranc d'Algendar (Cala Galdana) y columna estratigráfica sintética. Modificado de Fornós y Segura (2003).

**Figure 8.** A) Geomorphic and geological sketch of Menorca. Notice the main streams in the central sector of the island, as well as, the logs at the different stream mouths. B) Evolution model for the Barranc d'Algenda (Cala Galdana) and stratigraphic log. After Fornós y Segura (2003).

La morfología de la incisión se ha estudiado mediante sondeos eléctricos (Pardo *et al.*, 1997) observándose una incisión máxima que supera los 50 m en los barrancos de Macarella, Cala Galdana y Trebalúger. Aunque en los sondeos mecánicos realizados tan sólo se ha podido alcanzar una potencia máxima del relleno sedimentario de 31 m en Cala Galdana –probablemente debido al no encontrarse alineado con el depocentro del barranco– no puede descartarse la presencia de sumideros de tipo kárstico como los descritos aguas arriba (Pardo *et al.*, 1997). La potencia del relleno sedimentario disminuye de forma progresiva aguas arriba, llevando aparejadas tanto una variación en el tipo de relleno como de las facies sedimentarias.

La sedimentación presente en estos rellenos es mayoritariamente de materiales finos, lutíticos, de coloración oscura que alternan con materiales arenosos no consolidados, blanquecinos y pardos. Los materiales de tipo detrítico, como gravas o conglomerados, o materiales lutíticos, con coloraciones rojizas, son tan sólo testimoniales.

El conjunto de la secuencia del relleno sedimentario se interpreta como facies de transición litoral con diversos subambientes, caracterizados por una mayor o menor influencia marina. Así, en la base, suelen encontrarse gravas y a veces conglomerados con cantos redondeados a subangulosos y limos rojos que se interpretarían como facies de reacondicionamiento basal y depósitos de tipo fluvial. Estas facies presentan escasa potencia y una distribución muy aleatoria. Los limos negros y grises son la facies más abundante. Caracterizados por una importante presencia de la materia orgánica que, puntualmente, resulta en acumulaciones de restos carbonosos. Esta facies es rica en fauna de tipo salobre y localmente pueden observarse niveles con fauna y flora únicamente de agua dulce. Se interpreta como un ambiente de albufera. Arenas de gruesas a medias, bien clasificadas, con los granos subredondeados y escasa presencia de materia orgánica se intercalan con las anteriores facies y se corresponderían a materiales acumulados por la acción eólica y/o retrabajamiento marino en un sistema playa/duna típico. La presencia de niveles con arenas limosas ricas en fauna, con características claramente tanto marinas como salobres, se interpretaría como depósitos de transición del sistema playa-duna al sistema lagunar lacustre, probablemente formando pequeños abanicos de rebase, intralagunares, y deltas de inundación. La secuencia en todos los casos acaba con facies limosas y/o arenosas de colores parduzcos que presentan abundantes restos vegetales y que se corresponden con los procesos de edafogénesis que se dan en la actualidad.

Las dataciones de algunos niveles de los sondeos indican que toda la secuencia corresponde al Holoceno, siendo la edad más antigua, la obtenida en la base del relleno de Cala en Porter, con una edad de 7920±60 BP (Yll, 1992 y Yll *et al.*, 1994).

### **Agradecimientos**

El presente trabajo es una contribución a los proyectos de investigación MINECO CGL2013-48441-P y CGL2016-79246-P (AEI/FEDER, UE).

### **Bibliografía**

Back, W., Hanshaw, B.B. y Van Driel, J.N. (1984): Role of groundwater in shaping the Eastern Coastline of the Yucatan Peninsula, Mexico. En: La Fleur, R.G. (ed.), *Groundwater as a*



- Geomorphic Agent*. Allen and Unwin, Inc. London. The Binghamton Symposia in Geomorphology: International Series, 13(12): 281-293.
- Bourrouilh, R. (1983): *Stratigraphie, sédimentologie et tectonique de l'île de Minorque et du Nord-Est de Majorque (Baléares). La terminaison Nord-orientale des Cordillères Bétiques en Méditerranée occidentale*. Memorias del Instituto Geológico y Minero de España, 99: 1-672.
- Fornós, J.J. (1999): Rebliment holocènic de la vall incisa de Santa Anna, Sud de Menorca (Mediterrània occidental). En: Rosselló, V.M. (ed.), *Geoarqueologia i Quaternari litoral, Memorial M.P. Fumanal*: 342-355. València, Publicacions de la Universitat de València
- Fornós, J.J. (2003): El karst y la evolución del litoral del Migjorn de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 101-110. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fornós, J.J. (2004): Morfologia costanera i processos litorals. El paper de la fracturació i el karst. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y 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. Palma, Societat d'Història Natural de Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Fornós, J.J. y Segura, F. (2003): El relleno de los fondos de los barrancos del Migjorn de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 111-121. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fornós, J.J., Fumanal, M.P., Pons, G.X., Barón, A., Fornés, A., Pardo, J.E., Rodríguez-Perea, A., Rosselló, V.M., Segura, F. y Servera, J. (1998): Rebliment holocènic a la vall incisa del barranc d'Algendar (Cala Galdana, sud de Menorca, Mediterrània Occidental). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 41: 173-189.
- Fornós, J.J., Pomar, L. y Ramos-Guerrero, E. (2002): Balearic Islands. In: Gibbons, W. and Moreno, T. (eds.) *The Geology of Spain*. The Geological Society. 327-334. London.
- Furlani, S., Papalardo, M., Gómez-Pujol, L. y Debrat, M. (2014): The rock coast of the Mediterranean and Black seas. En: Kenedy, D., Stephenson, W.J., Naylor, L. (eds.), *Rocky coast geomorphology, a global synthesis*: 77-87. London, Geological Society of London.
- García-Senz, J.M. (1985): *Estudio geomorfológico del karst del Migjorn menorquí*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Geodinámica Externa e Hidrogeología. Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona. 51 pp.
- Gelabert, B. (2003): La estructura geològica de Menorca. Las zonas de Tramuntana y Migjorn. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 39-48. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo, J.E., Rosselló, V.M. y Segura, F. (2005): Structurally controlled drainage basin development in the south of Menorca (Western Mediterranean, Spain). *Geomorphology*, 65: 139-155.
- Ginés, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca; una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra. Palma, Universitat de les Illes Balears.
- Ginés, J. (2003): El modelado kárstico. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 65-70. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Ginés, J. y Fornós, J.J. (2004): Caracterització del karst del Migjorn. La seva contribució al modelat del territori. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 259-274. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004a): Forma, procesos y zonación en el lapiaz -karren- litoral de Menorca, 1: aproximación morfométrica. En: Benito, G. y Díez-Herrero, M. (eds.),

- Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 347-355. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004b): Forma, procesos y zonación en el lapiaz –karren– litoral de Menorca, 2: observaciones mediante microscopía electrónica de barrido. En: Benito, G. y Díez-Herrero, M. (eds.), *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 347-355. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004c): Les microformes litorals del Migjorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2009): Coastal karren in the Balearic Islands. En: Ginés, J.J., Knez, M., Slabe, T. y Deybrodt, W. (eds.), *Karst rock features, karren sculpturing*: 487-502. Ljubljana, ZRC Publishing.
- Gómez-Pujol, L., Fornós, J.J. y Pomar, F. (2011): El karren litoral a les Illes Balears. *Endins*, 35 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 55: 99-112.
- Gómez-Pujol, L., Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Segura, F.S. y Onac, B.P. (2013): Structural control on the presence and carácter of calas: Observations from Balearic Islands limestone rock coast macroforms. *Geomorphology*, 194: 1-15.
- Gràcia, F., Clamor, B. y Lavergne, J.J. (2000): Les coves de Cala Varques (Manacor, Mallorca). *Endins*, 23: 41-57.
- Kelletat, D. y Scheffers, A. (2009): Europe, coastal geomorphology. En: Schwartz, M.L. (ed.). *Encyclopedia of Coastal Sciences*: 452-462. Berlin, Springer.
- Kranjc, A. (1998): Kras (The Classical Karst) and the development of karst science. *Acta Carsologica* 27, 151-164.
- Mylroie, J.E. y Carew, J.L. (1990): The flank margin model for dissolution cave development in carbonate platforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 413-424.
- Obrador, A. y Pomar, L. (2004): El Miocè de Migjorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Obrador, A., Pomar, L., Rodríguez-Perea, A. y Jurado, M.J. (1983): Unidades deposicionales del Neógeno menorquí. *Acta Geològica Hispànica*, 18: 87-97.
- Pardo, J.E., Rodríguez-Perea, A., Fornós, J.J., García, F. y Cervera, T. (1997): Caracterización de los fondos de las calas y los barrancos menorquines mediante sondeos eléctricos. *Dinámica Litoral Interior, Actas XV Congreso de Geógrafos Españoles*, 1: 191-203.
- Penck, A. (1894). *Morphologie der Erdoberfläched*. Engelhorn. Stuttgart.
- Pomar, L., Obrador, A., y Westphal, H. (2002): Sub-wavebase cross-bedded grainstone on a distally steepened carbonate ramp, Upper Miocene, Menorca, Spain. *Sedimentology*, 49: 139-169.
- Roca, E. (1992): *L'estructura de la conca Catalano-Balear: paper de la compressió i de la distensió en la seva gènesi*. Tesis Doctoral, Barcelona, Universitat de Barcelona. 330 pp.
- Rosell, J. y Llombart, C. (2002): *El naixement d'una illa. Menorca. Guia de geologia pràctica*. Maó, Institut Menorquí d'Estudis, 279 pp.
- Rosselló, V.M. (1995): Les cales, un fet geomòrfic epònim de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 38: 167-180.
- Rosselló, V.M. (2005): Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica. *Cuadernos de Geografía*, 77, 1-18.
- Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Gelabert, B., Giménez, J., Ginés, J., Pardo, J. y Segura, F. (2002): El papel del karst en el macromodelado litoral: el ejemplo de las calas de las Islas Baleares. En: Carrasco, F., Durám J.J. y Andreo, B. (eds.), *Karst and Environment*: 329-335. Madrid, ITGME.
- Segura, F.S., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y 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.

- Smart, P.L. y Whitaker, F.F. (1991): Karst processes, hydrology and porosity evolution. En: V.P. Wright, V.P, Esteban, M. y Smart, P.L. (eds.), *Palaeokarsts and Palaeokarstic Reservoirs*. P.R.I.S. Occ. Publ. Series, 2: 1-54. Reading, University of Reading.
- Whitaker, F.F. y Smart P.L. (1990): Active circulation of saline ground waters in carbonate platforms: Evidence from the Great Bahama Bank. *Geology*, 18: 200-203.
- Woodroffe, C.D. (2003): *Coasts. Form, process and evolution*. Cambridge, Cambridge University Press. 622 pp.
- Yll, E.I. (1992): *Estudi de l'evolució de la vegetació i el clima durant el Tardiglacial i el Postglacial a partir d'anàlisis pol·líniques del Delta de l'Ebre i de Menorca*. Tesis doctoral. Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Yll, E.I., Pérez-Obiol, R., Pantaleón-Cano, J. y Roure, J.M. (1997): Palynological evidence for climatic change and human activity during the Holocene on Minorca (Balearic Islands). *Quaternary Research*, 48: 339-347.



# Presencia de bloques de tsunamis en las costas rocosas de Menorca: análisis morfométrico

Francesc X. Roig-Munar<sup>1</sup>, Antonio Rodríguez-Perea<sup>2</sup>, José Á. Martín-Prieto<sup>1, 2</sup>,  
Joan Manuel Vilaplana Fernández<sup>3</sup> y Bernadí Gelabert Ferrer<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Q4atre Consultoria Ambiental, Es Migjorn Gran.

<sup>2</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>3</sup> Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. Grup RISKMAT, Universitat de Barcelona, Barcelona.

<sup>4</sup> Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

## RESUMEN

Se presenta el estudio morfométrico de los bloques depositados en tres sectores de la isla de Menorca, E, SE y N. Las terrazas litorales asociadas a acantilados de Menorca presentan acumulaciones de bloques de tamaño métrico que han sido transportados tierra adentro por tsunamis. Estos bloques, depositados individualmente o formando cordones paralelos a la costa, se encuentran a alturas que van desde 0 hasta 30 m sobre el nivel del mar y hasta 75 m tierra adentro. La mayoría de los bloques son rectangulares, de cantos angulosos y su peso oscila entre 0,25 y 27 T. Se han aplicado ecuaciones de transporte para discernir entre acumulaciones derivadas de eventos de tormenta o eventos de tsunami. Los resultados indican que todas las áreas analizadas presentan bloques de tsunamis y que sus orientaciones son coincidentes con las modelizaciones realizadas de trayectorias de ola de tsunami procedentes del N de Argelia

**Palabras clave:** bloques de tsunami, morfometría, acantilados, Menorca.

## ABSTRACT

This paper analyses the morphometric study of blocks deposited in three sectors of the island of Menorca, E, SE and N. The coastal terraces associated to Menorca cliffs show accumulations of metric-sized blocks that have been transported inland by tsunamis. These blocks, deposited individually or forming ridges parallel to the coast, are at heights ranging from 0 to 30 m above sea level and up to 75 m inland. Most of the blocks are rectangular, showing edges, which weight ranges from 0.25 to 27 T. Transport equations have been applied to discern between accumulations derived from storm or tsunami events. The results indicate that all the analysed areas present blocks of tsunamis which orientations are coincident with the model of tsunami wave trajectories coming from the N of Algeria.

**Keywords:** boulders, tsunamis, morphometry, cliffs, Menorca.

## 1 | Introducción

La existencia de bloques desplazados por tsunamis ha sido ampliamente documentada en el Mediterráneo (Maouche *et al.*, 2009; Goto *et al.*, 2009; Furlani *et al.*, 2014; Biolchi *et al.*, 2015; Roig-Munar, 2016). Diversos bloques aislados o bien en forma de cordones situados sobre la cornisa de los acantilados o de las terrazas de las costas rocosas son interpretados como sedimentos de tsunamis acaecidos a lo largo de los últimos siglos (Kelletat *et al.*, 2005; Mastronuzzi *et al.*, 2007; Maouche *et al.*, 2009; Pignatelli *et al.*, 2009; Roig-Munar *et al.*, 2015). La frecuencia y magnitud de los procesos erosivos y sedimentarios que se dan en las costas rocosas permiten la conservación de estos depósitos de grandes bloques (Roig-Munar *et al.*, 2016a y b).

En las islas Baleares se encuentran acumulaciones de bloques en la cornisa de los acantilados o en las terrazas de las costas rocosas, algunos situados por encima de las mayores alturas de ola del registro histórico, y a grandes distancias de la cornisa del acantilado. La ausencia de cantiles tras las terrazas donde se acumulan tales depósitos, junto a las largas distancias a las que se encuentran los primeros accidentes del relieve, permiten descartar que su emplazamiento se deba a caídas gravitacio-

nales. Los bloques situados sobre acantilados bajos y cercanos a la línea de costa son ocasionalmente retrabajados por el oleaje, sin perder sus características morfológicas, de imbricación y orientación propias de eventos de gran energía (Scheffers y Kinis, 2014; Roig-Munar *et al.*, 2016a). De hecho, las modelizaciones de Roger y Hébert (2008) concluyen que se requiere un estudio para determinar la existencia de depósitos de tsunamis en el Mediterráneo occidental, con especial atención en Baleares.

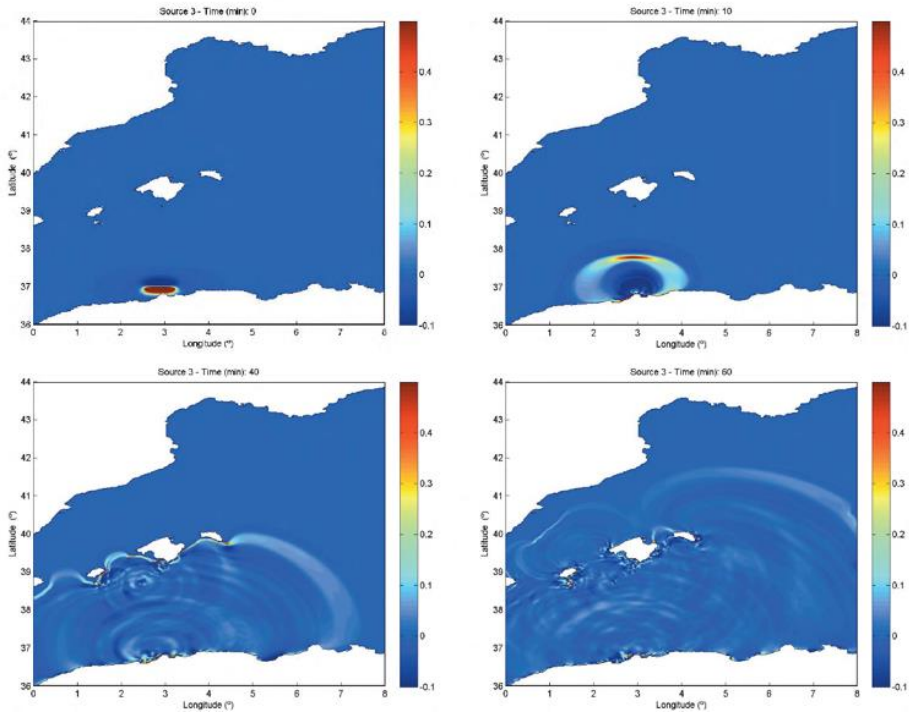
La presencia de bloques en las costas rocosas de Menorca fue estudiada inicialmente por Gómez-Pujol y Roig-Munar (2013) en una localidad de la costa SW de Menorca, con una primera aproximación netamente metodológica. Roig-Munar *et al.* (2014, 2015 y 2016b) ampliaron el alcance del estudio al resto de las costas de Baleares (Roig-Munar, 2016; Roig-Munar *et al.*, 2016b). Se aplicaron diferentes ecuaciones para discernir el mecanismo de deposición de los bloques –tormentas vs. tsunamis– (Scheffers y Kelletat, 2003; Nott, 2003; Pignatelli *et al.*, 2009, Barbano *et al.*, 2010; Engel y May, 2012), y la relación de estos últimos con las trayectorias de tsunamis provenientes del N de África.

## 2 | Marco geológico y geomórfico

Tanto desde un punto de vista geológico como geomorfológico, Menorca se divide en dos unidades morfoestructurales separadas por una línea imaginaria WNW-ESE que se extiende desde Maó hasta la ensenada de Cala Morell. La mitad meridional, el *Migjorn*, abarca todo el S de Menorca y está formada por materiales del Mioceno superior en forma de un anticlinal muy laxo con el eje orientado de N-S; mientras que la mitad septentrional, la *Tramuntana*, reúne materiales de edad paleozoica, mesozoica y oligocena que, fracturados y plegados por la orogenia alpina, constituyen la mitad septentrional de la isla. De este modo la estructura de *Tramuntana* refleja principalmente la etapa compresiva desarrollada durante el Oligoceno superior y el Mioceno medio, mientras que la estructura de *Migjorn* refleja una etapa extensiva del Mioceno superior seguida de una compresión de menor escala e intensidad durante el Plio-Cuaternario (Gelabert *et al.*, 2005).

Menorca presenta un clima marítimo caracterizado por una altura de ola significativa entre 0,5 y 1,5 m, con períodos de máximos asociados de 5 a 7 s y con una componente dominante del SW, seguida de una ESE. El régimen extremo ofrece probabilidades del 90% para eventos anuales de 5 m de altura de ola significativa, y valores de 7,8 y 8,3 m para periodos de recurrencia, respectivamente, de 20 y 50 años. Los valores extremos de los últimos 50 años presentan alturas de olas significativa de alrededor de 11 m en el sector N de Baleares y en torno a 8,5 m en el SE de Menorca (Cañellas *et al.*, 2007). La ola máxima registrada en la boya de Maó data de noviembre de 2001, con dirección NE, y alcanzó los 13,5 m.

El registro de sismicidad histórica e instrumental del Mediterráneo occidental, pone de manifiesto que el N de Argelia está expuesto a riesgos sísmicos relevantes, siendo el último evento sísmico registrado el acaecido en Zemmouri el 21 de mayo de 2003. Este fue generado por una falla inversa y con una magnitud de 6,9, fue el responsable del tsunami que alcanzó las Baleares con sobrelevaciones máximas por remonte (*runup*) de 3 m. Las simulaciones de este tsunami muestran su impacto directo en Menorca (Hébert y Alasset, 2003; Alasset *et al.*, 2006). Álvarez-Gómez *et al.*



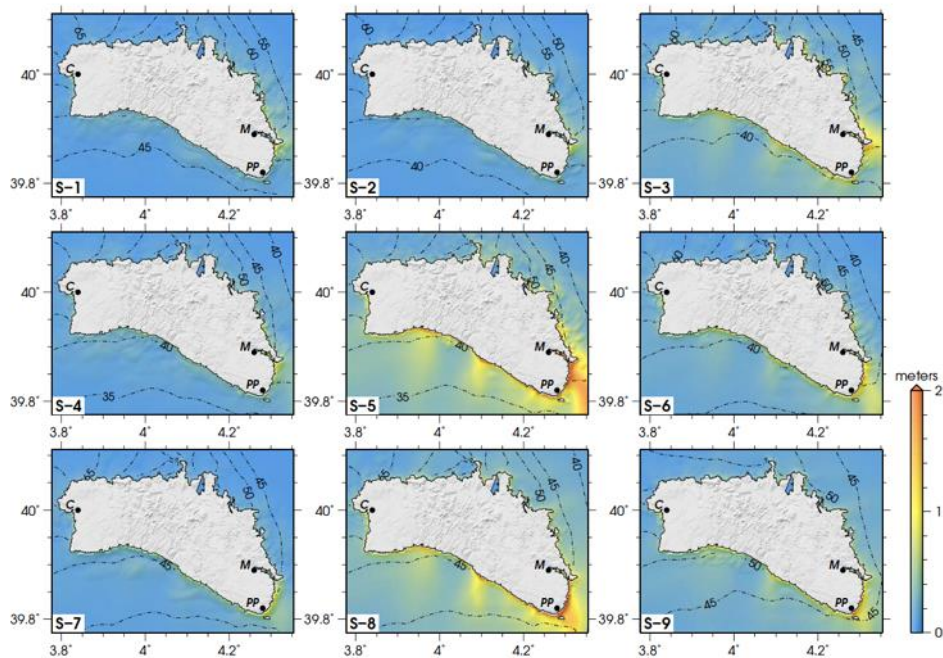
**Figura 1.** Modelización de las fuentes tsunámicas del N de Argelia y el efecto de escudo de las islas Baleares frente la península Ibérica. Fuente: Álvarez-Gómez *et al.* (2010).

**Figure. 1.** *Tsunami waves propagation from the N of Algeria and the role of Balearic Islands as a mainland protection.* Source: Álvarez-Gómez *et al.* (2010).

(2010) realizaron una modelización de la propagación del tsunami (Fig. 1), en la que concluían que debido a los cambios de batimetría y a la existencia de una pronunciada pendiente en la plataforma continental de las Baleares, la ola del tsunami sufrió una importante refracción con trayectorias perpendiculares a la plataforma continental.

### 3 | Método

En una primera fase exploratoria se localizaron, identificaron y caracterizaron las áreas con presencia de acumulaciones de bloques en crestas de acantilados o costas rocosas bajas a lo largo del litoral de Menorca. Una vez catalogados los depósitos, se procedió al análisis morfométrico de los bloques, calculando los valores del eje máximo (A), eje mínimo (B) y eje intermedio (C) de cada bloque para determinar su volumen y se estimaron las densidades de la roca para calcular su masa. Para determinar un volumen más preciso se aplicó la triangulación de volúmenes de Robinson *et al.* (2008). En paralelo, de cada uno de los bloques se han obtenido los ángulos de orientación y buzamiento, así como su cota sobre el nivel del mar y la distancia a la línea de costa. Una vez caracterizada la forma y dimensiones de los bloques, se ha calculado el valor del Transporte Figure (TF), de Scheffers y Kelletat



**Figure 2.** Mapas de elevación de ola máxima y tiempos estimados de viaje del tsunami para la isla de Menorca. El sombreado representa la elevación de las olas valor. Los contornos muestran el tiempo de viaje del tsunami con intervalos de 5 minutos (Álvarez *et al.*, 2011).

**Figure 2.** Maximum wave height and tsunami wave front travel time for Menorca (dashed lines). Source: Álvarez *et al.* (2011).

(2003), consistente en el producto de tres parámetros: el peso del bloque, la distancia respecto al mar a la que se encuentra y la altura sobre el nivel del mar. En paralelo, también se han aplicado las ecuaciones de Nott (2003), Pignatelli *et al.* (2009), Barbano *et al.* (2010) y Engel y May (2012) para calcular los valores hidrodinámicos necesarios para el arranque, desplazamiento y deposición de los bloques bajo diferentes escenarios hidrodinámicos y de contexto fisiográfico (i.e. bloque sumergido, bloque subaéreo y bloque delimitado por fracturas). Estas ecuaciones permiten establecer alturas de sobre elevación del rompiente (*run-up*) para olas de tormenta ( $H_s$ ) y/o tsunamis ( $H_t$ ) que necesarias para la remoción y/o arranque y posterior deposición de los bloques (Tabla 1).

#### 4 | Áreas de estudio

Se han analizado campos de bloques en 24 localidades, distribuidas en 3 sectores o fachadas marítimas en los que se identifican bloques asociados tanto a flujos de tsunami como a flujos de tormenta (Roig-Munar, 2016) (Fig. 3).

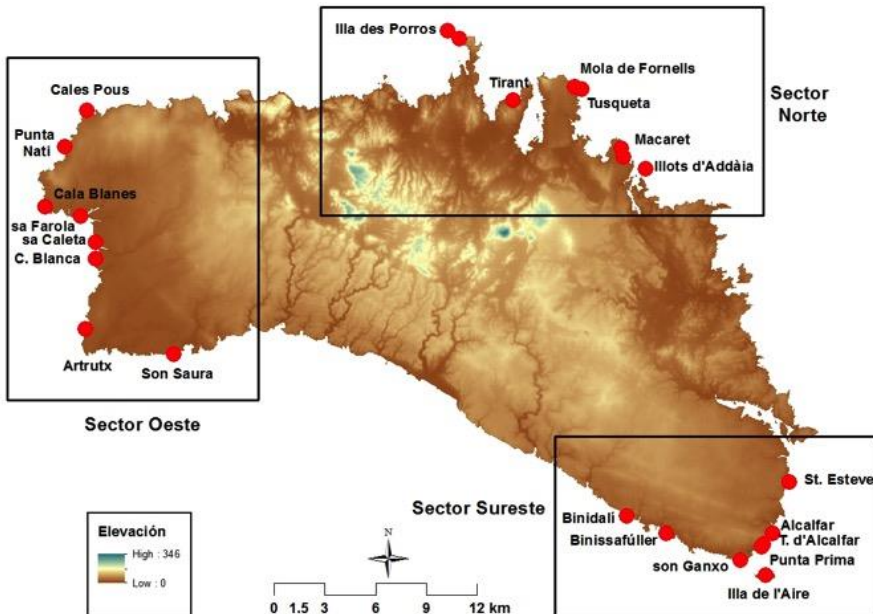
En el Sector Sudeste se han estudiado un conjunto de siete localidades. Es un sector que se caracteriza por presenta una costa escarpada con acantilados de hasta 15 m de altura que disminuyen de forma progresiva hacia el extremo oriental hasta la



	Criterio	Ht	Hs
Nott (2003)	sumergido	$H_t = [0,25(\rho_s - \rho_w / \rho_w) 2a] / [(C_d (ac/b^2) + C_i)]$	$H_s = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w) 2a] / [(C_d (ac/b^2) + C_i)]$
	subaéreo	$H_t = [0,25 (\rho_s - \rho_w / \rho_w) [2a - C_m (a/b) (\dot{u}/g)] / [C_d (ac/b^2) + C_i]$	$H_s = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w) [2a - 4C_m (a/b) (\dot{u}/g)]] / [C_d (ac/b^2) + C_i]$
	limitado por juntas	$H_t = [0,25 (\rho_s - \rho_w / \rho_w) a] / C_i$	$H_s = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w) a] / C_i$
Pignatelli (2009)	limitado por juntas	$H_t = [0,5 \cdot c \cdot (\rho_s - \rho_w / \rho_w)] / C_i$	
Engel and May (2012)	subaéreo	$H_t = 0,5 \cdot \mu \cdot V \cdot \rho_b / C_D \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot \rho_w$	$H_s = 2 \cdot \mu \cdot V \cdot \rho_b / C_D \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot \rho_w$
	limitado por juntas	$H_t = (\rho_b - \rho_w) \cdot V \cdot (\cos \theta + \mu \cdot \sin \theta) / 2 \cdot \rho_w \cdot C_L \cdot a \cdot b \cdot q$	$H_s = (\rho_b - \rho_w) \cdot V \cdot (\cos \theta + \mu \cdot \sin \theta) / 0,5 \cdot \rho_w \cdot C_L \cdot a \cdot b \cdot q$

**Tabla 1.** Ecuaciones aplicadas a cada bloque para la estimación de los forzamientos por tormenta o tsunami.  $H_t$  altura de la ola de tsunami,  $H_s$  altura de la ola de temporal,  $\rho_s$  densidad del bloque,  $\rho_w$  densidad del agua de mar,  $V$  volumen del bloque,  $\mu$  coeficiente de fricción,  $a$  eje mayor del bloque,  $b$  eje medio del bloque,  $c$  eje menor del bloque,  $g$  fuerza de la gravedad,  $q$  coeficiente de volumen,  $C_d$  coeficiente de arrastre,  $C_i$  coeficiente de levantamiento,  $C_m$  coeficiente masa,  $\dot{u}$  velocidad del flujo,  $\theta$  pendiente del acantilado.

**Table 1.** Equations for determining the tsunami or the sea storm boulder triggering mechanism.  $H_t$  tsunami wave height,  $H_s$  sea storm wave height,  $\rho_s$  Boulder density,  $\rho_w$  sea water density,  $V$  boulder volume,  $\mu$  friction coefficient,  $a$  Boulder major axis,  $b$  boulder medium axis,  $c$  boulder minimum axis,  $g$  gravity,  $q$  volume coefficient,  $C_d$  transport coefficient,  $C_i$  elevation coefficient,  $C_m$  mass coefficient,  $\dot{u}$  flow velocity,  $\theta$  cliff slope.



**Figura 3.** Zonas de estudio citadas en el texto.

**Figure 3.** Study site location cited in the text.

cota cero en cala Sant Esteve y Punta Prima. Este litoral se encuentra sometido a un clima marítimo caracterizado en los últimos 50 años por una altura máxima de ola significativa de 8,5 m y dirección SE y de olas de 10 m del NNE al sector SE-NE (Cañellas *et al.*, 2007). El Sector Oeste, donde se han caracterizado ocho localidades, discurre por una costa escarpada y articulada, muy condicionada por la fracturación y por la presencia de calas asociadas a barrancos (Segura y Pardo, 2003). Este litoral se encuentra sometido a un clima marítimo caracterizado en los últimos 50 años por una altura máxima de olas significativas de 8 m con un componente dominante del SW en la costa S y de 10 m con un componente NNE en tramo N (Cañellas *et al.*, 2007). En el Sector Norte, se han analizado ocho localidades. En términos generales se trata de una costa escarpada y articulada muy condicionada por la fracturación, recortada sobre roquedos del Triásico y el Jurásico. El litoral se caracteriza por una imponente fachada de acantilados superiores a los 10 m. Este litoral se encuentra sometido a un oleaje que en los últimos 50 años ha registrado algunos eventos con alturas máximas de ola significativa de 10 m de componente dominante del NNE (Cañellas *et al.*, 2007).

## 5 | Resultados

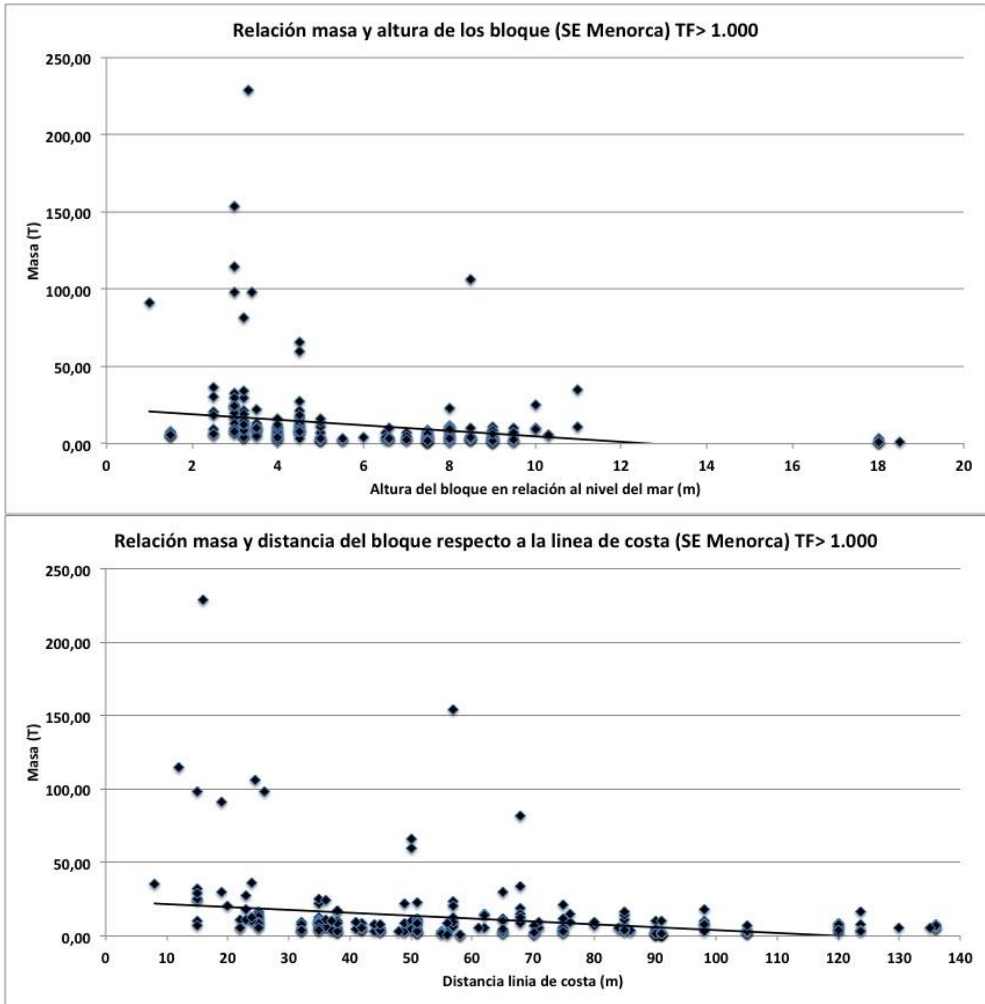
Para el conjunto de las localidades descritas se han caracterizado un total de 3.144 bloques. Para simplificar el análisis y siguiendo los criterios de Roig-Munar *et al.* (2015), en los resultados del presente estudio sólo se presentan los bloques con Transport Figure, TF de Scheffers y Kelletat (2003), superiores a 1.000. Valor representativo de su masa, de su altura sobre el nivel del mar y de su distancia a la costa.

### **Sector Sudeste**

Se han analizado 1.762 bloques situados en 8 áreas, de los cuales el 15,55 % presentan un TF superior a 1.000 y el 29,9%, de estos, se encuentran sobre acantilados más altos que las máximas alturas de ola registradas. Los bloques TF>1000, tienen unas dimensiones de sus ejes de 3,01 x 2,2 x 0,9 m, con un peso medio de 11,62 T. Están situados a una altura media de 6,2 m snm y a una distancia media de 61 metros de la cornisa del acantilado (Fig. 4).



**Figura 4.** Depósito de bloques en acantilados de Alcafzar (izquierda) y Binissafüller (derecha).  
**Figure 4.** Cliff-top boulder deposits at Alcafzar (left) and Binissafüller (right).



**Figura 5.** Distribución de bloques del sector SE, con TF>1.000 ubicados sobre acantilados superiores a la altura de las olas máximas registradas y en función de su altura sobre el nivel del mar y su peso (a) y en función de su distancia de la costa y su peso(b).

**Figure 5.** Boulder mass and height above mean sea level (a) and boulder mass and distance from shoreline (b) of boulders larger than TF =1.000 at the SE sector.

En cuanto a la distribución de los bloques en función de su altura snm o la distancia a la línea de costa, en la Fig. 5 se observa la existencia de un mayor número de bloques entre los 2,5 y 5,5 m de altura, mientras que el resto de bloques presentan una distribución heterogénea a partir de los 6 m hasta los 18 m de altura. Dicho grupo aparece en rampas y acantilados bajos, con un peso medio de 12,5 T y una disposición en cordones imbricados; mientras que los bloques dispersos entre las alturas de 6 y 18 m aparecen sobre los acantilados de mayor envergadura. En la Fig. 5b puede apreciarse como no existe ninguna distribución preferente entre los 22 y los 90 m de

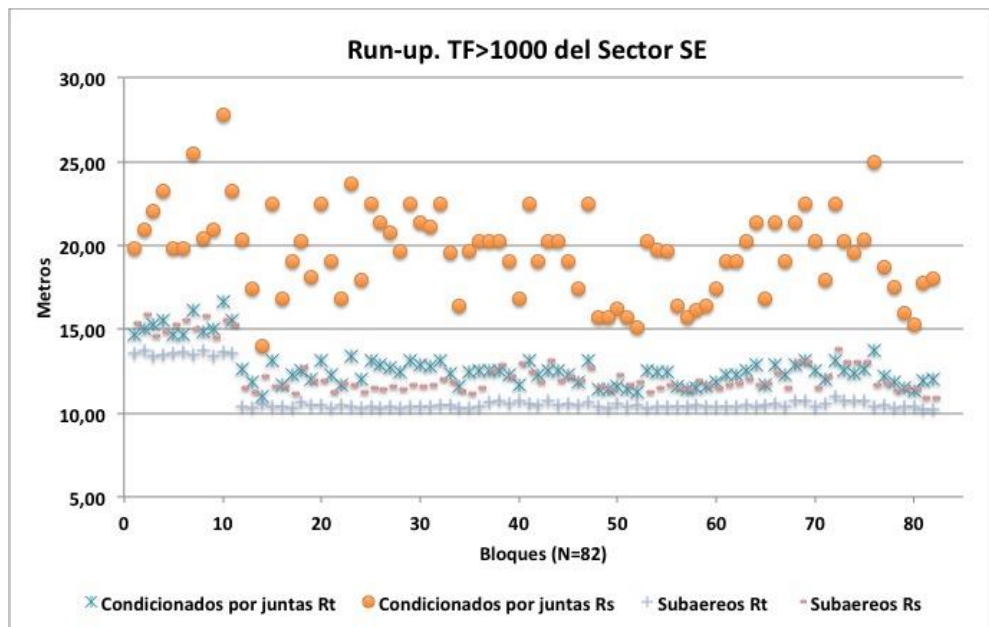
Conicionados por juntas		Subaéreos	
Rt	Rs	Rt	Rs
13,3	19,2	10,48	11,94

**Tabla 2.** Valores medios de la sobreelevación por remonte (run-up) necesaria bajo diferentes supuestos del inicio del desplazamiento de los bloques del sector SE (condicionados por juntas y subaéreos) de acuerdo con las ecuaciones de Engel y May (2012).

**Table 2.** Mean values of boulder displacement forced by different mechanisms at SE sector (delimited by joints or subaerial) according to Engel and May (2012) equations.

distancia respecto de la línea de costa. Las distancias medias de los bloques en relación con la cornisa es de 37 m y su peso medio de 10,1 T. Las orientaciones dominantes de los bloques son de  $146^\circ$ , coincidiendo con las trayectorias de avance del frente de la ola de tsunami descritas por Roger y Hébert (2008) y Álvarez-Gómez *et al.* (2010 y 2011). Los bloques ubicados sobre la altura del máximo oleaje registrado presentan dimensiones algo menores en sus tres ejes (2,21 x 1,5 x 0,8 m) y un peso medio de 4,29 T. Están situados a una altura media de 9,2 m snm y a una distancia media de 62 metros de la cornisa del acantilado.

Al aplicar las ecuaciones hidrodinámicas de Engel y May (2012) obtenemos las columnas de agua necesarias para el desplazamiento de los bloques (Fig. 6). Para los bloques delimitados por juntas, la altura media del run-up del oleaje requerida es de 19,3 m, mientras que para las columnas de agua de sobreelevación por tsunamis es de 12,1 m. En el caso de bloques subaéreos la altura media del run-up del oleaje debería



**Figura 6.** Sobreelevación por remonte (run-up) para los bloques del sector SE bajo distintos supuestos de oleaje de tormenta (Rs) o ola de tsunami (Rt).

**Figure 6.** Boulder emplacement by run-up for the SE study site under different triggering scenarios, wave storms (Rs) and tsunami (Rt).

llegar a 11,59 m, mientras que un *run-up* de tsunami necesitaría alcanzar 10,5 m (Tabla 2). Por tanto, las columnas de *run-up* nos indican que el arranque de estos bloques por oleaje de temporal ( $R_s$ ) requiere alturas muy elevadas que no encuentran parangón en ninguna tormenta registrada o conocida en el Mediterráneo occidental y que sólo en las posiciones menos elevadas pueden registrarse retrabajamiento por tormentas. En efecto, los bloques en acantilados con alturas de 10 y 11 m snm registran flujos de tsunamis, tanto por la altura y la distancia a la que se emplazan como por las columnas de agua necesarias para su removilización. Además, dichos flujos necesariamente actuaron sobre el resto de bloques, tal y como apuntarían los cordones de bloques imbricados presentes en las costas más bajas.

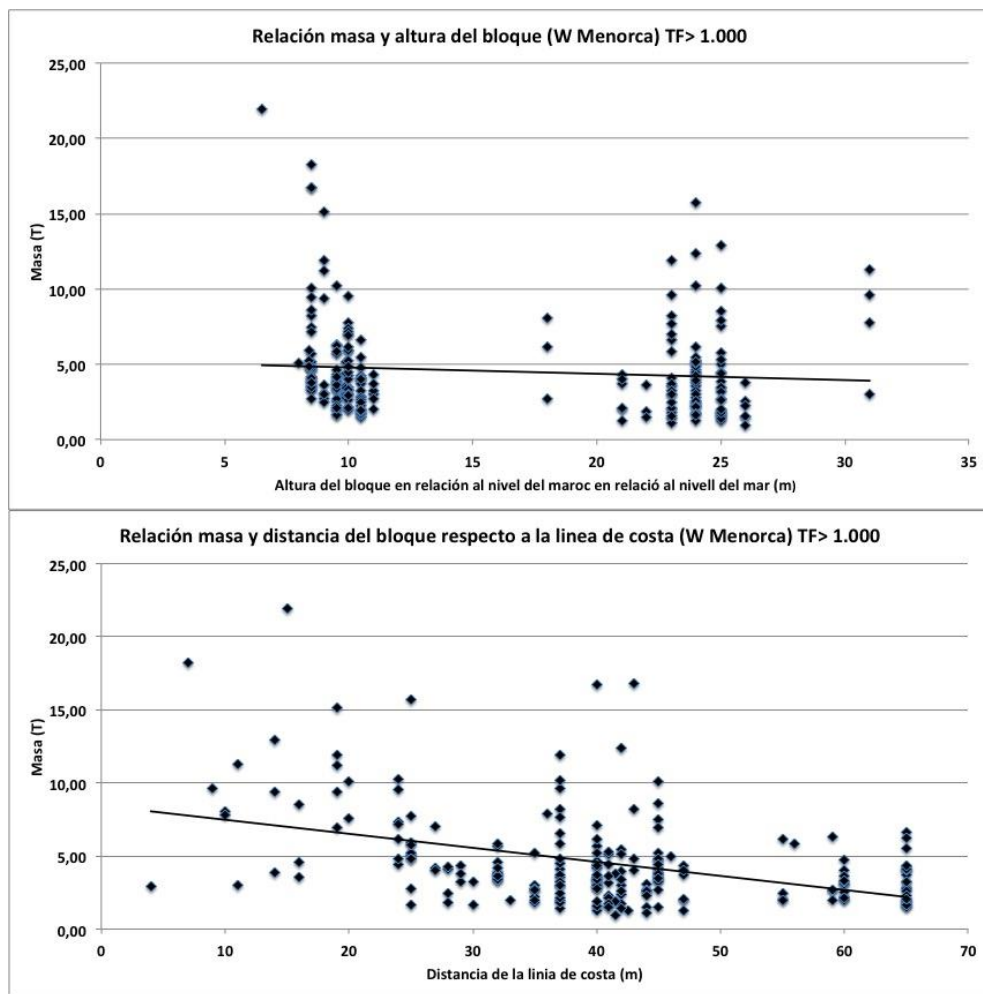
### Sector Oeste

En el sector occidental se han analizado 1.043 bloques repartidos en 8 áreas, donde el 32,2% de los bloques superan el  $TF > 1000$ , y el 13,6% se encuentran sobre acantilados más altos que las máximas olas registradas. Los bloques superiores a  $TF > 1000$  presentan un valor medio de TF de 2.404 y las dimensiones medias de sus ejes son de 2,3 x 1,9 x 0,7 m, con un peso promedio de 4,56 T. Suelen emplazarse a 16 m de altura snm y a distancias de 40 m respecto de la cornisa del acantilado (Fig. 7). En el conjunto de los bloques de esta zona, llama la atención la existencia nítida de dos poblaciones de bloques en función de la altura de su emplazamiento. En la Fig. 8 se aprecian dos agrupaciones de bloques: una primera agrupación en torno a los 10 m de altura y con un peso medio de 5 T, que corresponde a las áreas ubicadas en el S y W del sector y a los acantilados menos elevados. Y una segunda, que se corresponde con las tres áreas ubicadas en el N del sector, y presenta una altura media de 24 m snm y un peso de 4,8 T. En el caso de la primera agrupación las alturas máximas del oleaje registrado pueden modificar los bloques, mientras que en la segunda agrupación no es posible. En cuanto a la distancia de los bloques al borde del acantilado (Fig. 8b) también presentan dos agrupaciones, una primera en torno a los 38 y 45 m de la cornisa y con pesos medios de 4,8 T, y un segundo grupo entre los 60 y 65 m y con pesos medios de 3,3 T.



**Figura 7.** Depósito de bloques en Punta Nati (izquierda) y Son Saura del Sur (derecha).  
**Figure 7.** Cliff-top boulder deposits at Punta Natu (left) and south of Son Saura (right).





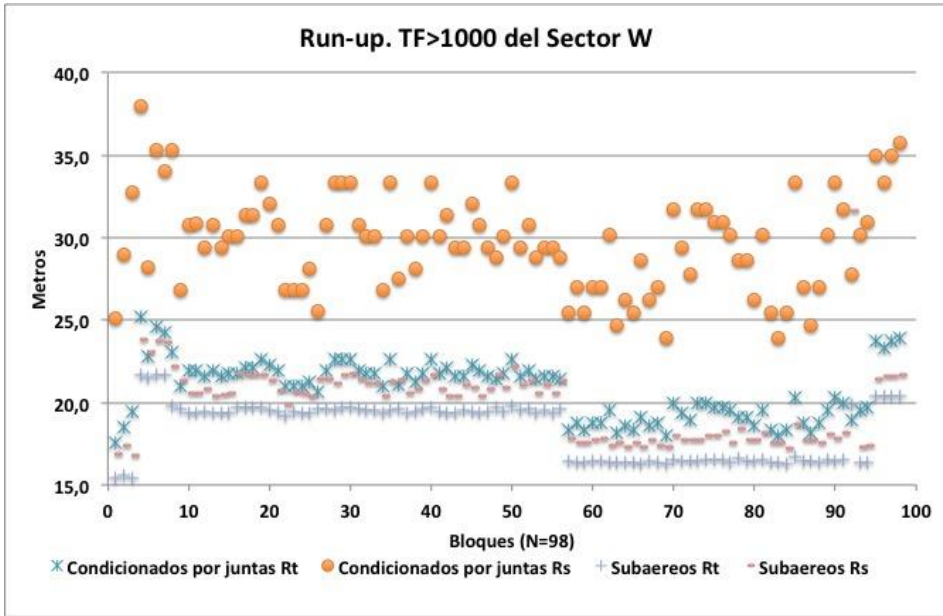
**Figura 8.** Distribución de bloques del sector W, con TF>1.000 ubicados sobre acantilados superiores a la altura de las olas máximas registradas y en función de su altura sobre el nivel del mar y su peso (a) y en función de su distancia de la costa y su peso(b).

**Figure 8.** Boulder mass and height above mean sea level (a) and boulder mass and distance from shoreline (b) of boulders larger than TF=1.000 at the Western sector.

Condicionados por juntas		Subaéreos	
Rt	Rs	Rt	Rs
20,81	29,74	18,35	19,91

**Tabla 3.** Valores medios de la sobreelevación por remonte (run-up) necesaria bajo diferentes supuestos del inicio del desplazamiento de los bloques del sector W (condicionados por juntas y subaéreos) de acuerdo con las ecuaciones de Engel y May (2012).

**Table 3.** Mean values of boulder displacement forced by different mechanisms at W sector (delimited by joints or subaerial) according to Engel and May (2012) equations.



**Figura 9.** Sobreelevación por remonte (run-up) para los bloques del sector W bajo distintos supuestos de oleaje de tormenta (Rs) o ola de tsunami (Rt).

**Figure 9.** Boulder emplacement by run-up for the W study site under different triggering scenarios, wave storms (Rs) and tsunami (Rt).

En cuanto a las orientaciones dominantes de los bloques diferenciamos aquellos bloques situados en el S y W del sector: presentan orientaciones al  $203^\circ$ , congruentes con los escenarios S-3, S-5 y S-8, e incluso escenarios de refracción entre el canal de Mallorca y Menorca. En cambio los bloques ubicados sobre los mayores acantilados del N, presentan unas orientaciones medias de  $71^\circ$ , que no se corresponden con las trayectorias definidas por Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011).

La presencia de estos bloques podría registrar tsunamis provenientes del NW, del N o del NE, producidos por sismos o grandes deslizamientos submarinos (Lastras *et*



**Figura 10.** Depósito de bloques en Tusqueta (izquierda) y la Illa des Porros (derecha).

**Figure 10.** Cliff-top boulder deposits at Tusqueta (left) and Illa dels Porros (right).

al., 2004 a y b; Canals *et al.*, 2004). Los bloques en acantilados superiores a la altura máxima del oleaje registrado, presentan un TF medio de 3.316 y las dimensiones medias A, B y C de  $2,05 \times 1,6 \times 0,8$  m, un peso medio de 4,25 T, situados a una altura media de 24 m snm y a una distancia media de 36 metros de la cornisa. Se descartan las influencias del oleaje sobre estas cornisas con alturas entre 18 y 25 m snm (Fig. 9). Los valores estimados de la columna de agua para el arranque de los bloques del sector W en caso de tormentas ( $H_s$ ) y tsunamis ( $H_t$ ) son 29,74 m y de 21,69 y 20,81 m respectivamente, en el caso de bloques subaéreos, su desplazamiento requiere en caso de tormentas 19,9 m y para tsunamis 18,3 m (Tabla 3). Queda, por tanto, manifiesto que las sobreelevaciones por remonte necesarias para arrancar o desplazar cada bloque de este sector, son valores muy elevados que no corresponden a ninguna tormenta registrada o conocida en el Mediterráneo occidental.

### Sector Norte

En los acantilados septentrionales se ha caracterizado la morfometría de 339 bloques, repartidos en 8 áreas, de los que el 63,1% superan el TF1000 y el 8,4% de éstos se encuentran sobre acantilados más altos que las olas máximas registradas. Los bloques superiores a  $TF > 1000$  presentan un TF medio de 8.501, sus dimensiones medias son de  $2,53 \times 1,9 \times 1,3$  m y su peso medio de 12,07 T (Fig. 10). Suelen emplazarse a una altura media de 12 m snm y a una distancia media de 66 metros de la cornisa del acantilado. Las orientaciones dominantes de los bloques con  $TF > 1.000$  es  $136^\circ$ , indicando tanto una eventual coincidencia con oleajes del SE que disponen de un *fetch* mayor, como con refracciones de las trayectorias tsunamíticas definidas por Roger y Hébert (2008) y Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011).

La distribución de las alturas de los bloques en este sector (Figura 11 a) presenta dos agrupaciones: una primera entre los 3 y los 15 m de altura con un peso medio de 14,1 T y otra, entre los 18 y 27 m de altura, correspondiente a la Mola de Fornells, con acantilados verticales elevados en donde los bloques presentan un peso medio de 3,45 T. En algunas ocasiones los bloques se ven favorecidos por morfologías *flowout* que permiten su llegada a mayores distancias y alturas. Este punto puede apreciarse en la Fig. 11b, donde la mayor concentración de bloques se encuentra entre los 65 y 70 metros de distancia, con una media de 66,1 m y un peso medio de 12 T.

En la Mola de Fornells (Fig. 1) se disponen bloques por encima la altura máxima de las olas de temporal registradas, siendo los acantilados de más de 20 m de altura. El TF medio de los bloques de este área es de 5.655, sus dimensiones medias de  $1,71 \times 1,3 \times 0,9$  m y presentan un peso medio de 3,45 T. Suelen encontrarse situados a una altura media de 23 m snm y a una distancia media de 69 metros de la cornisa del acantilado.

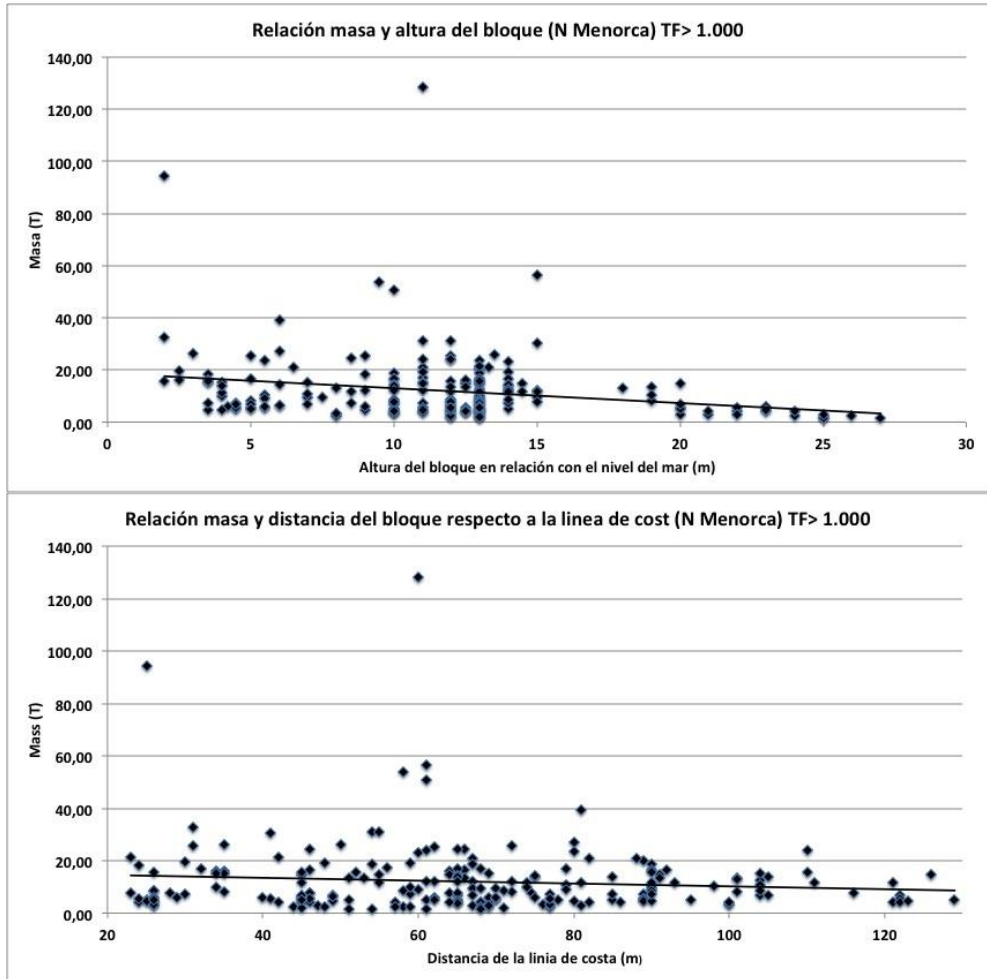
Los valores estimados de sobreelevación por remonte (*run-up*) de la columna de agua para el arranque y el desplazamiento de estos bloques son, en el caso de las tormentas, 33,86 m, y de 23,4 m para tsunamis (Tabla 4). Si interpretamos el escenario inicial de arranque de los bloques como subaéreo, los valores de *run-up* para su desplazamiento en caso de tormentas serán de 21,86 m (Tabla 4) y 20,4 m en tsunamis. Las columnas de agua requeridas para arrancar o movilizar cada bloque de  $TF > 1000$  son muy elevadas (Fig. 12), y no encuentran parangón con ninguna tormenta registrada y conocida en el Mediterráneo occidental Si interpretamos el escenario inicial de arranque de los bloques como subaéreo, los valores de *run-up* para su desplazamiento en caso de tormentas serán de 21,86 m. (Tabla 4) y 20,4 m en tsuna-



Conicionados por juntas		Subaéreos	
Rt	Rs	Rt	Rs
23,44	33,76	20,47	21,86

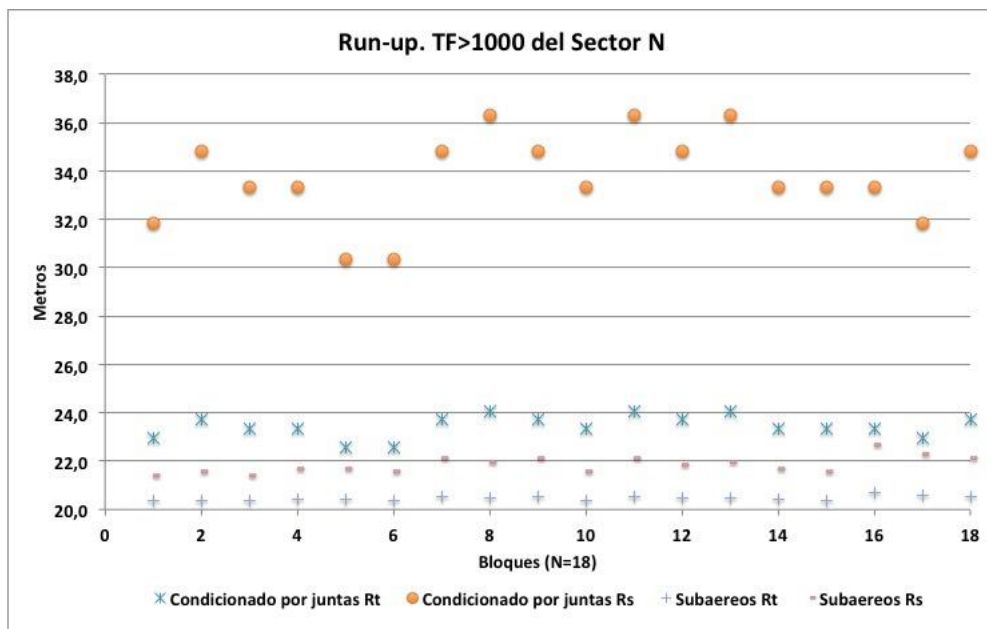
**Tabla 4.** Valores medios de la sobreelevación por remonte (*run-up*) necesaria bajo diferentes supuestos del inicio del desplazamiento de los bloques del sector N (condicionados por juntas y subaéreos) de acuerdo con las ecuaciones de Engel y May (2012).

**Table 4.** Mean values of boulder displacement forced by different mechanisms at the N sector (delimited by joints or subaerial) according to Engel and May (2012) equations.



**Figura 11.** Distribución de bloques del sector N con TF>1.000 ubicados sobre acantilados superiores a la altura de las olas máximas registradas y en función de su altura sobre el nivel del mar y su peso (a) y en función de su distancia de la costa y su peso(b).

**Figure 11.** Boulder mass and height above mean sea level (a) and boulder mass and distance from shoreline (b) of boulders larger than TF=1.000 at the Northern sector.



**Figura 12.** Sobre elevación por remonte (run-up) para los bloques del sector N bajo distintos supuestos de oleaje de tormenta (Rs) o ola de tsunami (Rt).

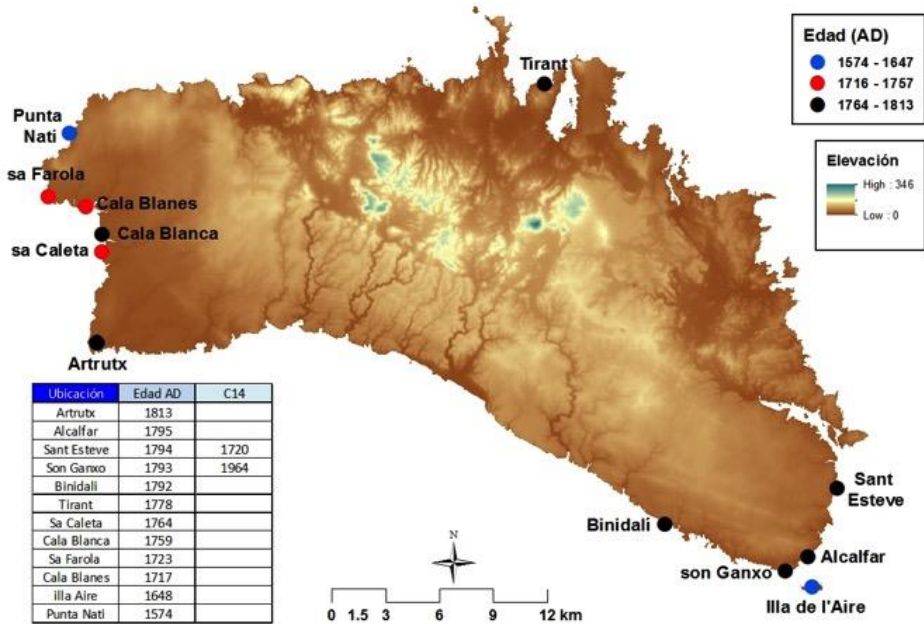
**Figure 12.** Boulder emplacement by run-up for the N study site under different triggering scenarios, wave storms (Rs) and tsunami (Rt).

mis. Las columnas de agua requeridas para arrancar o movilizar cada bloque de TF>1000 son muy elevadas (Fig. 12), y no encuentran parangón con ninguna tormenta registrada y conocida en el Mediterráneo occidental.

La orientación dominante de estos bloques TF>1000 es de 93° y no coincide con las posibles refracciones de las fuentes tsunámicas norafricanas, ni con las modelizaciones existentes. Su emplazamiento y las columnas de agua que requiere su movilización apuntan a flujos tsunámicos de grandes dimensiones, cuyo origen difícilmente puede ser atribuido a refracciones de los tsunamis argelinos.

## 6 | Edad de los bloques

La existencia de morfologías exokársticas litorales (cubetas y pozas) postdeposicionales sobre algunos bloques nos permite ensayar una primera aproximación a la cronología de las acumulaciones de bloques. Para ello se considera que la evolución de las cubetas y/o pozas es más o menos constante y a partir de su profundidad y de la tasa de erosión y formación del micromodelado obtenidas por Revelle y Emery (1957) y Gómez-Pujol (2006) en roquedos y contextos similares, se infiere la edad a la que podrían haberse empezado a desarrollar dichas formas. Así las cosas, la movilización de los bloques descritos se podría haber producido hace más de 220 años y podría coincidir con el evento de 1756 registrado en las notas de sismología balear que recoge Fontseré (1918), como una “gran ola sísmica (?)” en Santanyí -municipio de Mallorca-, en donde las crónicas indican la entrada de una ola



**Figura 13.** Localización de los bloques datados mediante técnicas  $^{14}\text{C}$  e indirectas.  
**Figure 13.** Location of boulders dated by means of  $^{14}\text{C}$  techniques or proxies indicators.

de más de media legua (ca. 2,4 km) tierra adentro, dejando una estela de peces en la maquia y con el transporte de un bloque de más de 100 quintales (unas 10 T).

Una datación mediante  $\text{C}^{14}$  de organismos marinos incrustados (serpúlidos) en uno de los bloques de cala Sant Esteve arrojó una edad de 1720 años (Fig. 13). Otra datación de organismos incrustados en un bloque en son Ganxo (Fig. 13) dio una edad de 1964 y corresponde a un fragmento de entalladura (*notch*) arrancado del acantilado de la zona.

## 7 | Propuesta de un modelo evolutivo asociado a diferentes eventos de tsunami sobre la costa rocosa

Los análisis morfométricos, así como las aproximaciones cronológicas, apuntan a la acción de diferentes eventos tsunamíticos en la costa de Menorca, afectando diferentes localidades y tipologías de acantilados. En base a ello Roig-Munar *et al.* (2016) han propuesto un modelo evolutivo de costa rocosa basado en la alternancia de varios episodios de tsunami (Fig. 14) en el que se podrían distinguir:

Un episodio inicial, Episodio A, donde el acantilado se presenta con paredes verticales desde la cornisa al nivel del mar, configurándose como una plataforma tabular ligeramente inclinada hacia el mar.

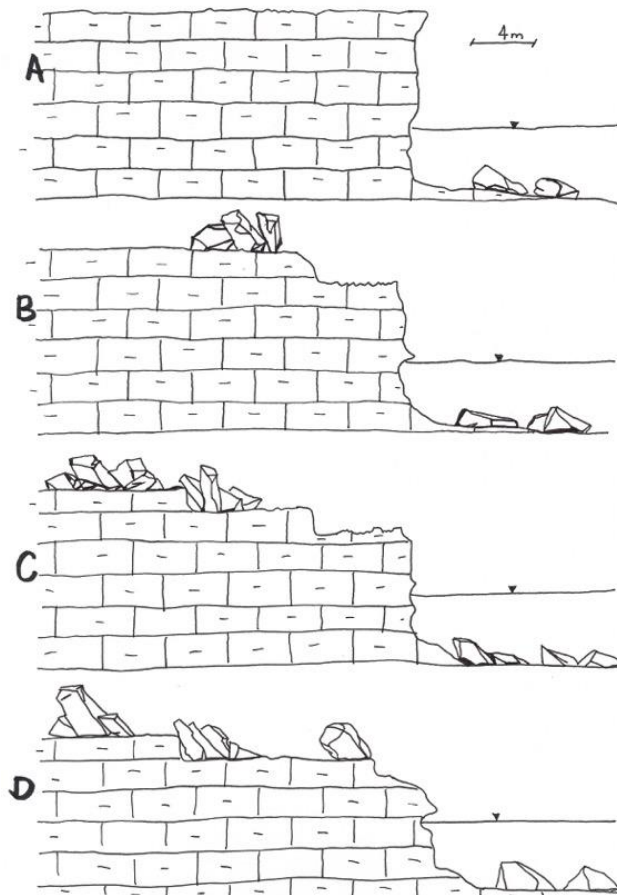
Le seguiría un Episodio B en el que un primer tsunami sobre la costa da como resultado el arranque de bloques de la cornisa, a favor de la fracturación y condi-

cionados por juntas. Este primer evento da lugar a la creación de un primer cordón imbricado asociado a la cornisa como área fuente.

La siguiente etapa, Episodio C, consistiría en la acción de un nuevo tsunami sobre la misma costa dando lugar al arranque de un nuevo estrato y el desplazamiento de los bloques subaéreos ya existentes hacia el interior. El resultado sería la creación de diferentes superficies de denudación o áreas fuente asociadas a los bloques trasladados. Sobre estos bloques y las plataformas de denudación se empiezan a dar procesos de disolución kárstica mediante pozas o cubetas, así como la removilización de pequeños fragmentos de bloques o de sedimento en las costas más bajas.

Episodio D: un nuevo evento da lugar a la creación de dos cordones imbricados en la zona más cercana a la cornisa. En este episodio se observan vuelcos y/o presencia de bloques subredondeados que podrían estar asociados a grandes tormentas, las cuales sólo se manifiestan como bloques aislados sin estructuras bien definidas.

Probablemente, en Menorca, los bloques asociados a este modelo corresponden al último evento tsunamítico de grandes proporciones registrado en Baleares, aunque también registran eventos menores posteriores y en algunos casos, el retrabajamiento posterior por temporales más recientes y muy energéticos.



**Figura 14.** Propuesta de modelo evolutivo de una costa rocosa frente a diferentes eventos tsunamíticos. Inspirado en las localidades de Torre d'Alcalfar y Alcalfar (Menorca).

**Figure 14.** A proposal schema for the evolution of a rocky coast under the effect of different tsunami events. Inspired in Torre d'Alcalfar and Alcalfar study sites (Menorca).

## 8 | Discusión

A grandes rasgos, la presencia y distribución espacial de acumulaciones de bloques en las costas rocosas de Menorca coincide con las áreas en las que sería mayor el impacto de las modelizaciones y propagación de ondas de tsunami de realizadas por Roger y Hébert (2008), Sahal *et al.* (2009), Álvarez-Gómez *et al.* (2010 y 2011) y por Periañez y Abril (2013). También vendrían a coincidir con los modelos de Schindele *et al.* (2008) Sahal *et al.* (2009) y Schindele *et al.* (2015) y las trayectorias de distorsión del oleaje de tsunamis que afectan el litoral, especialmente en el canal ubicado entre Mallorca y Menorca y en la costa N de Menorca. La ausencia de bloques en otras áreas de la costa N de la isla o en la parte central de la costa S, podría atribuirse a un factor limitante como es la altura y la morfología de los acantilados o su dinamismo y a altas tasas de retroceso en casos particulares (Roig-Munar *et al.*, 2016b), factores que, uno a uno o de forma conjunta, dificultarían encontrar registros de bloques asociados a diferentes flujos, tanto de tormenta como de tsunami.

Los bloques aparecen preferentemente sobre roquedos resistentes, ya sean en costas rocosas labradas sobre materiales carbonatados del Mioceno, calizas del Jurásico o eolianitas, donde la acción de los agentes erosivos es menos efectiva, hecho que ha permitido conservar las acumulaciones sedimentarias de bloques.

Cabe destacar el sector Sudeste, considerado el de mayor incidencia en las islas Baleares de las trayectorias de los tsunamis provenientes de Argelia (Hébert, 2003; Roger y Hébert, 2007; Sahal *et al.*, 2009; Álvarez-Gómez *et al.* 2010; Periañez y Abril 2013). En dicho sector se encuentran los mejores ejemplos de cordones imbricados múltiples (i.e. Sant Esteve, Alcafar e Illa de l'Aire). Los sectores Oeste y Norte presentan procesos mixtos con incidencia de tormenta, retrabajamientos y orientaciones de los bloques menores que denotan la incidencia del oleaje. No obstante, las orientaciones de los bloques con  $TF > 1.000$  podrían constituir el testimonio de las refracciones definidas en estas áreas por Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011).

Tanto las ecuaciones hidrodinámicas de los bloques con  $TF > 1.000$ , como el perfil de cada área, nos informan de donde se pueden dar procesos mixtos de tsunami y tormenta, como es el caso de las rampas de los sectores SE y W, o en aquellas localidades en las que los bloques de tsunami se sitúan en las zonas más altas del perfil.

### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Dr. J.A. Álvarez-Gómez la autorización para el uso y reproducción de la figuras 1 y 2, así como al Dr. L. Gómez-Pujol las sugerencias y comentarios críticos a propósito de la versión preliminar del presente trabajo.

### Referencias

Alasset, J. P., Hebert, H., Maoche, S., Calbini, V. y Meghraoui, M. (2006): The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw p 6.9 Algeria): modelling and results. *Geophysical Journal International*, 166: 213-226.

Álvarez-Gómez, J. A., Aniel-Quiroga, I., González, M. y Otero, L. (2011): Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 227-240.

- Álvarez-Gómez, J. A., Olabarrieta, M., González, M., Otero, L., Carreño, E. y Martínez-Solares, J. M. (2010): The impact of tsunamis on the Island of Majorca induced by North Algerian seismic sources. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 19:367-383.
- Barbano, M. S., Pirrotta, C. y Gerardi, F. (2010): Large boulders along the south-eastern Ionian coast of Sicily: Storm or tsunami deposits? *Marine Geology*, 275: 140-154.
- Biolchi, S., Furlani, S., Antonioli, F., Baldassini, N., Causon Deguara, J., Devoto, S., Di Stefano, A., Evans, J., Gambin, T., Gauci, R., Mastronuzzi, G., Monaco, C. y Scicchitano, G. (2015): Boulder accumulations related to extreme wave events on the eastern coast of Malta. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 5977-6019.
- Canals, M., Lastras, G., Urgeles, R., Casamor, J. L., Mienert, J., Cattaneo, A., De Batis, M., Haflidason, H., Imbo, Y., Laberg, J. S., Locat, J., Long, D., Longva, O., Masson, D. G., Sultan, N., Trincardi, F. y Bryn, P. (2004): Slope failure dynamics and impact from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project. *Marine Geology*, 213: 9-72.
- Cañellas, B. (2010): *Long-term extreme wave height events in the Balearic Sea: characterization, variability and prediction*. Tesis doctoral, Palma, Universitat de les Illes Balears, 71 pp.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F. J., Menéndez, M., Gómez-Pujol, L. y Tintoré, J. (2007): Application of a POT model to estimate the extreme significant wave height levels around the Balearic Sea (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, SI50: 329-333.
- Engel, M. y May, S. M. (2012): Bonaire's boulder fields revisited: Evidence for Holocene tsunami impact on the Lee-ward Antilles. *Quaternary Science Reviews*, 54: 126-141.
- Fontseré, E. (1918): *Notas sueltas de sismología Balear*. Publicaciones de la Sección de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias de la Universidad de Barcelona, 5-12.
- Furlani, S., Papalardo, M., Gómez-Pujol, L. y Debrat, M. (2014): The rock coast of the Mediterranean and Black seas. En: Kenedy, D., Stephenson, W.J., Naylor, L. (eds.), *Rocky coast geomorphology, a global synthesis*: 77-87. London, Geological Society of London.
- Gelabert, B., Fornós, J. J., Pardo, J. E., Rosselló, V. M. y Segura, F. S. (2005.): Structural controlled drainage basin development in the South of Menorca island (Spain). *Geomorphology*, 65; 139-155.
- Gómez-Pujol, L. 2006. *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Palma, Universitat de les Illes Balears. 200 pp.
- Gómez-Pujol, L. y Roig-Munar, F. X. (2013): Acumulaciones de grandes bloques en las crestas de los acantilados del sur de Menorca (Illes Balears): observaciones preliminares. *Geo-Temas*, 14: 71-74.
- Goto, K., Okada, K. y Imamura, F. (2009): Characteristics and hydrodynamics of boulders transported by storm waves at Kudaka Island, Japan. *Marine Geology*, 262: 14-24.
- Hebert, H. y Alasset, P. J. (2003): The Tsunami Triggered by the 21 May 2003 Algiers Earthquake. *EMSC Newsletter, Centre Sismologique Euro-Méditerranéen*, 20: 10-12.
- Iglesias, O., 2015. *Generación y propagación de tsunamis en el mar catalano-balear*. Tesis Doctoral. Barcelona, Universidad de Barcelona. 247 pp.
- Kelletat, D. (2005): Neue Beobachtungen zu Paläo-Tsunami im Mittelmeergebiet, Mallorca und Bucht von Alanya, türkische Südküste. *Schriften des Arbeitskreises Landes- und Volkskunde Koblenz (ALV)*, 4: 1-14.
- Lastras, G., Canals, M., Amblas, D., Frigola, J., Urgeles, R., Calafat, A. M. y Acosta, J. (2007): Slope instability along the northeastern Iberian and Balearic continental margins. *Geologica Acta*, 5 (1): 35-47.
- Lastras, G., Canals, M., Urgeles, R., Hughes-Clarke, J. E. y Acosta, J. (2004b). Shallow slides and pockmark swarms in the Eivissa Channel, western Mediterranean Sea. *Sedimentology*, 51: 1-14.
- Maouche, S., Morhange, C. y Meghraoui, M. (2009): Large Boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. *Marine Geology*, 262, 96-104.

- Mastronuzzi, G., Pignatelli, C., Sanso, P. y Selleri, G. (2007): Boulder accumulations produced by the 20th February 1743 tsunami along the coast of SouthEastern Salento (Apulia region, Italy). *Marine Geology*, 242, 191-205.
- Nott, J. (2003): Tsunami or storm waves? Determining the origin of a spectacular field of wave emplaced boulders using numerical storm surge and wave models and hydrodynamic transport equations. *Journal of Coastal Research* 19: 348-356.
- Periáñez, R. y Abril, J. M. (2013): Modeling tsunami propagation in the Iberia–Africa plate boundary: Historical events, regional exposure and the case-study of the former Gulf of Tartessos. *Journal of Marine Systems*, 111-112: 223-234.
- Pignatelli, C., Sanso, P. y Mastronuzzi, G. (2009): Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260, 6-18.
- Revella, R. y Emery, K.O. (1957): Chemical erosion of Beach rock and exposed reef rock. *US Geological Survey Professional Paper*, 260T: 699-709.
- Robinson, E., Khan, S., Rowe, D. A. y Coton, R. (2008): Size of boulders moved and emplaced by recent hurricanes, Jamaica. En: Mastronuzzi, G., Pignatelli, P., Sansó, P., Milella, M. y Selleri, G. (eds.), Abstract volume of the 2nd International Tsunami Field Symposium, Ostuni (Italy) and Ionian Islands (Greece), 22-28 September 2008. *GIS Coast Research Publication*, 6: 135-138.
- Roger, J. y Hébert, H. (2008): The 1856 Djielli (Algeria) earthquake and tsunami source parameters and implications for tsunami hazard in the Balearic Islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 721-731.
- Roig-Munar, F. X. (2016): *Blocs de tempesta i tsunamis a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica*. Tesis doctoral inédita. Departament de Geodinàmica i Geofísica, Barcelona, Universitat de Barcelona. 410 pp.
- Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M. y Gelabert, B (2015): Morfometría de bloques de tsunamis en las costas rocosas del Este de Mallorca (Islas Baleares). *Geotemas*, 15: 229-232.
- Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M., Gelabert, B., Pons, G. X. y Mir-Gual, M. (2014): Presencia de bloques de tsunamis en las costas rocosas del SE de Menorca (I. Baleares). En: Álvarez-Gómez, J. A. y Martín-González, F. (eds.), *Una aproximación multidisciplinaria al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico*: 125-128. Lorca, Universidad de Murcia.
- Roig-Munar, F. X., Vilaplana, J.M, Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A y Gelabert, B. (2016b): Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Geotemas*, 16 (1): 641-644
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J. M.Rodríguez-Perea, A. y Gelabert, B. (2016a): Presencia de bloques de tsunamis en acantilados de Punta Prima (Formentera). En: Durán J. J., Montes Santiago M., Robador A. y Salazar Á. (eds.), *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro*: 571-578. Madrid, IGME.
- Sahal, A., Roger, J. y Allgeyer, S. (2009): The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1823-1834.
- Scheffers, A. M. y Kinis, S. (2014.): Stable imbrication and delicate/unstable settings in coastal boulder deposits: Indicators for tsunami dislocation?. *Quaternary International*, 332: 73-84.
- Scheffers, A. y Kelletat, D. (2003): Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide- a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.
- Schindele, F., Gailler, A., Hébert, H., Loevenbruck, A., Gutiérrez, E., Monnier, A., Roudil, P., Reymond, D. y RiverA, L. (2015): Implementation and Challenges of the Tsunami Warning System in the Western Mediterranean. *Pure and Applied Geophysics*, 172: 821-833
- Schindele, F., Loevenbruck, A. y Hébert, H. (2008): Strategy to design the sea-level monitoring networks for small tsunamigenic oceanic basins: the Western Mediterranean case. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 1019-1027.

Segura, F. y Pardo, J. (2003): Los barrancos del Migjorn de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 71-86. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.



# Las playas de Menorca: naturaleza y distribución

Lluís Gómez-Pujol<sup>1,2</sup>, Montse Compa<sup>1,3</sup>, Alejandro Orfila<sup>4</sup>, Amaya Álvarez-Ellacuría<sup>1</sup>, Pau Balaguer<sup>1</sup>, Francesc X. Roig-Munar<sup>5</sup>, Joan J. Fornós<sup>2</sup> y Joaquim Tintoré<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> ICTS SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (MINECO-CAIB), Palma.

<sup>2</sup> Grup de Ciències de la Terra "Geologia i Paleontologia Guillem Colom". Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>3</sup> Centre Oceanogràfic de les Balears, Instituto Español de Oceanografía, Palma.

<sup>4</sup> Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, IMEDEA (CSIC-UIB), Esporles.

<sup>5</sup> Q4atre Consultoria Ambiental, Es Migjorn Gran.

## RESUMEN

La costa de Menorca acoge 114 sistemas de playa que representan el 9,9% de la línea de costa de Menorca. Ubicadas en un ambiente micromareal y expuestas a oleajes que raras veces superan los 3m de altura significativa, la mayoría de las playas menorquinas se caracterizan por presentar arenas biogénicas de medias a gruesas, estando su distribución y naturaleza condicionadas, principalmente, por el contexto morfoestructural de la isla. Tanto en lo tocante a la configuración fisiográfica de las playas y su espacio de acomodación como a la naturaleza y tipología del sedimento. En general, la tasa de evolución media de las playas de Menorca no presenta grandes problemas y se caracteriza por la estabilidad, una estabilidad reforzada por el carácter protegido o semi-protegido de las ensenadas que acogen a las playas o porque las playas más expuestas coinciden las acumulaciones de cantos y bloques al pie de acantilados.

**Palabras clave:** *playas, sedimento biogénico, control geológico, evolución de la línea de costa*

## ABSTRACT

The Menorcan coast contains 114 beach systems, which occupy 9,9% of the coastline. Menorcan beaches are characterized by a microtidal and a moderate wave energy environment where, at annual scale, in few occasions significant wave heights attend values larger than 3m. Biogenic medium to coarse sands beaches are the dominant feature, although the island morphostructure controls both: the type of beach and the sediment nature and/or texture. In average, the shoreline change rate for the island beaches shows a stability scenario reinforced by the large number of embayed and pocket beaches along the Menorcan coast. The beaches exposed to the most energetic waves tend show cobble-boulder beaches at the cliff-toe.

**Keywords:** *beach systems, biogenous sediment, geological control, shoreline change*

## 1 | Introducción

El dominio abrumador de las costas rocosas a lo largo del perímetro litoral de la isla de Menorca –alcanzando el 65% de su línea de costa– queda interrumpido, puntualmente, por la presencia de numerosas ensenadas que cobijan alrededor de 150 playas. Dichas playas llegan a sumar 36,7 km de recorrido, apenas un 9,9% de la costa de la menor de las Gimnesias. En su mayoría se trata de playas arenosas, aunque no faltan las playas de bloques o los conjuntos de playa-restinga. No obstante, a pesar del interés paisajístico y turístico del litoral de Menorca, sus playas no han merecido el interés de la comunidad científica hasta tiempos muy recientes. La aproximación a su caracterización y/o estudio se ha desarrollado, básicamente, desde enfoques centrados en la gestión litoral, quedando en un segundo término los aspectos evolutivos o de morfodinámica. De hecho, más allá de unos breves comentarios o de algunas referencias en las geografías descriptivas de Baulies (1967) y de Rosselló (1977), o más allá del contexto geológico de la tesis de doctorado de Borrouilh (1983), o el de los capítulos correspondientes a la Geografía Física y Geología de la Enciclopedia de Menorca (Obrador y Mercadal, 1979) apenas hay trabajos que ahonden en las playas menorquinas. Descontando el repaso de los accidentes del litoral menorquín (Rosselló, 2003; Rosselló, 2004), publicado en una de las monografías más completas

sobre la geomorfología de la isla (Fornós *et al.*, 2004), los antecedentes al conocimiento geomórfico-sedimentológico de las playas de Menorca hay que buscarlos en el trabajo de Fornós y Forteza (1993). Dicha contribución, a propósito de la sedimentología de la playa y del cordón dunar de la Albufera des Grau, constituye la primera aportación moderna a los trabajos de dinámica y/o sedimentología de las playas de Menorca. A partir de este hito, no será hasta finales de la década de los noventa cuando aparezcan nuevas aportaciones vinculadas a las actividades de investigación y trabajos de consultoría de Francesc X. Roig-Munar, así como a las de los investigadores del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universitat de les Illes Balears, del IMEDEA (CSIC) y del SOCIB (e.g. Roig-Munar, 2010; Gómez-Pujol *et al.*, 2013a y 2013b). En 2011 se producirá un cambio sustancial en este panorama, puesto que se instala la primera estación de videomonitorización costera y arranca un programa semestral de topo-batimetrías y muestreos de sedimento en Son Bou (Tintoré *et al.*, 2013). En este contexto, el objetivo del presente trabajo es revisar el estado del conocimiento actual de las playas menorquinas y reflexionar sobre los condicionantes, la evolución y los elementos dinámicos que las caracterizan.

## 2 | El contexto de las playas menorquinas

### *Marco fisiográfico y contexto geológico*

A título de inventario y una vez descontado el perímetro litoral interior de las albuferas o de las zonas húmedas costeras, así como de las bateas que entran en el cómputo global del Atlas de Sensibilidad Ambiental Costero de las Islas Baleares, elaborado sobre la cartografía 1:5.000 del Govern Balear (Balaguer *et al.*, 2015), la isla de Menorca acoge 36,7 km de playas (Fig. 1). Cabe citar aquí que se entiende por playa –a *grosso modo*– el acúmulo de materiales sedimentarios detríticos en la línea de costa, principalmente trabajados y transportados por el oleaje. Por tanto, quedan englobadas en dicha categoría playas de cantos y bloques, así como las consabidas playas arenosas. De hecho las playas suponen un escaso 9,9% del perímetro litoral Menorca (Tabla 1), siendo más frecuentes las playas arenosas, que integran un 5,5% de la línea de costa, a las que siguen las playas de cantos, con apenas un 2% del litoral de la isla. Finalmente, el 1,3% de playas se corresponde con restingas que a modo de cordón separan a las albuferas del mar abierto.

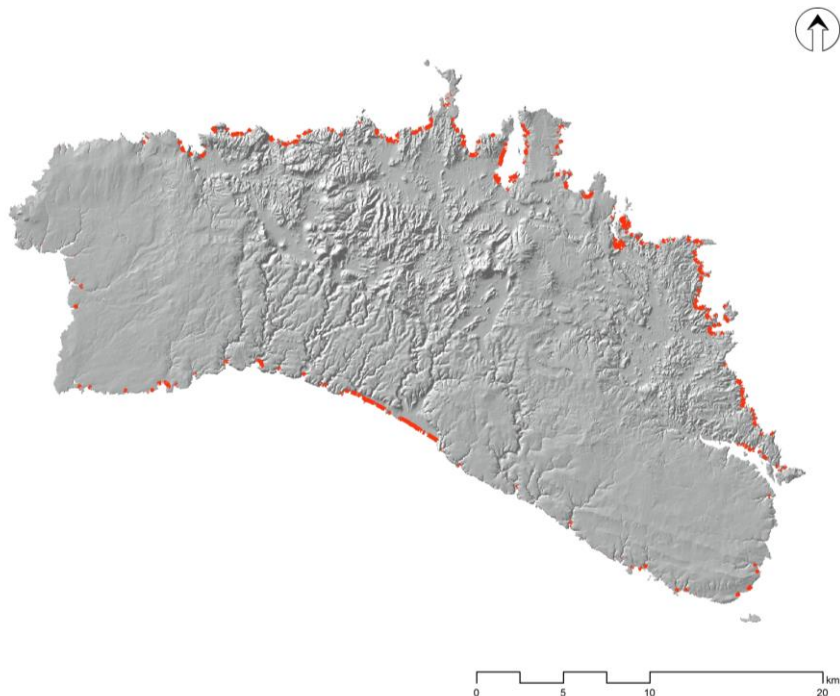
Tipología de costa	Menorca		Tramuntana		Migjorn	
	km	%	km	%	km	%
Costas rocosas	239,85	65,0	124,89	60,3	114,97	71,0
<i>Costas rocosas altas</i>	220,85	59,8	113,09	54,6	107,76	66,5
<i>Costas rocosas bajas</i>	19,00	5,2	11,80	5,7	7,20	4,4
Playas	36,70	9,9	27,15	13,1	9,55	5,9
<i>Playas arenosas</i>	20,24	5,5	13,02	6,3	7,22	4,5
<i>Playas mixtas</i>	3,63	1,0	3,43	1,7	0,19	0,1
<i>Playas de cantos</i>	7,86	2,1	7,54	3,6	0,32	0,2
<i>Restingas</i>	4,97	1,3	3,15	1,5	1,83	1,1
Costa artificial	92,65	25,1	55,19	26,6	37,41	23,31

**Tabla 1.** Tipología de costa de Menorca a partir de las categorías del Atlas de Sensibilidad Ambiental Costero de las Islas Baleares (Balaguer *et al.*, 2015).

**Table 1.** Menorcan coast type extension according to the Balearic Islands Environmental Sensitivity Coastal Atlas (Balaguer *et al.*, 2015).

Pero la distribución de las playas a lo largo de la costa de Menorca no es, ni de lejos, homogénea. Atendiendo a la naturaleza del roquedo y al control estructural que condiciona la geomorfología litoral de la isla y la divide en dos regiones o dominios geomórficos (vid. Pons y Gómez-Pujol, 2003), nos encontramos con una mitad septentrional, *Tramuntana*, en la que se alternan roquedos silíceos y carbonatados, intensamente fallados y plegados, de edades que van desde el Paleozoico al Mesozoico (Fornós y Obrador, 2003). Del perímetro litoral del norte de Menorca, 27,15 km, un 13,1%, de su línea de costa son playas (Tabla 1). Casi tres veces más que el espacio que ocupan las playas en la mitad meridional de la isla (5,9%, 9,55 km); en un *Migjorn* en el que afloran los materiales carbonatados postorogénicos del Mioceno superior (Obrador y Pomar, 2004).

La *Tramuntana* se caracteriza por un litoral muy articulado, a razón de la alternancia de litologías, la fracturación y el control estructural que facilitan la penetración del mar y la erosión diferencial de la costa. La presencia de un conjunto de fallas direccionales WNW-ESE y de un sistema de cabalgamientos y pliegues que en superficie presentan una dirección NE-SW, y en ocasiones NW-SE, producto de dos fases compresivas (Gelabert, 2003), explica el desarrollo de las grandes ensenadas del norte de la isla, aprovechando los flancos de cabalgamiento, las fallas o la alternancia de materiales resistentes y frágiles. Los mismos condicionantes se repiten a lo largo de la costa, aunque a menor escala, resultando en numerosas bahías de dimensiones mo-



**Figura 1.** Localización de las playas de Menorca (en rojo) a partir de las categorías del Atlas de Sensibilidad Ambiental Costero de las Islas Baleares (Balaguer *et al.*, 2015).

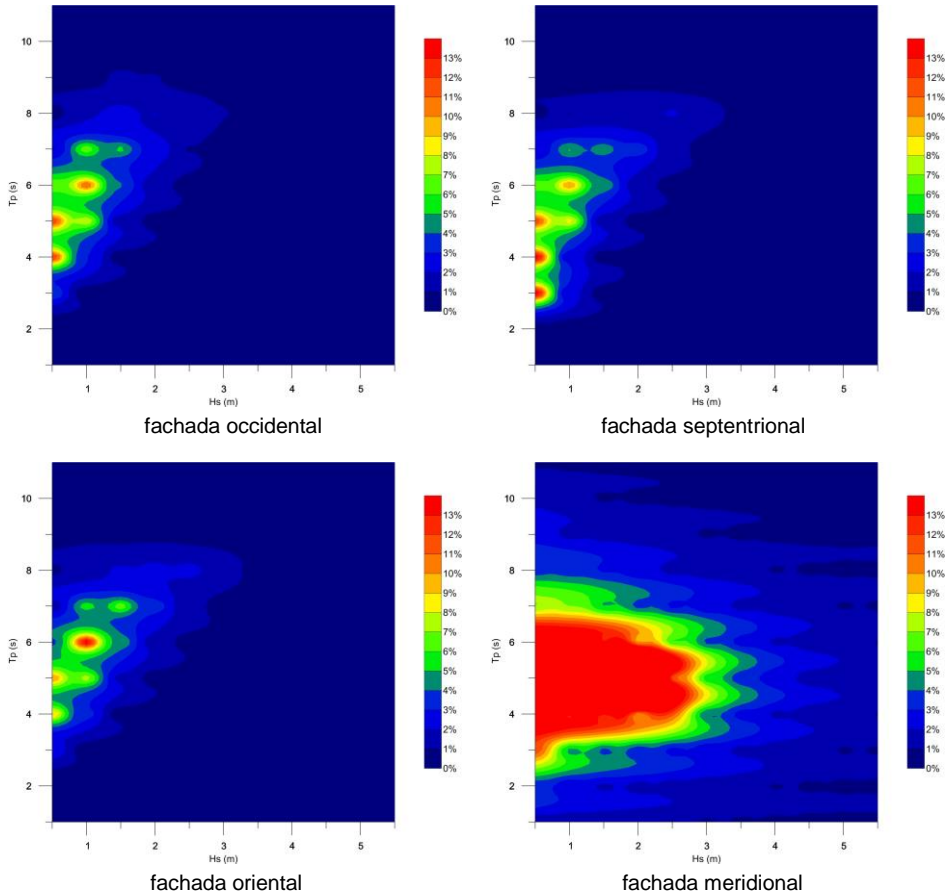
**Figure 1.** Location of Menorcan beaches (in red) according to the Balearic Islands Environmental Sensitivity Coastal Atlas (Balaguer *et al.*, 2015).

destas que acogen a la mayoría de playas de cantos, así como las playas arenosas o restingas, entre las que cabe citar la de la Albufera des Grau. La naturaleza del roquedo y la abundancia de las costas acantiladas, justifican que sea en la *Tramuntana* donde se encuentra casi la totalidad de playas de cantos (Tabla 1). Los materiales del *Migjorn* son calcarenitas y calcilitas que en su proceso de alteración y desmantelamiento apenas dan materiales gruesos y de entidad; todo ello resultando tanto en la ausencia de playas de cantos, como en la ausencias de formas secundarias –barras fluviales– en los cauces de los barrancos (Fornós y Segura, 2004; Segura *et al.*, 2007). Rossell y Llompart (2002, p. 61) sugieren, a título de curiosidad lingüística o etnográfica, que el local distingue las playas de cantos entre *macars* y *codolars*. Un *macar* sería una playa formada por *macs*, cantos y bloques de aristas suaves aspecto esférico, más o menos isométricos, mientras que un *codolar* sería una playa de cantos donde cantos y bloques son angulosos y dominan las formas planas. No obstante, no son anecdóticos los casos que se escapan del modelo y otros lingüistas tienden a considerar ambos términos como genéricos de igual significado (*com. pers.* J. F. López Casanovas) pese al predominio de los *codolars* en la costa occidental de *Tramuntana* y el de los *macars* en la oriental.

En contraste con la *Tramuntana*, el *Migjorn* de Menorca se caracteriza por un litoral con una marcada componente rectilínea y naturaleza acantilada. Su condición de plataforma –planicie– estructural mantiene una cota topográfica en torno a los 50 m hasta casi la misma línea de costa. La mayoría de los accidentes costeros de este sector tienen un control tectónico (Rosselló, 2004), ligeramente matizado por el retoque cárstico (Fornós, 2004). La geometría rectilínea y acantilada de la costa meridional sólo interrumpe por la presencia puntual de las desembocaduras de los barrancos que, en la mayoría de los casos, acogen en su interior pintorescas playas arenosas. La monotonía del acantilado también se ve interrumpida en el sector central del *Migjorn* donde los acantilados retranquean, en un tramo de costa que cubre de Binigaus a Son Bou, dando paso a largas playas lineales asociadas a cordones dunares y zonas húmedas. Gelabert *et al.* (2005) han definido el *Migjorn* como un anticlinal laxo, producto de una falla inversa NNW-SSW en la parte central de la unidad y de la isla. El sistema de fracturación de esta unidad, en la que dominan las orientaciones E-W en los flancos oriental y occidental, y N-S en el central controla el trazado de los barrancos y por tanto la presencia de las calas y su respectivas playas arenosas. Segura *et al.* (1999) atribuyen a un accidente estructural el retranqueo de los acantilados entre 500-800 m tierra adentro en la zona de Son Bou, donde una falla rotacional genera el espacio de acomodación para el desarrollo de una albufera y una restinga. Es precisamente en este sector central del sur de Menorca en el que se encuentran el conjunto de alineaciones de playas arenosas de mayor extensión de la isla.

### ***Nivel del mar y oleaje***

Menorca experimenta un régimen micromareal. Los datos del mareógrafo del puerto de Maó (Puertos del Estado, 2017) apenas registran variaciones medias de 10 o 15 cm respecto del nivel medio del mar, aunque ocasionalmente, y asociadas al paso de altas y bajas presiones atmosféricas, el nivel del mar puede llegar a desplazarse 40 cm respecto del nivel medio. La serie temporal de máximos y mínimos mensuales de nivel del mar en Maó, con la que se cuenta desde 2009, registra el evento de máximo ascenso en octubre de 2012, con 48 cm por encima del nivel medio del mar, mientras

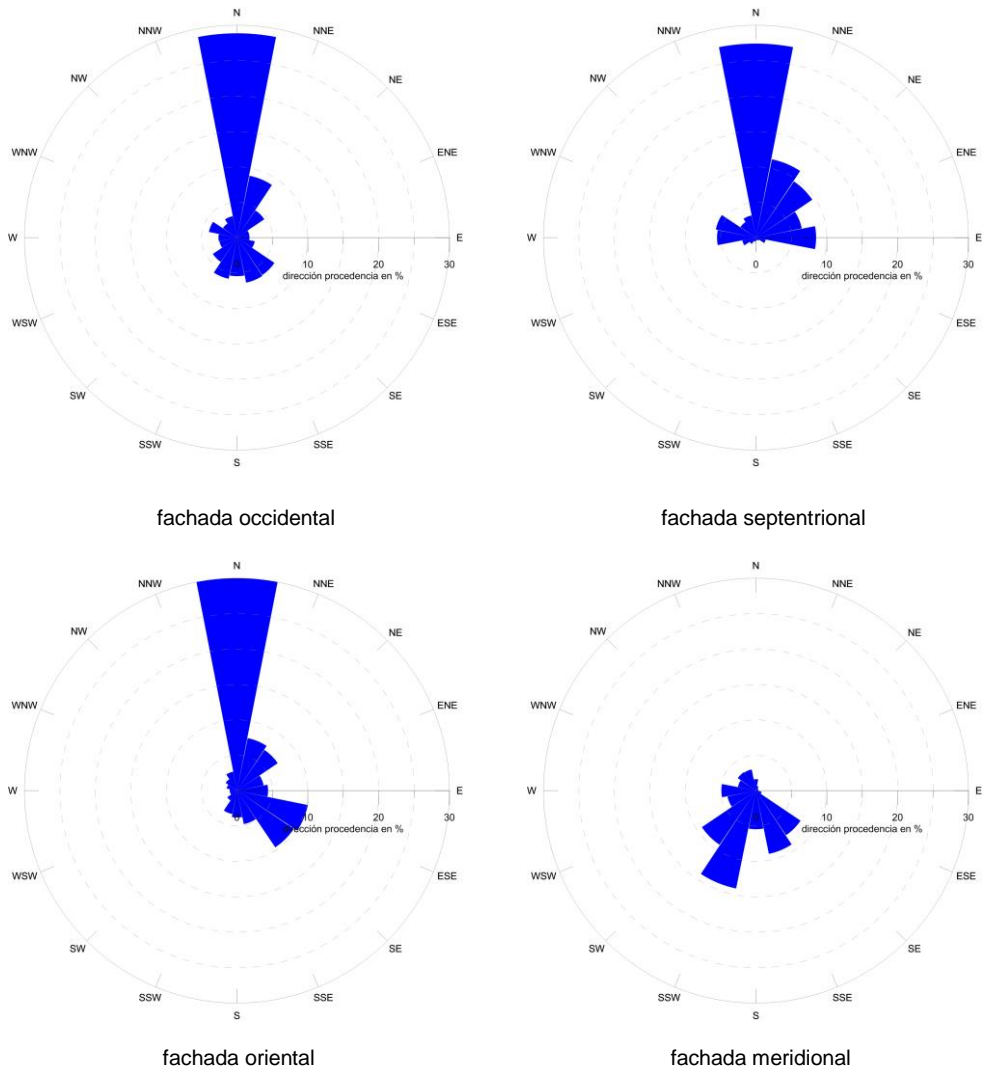


**Figura 2.** Distribución conjunta, en %, de altura de ola significativa ( $H_s$ ) y periodo de pico ( $T_p$ ) para puntos representativos de las fachadas marítimas de Menorca a partir de datos SIMAR, 1958-2017, de Puertos del Estado.

**Figure 2.** Joint distribution of significant wave height ( $H_s$ ) and the period ( $T_p$ ), in %, for a selected points for each one of the Menorca marine facades. Data from SIMAR database, 1958-2017, Puertos del Estado.

que el mínimo mensual aconteció en abril de 2010 con 46 cm por debajo del nivel medio del mar.

El litoral de Menorca, como el Mediterráneo occidental, se caracteriza por un clima de oleaje complejo, con unos atributos que lo definen como torrencial (Sánchez-Arcilla *et al.*, 2008). Su localización en el extremo septentrional del Promontorio Balear la condiciona de manera que durante los meses de invierno la costa septentrional sufre la acción de los fuertes temporales de norte provenientes del Golfo de León, mientras que en verano la intensidad del oleaje aminora (Cañellas, 2010). En el norte y noreste de la isla, las alturas de ola significativa en más del 50% de los casos quedan entre 0,5 y 1 m y los periodos de pico asociados entre 4 y 6 s (Puertos del Estado, 2017). La componente norte aglutina un 27% de la procedencia del oleaje, seguido de la componente NE (Figs. 2 y 3).



**Figura 3.** Dirección de oleaje para puntos representativos de las fachadas marítimas de Menorca a partir de datos SIMAR, 1958-2017, de Puertos del Estado.

**Figure 3.** Wave rose direction for a selected points for each one of the Menorca marine facades. Data from SIMAR database, 1958-2017, Puertos del Estado.

Las calmas llegan al 13%. Un 2% de los eventos procedentes del norte alcanzan alturas significantes de 3 m y, aunque puntuales, no son raros a escala interanual eventos con altura de ola signficante de 5 m o ligeramente superior. Las cartografía de la energía del oleaje de Ponce de León y Orfila (2016) pone de manifiesto como esos temporales afectan a toda la costa norte y el canal de Menorca así como refractados también inciden, aunque con menor energía, sobre el litoral de levante de la isla.

En la costa meridional los oleajes provenientes del suroeste y del sureste son menos energéticos: alturas de ola significativa en casi un 70% de los casos por debajo de 0,5 m y periodos de pico asociados entre 4 y 5 s (Fig. 2 y 3). Aunque en las configuraciones más energéticas de lebeche pueden llegar a alcanzar los 3 m e incluso los 4 m de altura significativa durante los meses de invierno. En el sur de la isla, mientras que en invierno dominan los oleajes de SSW y SW, en verano ceden algo de protagonismo a los de SSE y SE, que pueden alcanzar el 10% de los eventos. Según la serie SIMAR (1958-2017) de Puertos del Estado, el máximo alcanzado en la costa septentrional de la isla son los 8.5 m en mar abierto de enero de 2015, mientras que en la costa meridional el máximo aconteció en octubre de 2008 con 5,5 m de altura de ola significativa.

### ***El sedimento***

Las playas de Menorca están compuestas predominantemente por arenas de medias a gruesas (2 a 0 phi) moderadamente clasificadas, siendo el calibre medio para el conjunto de las 64 playas caracterizadas por Gómez-Pujol *et al.* (2013) de  $1,28 \pm 0,81$  phi. Cala Pregonda (*Tramuntana*), expuesta a los oleajes energéticos del norte de la isla, es la playa arenosa con un calibre más grueso,  $-0,16 \pm 0,02$  phi, mientras que Cala des Degollador (*Migjorn*), una playa encajada y resguardada de los oleajes energéticos, es la playa de arenas más finas,  $3,87 \pm 0,04$  phi. En cuanto a su textura, en términos agregados, el sedimento de playa es principalmente arenoso (95,1%), con una proporción mayor de gravas (4%) que de finos (0.9%) y una clasificación entre moderadamente clasificada (35,9% de las playas) a bien clasificada (32,8% de las playas). Vale la pena constatar que la clasificación disminuye proporcionalmente al número de bioclastos presentes en el sedimento. De hecho uno de los elementos que llama la atención, en el caso de las playas menorquinas, es la naturaleza del sedimento. En términos medios, el 78,4% del sedimento de playa lo integran granos que son fragmentos de algas coralíneas, briozoos, foraminíferos, bivalvos, gasterópodos y otros restos esqueléticos. No obstante, la proporción de bioclastos varía de una playa a otra y de un dominio geomórfico a otro. Oscilando del 9 al 99.4% su contribución al volumen de sedimento. En cuanto a la composición media del sedimento de playas para Menorca, en comparación con los fragmentos esqueléticos biogénicos, los litoclastos (27%) y el cuarzo (6,1%) son componentes subordinados. Llegados a este punto, vale la pena destacar que los cursos fluviales de la isla tienen un carácter intermitente y una capacidad de transporte mínima asociada a precipitaciones esporádicas e inundaciones (Segura *et al.*, 2007). Buena parte de los elementos terrígenos del sedimento de las playas proceden del desmantelamiento de los acantilados.

El sedimento de las playas de Migjorn tiende a ser en promedio más fino que el de Tramuntana,  $1,51 \pm 0,76$  phi y  $1,19 \pm 0,79$  respectivamente (Tabla 2). Mientras que desde el punto de vista composicional, en la mitad meridional de la islas el sedimento de las playas presenta un porcentaje mayor de bioclastos que en las playas del Tramuntana, 88,4% vs. 71,3% (Tabla 3).

En base a la textura y composición del sedimento Gómez-Pujol *et al.* (2013) han diferenciado 3 facies principales de sedimento, de las cuales dos pueden subdividirse en sendas subfacies. Así en la Figura 4 puede apreciarse la distribución de las playas de *Arenas medias biogénicas*, en las que el atributo característico es una elevada presencia de bioclastos (ca. 90%) y que pueden separarse en *Arenas medias biogénicas*

ricas en foraminíferos y en Arenas medias biogénicas ricas en bivalvos y algas coralíneas. Básicamente, se trata de playas localizadas en el sur de la isla o en localidades del norte protegidas de la acción de los eventos más energéticos y en contextos en los que la plataforma litoral se ensancha y el desarrollo de las comunidades de *Posidonia oceanica* es notable. Una segunda facies es la de las Arenas de medias a gruesas biogénicas con terrígenos (Fig. 4). Se trata de sedimentos en los que aunque hay una presencia significativa de bioclastos, el peso de los componentes terrígenos se incrementa notablemente (ca. 20%). Una subfacies particular, dentro de la categoría de las arenas mixtas de Menorca, son las Arenas medias biogénicas con cuarzo (Fig. 4). Si para el conjunto del Migjorn la fracción de cuarzo en el sedimento no supera el 5%, hay un grupo de playas localizadas en el sector central que superan un contenido en cuarzo del 10%. Gómez-Pujol *et al.* (2004) han sugerido que esa anomalía se debe a dos factores: por un lado, la presencia de un nivel rico en cuarzo en la Unidad Inferior de Barras del Mioceno Superior, que aflora en dicho sector; y por otro lado, el origen terrígeno de esta fracción del sedimento, puesto que las playas en las que aparece están a cobijo de calas cuyos barrancos han capturado, en cabecera, el dominio geomórfico de la Tramuntana, donde afloran roquedos silíceos. Finalmente, la última facies es la correspondiente a aquellas Arenas gruesas a muy gruesas terríge-

	Tramuntana			Migjorn		
	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
D <sub>50</sub> (phi)	1,19	2,92	-0,16	1,51	3,87	0,02
Clasificación (phi)	0,83	0,44	1,34	0,82	0,44	1,59
Skw	-0,14	-0,45	0,24	-0,08	-0,31	0,24
Kg	1,01	0,74	1,66	1,04	0,79	1,50
% Gravas	5,1	0,0	21,0	2,5	0,0	15,8
% Arenas	94,6	79,0	100,0	95,7	53,8	100,0
% Finos	0,3	0,0	2,5	1,8	0,0	44,4

**Tabla 2.** Parámetros texturales del sedimento de playa de Menorca por dominios geomórficos. Skw: asimetría; Kg: curtosis.

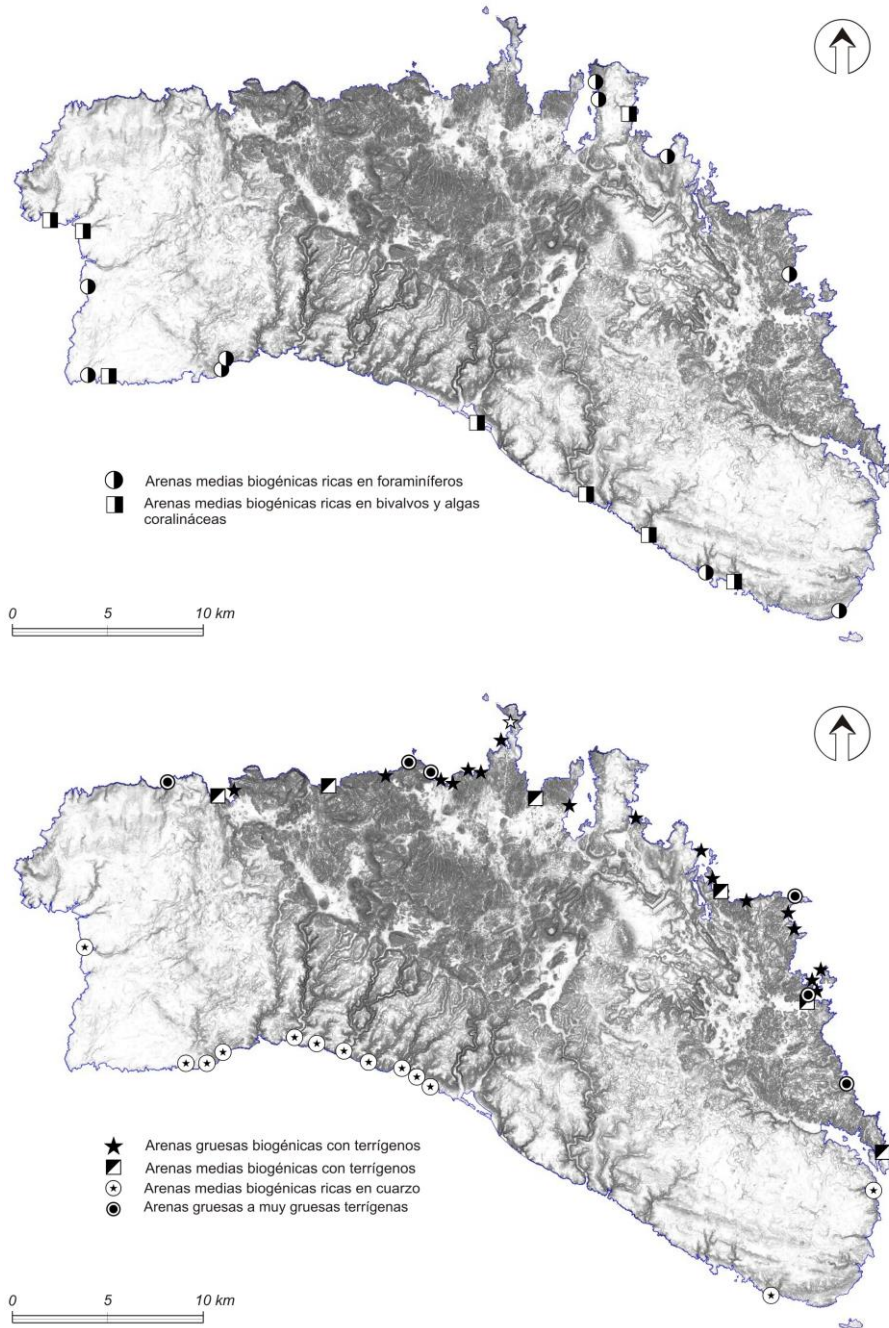
**Table 2.** Menorca beach sediments grain size and textural parameters for Tramuntana and Migjorn geomorphic regions. Skw: skewness; Kg: kurtosis.

% sedimento	Tramuntana			Migjorn		
	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
Cuarzo	2,9	0	27,3	5,8	0	19
Litoclastos	25,4	0	71,2	5,3	0	21,4
Foraminíferos	3,4	0	24,1	4,7	0,1	19,4
Bivalvos	5,2	0	17	5,1	0	21,9
Gasterópodos	2,4	0	15,1	4,1	0,1	11,4
Briozoos	2,2	0	20,5	2,7	0	12,5
Rodofceas	5,9	0	31,8	11	0	41,0
Equinodermos	1,6	0	6,4	2,7	0,1	7,4
Serpúlidos	0,4	0	4,4	0,7	0	7
Ostrácodos	0,4	0	2,7	0,4	0	2,3
Espículas esponja	0,5	0	11,6	0,2	0	1,8
Bioclasto indeter.	49,3	9	76,7	56,9	17,8	81,6
Otros	0,4	0	6,1	0,5	0	4,2

**Tabla 3.** Composición del sedimento de playa de Menorca.

**Table 3.** Menorca beach sediments composition.





**Figura 4.** Distribución espacial de las facies del sedimento de playa de Menorca.  
**Figure 4.** Spatial distribution of Menorcan beach sediment facies.

nas (Fig. 4) y que están formadas por arenas en las que la fracción de bioclastos apenas alcanza el 25% del volumen del sedimento. Su distribución está restringida al norte de la isla, en la región de *Tramuntana*, en playas expuestas al oleaje más energético y ubicadas al pie de acantilados.

### 3 | Características generales, tipología y distribución

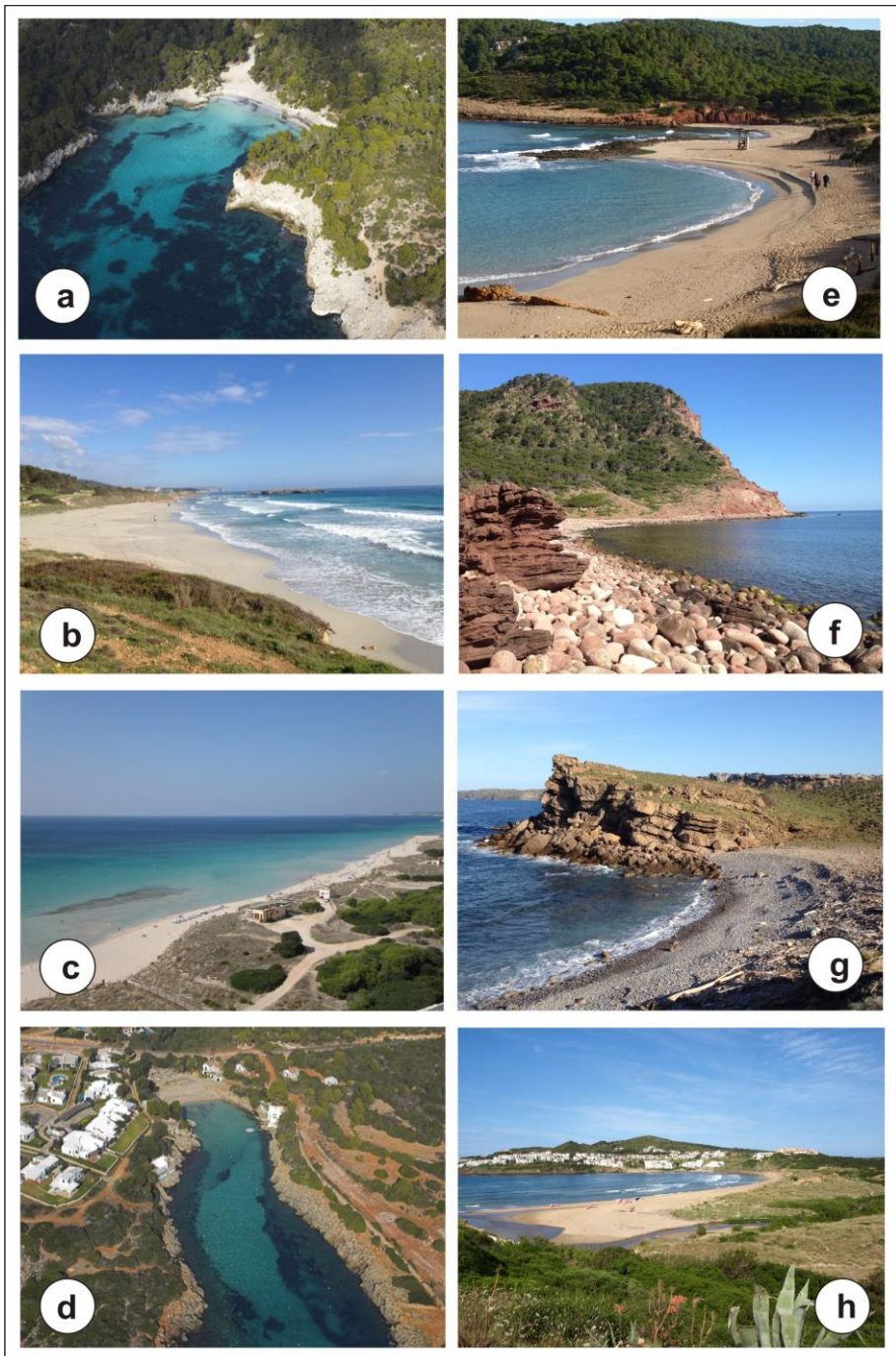
#### **Los atributos básicos**

Una vez esbozados los grandes condicionantes de las playas para la isla de Menorca, queda por revisar cuáles son sus características en cuanto a dimensiones y configuración fisiográfica. Partiendo de un criterio arbitrario por el que se considera como playa aquel acúmulo de sedimento en la costa por el oleaje con una extensión de más de 10 metros de longitud, un inventario sobre la ortofotografía de 2012 de Menorca arroja un total de 146 playas (Fig. 5). Tomando como referencia su extensión longitudinal a partir de la digitalización manual de la marca de agua, la playa menorquina, en términos medios, es de escaso recorrido. El 56,2% de las playas no supera los 50 m de longitud y tan solo el 4,8% de las playas sobrepasa los 500 m (Fig. 6). Sin duda, el control estructural y la herencia geológica, descritos en el apartado anterior, explican el rosario de pequeñas ensenadas y pequeñas calas que se traducen en recovecos con playas de escasa entidad. Especialmente llamativo es el caso del *Migjorn* de Menorca, pues aunque acoge las playas más largas de la isla –Son Bou con una longitud de 2,2 km, o Binigaus con 0,9 km– en la mayoría de casos, el 80,5%, las playas del sur apenas superan los 100 m de recorrido. Es más, el 51,2% queda por debajo de los 50 m de longitud (Fig. 6). El marcado control estructural de la línea de costa y la naturaleza acantilada del *Migjorn* explican el fenómeno, a la par que limitan la presencia de playas a la desembocadura de los barrancos –calas– que drenan el altiplano, la planicie estructural que define la mitad meridional de la isla. En cambio, la diversidad geológica de la mitad septentrional, así como un mayor grado de articulación, ayudan a explicar una distribución más heterogénea, un rango más amplio de longitudes de playa en el norte de la isla, aunque el 63,8% de las playas de *Tramuntana* tampoco superan los 100 m de recorrido (Fig. 6). Dos playas se disputan la preeminencia en cuanto a longitud en el norte de la isla, s’Arenal d’en Castell (0,69 km) y Macaret (0,78 km).

En cuanto al ancho de playa, para el conjunto de las playas de la isla (63,7%) apenas se alcanzan los 20 m de anchura media (Fig. 6). En la *Tramuntana* las playas son mucho más estrechas que en el *Migjorn*, la proximidad del acantilado o la exposición a los oleajes energéticos justificarían el escenario y que el 73,3% de las playas tengan anchuras medias, como mucho, de 20 m (Fig. 6). Mientras que en el *Migjorn*, el contexto fisiográfico de las calas, con las ensenadas alargadas y estrechas y con el efecto de los barrancos, acaban confiriendo playas que en un 51,2% de los casos alcanzan anchuras medias entre 20 y 40 m (Fig. 6).

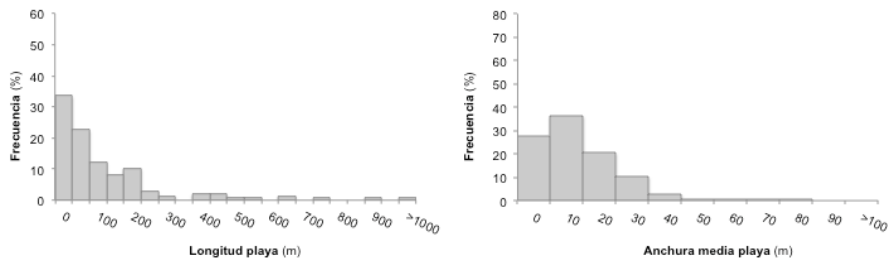
#### **Tipología de playas**

Desde un punto de vista fisiográfico pueden separarse las playas de Menorca en cuatro grandes tipologías: las playas expuestas, las playa semi-encajadas, las playas encajadas –*pocket beaches*– y las playas protegidas en el interior de las grandes bahías. Descontadas éstas últimas, que tan sólo y a razón del control estructural única-

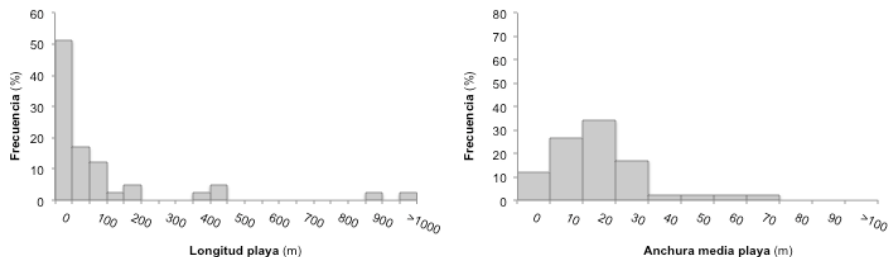


**Figura 5.** Ejemplos de playa en Migjorn (izquierda) y Tramuntana (derecha): a) Cala Turqueta. b) Binigaus; c) Son Bou, d) Binissafüller, e) Algaiarens, f) es Pla de Mar, g) Mongofre, h) Tirant.  
**Figure 5.** Selected beaches at Migjorn (left) and Tramuntana (right). a) Cala Turqueta. b) Binigaus; c) Son Bou, d) Binissafüller, e) Algaiarens, f) es Pla de Mar, g) Mongofre, h) Tirant.

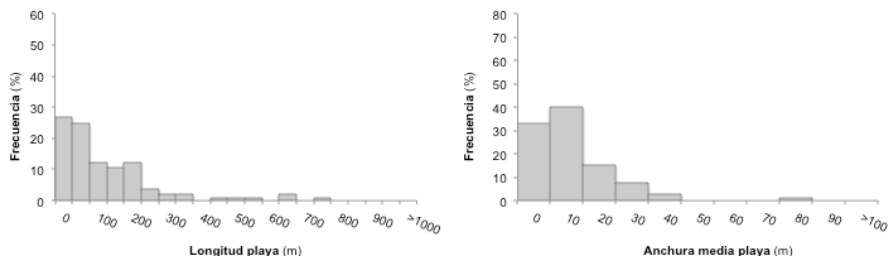
## MENORCA



## MIGJORN

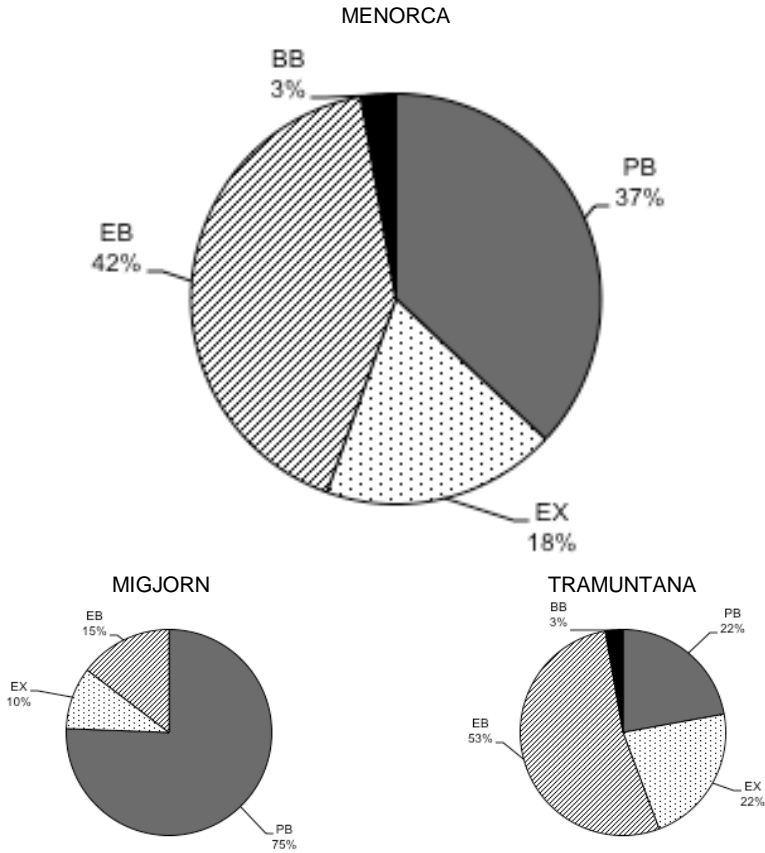


## TRAMUNTANA

**Figura 6.** Longitud y anchura media de las playas de Menorca.**Figure 6.** Menorcan beach length and width.

mente aparecen en el norte de la isla, el resto de tipologías de playa tienen una presencia para nada anecdótica en el conjunto de la isla (Fig. 7). No obstante si se separa la distribución de tipologías fisiográficas por dominios geomórficos, afloran diferencias sustanciales. De hecho, el papel relativo de las playas de escaso recorrido y ligeramente más anchas del Migjorn no puede desconectarse de la abundancia de la tipología de playas encajadas en este sector (Fig. 7). Playas en las que la apertura de la ensenada es menor que el recorrido y/o la profundidad suponen el 75% de las playas (Fig. 7), y casi en su totalidad, son ejemplos paradigmáticos de las arquetípicas calas del Mediterráneo occidental (Rosselló, 2005; Gómez-Pujol *et al.*, 2013; Furlani *et al.*, 2015).

En contraposición, el abanico de tipologías de la mitad septentrional, en las que hay un mayor peso de las bahías semi-expuestas (53%) –entendiendo por tales las que presentan una apertura de la ensenada mayor que su profundidad– tiene su traducción en un histograma de longitudes de playa más heterogéneo (Fig. 6).



**Figure 7.** Contexto fisiográfico de las playas de Menorca. PB: playas encajadas; EX: playas expuestas; EB: playas semi-expuestas; BB: playas poco energéticas en el interior de grandes bahías.

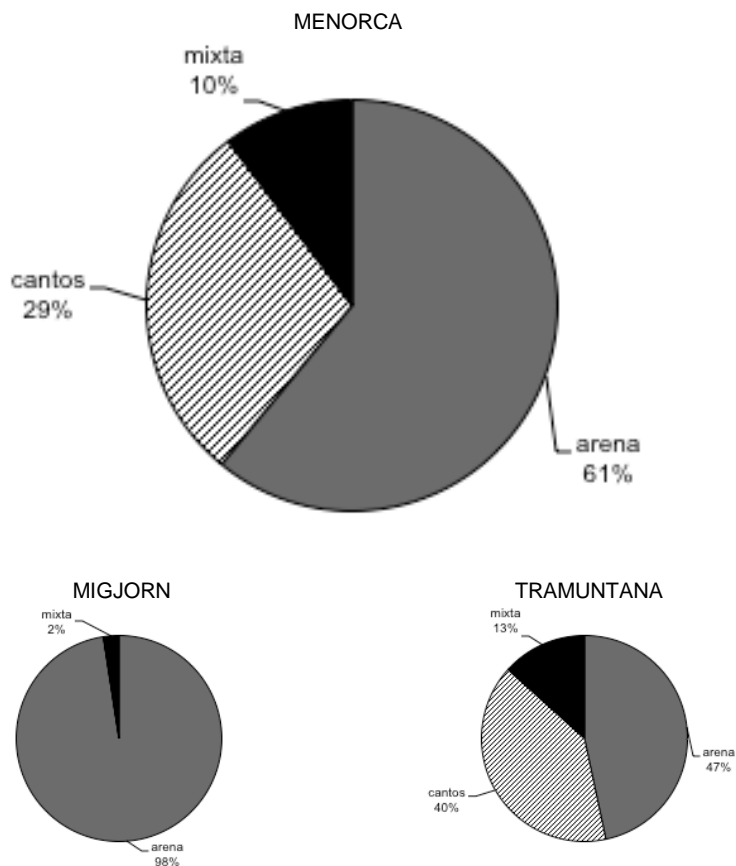
**Figura 7.** Menorcan beaches physiography framework; PB: pocket beaches; EX: exposed beaches; EB: embayed beaches; BB: low energy big bays beaches.

Un mayor porcentaje de playas expuestas (22% en Tramuntana vs. 10% en Migjorn; Fig. 7) –clasificando como tales aquellas playas que no están a cobijo de ningún accidente geográfico y por tanto más expuestas a los oleajes energéticos del norte– contribuirían a explicar el porqué de un conjunto de playas más estrechas en la región septentrional de la isla. Lo que juntamente con la naturaleza del roquedo también justificaría porque es en la mitad septentrional de Menorca donde encontramos la totalidad de playas de gravas, cantos y bloques (Fig. 8).

#### 4 | Evolución reciente de las playas de Menorca

La principal característica de las playas menorquinas es su dinamismo. Con el objeto de evaluar su tendencia evolutiva se ha digitalizado la marca de agua a modo de

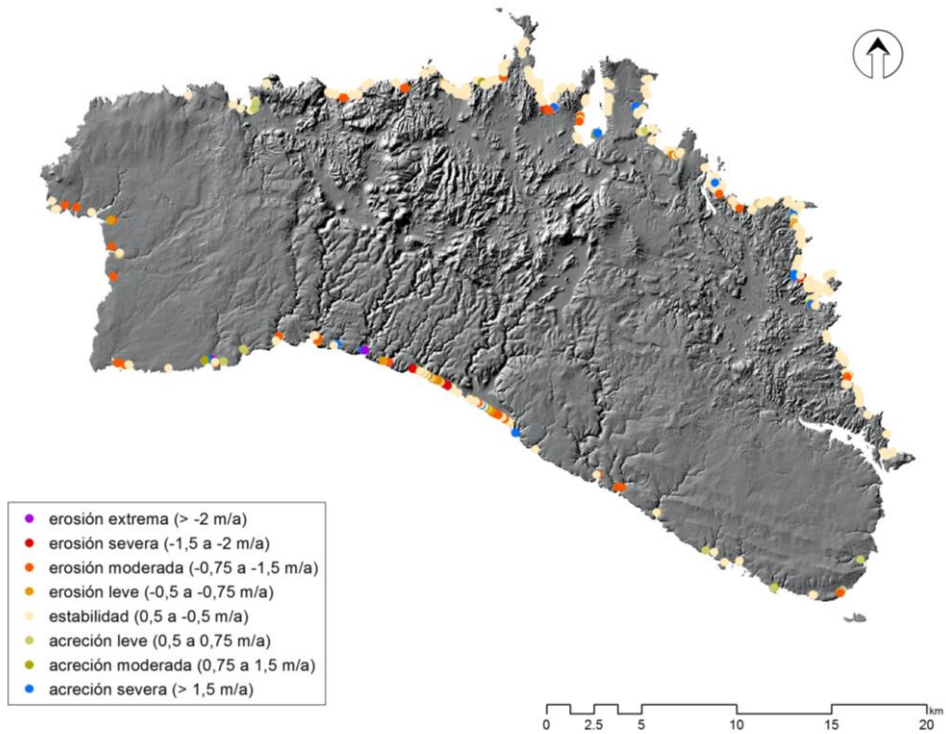




**Figura 8.** Tipología de playas de Menorca en función del tipo de sedimento.  
**Figure 8.** Menorcan beaches types according to the sediment characteristics.

indicador de la línea de costa (Ojeda, 2000; Boak y Turner, 2005) a partir de la ortofotografía disponible en el *Servei d'Informació Territorial de les Illes Balears* (SITIBSA), para los años 2002, 2004, 2008, 2006, 2010 y 2012, todas ellas con una resolución de píxel que oscila de 25 a 50 cm. La selección del periodo de análisis tiene su razón de ser en el hecho que durante la década 2002-2012 no se han producido acciones de regeneración artificial de playas y en que las intervenciones de gestión de costas han consistido principalmente en la restauración del cordón dunar. Por tanto, la evolución caracterizada representa básicamente el resultado de la acción de la dinámica natural en las condiciones actuales. A continuación se utilizó la herramienta *Digital Shoreline Analysis* (Thieler *et al.*, 2009) con la que se obtuvieron diferentes indicadores como son la anchura de la playa y la tendencia lineal de erosión (LRR, *Linear-Regression Rate*) en transectos trazados cada 20 m a lo largo de la playa.

La figura 10 muestra el histograma de las tasas de evolución media de la línea de costa en las playas analizadas a lo largo del litoral de Menorca y en la Tabla 5 los valores agregados obtenidos para el conjunto de la isla, así como para cada uno de los dominios geomórficos en que se divide la isla. Los resultados apuntan a un escenario



**Figura 9.** Evolución de la línea de costa de las playas de Menorca, 2000–2012.

**Figure 9.** Menorcan beaches shoreline change rates, 2002-2012.

Ámbito geográfico	Promedio	SD	Mínimo	Máximo	N
Menorca	-0.07	0.5	-1.67	2.86	146
Tramuntana	-0.03	0.4	-1.39	1.61	105
Migjorn	-0.18	0.8	-1.67	2.86	41

**Tabla 5.** Evolución agregada de la línea de costa para las playas de Menorca, 2000–2012.

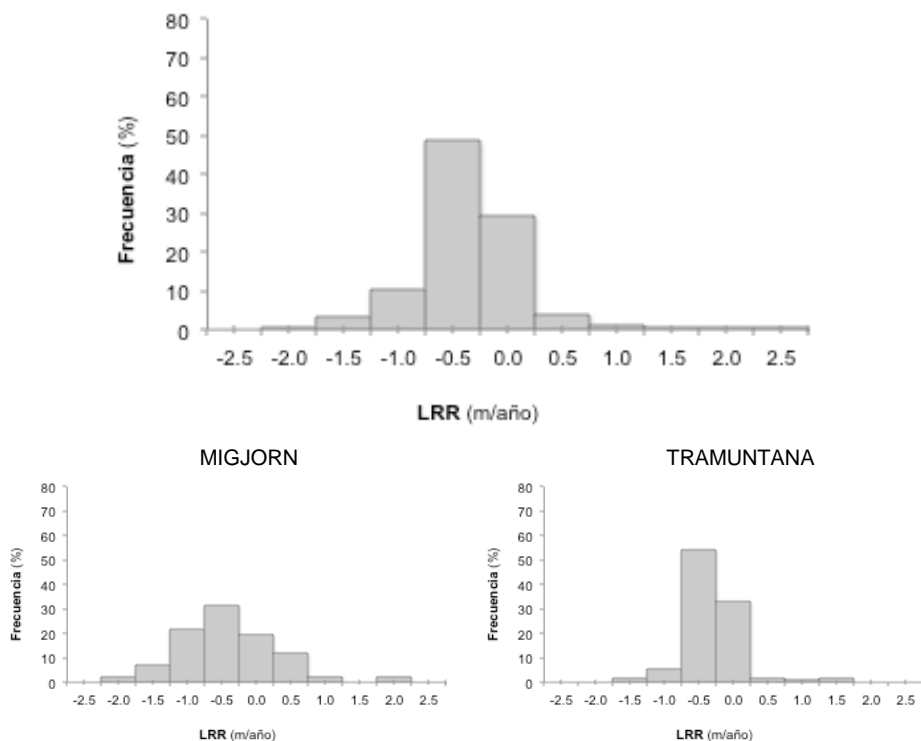
**Table 5.** Averaged Menorcan beaches shoreline change rates, 2002-2012.

en el que las playas arenosas de la isla de Menorca están experimentando una fase de estabilidad (Fig. 9 y 10). El 78,1% de las playas caracterizadas presentan una evolución media de cambio de la línea de costa entre -0,5 y 0,5 m/a. Un 14,4% de las playas experimenta procesos de erosión, que aunque habitualmente son de leves a moderados (-0,5 a -1,5 m/a) y algunas playas alcanzan máximos de -1,67 m/a (Fig. 9). Por otro lado sólo el 7,5% de las playas ha experimentado durante el periodo de estudio un avance de la línea de costa.

Por dominios geomórficos (Fig. 10) puede apreciarse que las playas del norte de la isla presentan una mayor estabilidad (87,6% en Tramuntana vs. 51,2% en Migjorn) pese a lo energético de la fachada septentrional. Debe considerarse que las playas de gravas y bloques, que en su práctica totalidad se encuentran en el Norte, destacan por presentar cierta variabilidad interanual, pero que en términos agregados, para el

periodo temporal caracterizado, se mantienen dentro de los rangos de cambio de la línea de costa considerados como de estabilidad. Otro de los fenómenos habituales en la costa norte es el de la rotación o basculamiento de la playa en los casos de playas semi-encajadas o encajadas, como sucede en s'Arenal d'en Castell o la Platja des Savinar. En esta tipología de playas las tasas de acreción en un extremo de la playa quedan compensadas por las de retroceso en el otro. En cualquier caso, el 7,6% de las playas del norte experimenta tasas de retroceso de la línea de costa, mientras el 4,8% lo hace en sentido contrario, principalmente la progradación de la playa alta se da en playas resguardadas de las componentes de norte y noroeste (i.e. Es Grau o Cala Rambla).

En cuanto al comportamiento de las playas del Migjorn (Fig. 10), el panorama presenta una mayor variabilidad, aunque en términos medios el 51,2% de las playas se encuentra en un rango de tasas de evolución media dentro de la estabilidad. Si bien es cierto que el 31,7% de las playas de este sector presenta tasas de retroceso de la línea de costa entre -0,5 y 1.5 m y que junto con Cala Escorxada (-1,67 m/a), las playas encajadas del sector de Ciutadella y el tramo Binigaus-Sant Tomàs engloban aquellas playas con mayores problemas de erosión. Casi un 16,1% de las playas del Migjorn



**Figura 10.** Tasas de cambio (LRR) de la línea de costa de las playas de Menorca, 2000-2012, por dominios geomórficos.

**Figure 10.** Menorcan beaches shoreline change trend rate (LRR), 2000-2012, at the different geomorphic domains.



destacan por presentar un avance en sus líneas de costa, bien porque se recuperan de los efectos de los temporales extremos de noviembre de 2001, bien porque por la dinámica de los barrancos favorece el empuje de la barra de cierre mar adentro (i.e. Cala Mitjana o Cala Llucalari).

## 5 | Conclusiones

Del inventario y caracterización de las playas menorquinas y de su descripción en términos de contexto fisiográfico, sedimentológico y sus tasas de evolución de la línea de costa, pueden destacarse varios aspectos entre los que resalta en primer lugar la importancia del control geológico, tanto en la distribución como en la tipología de playas. La naturaleza del roquedo no sólo condiciona el desarrollo de las redes fluviales y de la articulación de la línea de costa, sino que por extensión y dado el carácter torrencial y la escasa competencia de la red fluvial, explica la reducida componente terrígena y siliclástica del sedimento de las playas menorquinas. Especialmente en el caso del *Migjorn* se traduce en la existencia de playas encajadas –calas– y en *Tramuntana* en la concentración de las playas de cantos. Con todo, destaca la importancia del sedimento biogénico que confiere a las playas menorquinas su característico color blanquecino y transparencia de las aguas dada la escasez de la fracción fina.

En paralelo, lo articulado del litoral se traduce en la existencia de múltiples células litorales, que sólo adquieren cierta complejidad en las playas lineales que, como consecuencia del control estructural, se han desarrollado en el sector central del sur de la isla y que presentan los casos más severos, en el contexto regional de la isla, de retranqueo o variabilidad de la línea de costa.

En general, la tasa de evolución media de las playas para el conjunto de Menorca no presenta grandes problemas y se caracterizan por la estabilidad; si bien es cierto que en el *Migjorn* pese a las condiciones fisiográficas hay algunas playas que presentan tendencias regresivas y merecerían un estudio en detalle que va más allá del carácter general de este panorama general. Una estabilidad reforzada por el carácter protegido o semi-protegido de las ensenadas que acogen a las playas o porque en las playas más expuestas coinciden las acumulaciones de cantos y bloques al pie de los acantilados. Esa estabilidad no implica que no se de cierta variabilidad en la posición de la línea de costa, pues son abundantes los casos en los que se aprecia la rotación-basculamiento de la playa dado el carácter encajado de éstas.

## Agradecimientos

El presente trabajo es una contribución a los proyectos de investigación MINECO CGL2013-48441-P; CGL2016-79246-P y CTM2015-66225-C2-2 (AEI/FEDER, UE). Los autores agradecen a Josefina Salord y Joan F. López Casasnovas sus comentarios y ayuda en relación a los aspectos terminológicos de las playas de cantos.

## Bibliografía

Balaguer, P., Vallespir, J., Vizoso, M., Ruiz, M., Cañellas, B., Fornós, J. y Tintoré, J. (2015): *Atles de Sensibilitat Ambiental del Litoral de les Illes Balears*. Edición 2015. Palma, SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costero de las Illes Balears.

- Baulies, J. (1967): *L'illa de Menorca*. Barcelona, Ed. Barcions. 3 vols.
- Boak, E.H. y Turner, I.L. (2005): Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 1: 688-703.
- Bourrouilh, R. (1983): *Stratigraphie, sédimentologie et tectonique de l'île de Minorque et du Nord-Est de Majorque (Baléares)*. La terminaison Nord-orientale des Cordillères Bétiques en Méditerranée occidentale. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España.
- Cañellas, B. (2010): *Long-term extreme wave height events in the Balearic Sea: Characterization, variability and prediction*. Tesi Doctoral. Institut Mediterrani d'Estudis Avançats, Universitat de les Illes Balears. Palma. 84 pp.
- Fornós, J.J. (2004): Morfologia costanera i processos litorals. El paper de la fracturació i del karst. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Fornós, J.J. y Forteza, V. (1993): *Estudi de la dinàmica i dels sediments a la zona del Grau (Menorca)*. Document inèdit. Palma, Societat d'Història Natural de Balers. 54 pp.
- Fornós, J.J. y Obrador, A. (2003): Geologia de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds). *Introducció a la Geografia Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 31-38. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds). *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Institut Menorquí d'Estudis. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11. Palma Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Fornós, J.J., Segura, F. (2004); El rebliment holocènic dels barrancs del Migjorn. En Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds). *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Furlani, S., Pappalardo, M., Gómez-Pujol, L. y Debrat, M. (2014): The Rock Coast of the Mediterranean and Black seas. En: Kenedy, D., Stephenson, W.J. y Naylor, L. (eds). *Rocky Coast Geomorphology: A Global Synthesis: 77-87*. London. Geological Society of London.
- Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo, J.E., Rosselló, V.M. y Segura, F. (2005): Structurally controlled drainage basin development in the south of Menorca (Western Mediterranean, Spain). *Geomorphology*, 65: 139-155.
- Gómez-Pujol, L., Balaguer, P., Mateu, J. y Roig, F.X. (2004): Composició i textura del sediment de les platges del Migjorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds). *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Gómez-Pujol, L., Gelabert, B., Fornós, J.J., Rosselló, V.M., Pardo, J.E. y Segura, F. (2013): Structural control on the presence and character of Calas: examples from Balearic Islands limestone rock macroforms. *Geomorphology*, 194: 1-15.
- Gómez-Pujol, L., Orfila, A., Álvarez-Ellacuría, A., Terrados, J. y Tintoré, J. (2013a.): *Posidonia oceanica* beach-cast litter in Mediterranean beaches: a coastal videomonitoring study. *Journal of Coastal Research*. Spec. Issue., 65: 1768-1773.
- Gómez-Pujol, L., Roig, F.X., Fornós, J.J., Balaguer, P. y Mateu, J. (2013b): Provenance-related characteristics of beach sediments around the island of Menorca (Balearic Islands, western Mediterranean). *Geo-Marine Letters*, 33:195-208.
- Obrador, A. y Mercadal, B. (1979): Geomorfologia de Menorca. En: Vidal, J.M. (ed.). *Enciclopèdia de Menorca*. Volum 1: 267-230. Ciutadella, Obra Cultural Balear.
- Obrador, A. y Pomar, L. (2004): El Miocè de Migiorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds). *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Ojeda, J. (2000): Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30: 103-118.

- Ponce de León, S. y Orfila, A. (2016): Wave energy in the Balearic sea. Evolution from a 29 year spectral wave hindcast. *Renewal Energy*, 85: 1192-1200.
- Pons, G.X. y Gómez-Pujol, L. (2003): Introducción al Medio Físico de Menorca (Illes Balears). In Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds). *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 1-30. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Roig-Munar, F.X. (2010): *Aplicació de criteris geomorfològics en la gestió dels sistemes litorals arenosos de les Illes Balears*. Tesis de Doctorat. Departament de Ciències de la Terra Palma, Universitat de les Illes Balears. 366 pp.
- Rossell, J. y Llompart, C. (2002). *El naixement d'una illa, Menorca. Guia de geologia pràctica*. Maó, Institut Menorquí d'Estudis. 279 pp.
- Rosselló, V.M. (1977): *Les Illes Balears. Resum geogràfic*. Barcelona, Barcino, 198 pp.
- Rosselló, V.M. (2005): Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica. *Cuadernos de Geografía*, 77: 1-18.
- Rosselló, V.M., (2004): El litoral i les cales. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (Eds). *Història Natral 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 Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Sánchez-Arcilla, A., González-Marco, D. y Bolaños, R. (2008): A review of wave climate prediction along the Spanish Mediterranean coast. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8: 1217-1228.
- Segura, F., Pardo, J.E. y Servera, J. (1999): Tectònica i carst al migjorn de Menorca: El Prat de Son Boy. En: Rosselló, V.M. (ed.). *Geoarqueologia i Quaternari Litoral. Memorial Maria Pilar Fumanal*: 435-446. València, Publicacions de la Universitat de València.
- Segura, F., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gelabert, B. (2007): Morphometric indices of tectonic fluvial and karst processes in calcareous drainage basins, South Menorca Island, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32:1928-1946
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L. y Ergui, A. (2009): *Digital shoreline analysis sytem (DSAS) versió 4*. US Geological Survey Open-file Report, 2008-1278.
- Tintoré J.; Vizoso, G., Casa, B., Heslop, E., Pacual, A., Orfila, A., Ruiz, S., Martínez-Ledesma, M., Torner, M., Cusí, S., Balaguer, P., Gómez-Pujol, L., Álvarez-Ellacuría, A., Sebastian, K., Lora, S., Beltrán, P., Renault, L., Juzà, M., Álvarez, D., March, D., Garau, B., Castilla, C., Cañellas, T., Roque, D., Lizarán, I., Pitarch, S., Carrasco, M., Lana, A., Mason, E., Escudier, R., Conti, D., Sayol, J.M., Barceló, B., Alemany, F., Reglero, P., Massuti, E., Vélez-Belchi, P., Ruiz, J., Oguz, T., Góme, M., Álvarez, E., Ansorema, K. y Manríquez, M. (2013): SOCIB: The Balearic Islands Coastal Ocean Observing and Forecasting System Responding to Sciene, Technology and Society Needs. *Marine Technology Society Journal*, 47: 1-17.



# Los sistemas dunares costeros de Menorca

Guillem X. Pons<sup>1,2</sup>, José Á. Martín-Prieto<sup>1</sup>, Miquel Mir-Gual<sup>2</sup> y A. Rodríguez-Perea<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Grup de Recerca BIOGEOMED, Palma.

<sup>2</sup> Institut Menorquí d'Estudis, IME, Maó.

## RESUMEN

Menorca cuenta con una superficie de aproximadamente 700 km<sup>2</sup> y 369,2 km de costa. De estos 36,7 km se corresponden con playas arenosas o de cantos. Y unos 20,24 km (un 5,5%) es de playas o calas exclusivamente arenosas. Estas playas suponen la base de la actividad turística, que se ha convertido en el principal recurso económico de la isla. Sin embargo, más allá de ser una plataforma para el desarrollo del turismo, las playas son una parte viva de Menorca, una parte dinámica y cambiante que es muy frágil. La UNESCO declaró Menorca como Reserva de la Biosfera el 8 de octubre de 1993. Para ello se tuvo en consideración el alto grado de compatibilidad conseguida entre el desarrollo de las actividades económicas, el consumo de recursos y la conservación del patrimonio y el paisaje; de todo esto, las playas de Menorca son un buen ejemplo. Las praderas de *Posidonia oceanica* constituyen una de las formaciones más características e importantes de la costa menorquina debido a la gran extensión que ocupan ya su papel como bosques submarinos productores de vida, oxígeno, amortiguador del oleaje y de las corrientes, y sedimento que alimenta a esas playas.

**Palabras clave:** Menorca, sistemas dunares, *Posidonia oceanica*.

## ABSTRACT

Menorca has an area of approximately 700 km<sup>2</sup> and 369.2 km of coastline. Of these 36.7 km correspond to sandy beaches or songs. And about 20.24 km (5.5%) is of beaches or coves exclusively sandy. These beaches are the basis of tourism, which has become the main economic resource of the island. However, beyond being a platform for the development of tourism, beaches are a living part of Menorca, a dynamic and changing part that is very fragile. UNESCO declared Menorca as a Biosphere Reserve on 8 October 1993. This took into consideration the high degree of compatibility achieved between the development of economic activities, the consumption of resources and the conservation of heritage and landscape; Of all this, the beaches of Menorca are a good example. *Posidonia* meadows constitute one of the most characteristic and important formations of the coast of Menorca because of the great extent that they already occupy their role as submarine forests that produce life, oxygen, wave and current absorber, and sediment that feeds those beaches.

**Keywords:** Menorca, dune systems, *Posidonia oceanica*.

## 1 | Introducción

Los sistemas dunares costeros son espacios de acumulación de sedimento arenoso que se desarrollan tierra adentro de la mayoría de las playas de las islas Baleares. De hecho deben considerarse como parte de un sistema más complejo, sistema playa-duna, que abarca dos ámbitos diferenciados: un ámbito sumergido, controlado por la hidrodinámica marina, y otro subaéreo cuyo agente de modelado principal es la dinámica eólica. Las dunas litorales constituyen un paisaje ondulado que se extiende desde la playa tierra adentro de forma organizada, y que está formado por unidades individuales de relieve positivo a las que llamamos dunas, y a su conjunto campos dunares. A pesar de que los sistemas dunares pueden analizarse morfológica y dinámicamente de forma independiente, su existencia, estructura y su equilibrio no pueden desligarse de la playa, incluyendo la playa sumergida, ni tampoco del contexto medioambiental en que se formaron y han ido evolucionando (Servera *et al.*, 2007).

El masivo desarrollo de infraestructura turística y urbanística en la zona litoral de las Islas Baleares ha conducido a una paulatina destrucción y desgaste del paisaje litoral. Pero sin duda, han sido las costas arenosas y sus sistemas dunares, con ecosistemas altamente especializados, son los que se han visto más afectados. Estos espacios vitales, han sufrido una reducción de su superficie debido fundamentalmente a desarrollos urbanísticos promovidos por la actividad turística y una falta de gestión adecuada (Curr *et al.*, 2000; Williams y Morgan, 1995). Esta presión urbanística y la permanente y creciente presión de los visitantes son las causas directas de la regresión de los ecosistemas dunares. Especialmente la carga provocada por el continuo pisoteo de visitantes que han provocado la fragmentación del sistema dunar gracias a la eliminación de la cobertura vegetal (Schmitt, 1994; Roig-Munar *et al.*, 2012) y con la consecuente aparición de formas erosivas blowout (Mir-Gual y Pons, 2011).

Las Islas Baleares, así como otros destinos turísticos clásicos de sol y playa, la ocupación del litoral por parte del hombre, durante las últimas décadas, ha sido de carácter masivo, rápido y acultural (Cerdà, 2002). Como consecuencia se ha dado un proceso de '*litoralización*' acelerado, que en algunos casos ha dado lugar a la pérdida de identidad de estos espacios (González, 2003, Roig-Munar, 2003). En muchas ocasiones estas ocupaciones han dado lugar a la interrupción de estrategias y mecanismos naturales de defensa que han impedido el buen funcionamiento de los ecosistemas arenosos, como los sistemas playa-duna (Brown y McLachlan, 1990). Este proceso ha modificado notablemente el paisaje, cambiando las características naturales y los usos tradicionales del litoral, ya sea de forma intencionada o no. Además, este cambio ha sido imprevisto, en la medida que al comenzar el desarrollo turístico no se concibió que el espacio ofertado -las playas y las dunas- fueran espacios frágiles y dinámicos, susceptibles a una rápida degradación. En este sentido, Nordstrom y Mitteager (2001) mencionan la acción del hombre sobre el medio litoral como una acción aberrante, reclamando que las acciones se realicen de forma integral y no como intromisión en el medio. Bejarano *et al.* (1997) mencionan que las agresiones sobre el litoral se encuentran disfrazadas como "factores socioeconómicos" que han permitido la ruptura de sistemas y ámbitos de riqueza natural. Además de la degradación natural como ecosistema y como paisaje, por la ocupación directa de la costa, en muchas ocasiones se ha provocado una alteración de la dinámica litoral, que no se circunscribe exclusivamente al espacio ocupado físicamente. Algunas de estas actuaciones de transformación, que desvirtúan el carácter del litoral, y que a veces lo degradan completamente e irreversiblemente, han acabado provocando, a menudo, la dependencia del litoral arenoso de procesos de regeneración artificial (Rodríguez-Perea *et al.*, 2000), concibiendo un espacio intensamente dinámico como un espacio estático (Jiménez y Valdemoro, 2003).

Los espacios litorales son espacios públicos de bajo coste. Se puede decir que son los espacios públicos más extensos que ofrecen los municipios costeros. Son referentes importantes en el proceso productivo a nivel local, regional y estatal, y constituyen el fundamento más sólido de la oferta turística. Paradójicamente, siendo las playas tan provechosas y complejas, tan valoradas y solicitadas, su gestión está basada en un concepto estrictamente económico, mecánico y estático del espacio, en el que se obvia su dinamismo y su fragilidad, entendiéndolas simplemente como espacios con una gran potencia de recaudación económica a los que se presta atención sólo durante la temporada alta de máximo uso (Yepes *et al.*, 1999; Iribas, 2002, Roig-

Munar, 2003). Las transformaciones sobre el medio han sido incorporadas para llegar a la calidad litoral entendida por los clientes como la idoneidad o adecuación para el uso, y que en muchas ocasiones tiende simplemente a satisfacer las demandas de los usuarios de playas para hacer de estas, bienes naturales funcionales o de servicios.

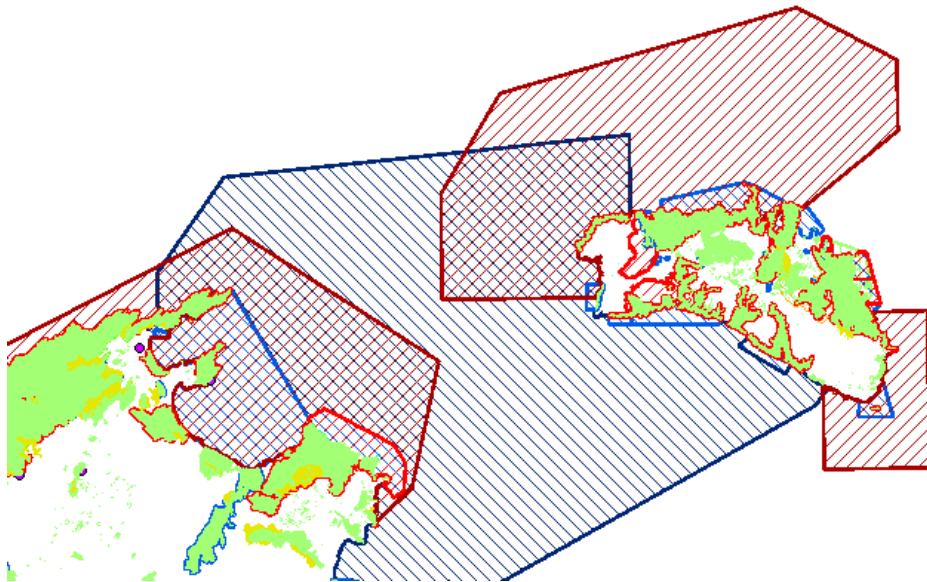
Yepes y Medina (1997) indican que la gestión turística del litoral equivale al conjunto de acciones encaminadas a la consecución de determinados fines turísticos en el ámbito costero mediante la combinación, la distribución y la disposición de los recursos materiales y humanos, la guía, la coordinación y la motivación de los diferentes agentes implicados y la evaluación de los efectos en función de los objetivos fijados, los cuales deben tener presente a la hora de la planificación de nuevos espacios litorales, como las regeneraciones artificiales (Gallofrer *et al.*, 1997). Estos autores entienden que la gestión y la ordenación turística del litoral implican la planificación, organización, dirección y control de los recursos costeros para conseguir unos objetivos claramente turísticos y económicos. Consideran que el espacio es un servicio y no un sistema natural sobre el que se pueden encontrar determinados servicios. Es justamente esta capacidad de satisfacer necesidades empresariales, políticas y sociales que ha transformado los atributos de la naturaleza litoral en un recurso económico, convirtiendo estos espacios en algo subjetivo, relativo y funcional (Roig-Munar, 2003).

El espacio litoral se encuentra limitado y sujeto a usos que en algunos casos son contraproducentes para la estabilidad del sistema. La confluencia de diferentes intereses ha constituido la principal preocupación de los poderes públicos y privados, así como de los distintos profesionales que estudian ese ecosistema. El valor ambiental y paisajístico de las playas, se mire como se mire, es innegable. De todos los medios terrestres, las zonas costeras constituyen uno de los ámbitos de estudio más atractivos desde la perspectiva geográfica, siendo el litoral una frontera por antonomasia (Pardo y Rosselló, 2001). Sin entrar en los detalles de sus complejidades geomorfológicas con otros espacios limítrofes, el litoral se presenta como un espacio de elevado interés. Pero para una correcta comprensión del medio no se puede dejar de lado, prácticamente en ningún caso, el hombre. El factor humano es una de las piezas básicas para entender su funcionamiento así como sus desequilibrios. Esto es así por el aumento en su capacidad de influencia humana, que la ha convertido en uno de los agentes más decisivos y efectivos en las modificaciones de la morfología y del funcionamiento litoral, y porque el litoral ha pasado a ser de una zona sin importancia económica hasta mediados de siglo XX, a un bien con alta estima social y económica.

A finales del siglo XVIII las zonas litorales eran todavía espacios hostiles e inhóspitos, a la vez que peligrosos para la población, hecho que queda manifestado con los pocos núcleos urbanos asociados al litoral, muchos de ellos amurallados, situación aún más evidente y agravada en los territorios insulares. Antes del período turístico actual, que se fundamenta principalmente en la explotación litoral de los sistemas playa-duna como espacio de ocio (Valdemoro y Jiménez, 2006), el litoral mantenía un dinamismo natural y equilibrado que suponía en algunos lugares costeros un peligro para la población y para los cultivos, debido al avance de las dunas hacia las zonas internas. A fin de evitar el avance de morfologías dunares se empiezan a realizar tareas de forestación para la fijación de sistemas dunares (Mayol, 2006; Roig-Munar *et al.*, 2009). En general, su objetivo es evitar que los frentes dunares afecten de manera negativa a zonas de interés por la actividad humana, como tierras de interés agrario o núcleos de población (Ranwell y Boar, 1986). A su vez, estas

actuaciones están reconocidas como uno de los impactos negativos en la conservación de estos ambientes. En este sentido la costa también se vio afectada por procesos de fijación de masas forestales de las cuencas de drenado, reduciendo de forma considerable la aportación de material sedimentario que quedó retenido por el incremento de las tasas de fijación de suelo (Vizcaíno, 2001). En las últimas décadas el litoral se presenta como el motor del desarrollo territorial que se da en su parte emergida (Lechuga, 1999). A este valor ambiental debemos superponer las industrias turísticas, no siempre en consonancia con la protección y evolución del medio litoral. En la mayoría de los países turístico litorales la disponibilidad de playas en condiciones óptimas es primordial, ya que representan la infraestructura básica de la economía, adquiriendo un importante valor económico y geopolítico.

Dentro del marco de gestiones de playas éstas han tenido como prioridad la estabilización de playas para su explotación, aunque estas se han visto afectadas de forma regresiva para actuaciones de extracciones de áridos en sus cuencas (Vizcaíno, 2001) y la creación de presas hidráulicas (Bird, 2000). La respuesta tradicional de la ingeniería para hacer frente a la erosión costera y la defensa de la misma ha sido la de mitigar los efectos erosivos, y cuando ha sido posible, prevenir la erosión por diferentes métodos (Hanson *et al.*, 2002; Hamm *et al.*, 2002). Muchas de estas actuaciones han sido atribuibles al estado de degradación derivado de una mala gestión y planificación.



**Figura 1.** Cartografía de las zonas protegidas de Menorca y norte de Mallorca, en azul zonas LIC, áreas en rojo zonas ZEPAS, Verde zonas ANEI (Áreas Naturales de Especial Interés, una figura propia de protección derivada de la normativa autonómica). Visor IDEIB.

**Figure 1.** Cartography of the protected areas of Menorca and northern Mallorca, in blue LIC zones, in red ZEPAS'areas, green zones ANEI (Natural Areas of Special Interest, a figure of protection derived from the autonomic regulations). IDEIB Viewer.



## 2 | Las playas y las calas de Menorca

La UNESCO declaró Menorca como reserva de biosfera el 8 de octubre de 1993, atendiendo al alto grado de compatibilidad conseguido entre el desarrollo de las actividades económicas, el consumo de recursos y la conservación de un patrimonio y de un paisaje que ha mantenido, y sigue manteniendo hoy, una calidad excepcional. Menorca es un territorio intensamente humanizado, con un paisaje rural tradicional muy rico. Aloja una notable diversidad de hábitats mediterráneos, en los que viven especies de animales y plantas endémicas, exclusivas de la isla, algunas de ellas en peligro de extinción.

Las zonas litorales y los ecosistemas marinos son áreas que cuentan, en general, con alguna figura de protección (Fig. 1). Menorca cuenta con un parque natural, s'Albufera des Grau, illa den Colom y cap de Favàritx creado en 1995 y ampliado el 2003 (decreto 51/2003, de 16 de mayo, de ampliación del Parque natural de s'Albufera des Grau y de declaración de las Reservas naturales de las islas des Porros, s'Estany, la bassa de Morella, es Prat y la illa d'en Colom). Cuenta en la actualidad con 5.066,95 hectáreas protegidas (1.735,50 hectáreas marinas y 3.331,46 hectáreas terrestres) y es el núcleo de la Reserva de la Biosfera.

En el conjunto de las Islas Baleares hay unas 322 calas o playas. Algunas de ellas, en general las más energéticas o relacionadas con desprendimientos de acantilados, están formadas por cantos rodados. Pero, la gran mayoría son partes terminales de torrentes que acumulan arena y conforman la playa. Unas pocas conforman los verdaderos sistemas playa-duna. Así, de esta última tipología se han descrito un total de 28 campos de dunas que se extienden sobre unas 3.500 ha (Servera *et al.*, 2007).



**Figura 2.** Playa de Son Bou (Alaior) que cierra una zona húmeda producto de la desembocadura de distintos barrancos es la playa más larga de Menorca.

**Figure 2.** Son Bou beach (Alaior), the longest beach in Menorca, closes a wet zone where different streams discharge.



**Figura 3.** Pequeña playa en el islote del Lazareto, dentro del puerto de Maó.

**Figure 3.** Small beach on the islet of Lazareto, inside the port of Maó.

Estos sistemas se sitúan en la mayoría de los entrantes costeros y a favor de los vientos dominantes que provienen del N y W en invierno, y del S y en régimen de brisas, durante el verano. La ausencia de marea y las extensas praderas de fanerógamas marinas (*Posidonia oceanica*) caracterizan la dinámica litoral de las Baleares.

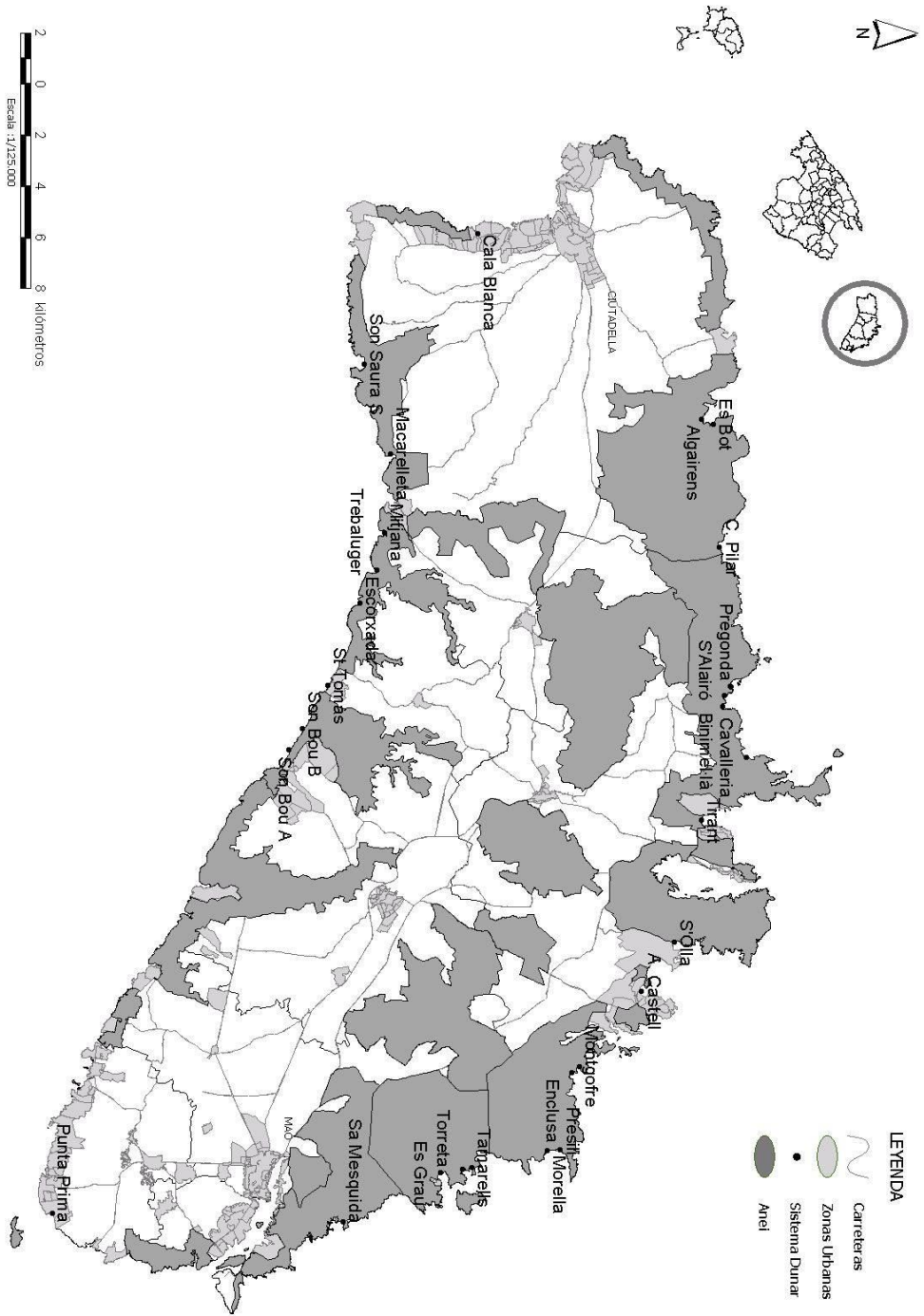
Según Balaguer *et al.* (2015), utilizando cartografía 1:5000 del Govern de les Illes Balears, Menorca cuenta con unos 369,2 km de costa. De estos 36,7 km se corresponden con playas arenosas o de cantos. Y unos 20,24 km (un 5,5%) es de playas o calas exclusivamente arenosas. En total se podría hablar de unas 119 playas o calas, la mayoría de ellas de pocas dimensiones, y sin conformar sistemas dunares asociados. Las mayores longitudes de playa las encontramos en el sur de Menorca: Son Bou (Alaior), con unos 2.300 m (Fig. 2); Binigaus (es Migjorn Gran) con 1040 m; Santo Tomàs (es Migjorn Gran) con 750 m y Sant Adeodat (es Migjorn Gran) con 490 m. En el norte, s'Arenal den Castell (es Mercadal) con 650 m, es Grau (Maó) con 590 m o Tirant (es Mercadal) con 570 m serían las excepciones, las otras no superan los 500 m. El resto son calas pequeñas o muy pequeñas, pocas llegan a 150 m. Algunas playas de islotes o de pocas dimensiones tampoco se suelen tener en cuenta (Fig. 3).

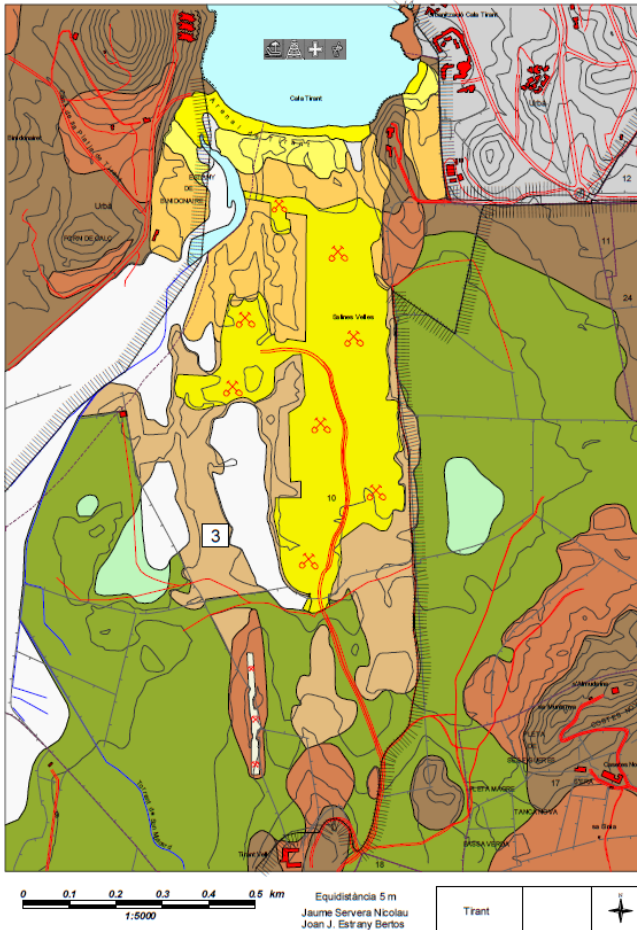
Pocas de ellas desarrollan un sistema playa-duna, aunque sea incipiente. Estas fueron definidas por Servera y Estrany (2002) y posteriormente Roig-Munar *et al.* (2012) realizan un análisis espacio-temporal (1956-2004), en base a variables ambientales de uso y gestión (Figs. 4 y 5, Tabla 1).

La tipología de playas de Menorca, y por tanto también a esos sistemas playa-duna, tradicionalmente se ha dividido en tres grupos (Juaneda y Roig, 2002): tipo A (urbanas) (Fig. 6), tipo B (vírgenes con buena accesibilidad rodada y peatonal, sin ser-

**Figura 4.** (página siguiente) Playas que desarrollan sistemas dunares, aunque algunos sean de forma incipiente o muy reducidos según Roig-Munar *et al.* (2012).

**Figure 4.** (next pages) Beaches that develop dune systems, although some are incipient or very reduced according to Roig-Munar *et al.* (2012).





**Figura 5.** Sistema playa-duna de Cala Tirant según Servera y Estrany (2002).  
**Figure 5.** Beach-dune system of Cala Tirant according to Servera and Estrany (2002).

Sistemas de tipología A	Sistemas de tipología B	Sistemas de tipología C
Arenal d'en Castell	Binimel·là	Cala Pilar
Cala Blanca	Cavalleria	Escorxada
Punta Prima	Es Bot	Morella
Sant Adeodato	Es Grau	Presili
Sant Tomàs	Es Tancats	S'Enclusa
Son Bou, zona A	Macarelleta	Tamarells
S'Olla (Son Saura N)	Mesquida	Torreta
	Mitjana	Trebalúger
	Pregonda	
	S'Alairó (Pregondó)	
	Son Bou, zona B	
	Son Saura Sud	
	Tirant	

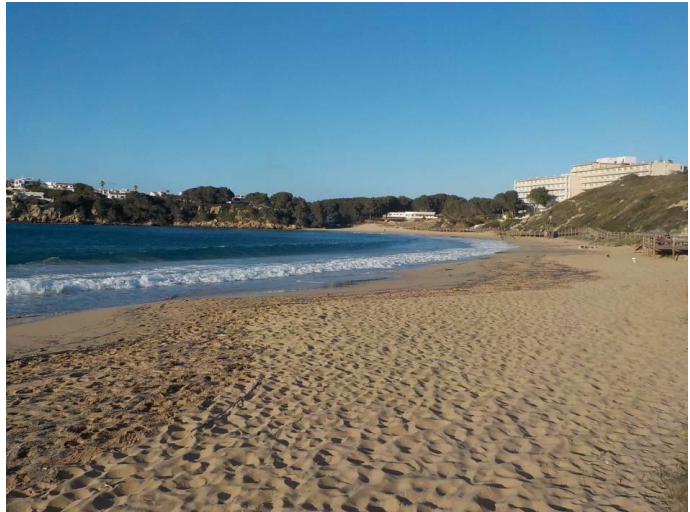
**Tabla 1.** Playas y calas con sistemas playa-duna, algunos muy reducidos o incipientes y su clasificación según su tipología.

**Table 1.** Beaches and coves with beach-dune systems, some very small or incipient and their type classification.



servicios turísticos o de ocio y con un alto grado de frecuentación) (Fig. 7) y tipo C (el resto, con poca o nula frecuentación y sin acceso rodado) (Fig. 8). Todo y su aceptación general sería necesaria una revisión de esa clasificación puesto que playas de tipo C, se ven sujetas a una elevada frecuentación por vía marítima, con barcas privadas o de excursiones que llegan a saturar dichas playas, en ocasiones, con incluso más frecuentación que playas del tipo A. La publicitación ha sido un gran desencadenante de la necesidad del turista para visitar las playas vírgenes (tipo B y C) también por vía terrestre. En las áreas de acceso a playas del tipo B habilitadas como aparcamiento, por la mañana, bien temprano, ya se da la saturación, creando problemas de tráfico, e incluso seguridad vial y conflictos con las fincas adyacentes en busca de aparcamiento -invadiendo una propiedad privada- y problemas de seguridad-puesto de información, incluso de agresiones de turistas que no consiguen aparcar.

**Figura 6.** S'Arenal den Castell (es Mercadal), playa urbana del tipo A.  
**Figure 6.** S'Arenal den Castell (es Mercadal), urban beach type A.



**Figura 7.** Cala Pregonda (es Mercadal), playa de tipo B.  
**Figure 7.** Cala Pregonda (es Mercadal), beach type B.





**Figura 8.** Cala Escorxada (es Migjorn Gran), playa de tipo C.

**Figure 8.** Cala Escorxada (es Migjorn Gran), beach type C.

Tal como indica Servera (2003), Menorca mayoritariamente presenta una línea de costa de tipo acantilado, poco adecuada a la formación de ambientes de playa o de cala. No obstante, en cada uno de los lugares del litoral en que se dan las condiciones topográficas adecuadas en la transición del ámbito sumergido al ámbito subaéreo y existe la disponibilidad de sedimento arenoso, encontramos formaciones de playas o cala, y en algunas ocasiones desarrollo de sistemas de playa-duna (Fig. 9). En este sentido son numerosos, aunque pequeños, los entrantes de mar hacia tierra que en la su parte más profunda presentan este tipo de litoral. Los sistemas playa-duna litorales son ambientes muy dinámicos, donde se dan variaciones de las formas a diferente escala temporal. Así pues, estos ambientes presentan cambios muy rápidos, en cuestión de horas, como los movimientos de las barras arenosas de la playa sumergida, y cambios lentos, milenarios, como la ampliación o reducción del campo de dunas. Todos estos procesos que implican una dinámica de sistema, responden a estrategias naturales que tienen como única finalidad el equilibrio o la estabilidad de la línea de costa. Estabilidad que podemos entender o asumir como un balance sedimentario cero, donde las pérdidas de sedimento se compensan con las entradas en el sistema. Pese a todo, la variabilidad de los diferentes agentes que intervienen a corto y medio plazo y de los factores a largo plazo, hacen que la búsqueda del equilibrio y estabilidad de la línea de costa sea permanente y que la dinámica de los sistemas lleve a una persistente adaptación sincrónica de todas sus formas en cada variación ambiental, por sutil que sea esta. Pese a todo y en última instancia, dentro del complejo dinamismo de estos ambientes litorales, la existencia y las características definitorias de los sistemas playa-duna actuales están ligados a un factor clave, el nivel relativo del mar. A medio o a largo plazo el comportamiento regresivo o transgresivo del mar marca una pauta muy importante en el balance sedimentario de estos litorales. Una variación de signo regresivo favorece un excedente de sedimento en la parte emergida del sistema, ya que progresivamente quedan al descubierto los contingentes que conforman la playa sumergida. Son en estos cambios en la tendencia

**Figura 9.** (página siguiente) Mapa con las playas y calas de Menorca.

**Figure 9.** (next page) Map with the beaches and calas of Menorca.



regresiva cuando la dinámica eólica construye las formas dunares. Con una tendencia opuesta, con una variación de signo transgresivo, se produce un déficit de sedimento en la parte sumergida del sistema. En estas circunstancias se ocasiona el retorno del sedimento depositado en las dunas hacia la zona de playa sumergida. En el sentido que anteriormente hemos expuesto, los sistemas playa-duna constituyen los ambientes sedimentarios que con el tiempo y ligados a cambios importantes en los factores ambientales que los determinan, pueden dar lugar a depósitos antiguos de eolianitas. Depósitos que son el resultado de la progresiva paralización de los campos de dunas y posterior litificación como excedentes sedimentarios en las fases regresivas en los períodos glaciales. Ahora bien, no necesariamente necesitamos tener oscilaciones del nivel del mar como las producidas por un período glacial para tener la construcción de edificios dunares que en algunas ocasiones presentan restos fósiles (ver Vicens y Pons, 2017). Tal como sucede en los sistemas playa-duna actuales, estos han sido el resultado de las regresiones y transgresiones del nivel del mar ocurridas por las pulsaciones y oscilaciones climáticas del Holoceno. Es más, la presencia de diferentes generaciones de depósitos en los campos dunares actuales se debe a que ninguna trasgresión del nivel del mar provocada por las pulsaciones más recientes, ha superado el nivel alcanzado en el máximo flandriense, hace unos 6.000 años. Esto implica que cuanto más reciente ha sido la oscilación, menor magnitud ha presentado, lo que ha permitido el acoplamiento en horizontal de las diferentes generaciones de dunas que encontramos construidas. El sedimento de los sistemas playa-duna de Menorca Los ambientes de deposición playa-duna de Menorca, igual que pasa en el resto de las islas Baleares, no difieren excesivamente de la morfogénesis y morfodinámica que caracteriza al resto de ambientes similares del Mediterráneo, incluso del resto del mundo. Tal vez, la diferencia más importante sea el origen del sedimento que los compone, ya que normalmente en este tipo de sistemas litorales la fuente de alimentación suelen ser los contingentes de sedimento alóctonos (litoclastos) que vierten las redes fluviales a la costa o los que el mar trabaja por desmantelamiento de acantilados de materiales cohesionados; no obstante, en las islas Baleares la principal fuente de sedimento viene de la producción biogénica in situ (bioclastos).

Una de las características de las playas y dunas de las Baleares que las distinguen de playas de la península ibérica es la composición de sus arenas. Éstas son mayoritariamente de origen bioclástico –restos esqueléticos de organismos marinos– (87% en promedio para Mallorca) (Jaume y Fornós, 1992, Gómez-Pujol *et al.*, 2000), con una escasa aportación de los litoclastos –partículas arenosas de características no biológicas–. Gómez-Pujol *et al.* (2013; 2017 en este volumen) analizan detalladamente la composición del sedimento de las playas de Menorca. Tal como indican estos autores, la composición media de las playas de Menorca de bioclastos es 78,3%. No obstante, la proporción de bioclastos varía de una playa a otra y de un dominio geomórfico a otro. Oscilando del 9 al 99,4% su contribución al volumen de sedimento (Gómez-Pujol *et al.*, 2013; 2017).

### **3 | Historia de los sistema dunares costeros**

A pesar de que la mayoría de análisis empiezan desde que se cuenta con fotografía aérea (1956), como elemento pre-turístico del litoral, hay otros datos históricos que



nos permiten comprobar que ese espacio de playa ha sido utilizado (y modificado). Los documentos de planificación regional y sectorial y los archivos de imágenes y sonido (fotografía y películas) han ayudado a ampliar ese aspecto de análisis temporal.

Los procesos de fijación de dunas mediante actuaciones de forestación están recogidos en abundante bibliografía tanto en el ámbito estatal como en el internacional (Valls, 1870; Artigas, 1887, 1889; Anónimo, 1890; Artigas, 1890, 1896; De Castro, 1900a, 1900b; Codorniu, 1908; Tiismann, 1924; Whitehead, 1964; Ranwell y Boar, 1986; Gadgil y Ede, 1998; Cata y Pontee, 1998; Hilton *et al.*, 2000; Lemauviel y Roze, 2000; Pausas *et al.*, 2004; Hilton, 2006; Mayol, 2006). En general, su objetivo es evitar que los frentes dunares afecten de manera negativa a zonas de interés para la actividad humana, como suelos de interés agrario o núcleos de población (Ranwell y Boar, 1986; Gadgil y Ede, 1998). A la vez, estas actuaciones están reconocidas como uno de los impactos negativos en la conservación de estos ambientes (Ranwell y Boar, 1986; Gallego Fernández *et al.*, 2003).

A finales del s. XVIII las zonas litorales eran aún espacios hostiles e inhóspitos, a la vez que peligrosos para la población, lo que queda manifestado con los pocos núcleos urbanos asociados al litoral, mucho de ellos amurallados. Una situación aún más evidente y agravada en los territorios insulares (Grove y Rackham, 2003).

Antes del período turístico actual, que se basa principalmente en la explotación litoral de los sistemas playa-duna como espacio de ocio (Valdemoro y Jiménez, 2006), se mantenía un dinamismo natural y equilibrado en estos que suponía en algunos lugares de la cuesta un peligro para la población y para los cultivos, debido al avance de las dunas hacia las zonas internas. Según Madariaga (1909) en determinados puntos de la costa existían grandes superficies ocupadas por arenales que avanzaban tierra adentro conquistando terrenos fértiles, haciéndolos improductivos y enterrando viviendas y poblaciones enteras. El autor cita que en casos de terrenos productivos afectados por arenas voladoras no queda más opción que la forestación para retener y estabilizar terrenos arenosos móviles hasta el cubrimiento definitivo de las arenas, volviendo estos espacios o campos de desolación en fuentes de riqueza y hermosura.

Es a partir de 1902 que se utiliza el arbolado como medida eficaz para evitar el avance de la arena en el ámbito estatal, donde el cuerpo de ingenieros forestales asume gran parte de estas tareas de fijación mediante proyectos ejecutivos a lo largo de toda la costa española (Figueras, 1981). Dentro de estos proyectos destacan las forestaciones de los sistemas dunares de la bahía de Roses, Alt Empordà (Cataluña), donde se estabiliza las dunas provenientes del Montgrí (Artigas, 1887; 1889). Las de las dunas de la zona de Andalucía que también fueron objeto de estabilización, como las de Huelva (Maceira 1890) y Cádiz (Fernández de Castro, 1917), las de Guardamar (Mira, 1903, Codorniu, 1908) a la provincia de Alicante o las del País Vasco (Uriarte Ayo, 1998). En el caso de las Islas Baleares, Mayol (2006) aporta la primera referencia de forestaciones referente al Proyecto de correcciones de dunas de las isla de Formentera, con fecha del año 1944, donde se utilizan diferentes técnicas de fijación con el uso de *Amophila arenaria* y *Ampelodesmos mauritanica*, como herbáceas, y el uso de vegetación de porte arbóreo con *Pinus halepensis*, *Pinus pinea* y plantaciones puntuales de cipreses (*Cupressus* sp.), tamarindos (*Tamarix* sp. pl.), palmeras (*Phoenix dactylifera*) y ricino (*Ricinus communis*). Estas tareas de fijación dirigidas por la escuela española de forestales no se centraron sólo en territorio español, sino que

también realizaron tareas de forestación en las zonas de protectorado, como es el caso de la zona de Tetuán (Marruecos), donde los campos de dunas invadían las nuevas zonas urbanas y agrarias, así como las infraestructuras viarias (Cantarino y Seva, 1997).

Según Artigas (1890), las arenas pueden avanzar tierra adentro desde metros a más de 14 km, variando su forma debido a la extrema finura de los granos que cubren campos, montes y edificios, convirtiendo los más fértiles terrenos y poblaciones en silenciosos y inhospitalarios desiertos. Estas arenas voladoras en continuo movimiento, según definición del autor, no destrozan ni ofenden nada, sólo modifican, ya que las hojas de los árboles están todavía verdes antes de desaparecer bajo la arena. Para desarrollar las tareas encaminadas a la consolidación de los arenales, Artigas (1890) propone el seguimiento de diferentes etapas como:

- Levantamiento de un plano y amojonamiento de las propiedades objeto de repoblación cuando sean del Estado. En caso de propiedades privadas que deseen fijar las arenas lo podrán hacer ajustándose al proyecto aprobado por el estado.

- Creación de cordones de defensa, llamados dunas litorales o contradunas, considerado trabajo indispensable para el buen éxito de las tareas de repoblación y formación de la duna litoral. Las tareas consisten en la fijación, a una distancia de 100 a 200 metros de la mayor altura ordinaria alcanzada por las aguas del mar, con la creación de pantallas de tabloneros en dirección paralela a la línea de costa. Con este método se estima que con un periodo de un año pueden estar cubiertos de sedimento, por lo que se propone levantar los tabloneros para posteriormente replantar sobre la nueva forma no consolidada gramíneas, generalmente barrón (*Ammophila arenaria*), además de la neoformación dunar (las caras de Stos y lee) que habrá sido formada por procesos de interferencia eólica (Savage, 1963; Savage y Woodhouse, 1969).

- Repoblaciones de vegetación de porte arbóreo, ya dentro de la zona interna del sistema condicionado por la nueva duna litoral se repoblará con especies dominantes como *Pinus pinaster* y con plantas protectoras o auxiliares (*Ulex europaeus*, *Genista scoparia*, *Ammophila arenaria*, etc.).

En el caso de Menorca, Roig-Munar *et al.* (2008) hacen una recopilación de información oral de las forestaciones de los sistemas dunares semiestabilizados de las playas de Morella, es Grau y cala de Sa Torreta, las cuales fueron realizadas por la propiedad. A raíz de este último trabajo, basado en la observación, fotografía histórica y fuentes orales, este estudio pretende verificar la posible existencia de otros casos similares en la isla tomando como referencia una caracterización cuantitativa básica de la especie vegetal más habitual por estas actuaciones: *Pinus halepensis*.

Recientemente, se ha podido constatar que una importante parte de los sistemas dunares de Formentera (Mayol, 2006), Menorca (Roig-Munar *et al.*, 2009) y de Mallorca (Mir-Gual *et al.*, 2010, 2011) han sido forestados, básicamente por *Pinus halepensis*, por la mano del hombre.

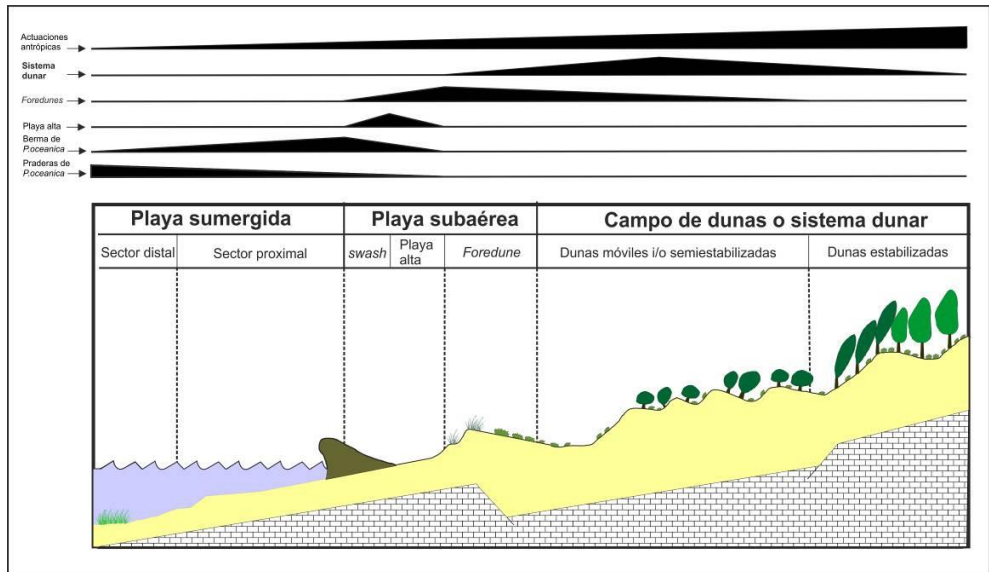
#### 4 | El papel de las praderas de *Posidonia oceanica*

Un sistema playa-duna se caracteriza por la interacción de dos áreas distintas: la zona sumergida, controlada por los procesos hidrodinámicos y la zona emergida, controlada por la dinámica eólica. Cualquier cambio en alguna de las dos zonas, puede comportar un desequilibrio en el conjunto.

La playa es el sector donde se produce el intercambio sedimentario entre la parte sumergida y emergida o viceversa, así como el sector de transferencia sedimentaria hacia las dunas (Sherman y Bauer, 1993). En los sistemas playa-duna se puede definir un grado de sensibilidad y/o fragilidad morfodinámica mediante tres curvas de sensibilidad: la primera, común en todos los sistemas dunares, es la debilitación, erosión y/o desaparición de los primeros cordones dunares, básicos para la estabilización del perfil natural playa-duna, establecida por Brown y McLachan (1990); la segunda, y aplicada a los sistemas playa-duna de Baleares por Rodríguez-Perea *et al.* (2000), se sitúa sobre las praderas de *Posidonia oceanica* como hábitat productor de sedimento del sistema y estabilizador de la playa sumergida.

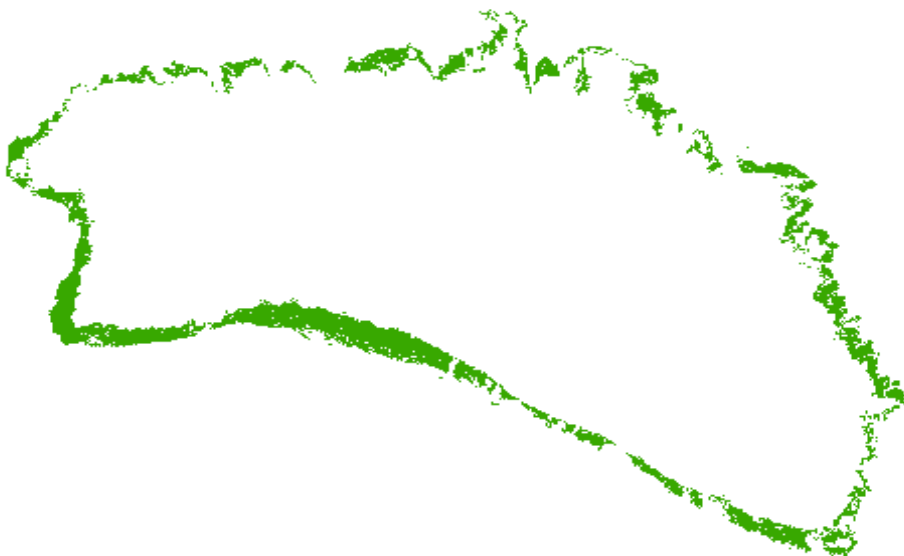
La tercera curva de sensibilidad del sistema, definida por Roig-Munar y Martín-Prieto (2004) se establece sobre las bermas acumuladas de *Posidonia oceanica* debido a su importancia como sector de transferencia sedimentaria entre sectores playa-duna, como aporte de materia orgánica entre la playa y las comunidades vegetales de *foredune*, y como elemento amortiguador de la fuerza de los temporales. De este modo podemos diferenciar tres puntos críticos en el grado de sensibilidad y fragilidad del perfil teórico de playa-duna balear, a la vez que tres puntos donde incidir de forma positiva mediante sistemas de gestión geoambientales.

La *Posidonia oceanica* es una fanerógama marina endémica del mar Mediterráneo, de una extraordinaria importancia biológica, que forma extensas praderas en torno a las Islas Baleares, con una superficie de más de 650 km<sup>2</sup> (hay estudios que sitúan esa superficie hasta los 1000 km<sup>2</sup>) (Fig. 11). Se trata de la vegetación marina más extendida en fondos litorales entre 0 y 35 m de profundidad, llegando hasta los 43 m en el Parque Nacional marítimo-terrestre del archipiélago de Cabrera, con una dinámi-



**Figura 10.** Esquema de un perfil de playa duna, así como las zonas en que las distintas acciones pueden suponer una mayor sensibilidad al sistema (según Mir-Gual *et al.*, 2012).

**Figure 10.** Schema of a dune beach profile, as well as the areas where the different actions may imply a greater sensitivity to the system (after Mir-Gual *et al.*, 2012).



**Figura 11.** Cartografía marina de las praderas de *Posidonia oceanica* de Menorca. Visor IDEIB.  
**Figure 11.** Marine cartography of the *Posidonia oceanica* meadows around of Menorca. IDEIB.

ca biológica que incluye el desprendimiento anual espontáneo de una gran parte de su biomasa de hojas, que se regeneran de forma natural sin dificultades.

Hay que tener presente que la *Posidonia oceanica*, popularmente conocida como alga, recubre los fondos marinos costeros, y que parte de sus restos flotan y provocan un amortiguamiento del oleaje. Cuando se acumulan en forma de banquetas o bermas, absorben la energía de las olas, minimizan la pérdida de sedimentos mar adentro y constituyen un importante mecanismo natural de protección de las playas, especialmente en invierno y en ocasión de temporales, tanto para la defensa física como por la captura de sedimentos, evitando así el retroceso de la línea de costa. Cabe destacar igualmente el importante papel de las praderas en la retención de sedimentos y nutrientes, así como la oxigenación del agua y la captación de CO<sub>2</sub>, por lo que es fundamental conservarlas como elemento mitigador del cambio climático, contribuyendo al mismo tiempo al cumplimiento del Acuerdo de París adoptado el 12 de diciembre de 2015 por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, ratificado por el Estado español el 23 de diciembre de 2016 (BOE de 2 de febrero de 2017). Por otra parte, cabe destacar el papel geomorfológico que la *Posidonia* tiene hacia a el estado de conservación y equilibrio sedimentario de los sistemas playa-duna en las Islas Baleares. En primera instancia poner de relieve su papel en tanto a la producción sedimentaria; los restos de los organismos con caparazón calcáreo que viven sobre las hojas son arrastradas y depositadas en las playas, y constituyen una parte importante los sedimentos arenosos del litoral balear. Hay que tener en cuenta que, en el caso de las Islas Baleares, las costas sedimentarias (las playas) son las de mayor presencia y actividad humana; que los restos de *Posidonia* se acumulan con carácter masivo; que la retirada de estos restos en playas naturales o seminaturales no se considera conveniente desde un punto de vista

ambiental para mantener su equilibrio sedimentario. Sin embargo, en determinadas condiciones, puede ser conveniente para los usos balnearios de las playas urbanas, y porque las hojas son objeto de aprovechamientos (especialmente como abono y lecho de ganado, pero también para otros usos, como de apoyo del *puu* (un conjunto de crustáceos que viven entre las hojas) usado como cebo para un tipo de pesca tradicional o como aislante en la construcción tradicional, entre otros).

Tenemos, por tanto, un conjunto de servicios ecosistémicos de una gran variedad y trascendencia, no sólo por su valor como procesos biogeológicos, sino con repercusiones directas en la calidad de vida en las Islas Baleares y la actividad económica local.

Asimismo, cabe mencionar la prioridad de conservación de una de las manifestaciones de la especie más importantes; los arrecifes barrera o de *altina*, los cuales suponen poblamientos litorales que llegan a emerger y constituyen una formación muy singular a la Mediterráneo, la mayor parte de los cuales han sido destruidos o degradados. La preservación de los escasos arrecifes barrera que existen debe ser garantizada. En Menorca son excelentes ejemplos: en la bahía de Addaia (Es Mercadal-Maó), sa Nitja (Es Mercadal) o cala de sa Torreta (Maó) o en zonas como cala Tamarells (Maó) cuentan con unas estructuras bien desarrolladas.

El Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero, para el desarrollo de la Lista de especies silvestres en régimen de protección especial y del Catálogo Español de Especies amenazadas, incluyó *Posidonia oceanica* en el Listado de Especies Silvestres en Régimen de protección especial. La inclusión de una especie, subespecie o población en este listado conlleva una serie de prohibiciones genéricas establecidas en la normativa estatal, en concreto en el artículo 57 de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del patrimonio natural y de la biodiversidad. La misma ley estatal prevé una serie de excepciones de estas prohibiciones genéricas, excepciones que se aplican con la correspondiente autorización administrativa (artículo 61). Por otra parte, el Real Decreto que la incluye en el Listado prevé explícitamente que las comunidades autónomas puedan reglamentar las operaciones de anclaje de embarcaciones u otros.

La comunidad autónoma en estos momentos está elaborando un Real Decreto de

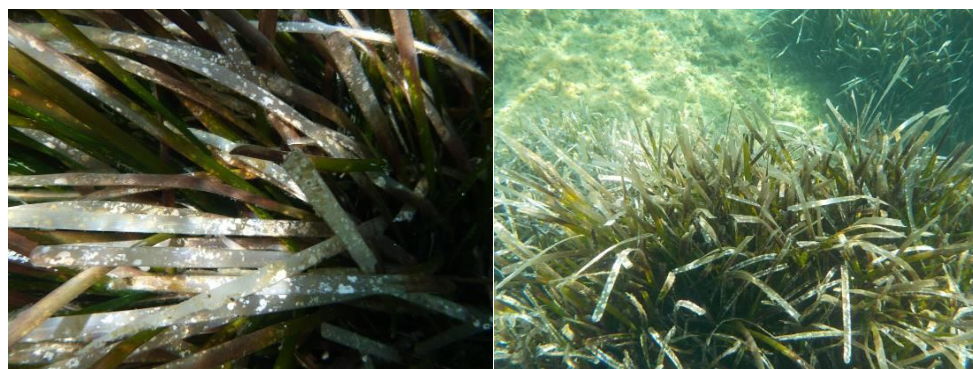


Fig. 12. Detalles de las hojas de *Posidonia oceanica* con epífitos en Cala Pregonda y pradera en s'Arenal d'en Castell.

Fig. 12. Details of *Posidonia oceanica* leaves with epiphytes in Cala Pregonda and meadow in s'Arenal d'en Castell.

protección de la especie, que tiene la base jurídica en la Ley 42/2007, el título preliminar de la que expresan, entre otros, el objeto, los principios y las definiciones. La protección legal de la *Posidonia* como especie silvestre tiene por objeto garantizar su estado de conservación favorable, el cual se define como el estado que se encuentra una especie cuando su dinámica de población indica que sigue y puede seguir constituyendo a largo plazo un elemento vital de los hábitats a los que pertenece; el área de distribución natural no se está reduciendo ni hay amenazas de reducción en un futuro previsible y hay, y probablemente continuará habiendo, un hábitat de extensión suficiente para mantener las sus poblaciones a largo plazo.

Las Islas Baleares es la comunidad autónoma que posee mayor superficie de praderas de *Posidonia oceanica* del Estado, concretamente un 50% del total inventariado, lo que da una idea de su buen estado de conservación. Además, alrededor del 75% de estos se encuentran dentro de áreas incluidas en la Red Natura 2000. La *Posidonia oceanica* es también considerada hábitat prioritario (1120 - *Posidonium oceanicae*) según la Directiva 92/43 / CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres (la llamada Directiva hábitats), lo que supone una especial responsabilidad de la Comunidad Autónoma en cuanto a su conservación. En las Islas Baleares hay precedentes en la protección de estos ecosistemas. Hay de recordar que con la creación del parque marítimo terrestre de Cabrera se protegieron extensas áreas de este hábitat, algunas de las cuales declaradas como zonas de exclusión. Asimismo se instaló el primer campo de boyas ecológicas de amarre del Mediterráneo español. Posteriormente, y vista la eficacia de este sistema, se pusieron en funcionamiento otros campos de boyas en otras zonas del litoral balear, la mayoría de los cuales ligados al proyecto Life *Posidonia*, ejecutado a Baleares con financiación de la Unión Europea.

En estos ambientes los agentes biológicos destacan más por su papel constructivo o de protección del litoral que por su implicación en los procesos de erosión. En el litoral balear cabe destacar las praderas de *Posidonia oceanica*. El conjunto de especies que forman estas praderas sumergidas tienen un papel insustituible en la estabilidad de este tipo de litoral. Algunos autores estiman la producción carbonatada anual neta en 65 g de carbonatos por m<sup>2</sup> de pradera y año (Canals y Ballesteros, 1997). Si consideramos, las máximas estimas, que la superficie de *Posidonia oceanica* en las Baleares es de unos 1000 km<sup>2</sup>, podríamos hablar de una producción de sedimento de 65.000 toneladas/año. Como es natural buena parte de ese sedimento se queda en la pradería, pero parte también acaba por alimentar las playas.

La retirada de bermas de *Posidonia oceanica* con maquinaria pesada y sin control puede suponer la pérdida importantísima de volumen sedimentario. Datos recogidos en base al análisis de acopios recogidos en las playas de Eivissa reflejan que la cantidad de sedimento que desaparece se sus playas durante los últimos seis años fue de 31.302 Tn (Roig-Munar *et al.*, 2011).

## 5 | Distribución y clasificación de los sistemas playa-duna de Menorca

Tal como indica Servera (2003) la distribución y clasificación de los sistemas litorales playa-duna de Menorca es un tanto peculiar, explicables a partir de la misma división de la dos comarcas naturales de Tramuntana y Migjorn.





**Figura 13.** Es Grau.  
*Figure 13.* Es Grau beach.

Centrándonos así en la mitad occidental de la costa de Migjorn, los sistemas que encontramos son de fondo de cala y de pequeñas dimensiones, cuyo desarrollo está sujeto a las propias dimensiones de las calas que los albergan. La mayoría de ellos apenas desarrollan un campo de dunas hacia su interior, quedando limitado a la presencia de la playa y el foredune, y en el mejor de los casos alguna parabólica posterior o un manto eólico tipo sand-sheet.

No obstante, hay honrosas excepciones como es el caso de Cala en Bosc, Son Xoriger y Son Saura que presentan un considerable campo de dunas. Mención aparte merece la playa de Son Bou, en este caso el sistema constituye una barra dunar que cierra una zona de albufera.

En el litoral de la región de Tramuntana la distribución de sistemas playa-duna es más homogénea y, en comparación a la región del Migjorn, estos sistemas presentan unas mayores extensiones. Las especificidades y desarrollo de este conjunto de siste-



**Figura 14.** Playa y sistema dunar de Cala Tirant (es Mercadal).  
*Figure 14.* Beach and dune system of Cala Tirant (es Mercadal).



**Figura 15.** Tirant recuperación de la foredune, y crecimiento de vegetación dunar detrás de una barrera de interferencia eólica y *Ammophila arenaria* con la formación de dunas embrionarias o *shadow dunes*.

**Figure 15.** Tirant recovery of the foredune, and growth of dune vegetation behind a barrier of aeolian interference and *Ammophila arenaria* with the formation of *shadow dunes*.

mas playa-duna del norte de Menorca están sujetas básicamente a dos factores principales (Servera, 1977). Un primer factor, corresponde a su exposición a vientos de componente norte cuya componente presenta la dirección más frecuente y las mayores velocidades, hecho que implica que todos los sistemas presenten una disposición del campo dunar alargada de norte a sur y con penetraciones tierra adentro a distancias considerables desde la línea de costa. El segundo factor corresponde al control que ejerce la notable, aunque no elevada, topografía de la región que nos permite clasificar los sistemas en dos tipologías: una primera, corresponde a los sistemas instalados en valles con relleno sedimentario cuaternario y que a nivel estructural tienen una continuación hacia el mar. Estos sistemas presenta mayores extensiones del campo dunar organizado en cordones paralelos a la playa, más o menos deformados, que en su interior cierran una albufera. De esta tipología podemos destacar los sistemas playa-duna des Grau (Fig. 13), Arenal de Son Saura del Nord, Cala Tirant (Figs. 14 y 15), Binimel·là o Cala Algaiarens

Una segunda tipología, la componen los sistemas instalados en valles sin relleno sedimentario, estrechos y vertientes de inclinación notable. Estos sistemas presentan un campo dunar cuya distribución se adapta al recorrido de los valles. En ocasiones, los depósitos eólicos ascienden lateralmente para llegar a sobresalir de la vaguada. En estas ocasiones encontramos formaciones del tipo *climbing dunes*, *cliff-top dunes* e incluso, cuando hay un trasvase de arena de una vaguada a otra, encontramos dunas del tipo *falling dune*. A esta segunda tipología corresponden el resto de sistemas playa-duna de la región de Tramuntana, aunque destaca por la espectacularidad de las formas remontantes de los sistemas de Cala Presili, de la playa de Mongofre y el de Cala Pilar.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha visto beneficiado del proyecto de investigación “Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español” (CS02015-64468-P) del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).



## Bibliografía

- Anónimo, (1890): Estudio sobre la fijación de las dunas situadas en el término municipal de Almonte, en la provincia de Huelva. *Revista de Montes*, 14: 281-287,311-318,343-348,367-373,388-397,448-457,472-479,496-502,505-510.
- Artigas, P. (1887): Las dunas de Torroella de Mongrí. *Revista de Montes*. Año XI, núm 257: 489-491.
- Artigas, P. (1889): Dunas procedentes del Golfo de Roses. *Revista de Montes*, 300: 329-331.
- Artigas, P. (1890): *Selvicultura o cría y cultivo de los montes*. Imprenta de Moreno y Rojas. Madrid.
- Artigas, P. (1896): Las dunas del golfo de Rosas. *Revista de Montes*, 20: 536-541, 9-15.
- Baeza, M.J., Pastor, A., Martín, J. y Ibáñez, M. (1991): Mortalidad post-implantación en repoblaciones de *Pinus halepensis*, *Quercus ilex*, *Ceratonia siliqua* y *Tetraclinis articulata* en la provincia de Alicante. *Studia Oecologica*, 8: 139-146.
- Balaguer, P., Vallespir, J., Vizoso, M., Ruiz, M., Cañellas, B., Fornós y Tintoré, J. (2015): *Atlas de Sensibilitat Ambiental del Litoral de les Illes Balears*. Edición 2015. Palma, SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costero de las Illes Balears.
- Bejarano, R., Tejada, M. y Jurado, J. (1997): Incidencia del actual proceso de intervención territorial en medios costeros de alto valor naturalístico. En: Asociación de Geógrafos Españoles (eds.), *Dinámica Litoral-Interior Vol I.*: 33-44. Universidad de Santiago, Santiago de Compostela.
- Bellot, J., Maestre, F.T., Chirino, E., Hernández, N. y de Urbina, J.A. (2004): Afforestation with *Pinus halepensis* reduces native shrub performance in a Mediterranean semiarid area. *Acta Oecologica*, 25: 7-15.
- Bird, E. (2000): *Coastal Geomorphology, an Introduction*, John Wiley & Sons Ltd, England, 322 pp.
- Brown, A.C. y McLachlan, A., (1990): *Ecology of sandy shores*, Elsevier, Hardbound, 328 pp.
- Cantarino, C.M. y Seva, E. (1997): Transformaciones en el paisaje natural del litoral mediterráneo de Marruecos durante la época del Protectorado español (1912-1956). I: política de desecación de zonas húmedas en la región de Tetuán. En: Ater, M. y Dakki, M. (eds.). *Actes du seminaire sur les marais Smir-Restinga (Maroc): Écologie et propositions d'aménagement (Tetouan, 16-17 mars 1995)*: 69-83. Travaux de l'Institut Scientifique. Memoire hors serie. Rabat.
- Carreras, D., Pons, C. y Canals, A. (2007): *Cartografía digital de l'ocupació del territori de Menorca -2002-*. Memòria final del projecte. OBSAM-IME, 64 pp.
- Cerdà, V. (2002): La gestión integrada de la costa. ¿La última oportunidad?, *Rev. Obras Públicas Ingeniería y Territorio*, 61, 8-15.
- Codorniu, R. (1908): Las dunas de Guardamar. *Revista de Montes*, 754: 445-451.
- Costa, M. y Mansanet, J. (1981): Los ecosistemas dunares levantinos: la dehesa de la Albufera de Valencia. *Anales del Real Jardín Botánico de Madrid*, 37: 277-299.
- Curr, R. H., Koh, A., Edwards, E., Williams, A. T. y Davides, P. (2000): Assessing anthropogenic impact on Mediterranean sand dunes from aerial digital photography. *Journal Coastal Conservation*, 6: 15-22.
- De Castro, A.F. (1900a): Repoblación de dunas. *Revista de Montes*, 559, 561: 225-232, 281-285
- De Castro, A.F. (1900b): Repoblación de dunas. *Revista de Montes*, 565: 395-400.
- De Luis, M., Novak, K., Čufar, K. y Raventós, J. (2009): Size mediated climate-growth relationships in *Pinus halepensis* and *Pinus pinea*. *Trees*, 23: 1065-1073.
- Fernández de Castro, M. (1917): Dunas de la provincia de Cadiz. *Revista de Montes*, 961: 77-85.
- Gadgil, R.L. y Ede, F.J. (1998): Application of scientific principles to sand dune stabilization in New Zealand: past progress and future needs. *Land Degradation & Development*, 9: 131-142.
- Gallego Fernández, J.B., García Mora, R. y Ley Vega de Seoane, C. (2003): Restauración de ecosistemas dunares costeros. En: Rey Benayas, J.M. (ed.). *Restauración de ecosistemas en ambiente mediterráneo*: 157-172. Asociación Española de Ecología Terrestre.
- Gallofrer, J., Montoya, F.J. y Medina, R. (1997): Regeneración de playas: aspectos a considerar para un diseño funcional. En: *IV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Vol. III*. 861-874. Grupo de Oceanografía Física, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz, Cádiz.
- Gómez-Pujol, L., Balaguer, P., Mateu, J. y Roig, F. X. (2000): *SEDIPME 2000: Sedimentología de les platges de Menorca*. Institut Menorquí d'Estudis, Consell Insular de Menorca. Inédit, 52 p.

- Gómez-Pujol, L., Roig, F.X., Fornós, J.J., Balaguer, P. y Mateu, J. (2013): Provenance-related characteristics of beach sediments around the island of Menorca (Balearic Islands, western Mediterranean). *Geo-Marine Letters*, 33:195-208.
- Gómez-Pujol, L., Compa, M., Orfila, A., Álvarez-Ellacuría, A., Balaguer, P., Roig-Munar, F.X., Fornós, J.J., y Tintoré, J. (2017): Las playas de Menorca: naturaleza y distribución. In: Gómez-Pujol, L. y Pons, G.X. (eds.) *Geomorfología litoral de Menorca: dinámica, evolución y prácticas de gestión*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 25 (en este mismo volumen).
- González Paz, J. (2003): La pérdida de espacios de identidad y la construcción de lugares en el espacio turístico de Mallorca, *Boletín de la A.G.E.*, 35, 137-152.
- Grove, A.T. y Rackham, O. (2003): *The nature of Mediterranean Europe. An ecological history*. Yale University Press. New Haven and London.
- Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H., Lechuga, A., Spanhoff, R. y Stiv, M., (2002): A summary of European experience with shore nourishment, *Coastal Engineering*, 47, 237-264.
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H.H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A. y Spanhoff, R. (2002): Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview, *Coastal Engineering*, 47, 81-111.
- Hilton, M.J. (2006): The loss of New Zealand's active dunes and the spread of marram grass (*Ammophila arenaria*). *New Zealand Geographer*, 62: 105-120.
- Hilton, M.J., Macauley, U. y Henderson, R. (2000): *Inventory of New Zealand's active dunelands*. Science for Conservation, 157. Department of Conservation. Wellington.
- Iribas, J.M. (2002): Una perspectiva sociológica sobre las playas, *Obras Públicas Ingeniería y Territorio*, 61, 78-85.
- Jaume, C. y Fornós, J. J. (1992): Composició i textura dels sediments de platja del litoral mallorquí. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 35: 51-61.
- Jiménez, J.A. y Valdemoro, H. (2003): La influencia de la dinámica costera en la explotación turística de playas (I). *Equipamientos y servicios Municipales*, 109, 28-37.
- Juaneda, J. y Roig, F. X. (2002): El pla de neteja integral de l'illa de Menorca com a eina de gestió ambiental. En Geografía y Territorio, el papel del geógrafo a escala local. págs. 43-48. Ed. Bàzquez, M. y Cors, M. Universitat Illes Balears, Palma de Mallorca
- Lechuga, A., (1999): ¿Hay que defender las playas? Una reflexión, *Ingeniería Civil*, 113: 131-136.
- Lemauviel, S. y Roze, F. (2000): Ecological study of pine forest clearings along the French Atlantic sand dunes: Perspectives of restoration. *Acta Oecologica*, 21: 179-192.
- Maceira, A.G. (1890): Estudio sobre la fijación de las dunas situadas en el término municipal de Almonte, en la provincia de Huelva. *Revista de Montes*, 322: 281-510.
- Madariaga, J.A. (1909): *Repoblación forestal. Medios de dar valor a eriales y terrenos pobres*. Madrid. Imprenta Alemana.
- Maestre, F.T. y Cortina, J. (2004): Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *Forest Ecology and Management*, 198: 303-317.
- Mayol, J. (2006): Un gran projecte de postguerra: La repoblació forestal de les dunes de Formentera. *Eivissa*, 44-45: 9-16.
- Mir-Gual, M. y Pons, G.X. (2011): Coast sandy strip fragmentation of a protected zone in the N of Mallorca (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, SI 64 (1): 1367-1371.
- Mir-Gual, M., Pons, G.X., Perelló, B., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á. y Rodríguez-Perea, A. (2011). Caracterització i dinàmica del sistema platja-duna d'es Comú de Muro (Badia d'Alcúdia, Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 54: 95-116.
- Mir-Gual, M., Fraga, P., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A. y Brunet, P. J. (2010): Alteracions antròpiques en els boscos de *Pinus halepensis* Mill. dels sistemes dunars de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 53: 133-152.
- Mir-Gual, M., Roig-Munar, F.X., Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A. y Rodríguez-Perea, A. (2012): Modelo teórico para la definición de curvas de sensibilidad litorales. Comparativa entre los sistemas playa-duna mediterráneos y caribeños. En: González-Díez, A. (edit.). *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*: 375-378. Santander, Universidad de Cantabria.
- Mira, F. (1903): Reseña de las dunas de Guardamar. *Revista de Montes*, 635: 862-888.

- Montero, G., Cañellas, I., Ruiz-Peinado, R. (2001): Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, 10: 179-201.
- Nordstrom, K.F. y Mitteager, W.A., (2001): Perceptions of the value of natural and resorted beach and dune characteristics by high school students in New Jersey, USA, *Ocean Coastal Management*, 44, 545-559.
- Oliveras, I., Martínez-Vilalta, J., Jimenez-Ortiz, T., Lledó, M.J., Escarré, A. y Piñol, J. (2003): Hydraulic properties of *Pinus halepensis*, *Pinus pinea* and *Tetraclinis articulata* in a dune ecosystem of Eastern Spain. *Plant Ecology*, 169: 131-141.
- Ortuño, F. (1990): El plan para la repoblación forestal de España del año 1939. Análisis y comentarios. *Ecología, Fuera de Serie* 1: 373-392.
- Pardo, J.E. y Rosselló, V.M., (2001). El medio litoral en una perspectiva geográfica y aplicada. En: *Los espacios litorales y emergentes. Actas XV Congreso de Geógrafos Españoles*: 15-37. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.
- Pausas, J.G., Bladé, C., Valdecantos, A., Seva, J.P., Fuentes, D., Alloza, J.A., Vilagrosa, A., Bautista, S., Cortina, J. y Vallejo, R. (2004): Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: New perspectives for and old practice – a review. *Plant Ecology*, 171: 209-220.
- Quézel, P. y Médail, F. (2003): *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Elsevier. Paris.
- Ranwell, D.S. y Boar, R. (1986): *Coast dune management guide*. Institute of Terrestrial Ecology. University of East Anglia. Norwich.
- Rodríguez-Perea, A., Servera, J. y Martín-Prieto, J.A. (2000): *Alternatives a la dependència de les platges de les Balears de la regeneració artificial: Informe METADONA*, Col·lecció Pedagogia Ambiental, 10. Universitat de les Illes Balears, 110 pp.
- Roig-Munar, F.X. (2003): Identificación de variables útiles para la clasificación y gestión de calas y playas. El caso de la isla de Menorca (I. Balears). *Boletín de la A.G.E.*, 35, 175-190.
- Roig-Munar, F. X. y Martín-Prieto, J. Á. (2004): Efecto de la retirada de bermas vegetales de *Posidonia oceanica* sobre las playas de las Islas Baleares: consecuencias de la presión turística. *Investigaciones Geográficas*, 57: 40-52.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J. A., Rodríguez-Perea, A. y Pons, G. X. (2008): Notes sobre la repoblació dels sistemes dunars de es Grau, Torreta i Morella (parc natural de s'Albufera d'es Grau, Menorca). In: Pons, G.X. (ed.). *V Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*: 333-335. Societat d'Història Natural de les Balears. Palma de Mallorca.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A., Comas-Lamarca, E. y Rodríguez-Perea, A. (2006): Space-time Analysis (1956-2004) of human use and management of the Beach-Dune Systems of Menorca (Balearic Islands, Spain). *Journal Coastal Research*, Special Issue, 48: 107-111.
- Roig-Munar, F.X., Fraga, P., Martín-Prieto, J.Á., Pons, G.X. y Rodríguez-Perea, A. (2009): Fixació i estabilització de sistemes dunars a les Illes Balears per processos de forestació: el cas de Menorca, *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 52, 129-140.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á., Mir-Gual, M., Pons, G.X. y Rodríguez-Perea, A., (2011): Balance sedimentario negativo por la retirada de *Posidonia oceanica* de las playas de Ibiza (Islas Baleares), En: Montoya, I., Rodríguez, I. y Sánchez, M.J. (eds.), *Avances en Geomorfología Litoral. Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral*:79-82. Madrid, Univ. Juan Carlos I.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A. y Martín-Prieto, J.Á. (2004): Influencia antrópica en la alteración del sistema playaduna de Son Bou (Menorca). En Benito, G. y Díez Herrero, A. (eds.), *Contribuciones Recientes sobre Geomorfología*: 375-384. SEG y CSIC, Madrid,
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Comas, E., y Rodríguez-Perea, A. (2006): Space-time analysis (1956–2004) of human use and management of the beach–dune systems of Menorca (Balearic Islands, Spain). En: Alonso, I. y Cooper, A. (eds.), *Coastal Geomorphology in Spain. Journal of Coastal Research*, SI 48: 107–111.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Gelabert, B. Y Mir-Gual, M. (2012): Risk assessment of beach–dune system erosion: beach management impacts on the Balearic Islands. *Journal of Coastal Research*, 28(6): 1488-1499.
- Roig-Munar, F.X., Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A. y Mir-Gual, M. (2012): Análisis espacio temporal (1956-2004) de los sistemas dunares de Menorca (Islas Baleares)

- mediante variables geoambientales de uso y gestión. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 58 : 381-403.
- Savage, R. (1963): Experimental study of dune building with sand fences. En: *Proceedings of the 8th Conference in Coastal Engineering*: 380-396. American Society of Civil Engineers. Nova York.
- Savage, R. y Woodhouse, W.W. (1969): Creation and stabilization of coastal barrier dunes. *Proceedings of the 11th Conference in Coastal Engineering*, 1: 671-700. American Society of Civil Engineers. Nova York.
- Schmitt, T. (1994): Degradació de la vegetació psamofila litoral de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 37: 15-174.
- Servera, J. (1997): *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 2 Vols.
- Servera, J. (2003): Los sistemas playa-duna holocenos y actuales de Menorca. En: Rosselló, V.M , Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L., (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 123-138. Palma, AGE, Universitat de València, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Servera, J. y Estrany, J. J. (2002): *Catàleg dels Sistemes Platja-duna de les Illes Balears*. Documento Técnico inédito: 4 Vols. Direcció General de Biodiversitat, Conselleria de Medi Ambient del Govern Balear.
- Servera, J. y Pons, G.X. (2007): Trets mineralògics i texturals de la seqüència dunar holocena de la depressió de Campos (Mallorca). En: Pons, G.X. y Vicens, D. (eds), *Geomorfologia Litoral i Quaternari: homenatge a Joan Cuerda*. Mon. Soc. Hist. Nat, Balears, 14: 353-374. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Servera, J., Rodríguez-Perea, A. y Martín-Prieto, J. A. (2007). Los sistemas playa-duna de las Baleares. En: Fornós, J. J., Ginés, J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Geomorfología litoral: Llevant y Migjorn de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 61-74. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Sherman, D. J. y Bawer, D. O. (1993): Coastal geomorphology through the looking glass. *Geomorphology*, 7: 225-249.
- Tastet, J.P. y Pontee, N.I. (1998): Morpho-chronology of coastal dunes in Médoc. A new interpretation of Holocene dunes in Southwestern France. *Geomorphology*, 25: 93-109.
- Tiismann, B. (1924): Coastal dunes of Hiiusaare, their stabilisation and forestation. *Tartu Ülikooli Metsaosakonna Toimetised*, 1: 1-95.
- Tsitsoni, T. y Karagiannakidou, V. (2000): Site quality and stand structure in *Pinus halepensis* forests of north Greece. *Forestry*, 73: 51-64.
- Uriarte Ayo, R. (1998): Economías campesinas y explotación forestal en el País Vasco durante el Antiguo Régimen. Zainak. *Cuadernos de Antropología-Etnografía*, 17: 101-110.
- Valdemoro, H.I. y Jiménez, J.A. (2006): The influence of shoreline dynamics on the use and exploitation of Mediterranean tourist beaches. *Coastal Management*, 34: 405-423.
- Valls, A. (1870): Las dunas de la ciudad de San Sebastián, su repoblación y su cultivo. *Revista de Montes*, 3: 89-94.
- Vicens, D. y Pons, G.X. (2017): Registro fósil del Cuaternario litoral de Menorca. En: Gómez-Pujol, L. y Pons, G.X. (eds.) *Geomorfología litoral de Menorca: dinámica, evolución y prácticas de gestión*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 25 (en este mismo volumen).
- Vizcaíno, A. (2001): *Erosión costera en Almería (1957-1995)*. Instituto de Estudios Almerienses, Almería, 550 pp.
- Whitehead, P.S. (1964): Sand dune reclamation in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry*, 9: 146-153.
- Williams, A. T. y Morgan, R. (1995): Beach awards and rating systems. *Shore and Beach*, 63 (4): 29-33
- Yepes, V. y Medina, J.R. (1997): Gestión turística y ordenación de las playas: Una propuesta de balizamiento. En: *IV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Vol. III*. 903-916. Grupo de Oceanografía Física, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz, Cádiz.
- Yepes, V., Esteban, V. y Serra, J. (1999): Gestión turística de las playas, Aplicabilidad de los modelos de calidad. *Revista de Obras Públicas*, 3385, 25-34.

# Las eolianitas cuaternarias de Menorca y los depósitos asociados

Francesc Pomar<sup>1</sup>, Joan J. Fornós<sup>1</sup>, Lluís Gómez-Pujol<sup>1,2</sup> y Laura del Valle<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grup de Ciències de la Terra “Geologia i Paleontologia Guillem Colom”. Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>2</sup> ICTS SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (MINECO-CAIB), Palma.

## RESUMEN

Las eolianitas son depósitos de areniscas de composición carbonatada que se desarrollaron en un ambiente de sedimentación eólico costero durante el Pleistoceno. Son depósitos muy abundantes alrededor del mundo, sobretudo en litorales de las latitudes medias y bajas. Una de las principales zonas, el Mediterráneo occidental, concentra importantes depósitos pleistocenos con excepcionales secuencias de eolianitas, depósitos coluviales y aluviales y depósitos de playa. Dentro del Mediterráneo, Menorca es una de las localizaciones destacadas en la cual abundan afloramientos costeros alrededor de la isla, constituidos mayoritariamente por niveles de deposición eólica con intercalaciones de depósitos de abanico aluvial-coluvial y algunos paleosuelos. Estas secuencias se sitúan cronológicamente entre el Pleistoceno medio y superior. El sedimento que constituye las eolianitas son arenas carbonatadas con un tamaño de grano de medio a grueso bien clasificadas con una elevada presencia de bioclastos. Por otra parte, los depósitos pleistocenos de Menorca se agrupan en dos ambientes deposicionales distintos: las eolianitas adosadas al frente de acantilados compuestas por secuencias dunares y algún nivel coluvial intercalado; y los depósitos de interferencia eólico-aluvial compuestos por secuencias de abanico aluvial que tienen la particularidad de estar constituidas por el sedimento eólico de dunas desmanteladas por aguas de escorrentía. La alternancia de depósitos eólicos y coluviales-aluviales responde a la variabilidad climática y a los cambios glacioeustáticos ocurridos durante el Pleistoceno. En este sentido, las cronologías más modernas realizadas mediante OSL y <sup>14</sup>C, sitúan la deposición eólica durante períodos fríos y áridos y de niveles marinos bajos. Estos son momentos en los cuales la plataforma continental queda expuesta dejando grandes bancos de arena preparados para ser transportados por el viento hacia la costa. Durante los períodos relativamente más cálidos y húmedos predominaba la deposición coluvial y aluvial.

**Palabras clave:** Eolianita, depósito coluvial, interferencia eólico-aluvial, nivel marino, Pleistoceno, OSL, Menorca, Islas Baleares

## ABSTRACT

Aeolianites are carbonate sandstone deposits developed in a coastal sedimentation environment during the Pleistocene. They are very common deposits around the world, mainly in littoral areas of mid-low latitudes. One of the main zones, the Western Mediterranean, concentrates important Pleistocene deposits with exceptional sequences of aeolianites, colluvial and alluvial deposits and beach deposits. One of the outstanding locations within the Mediterranean is Menorca, where there are many coastal outcrops consisting mainly of levels of aeolian deposition with interbedded alluvial-coluvial fan deposits and some paleosols. These sequences are chronologically placed at Middle to Upper Pleistocene. The sediment that constitutes the aeolianites is fairly well-sorted carbonate medium to coarse sands, with a high content of bioclasts. Moreover, Pleistocene deposits of Menorca are grouped into two different depositional environments: cliff-front aeolianites composed of dune sequences and some interbedded colluvial levels; and aeolian-alluvial interference deposits consisting of alluvial fan sequences which have the particularity of being constituted by aeolian sediment from dismantled dunes by runoff. The alternating aeolian and colluvial-alluvial deposits, responds to climatic variability and glacioeustatic sea level changes occurred during the Pleistocene. In this sense, modern chronologies set up by means of OSL and radiocarbon dating techniques, place aeolian deposition during cold and arid climatic periods and low sea levels. The characteristic environment of these periods was the continental shelf exposed leaving extensive surfaces covered by sand prepared to be wind-blown inland. During the relatively warmer and wetter periods, colluvial and alluvial deposition predominated.

**Keywords:** Aeolianite, colluvial deposit, aeolian-alluvial interference, sea level, Pleistocene, OSL, Menorca, Balearic Islands

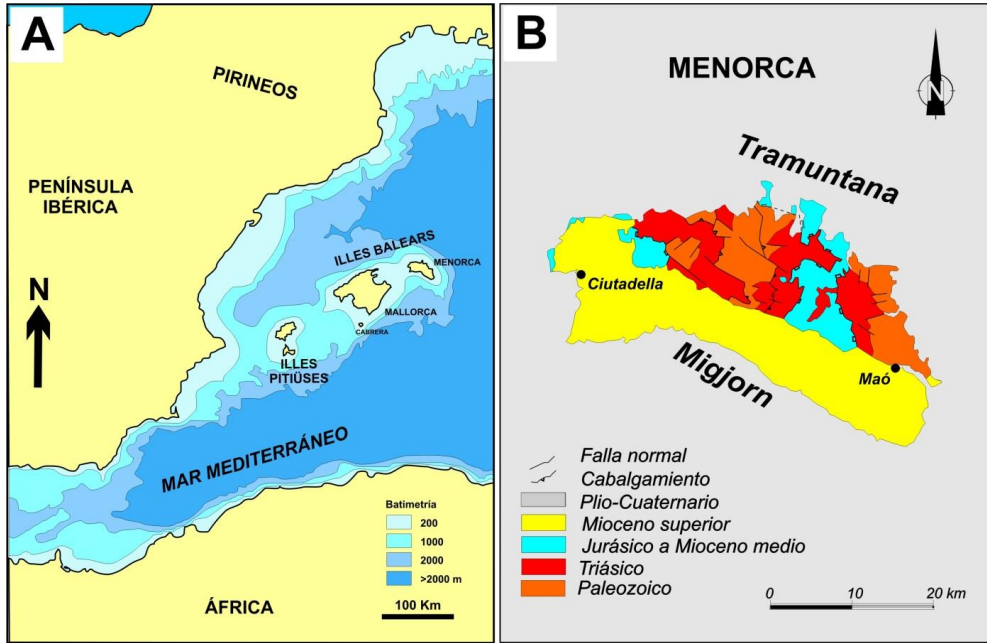
## 1 | Introducción

Las eolianitas son depósitos eólicos litificados y preservados mayoritariamente en forma de areniscas de composición carbonatada, los cuales se forman en zonas costeras bajas cercanas a latitudes entre 55° y 45° de ambos hemisferios, donde hay un relativo predominio de vientos constantes y un clima templado. Se suelen relacionar con zonas de plataforma marina subtropical-tropical (Tucker y Wright, 1990) o templada (James y Clarke, 1997) y con una producción de carbonatos abundante. Se han descrito importantes afloramientos en áreas mediterráneas, Sudáfrica, Australia meridional y en las costas del mar Caribe (Brooke, 2001).

Las eolianitas son uno de los depósitos más característicos de las secuencias sedimentarias del Pleistoceno (Abegg *et al.*, 2001; Brooke, 2001; Fornós *et al.*, 2002b; Nielsen *et al.*, 2004; Radies *et al.*, 2004; Sivan y Porat, 2004; Munyikwa, 2005; Andreucci *et al.*, 2010, 2014; Fornós *et al.*, 2009; Brooke *et al.*, 2014; Faust *et al.*, 2015; Del Valle *et al.*, 2016). El registro preservado en los depósitos eólicos puede ser datado con precisión (Price *et al.*, 2001; Frechen *et al.*, 2004; Leighton *et al.*, 2014) y además sirve como marcador para entender las relaciones estratigráficas con otros depósitos asociados que incluyen: abanicos aluviales, coluviones, depósitos de playa y/o paleosuelos, obteniendo así importantes informaciones de carácter paleoambiental como son las fluctuaciones del nivel marino y la evolución geomorfológica del paisaje (Kindler *et al.*, 1997; Carew y Mylroie, 2001; Kindler y Mazzolini, 2001; Rose *et al.*, 1999; Preusser *et al.*, 2002; Andreucci *et al.*, 2009; Coltori *et al.*, 2010; Elmejdoub *et al.*, 2011; Carboni *et al.*, 2014).

Las secuencias pleistocenas que contienen eolianitas en el Mediterráneo se encuentran a menudo en muchas zonas costeras (Hearty, 1987; El-Asmar, 1994; El-Asmar y Wood, 2000; Andreucci *et al.*, 2010; Andreucci *et al.*, 2014; Pascucci *et al.*, 2014; Gutiérrez-Elorza *et al.*, 2002; Nielsen *et al.*, 2004; Fornós *et al.*, 2009; Pappalardo *et al.*, 2013; Pomar *et al.*, 2015a; Del Valle, 2016; Del Valle *et al.*, 2016; Sivan *et al.*, 2016). La rápida litificación de estos depósitos eólicos debido a la exposición subaérea preserva un registro estratigráfico de gran resolución que permite el análisis sedimentológico detallado. En este sentido, las sucesiones de eolianitas que afloran alrededor de las costas del Mediterráneo occidental adquieren especial relevancia ya que han sido datadas con las técnicas más recientes (Andreucci *et al.*, 2010, 2014; Thiel *et al.*, 2010; Pappalardo *et al.*, 2013; Pascucci *et al.*, 2014; Pomar *et al.*, 2015a; Del Valle, 2016; Pomar, 2016).

La isla de Menorca situada en mitad del Mediterráneo occidental (Fig. 1a) representa una buena localidad para el estudio de los depósitos Pleistocenos y su relación con los cambios climáticos y del nivel del mar (Mercadal *et al.*, 1970; Cuerda, 1975; Servera y Riquelme, 2004; Rosell y Llompert, 2014). Los depósitos costeros de Menorca abarcan desde el Pleistoceno medio hasta Pleistoceno superior-Holoceno (Mercadal *et al.*, 1970; Fornós *et al.*, 2007, Pomar, 2016) y contienen mayoritariamente alternancias de eolianitas con depósitos de abanico aluvial. En la costa norte de la isla se observan emplazados sobre la base de laderas costeras (Cuerda, 1975; Pomar, 2016) constituidas por un basamento paleozoico (Bourrouilh, 1983) o adosados a la base de un acantilado vertical compuesto por materiales jurásicos; mientras que en la costa sur aparecen adosados a la base de acantilados verticales tallados sobre una plataforma calcárea miocena (Bourrouilh, 1983) o en relación a la



**Figura 1.** Localización de Menorca en el Mediterráneo occidental (A) y mapa geológico simplificado que muestra las principales unidades morfoestructurales de la isla (B).

**Figure 1.** Location of Menorca in the Western Mediterranean (A) and geological sketch map showing main morphostructural units of the island (B).

desembocadura de barrancos (Mercadal *et al.*, 1970; Servera y Riquelme, 2004). El presente trabajo constituye una revisión del estado actual del conocimiento del registro sedimentario del Pleistoceno menorquín en el contexto geológico de la isla. Se presentará una descripción de las principales características de las facies sedimentarias, principalmente eolianitas, pero también sus características petrológicas, icnológicas y su relación con los depósitos asociados. El trabajo se centrará en la descripción de las principales secuencias del Pleistoceno superior, la arquitectura estratigráfica y sus características. Para finalizar, se discutirán las principales implicaciones paleoclimáticas y las fluctuaciones del nivel del mar durante el Pleistoceno superior.

## 2 | Marco geológico y climático

La isla de Menorca forma parte del extremo más oriental del Promontorio balear, el cual constituye la prolongación submarina de las cordilleras Béticas (Sàbat *et al.*, 2011). Se trata de una zona de engrosamiento cortical que conforma la continuación hacia el noreste del cinturón cabalgante Bético originado durante el Mioceno inferior y Mioceno medio, como consecuencia de la convergencia entre la placa africana y la ibérica (Gelabert *et al.*, 1992).

El registro estratigráfico abarca desde el Silúrico-Devónico hasta el Cuaternario, con la particularidad que desde los inicios del Mesozoico presenta una secuencia muy



discontinua con algunos depósitos de materiales carbonatados del Jurásico y Cretácico y a continuación se interrumpe hasta el Mioceno superior. La mayoría de materiales paleozoicos que conforman la comarca de Tramuntana (mitad norte; Fig. 1b) se disponen plegados en tres grandes láminas cabalgantes (Bourrouilh, 1983; Gelabert, 2003; Rosell y Llompert, 2014), mientras que la comarca de Migjorn (mitad sur; Fig. 1b) está constituida por una plataforma tabular de materiales post-orogénicos del Mioceno superior correspondientes a calizas arrecifales (Obrador *et al.*, 1992; Gelabert, 2003; Obrador y Pomar, 2004; Fornós y Gelabert, 2011).

Los depósitos Plio-Cuaternarios están constituidos por sedimentos continentales (conglomerados, brechas, areniscas y limos rojizos) relacionados con la erosión de los relieves silíceos de la Tramuntana, y por sedimentos de origen marino que forman depósitos costeros de areniscas bioclásticas (Fig. 2) que corresponden mayoritariamente a acumulaciones de eolianitas que reflejan las fluctuaciones del nivel del mar ocurridas durante el Pleistoceno. Cabe destacar que las Islas Baleares representan una área relativamente estable con una actividad tectónica muy baja o nula (Hearty, 1987; Fornós *et al.*, 2002a; Giménez, 2003; Silva *et al.*, 2005), cosa que favorece que los depósitos pleistocenos del litoral sean fáciles de interpretar debido a que no hay efec-



**Figura 2.** Depósitos coluviales constituidos por niveles de calcarenitas y brechas pleistocenas sobre laderas costeras en un tramo de costa del sector occidental de la costa norte.

**Figure 2.** Colluvial deposits consisting of Pleistocene calcarenites and breccia levels placed on coastal hillslopes in the Northern coast of Menorca.



tos tectónicos que distorsionen los cambios en el nivel del mar. Por esta razón, los estudios de depósitos pleistocenos en Menorca son de gran interés para establecer reconstrucciones paleoambientales de las costas y la posición del nivel marino durante el Pleistoceno.

Los depósitos cuaternarios de Menorca se pueden agrupar en dos grandes grupos: uno de depósitos de ambiente de transición (costero) y otro de depósitos de ambiente claramente continental. Los depósitos de ambiente costero se encuentran a lo largo de las costas de la isla de manera irregular y en la costa norte se encuentran los de mayor entidad relacionados con procesos eólicos y aluviales (Pomar, 2016; Pomar *et al.*, 2016). Los depósitos de ambiente continental están bien representados por los materiales procedentes de la erosión fluvial de los relieves paleozoicos y la formación de suelos sobre laderas suaves y en el fondo de amplios valles del interior de la isla. Por otra parte, también cabe destacar los rellenos sedimentarios del fondo de los barrancos que surcan la comarca de *Migjorn* (Segura *et al.*, 2004). Los depósitos más modernos se caracterizan por sistemas playa-duna que cierran una albufera (*lagoon*) que se extiende hacia el interior en zonas costeras amplias y bajas o en la estrecha desembocadura de algún barranco de la costa sur. La presencia de plataformas rocosas y entalladuras (*notches*) como evidencias de niveles marinos elevados, pueden observarse preferentemente en zonas costeras con presencia de calcarenitas miocenas y pleistocenas (Mercadal *et al.*, 1970; Servera y Riquelme, 2004).

El clima de la isla se caracteriza por ser típicamente mediterráneo con inviernos húmedos y templados y veranos cálidos y secos. El régimen de temperaturas se caracteriza por una temperatura media anual de 17°C, con temperaturas medias en torno a los 11°C en invierno y 27°C en verano. La precipitación media total anual se encuentra alrededor de 600 mm, repartidos de forma irregular durante el año. El otoño llega a acumular el 46% de la precipitación anual con períodos de fuertes tormentas, mientras que el verano las escasas precipitaciones sólo alcanzan un 3% de la precipitación anual. La distribución territorial de estas precipitaciones no presenta muchas variaciones pero asimismo se puede identificar un gradiente con un máximo de más de 600 mm/año en la zona centro-norte de la isla que se reduce hacia la costa sur con valores por inferiores a la media (Gujarro, 1986; Pons y Gómez-Pujol, 2003).

El régimen de vientos menorquín presenta unas claras direcciones predominantes de la componente norte, seguidos de los vientos procedentes del sureste y noreste. Por estaciones, durante el otoño las componentes predominantes son del norte debido a la proximidad de la circulación general del oeste. Durante el invierno se produce una situación de reforzamiento del otoño consolidando un claro predominio de la componente norte. En cuanto a la primavera, aún se mantiene el predominio del viento del norte. Por otra parte, el incremento de la temperatura favorece la formación de bajas presiones térmicas en el mar de Liguria que hacia Menorca impulsan vientos de componente norte y noreste. Durante el verano el viento del norte se debilita como consecuencia del desplazamiento de la circulación general del oeste hacia el norte. La componente predominante es del sureste debido a la formación de bajas térmicas sobre la Península Ibérica y norte de África. En general, el régimen de vientos de Menorca está claramente sesgado hacia una fuerte componente norte en parte debido a que Menorca se sitúa en el centro del Mediterráneo occidental y frente al canal del valle del Ródano que canaliza el viento del norte hacia el interior de la cuenca (Servera, 1997; Campins, 1998; Jansà, 1998; Pons y Gómez-Pujol, 2003; Jansà, 2004).

### 3 | El registro sedimentario pleistoceno de Menorca

Los estudios que abordan la caracterización de depósitos del Cuaternario en Menorca son escasos y dispersos durante las últimas décadas. Sin embargo, algunos de estos trabajos ponen de manifiesto la destacable presencia de yacimientos cuaternarios en Menorca. De este modo, las primeras referencias se encuentran en pequeños apartados dentro de otros trabajos históricos, de temática más amplias, en los que se cita su presencia y se hacen descripciones sin entrar en mucho detalle (Nolan, 1895; Fallot, 1922; Fallot, 1933 y Nolan, 1933).

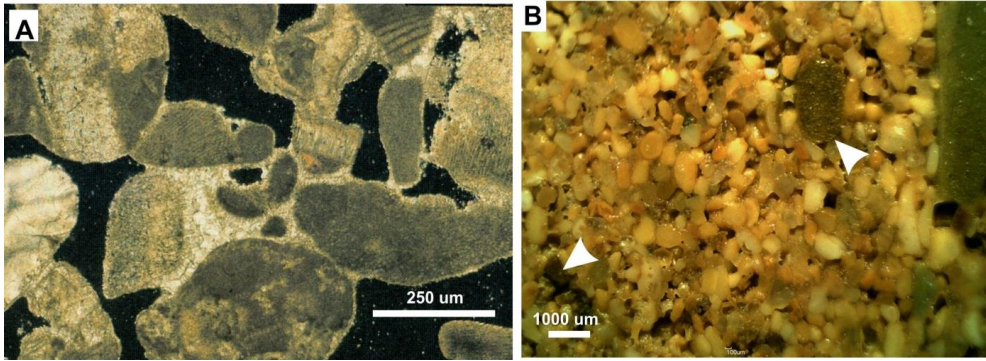
A partir de la década de los sesenta comenzarán a publicarse una serie de trabajos breves, la mayoría de ellos impulsados por el naturalista menorquín Benet Mercadal. Se trata de descripciones sedimentológicas y paleontológicas de algunos yacimientos litorales (Mercadal, 1959; Muntaner, 1959; Mercadal, 1960; Solé Sabarís, 1962; Bourrouilh y Magné, 1963; Cuerda *et al.*, 1966; Rosell *et al.*, 1969 y Mercadal *et al.*, 1970; Cuerda, 1975). Aunque en las secuencias estratigráficas descritas se identifica la alternancia de niveles eólicos, paleosuelos y algunos niveles de depósitos coluviales, generalmente los depósitos menorquines también comprenden una amplia variedad de depósitos de ladera, abanico aluvial y playas de cantos rodados (Mercadal, 1959; Muntaner, 1959; Pomar *et al.*, 2013; Pomar, 2016; Pomar *et al.*, 2016). Además, muchos de los trabajos citados aportan información paleoclimática y de niveles marinos pleistocenos a partir de las asociaciones de fauna fósil que contienen. La mayoría de trabajos atribuyen una cronología a estos depósitos cuaternarios entre el Pleistoceno medio y el Pleistoceno superior (Mercadal *et al.*, 1970; Henningsen, 1990).

Trabajos recientes, mediante dataciones OSL en niveles de eolianitas, han refutado las cronologías inferidas a partir del análisis paleontológico más de cuatro décadas atrás. Así, la cronología en base a dataciones OSL arroja la existencia de períodos de sedimentación eólica que cubren desde el MIS 12 (Pleistoceno medio; ~480 ka) hasta el MIS 3 (Pleistoceno superior; ~56 ka) caracterizados por la interacción con ambientes aluviales-coluviales y costeros (Pomar, 2016). No obstante el registro eólico en Menorca es más amplio y aparecen algunos sistemas más recientes repartidos por toda la isla. Fornós *et al.* (2007) han aportado una de las dataciones más recientes procedente de la caracterización de una localidad del norte de la isla. Se trata de una secuencia de sedimentos eólicos que alternan con niveles arenosos muy ricos en materia orgánica y restos de vertebrados. Según las dataciones por  $^{14}\text{C}$  realizadas en un fragmento de hueso de *Myotragus balearicus*, así como de un fragmento de carbón vegetal, se atribuye la deposición de la secuencia eólica a mitad del Holoceno (5.500-4.800 ka BP).

### 4 | Sedimentología

#### ***Algunos aspectos terminológicos***

Las eolianitas son depósitos eólicos de composición carbonatada que suelen asociarse a ambientes litorales con la característica de una producción y deposición rápida de carbonatos. La terminología ha cambiado a lo largo del tiempo con importantes diferencias en la caracterización (incluyendo composición y emplazamiento): desde arenas litificadas en la zona de backshore (Davis, 1983) hasta eolia-



**Figura 3.** Sedimento que constituye las eolianitas pleistocenas de Menorca. A: Imagen de una lámina delgada que muestra que el sedimento bioclástico es el componente mayoritario de las eolianitas menorquinas. Se observa la presencia de fragmentos esqueléticos y de conchas con un grado bajo de cementación entre los granos. B: Imagen tomada con lupa binocular de la cara pulida de una muestra de eolianita. Se observa el elevado grado de clasificación de los granos, así como se diferencian algunos litoclastos (flechas) procedentes de areniscas paleozoicas.

**Figure 3.** Sediment that constitutes the Pleistocene aeolianites of Menorca. A: Image of a thin section showing that bioclastic sediment is the main component of the aeolianites of Menorca. Presence of skeletal and shell fragments with low degree of cementation is observed. B: Image of polished face of aeolianite sample taken by binocular magnifying. Image highlights fairly well-sorted sand, as well as some lithoclasts (arrows) from Paleozoic sandstones.

nitadas carbonatadas con más del 50% de materiales carbonatados (Abegg *et al.*, 2001). El uso actual del término “eolianita”, en su sentido más amplio, que es el que usaremos aquí, se refiere a una calcarenita litoral producto de la acumulación de depósitos dunares que consisten en arenas marinas (mayoritariamente bioclásticas) que sufrieron una cementación rápida y que fueron depositadas en un ambiente litoral a raíz de una gran producción de carbonatos durante el Cuaternario (Fairbridge y Johnson, 1978; Gardner, 1983).

### **Características del sedimento**

Las eolianitas pleistocenas de Menorca están constituidas principalmente por arenas bioclásticas y el sedimento que las forma tiene prácticamente la misma composición que el sedimento de los arenales y playas actuales del litoral menorquín (Gómez-Pujol *et al.*, 2013). De entre todos los elementos bioclásticos del sedimento, el componente principal son fragmentos de algas rojas (constituyen más del 50%), seguido de fragmentos de moluscos (sobre todo bivalvos y gasterópodos), equínidos, foraminíferos, briozoos y otros granos bioclásticos indiferenciados (Fig. 3a). El sedimento de las eolianitas también puede contener granos litoclásticos en función del contexto del afloramiento, aunque siempre en proporciones pequeña que proceden, por una parte de fragmentos de calcáreas (litología predominante en los materiales mesozoicos y terciarios de la isla), y por otra de granos siliciclásticos (Fig. 3b) producto del desmantelamiento de las areniscas paleozoicas presentes a lo largo de la costa norte de la isla (Henningsen, 1990; Pomar, 2016).

La composición bioclástica de la arena eólica revela que la fuente del sedimento se sitúa en un ambiente cercano de plataforma marina poco profunda. Este antiguo

ambiente tenía un ecosistema similar al que caracteriza la actual plataforma Balear (Fornós y Ahr, 1997 y 2006). Las praderas de fanerógamas marinas (principalmente *Posidonia oceanica*) se extienden desde una profundidad de unos 35 m hasta prácticamente la superficie del nivel del mar (Ruiz *et al.*, 2007), articulando un ambiente de protección y desarrollo de multitud de organismos calcáreos. La mayoría del sedimento de los sistemas playa-duna modernos consiste en bioclastos procedentes de comunidades que se desarrollan en las praderas, pero el volumen más significativo de fragmentos esqueléticos carbonatados procede de briozoos, rodófitas y conchas de moluscos que se producen a profundidades mayores al margen de las mismas (Canals y Ballesteros, 1997). La acumulación y fragmentación de este material esquelético produce la arena bioclástica que una vez depositada en la playa por las olas y las corrientes marinas, es transportada por el viento tierra adentro por los vientos predominantes y por las constantes y regulares brisas marinas típicas de las zonas de costa.

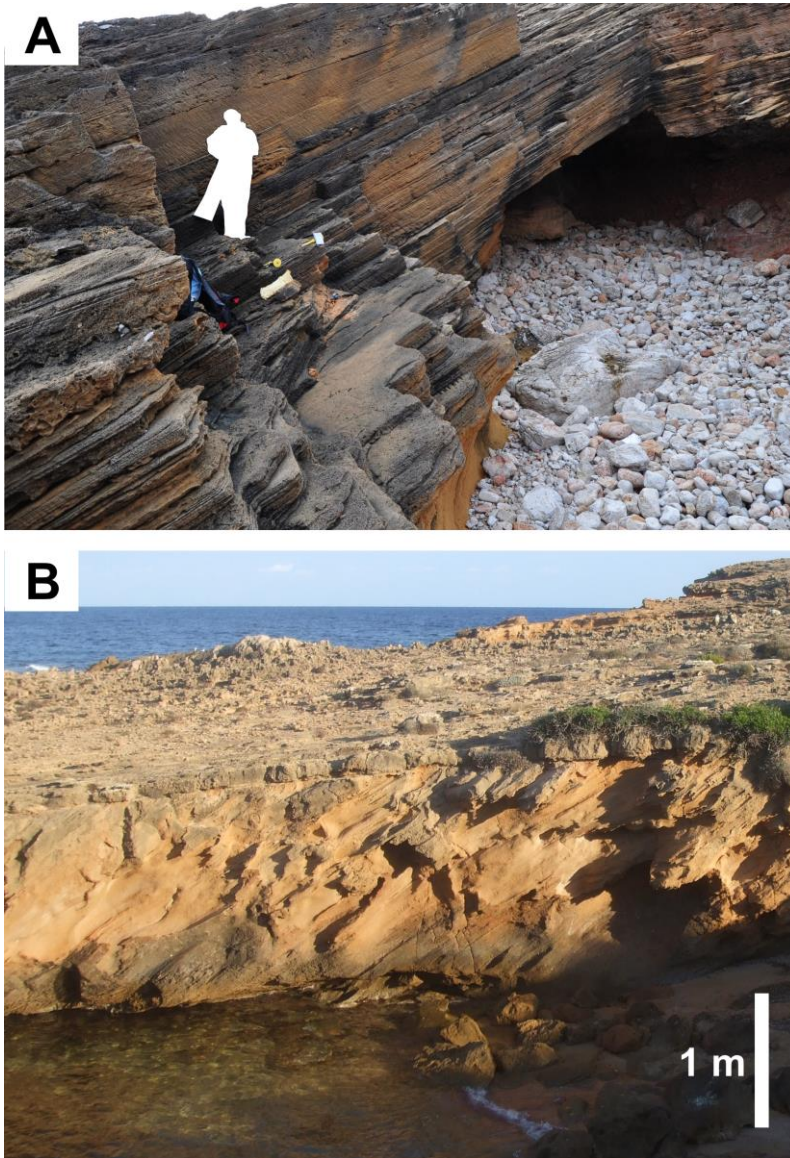
En líneas generales, el sedimento de las dunas eólicas se compone de arenas bioclásticas bien clasificadas (Fig. 3b), con un tamaño de grano entre medio y grueso, que fueron litificadas por la cementación inducida por la humedad ambiental (Calvet *et al.*, 1980). Las estructuras sedimentarias más comunes se caracterizan por una laminación de 2 a 5 mm de potencia con alternancias de tamaño de grano de medio a grueso con alguna lámina con tamaño de grano fino. Esta laminación, interpretada como consecuencia de la migración de *ripples* (Fryberg y Schenk, 1988), está enmascarada por una laminación rítmica (2-5 cm) relacionada con diferencias en la cementación de las láminas. La variación en el grado de cementación se atribuye a la alternancia de ciclos secos y húmedos típicos del clima Mediterráneo (Fornós *et al.*, 2002b). Otras eolianitas pueden contener láminas con alternancia de tamaño de grano que se pueden interpretar como procesos de *grain flow* y *grain fall* sobre la superficie de la duna. Las eolianitas muestran estratificaciones cruzadas de diferentes tipos (Fig. 4a y b) desde la clásica estratificación cruzada en forma de canal (*trough cross-bedding*), la estratificación cruzada paralela de gran escala (*planar cross-bedding*) y/o la estratificación cruzada de bajo ángulo (*low-angle cross-bedding*) hasta la espectacular estratificación cruzada de alto ángulo (*high-angle cross-bedding*) que desarrollan las dunas escaladoras (Clemmensen *et al.*, 1997; 2001).

### **Otros aspectos sedimentarios**

#### *Rizoconcreciones*

En los depósitos de eolianitas, y especialmente bajo niveles de deposición coluvial y paleosuelos, se desarrollan estructuras relacionadas con la presencia de raíces (root cast) de diferentes tamaños y formas (Calvet *et al.*, 1975; Esteban y Klappa, 1983). Las estructuras de raíces muy marcadas generando relieves en el sedimento son comunes en la mayoría de los depósitos dunares (Fig. 5a y b), exceptuando las dunas eco en las cuales no hay prácticamente evidencias de rizoconcreciones que indican una escasa colonización por vegetación.

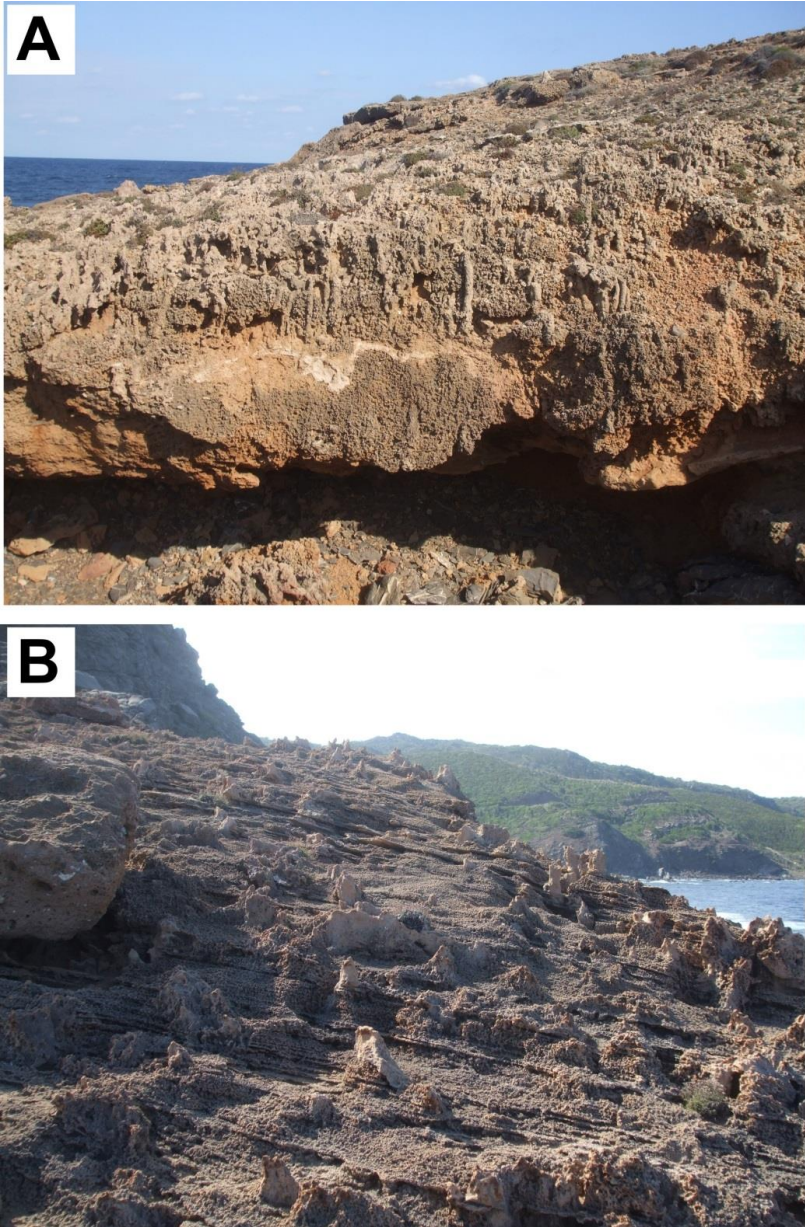
Las rizoconcreciones son una característica diagenética de las eolianitas presentes en Menorca. Estas concreciones carbonatadas se forman por cementación preferencial alrededor de raíces de la vegetación que crece sobre las dunas. Esta cementación se produce gracias a la calcificación de las hifas de hongos que descomponen la materia orgánica de las raíces muertas. Una vez la materia orgánica está completamente des-



**Figura 4.** Estructuras sedimentarias típicas de los depósitos de eolianitas. A: Cuerpo dunar buzando hacia el mar correspondiente a la cara de barlovento de una duna adosada a un acantilado. Se observa una sucesión de capas con laminación paralela de unos pocos centímetros en la base, y a continuación laminación cruzada de bajo ángulo en las capas superiores. La persona de la imagen mide 1,7 m. B: Estratificación cruzada paralela característica de la cara de sotavento de las dunas.

**Figure 4.** Typical sedimentary structures of aeolianite deposits. A: Aeolian unit dipping to the sea corresponding to the stoss face of a cliff-front dune. A succession of planar lamination of few centimeters thick at the base changing to low-angle cross lamination at the top is observed. Person in the image is 1,7 m tall. B: Characteristic planar cross-stratified lee face deposits.





**Figura 5.** Rizoconcreciones en depósitos de eolianitas. A: Estructuras verticales de raíces dentro de depósitos dunares. La sección de la imagen tiene 60 cm de potencia. B: Rizoconcreciones expuestas sobre un depósito eólico de dunas escaladoras. Es muy habitual encontrar estas estructuras sobresalientes de forma troncocónica que obliteran la laminación.

**Figure 5.** Rhizoliths in aeolianite deposits. A: Vertical structures of roots within dune deposits. Section showed in the image is 60 cm thick. B: Rhizoliths exposed on a climbing dune deposit. It is quite common to find these conspicuous truncated cone-shaped structures obliterating the lamination.

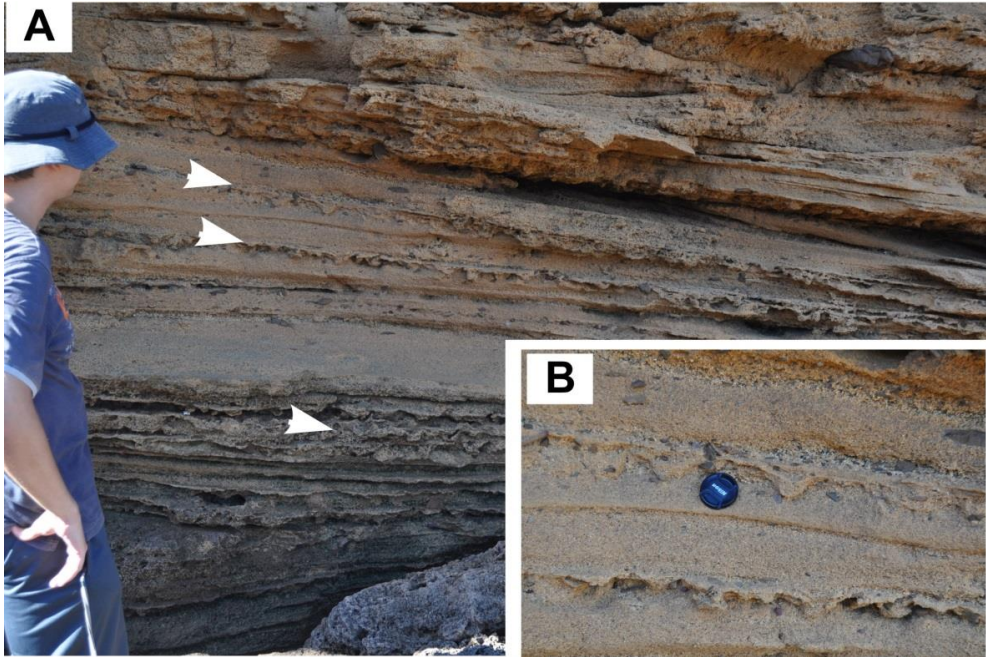
compuesta, el interior de la estructura colapsa y es rellenada por el sedimento que la envuelve (Argyilan *et al.*, 2015). Las rizoconcreciones se caracterizan por una orientación vertical y localmente pueden mostrar formas ramificadas con secciones que oscilan de unos pocos milímetros hasta varios centímetros de diámetro (Fig 5a). Longitudinalmente pueden alcanzar una magnitud de orden métrico sobre todo en disposición vertical (Calvet *et al.*, 1975; Ward, 1975). La presencia de concreciones laminadas (costras) y caliches relacionadas con paleosuelos (Klappa, 1978) son muy comunes, destacando la presencia de microestructuras esféricas formadas a partir de prismas de calcita y producidos por la calcificación de redes de microrraíces o hifas de hongos (*microrizae*) llamadas *Microcodium* (Esteban y Klappa, 1983). La presencia masiva de estas estructuras puede enmascarar o eliminar totalmente la laminación de la duna (Glennie y Evamy, 1986).

#### *Iconología: icnitas y pistas de Myotragus balearicus*

Las pistas y icnitas de la cabra endémica *Myotragus balearicus* (Bate, 1909) son una característica abundante en las eolianitas pleistocenas de zonas costeras de Menorca. Descritas por primera vez por Fornós y Pons-Moyà (1982) en una pequeña cantera en el sureste de Mallorca, están presentes en prácticamente todos los depósitos costeros de eolianitas de Mallorca y Menorca, hasta su desaparición alrededor de 5.000 ka BP cuando probablemente se produjo la exterminación de este animal con la llegada del hombre (Alcover, 2004).

Las pistas pueden observarse en todas las unidades eólicas siendo especialmente abundantes en los depósitos de frente de acantilado, donde abundan en la zona de la cresta de los depósitos, muy habituales en la cara de barlovento (menor pendiente) de las dunas y escasas en la cara de sotavento (mayor pendiente). También es muy habitual encontrar pistas en depósitos arenosos de abanico aluvial (Fig. 6a), sobre todo en zonas medias y distales del abanico caracterizadas por la presencia de depósitos de escorrentía laminar. La presencia de canteras para la extracción de estos materiales para construcción en la costa ha permitido dejar secciones de los depósitos de manera paralela y perpendicular a la laminación permitiendo ver las pistas y huellas en sección vertical y en planta. Las huellas producen una deformación plástica y una ruptura microtectónica del sedimento y su estructura laminar en forma de fallas, cabalgamientos y pliegues de microescala. Casi todas las secciones sedimentarias expuestas muestran secciones horizontales de huellas de *Myotragus* que se disponen siguiendo la laminación y deformándola. Se trata de deformaciones cóncavas que penetran en las láminas subyacentes unos pocos centímetros (Fig. 6b). La buena preservación de las huellas sugiere que la impresión se produjo sobre arena húmeda, que favorece la cohesión del sedimento y reduce las posibilidades que las paredes de la huella colapsen.

Los depósitos cuaternarios de Menorca cuentan con una información cronológica escasa. Hasta día de hoy se atribuía la edad de los depósitos a partir de algunos restos de fauna fósil característica que se podía diferenciar entre fauna de períodos cálidos y fríos dentro de las secuencias sedimentarias (Mercadal, 1959; Muntaner, 1959; Solé Sabarís, 1962; Bourrouilh y Magné, 1963; Rosell *et al.*, 1969 y Mercadal *et al.*, 1970; Cuerda, 1975). De esta manera se identificaban hasta tres eventos dunares durante el Pleistoceno en los depósitos situados en la costa norte de Menorca. Dos de ellos atribuidos al Pleistoceno medio y el último y más moderno al Pleistoceno superior (Henningsen, 1990).



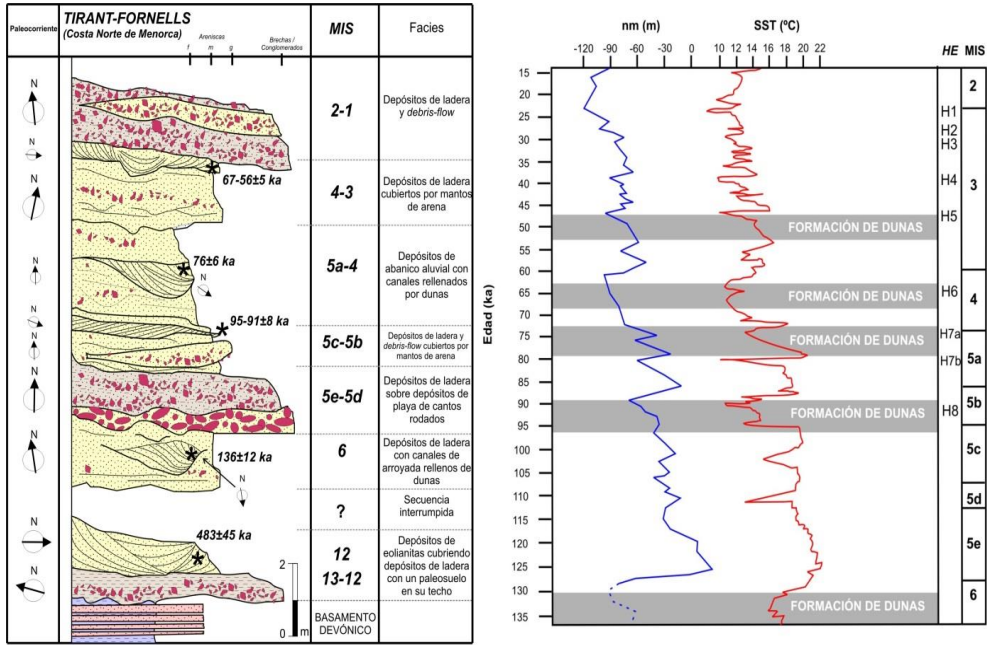
**Figura 6.** Huellas de *Myotragus* preservadas dentro de depósitos de abanico aluvial correspondientes a corrientes laminares. A: Vista general de las pistas (flechas) siguiendo la estratificación. B: Detalle de las huellas.

**Figure 6.** *Myotragus* footprints preserved within sheetflow alluvial fan deposits. A: General view of trackways (arrows) following the stratification. B: Detailed image of *Myotragus* footprints.

## 5 | Cronología de las eolianitas

Recientemente, mediante dataciones por OSL en depósitos de eolianitas de la costa norte de Menorca (Pomar, 2016), se ha podido establecer una cronología prácticamente continua durante el Pleistoceno superior (Fig. 7). Aun así, se identificó un depósito eólico situado en el Pleistoceno medio. Las dataciones OSL fueron realizadas utilizando los granos de cuarzo presentes en el sedimento de las eolianitas que procedían de areniscas paleozoicas que constituyen el basamento, pero también como consecuencia de precipitaciones que contenían polvo de zonas desérticas del norte de África (Fiol *et al.*, 2005). Las edades de los depósitos eólicos separados por depósitos aluviales y coluviales (Fig. 7) en la costa norte, cerca de la población de Fornells, son  $136 \pm 12$  ka, indicando un primer período de deposición eólica a finales del MIS 6;  $95 \pm 8$  hasta  $91 \pm 8$  ka que sugiere una renovación de la deposición eólica durante la transición del estadio MIS 5c/b. Finalmente durante el último período glacial se intensifica la actividad eólica a partir del final del estadio MIS 5a ( $76 \pm 6$  ka) y sucesivas pulsaciones frías del MIS 4 y MIS 3 ( $67 \pm 5$ ,  $60 \pm 3$ ,  $56 \pm 8$  ka). Esta cronología coincide con las ya realizadas en depósitos del Pleistoceno superior en Mallorca (Rose *et al.*, 1999; Fornós *et al.*, 2009), en Ibiza (Del Valle *et al.*, 2016) o en otras localizaciones del Mediterráneo occidental como Cerdeña (Pascucci *et al.*, 2014).





**Figura 7.** Columna estratigráfica sintética (izquierda) de los depósitos pleistocenos de Tirant-Fornells en la costa norte de Menorca y principales eventos eólicos (derecha) identificados durante el Pleistoceno superior (modificado de Pomar, 2016) comparados con la curva eustática; “nm” (Siddall et al., 2003) y de temperatura de la superficie del mar; “SST” (Martrat et al., 2004). La cronología de los Heinrich events (HE) y de los estadios isotópicos (MIS) se basa en Seierstad et al. (2014).

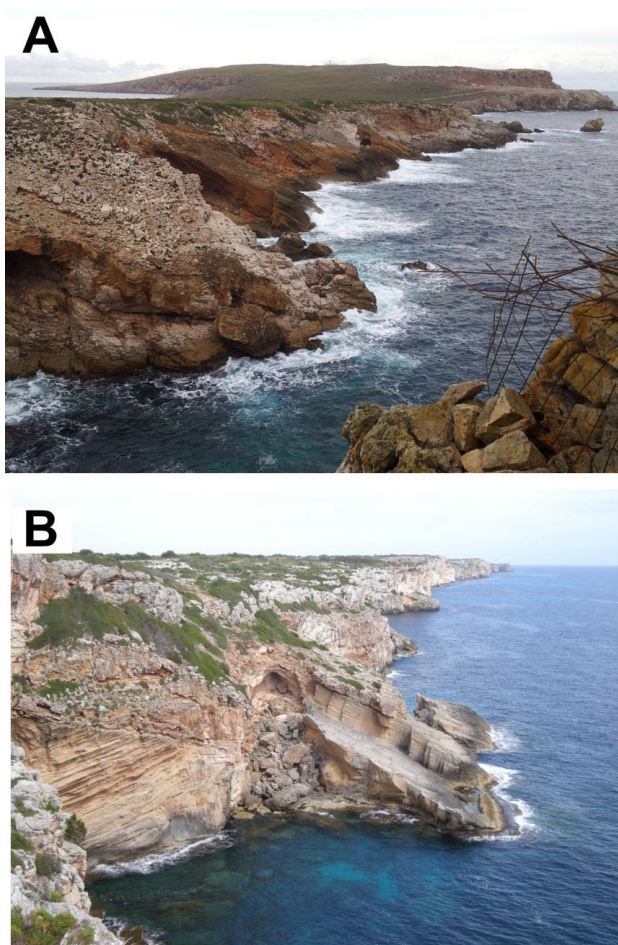
**Figure 7.** Synthetic stratigraphic column (left) of Tirant-Fornells Pleistocene deposits in the Northern coast of Menorca and main aeolian events (right) identified during the Upper Pleistocene (modified from Pomar, 2016) compared to eustatic curve; “nm” (Siddall et al., 2003) and sea surface temperature; “SST” (Martrat et al., 2004). Heinrich events and isotopical stages (MIS) chronologies are based on Seierstad et al. (2014).

Mediante técnicas de datación por <sup>14</sup>C se dató una secuencia dunar situada sobre una pequeña planicie elevada de la costa norte (Fornós et al., 2007). Dos niveles de eolianitas poco cementados con un elevado contenido en materia orgánica separados por paleosuelos arenosos fueron analizados arrojando una edad de 5495±45 y 4830±40 ka. Estas edades sitúan la actividad eólica a mediados del Holoceno.

## 6 | Ambientes sedimentarios y depósitos asociados

### Eolianitas adosadas al frente de un acantilado

Las acumulaciones eólicas controladas por la topografía comprenden las dunas eco (echo dunes), las dunas escaladoras (climbing dunes) y las rampas de arena (sand ramps). Normalmente su desarrollo se produce por la presencia de una barrera topográfica como acantilados (cliff-front dunes) o laderas empinadas (Livingstone y



**Figura 8.** Eolianitas adosadas al frente de un acantilado. A: Eolianitas adosadas en un acantilado tallado sobre dolomías jurásicas cerca del cap de Cavalleria (costa norte de Menorca). Muestran cuerpos dunares buzando hacia el mar típicos de la cara de barlovento de dunas escaladoras. En primer término a la izquierda se observa sobre una plataforma rocosa inclinada un nivel eólico cubierto por un depósito coluvial exhumado por la erosión. B: Eolianita adosada a los acantilados verticales del sur de Menorca modelados sobre calcarenitas del Mioceno superior (al este de cala en Porter). La explotación de este material como cantera ha dejado a la vista una magnífica sección de la duna en 3D. Se puede observar la forma de la cresta alcanzando casi la cima del acantilado. Este afloramiento se caracteriza por hasta cuatro niveles eólicos separados por delgados niveles coluviales constituidos por brechas.

**Figure 8.** Cliff-front aeolianites. A: Aeolianites covering a cliff composed of Jurassic dolomites nearby the Cape Cavalleria (Northern coast of Menorca). They show typical stoss-face sets of climbing dunes dipping to the sea. On the left part of the image there is a close-up of an aeolian level overlying an inclined wave-cut platform and covered by colluvial deposits exposed by erosion. B: Cliff-front aeolianite on the vertical cliffs shaped on Upper Miocene calcarenites in the Southern coast (close to cala en Porter). The exploitation of this material in a quarry has left exposed an outstanding 3D dune section showing a conspicuous dune crest almost reaching the top of the cliff. This outcrop is characterized by up to four aeolian levels separated by thin breccia levels.

Warren, 1996, Lancaster y Tchakerian, 1996; Pye y Tsoar, 2009; Bateman *et al.*, 2012). A lo largo de algunos tramos de costa de Menorca, se observan importantes acumulaciones eólicas adosadas a la pared de acantilados que alcanzan alturas entre 20 y 50 m snm. Los ejemplos más significativos de estos depósitos se sitúan en la base de acantilados casi verticales rellenando plataformas rocosas modeladas por la acción del oleaje o en los flancos verticales de las desembocaduras de cañones kársticos sobre calcarenitas del Mioceno superior de la costa sur o sobre acantilados de calizas y dolomías del Jurásico en la costa norte (Fig. 8). A estos acantilados se les puede atribuir un retroceso importante desde el Pleistoceno medio como el identificado a sus homólogos de la costa sureste de Mallorca (Fornós *et al.*, 2005) y probablemente alcanzaron su posición y forma actual en un corto espacio de tiempo durante el último período interglacial antes de la deposición de los sedimentos eólicos.

Los depósitos de frente de acantilado pueden dividirse en diversos ciclos sedimentarios. Cada uno de ellos iniciado por depósitos coluviales y a continuación cubiertos por depósitos dunares. Los depósitos dunares de la base de la secuencia se caracterizan mayoritariamente por la combinación de depósitos de dunas escaladoras, dunas adosadas y dunas eco; mientras que la parte superior de la secuencia se caracteriza por depósitos de rampas de arena (*sand sheet*) y dunas escaladoras. Los depósitos coluviales que separan los niveles eólicos están constituidos por brechas con clastos procedentes del acantilado que pueden contener sedimento eólico arrancado de la superficie de la duna.

Los depósitos de dunas escaladoras y dunas eco muestran unas estructuras sedimentarias caracterizadas por una estratificación cruzada de bajo ángulo en la cara de barlovento con un buzamiento hacia el mar y ángulos que oscilan entre 15° y 25° (rara vez se observan ángulos superiores a 30°). La cara de sotavento de la duna presenta capas de estratificación cruzada de alto ángulo con buzamiento hacia el acantilado con una inclinación entre 20° y 30° (Clemmensen *et al.*, 1997). La sección longitudinal de la duna muestra una forma que varía desde una cresta aguda hasta formas más redondeadas (Fig. 8a), estas últimas relacionadas con superficies de reactivación del avance de la duna. A menudo el frente de duna (cresta) de los depósitos eólicos se muestra alineado (paralelo) con la forma de la costa.

Los depósitos coluviales forman capas de poca potencia que no suelen alcanzar más de 50 cm y que aparecen intercalados entre los niveles eólicos (Fig. 8b). Se componen de brechas masivas soportadas por la matriz con clastos angulosos a muy angulosos constituidos por fragmentos de materiales procedentes de la erosión del acantilado que se disponen flotando dentro de una matriz de limo rojizo. A menudo la matriz puede contener arena bioclástica que en algunos casos alcanza más del 50% del material. Muestran contactos erosivos muy marcados con los depósitos eólicos subyacentes, mientras que el contacto en su límite superior con la capa eólica es gradual. Los depósitos coluviales representan caídas de pequeños bloques y procesos de arroyada que lavan la superficie del talud que define la acumulación de arena eólica en el frente del acantilado.

La alternancia de depósitos eólicos y coluviales registra la transición de ambientes áridos a ambientes relativamente más húmedos. Este escenario puede relacionarse con los ciclos climáticos *Dansgaard-Oeschger*, de corta duración (~1500 años), acaecidos durante el Pleistoceno superior (Bond *et al.*, 1999; Weaver, 1999; Schultz, 2002).

### ***Depósitos de interferencia eólico-aluvial en laderas costeras o acantilados bajos***

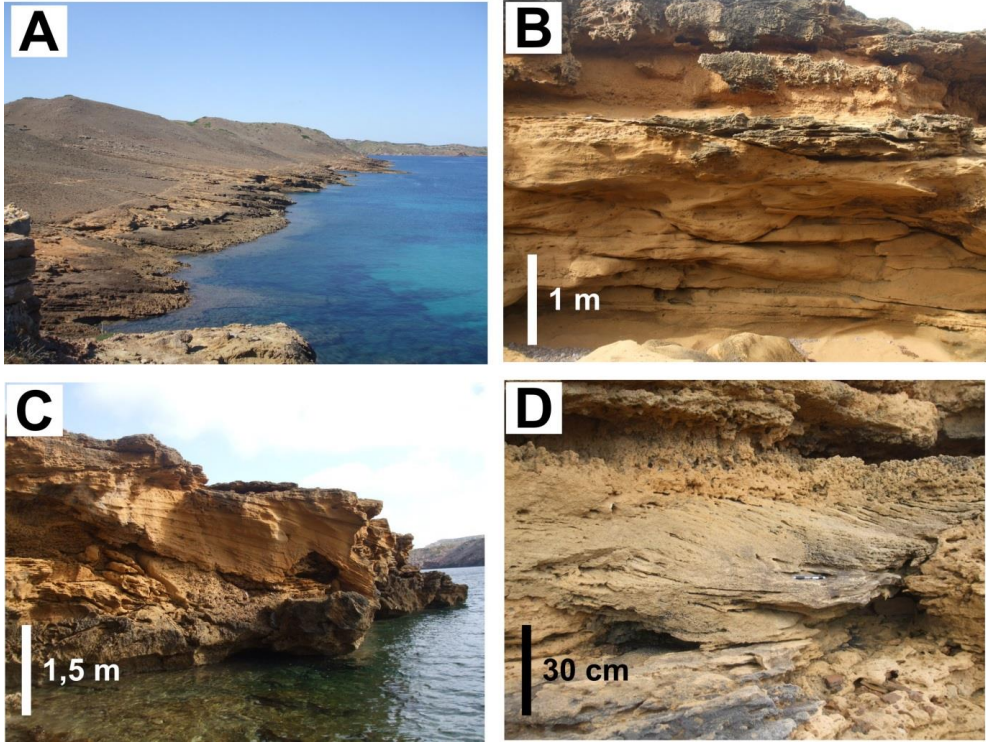
El segundo grupo de depósitos pleistocenos relacionados con la sedimentación eólica concierne ambientes deposicionales caracterizados por la presencia de laderas o acantilados de perfil suave. Los depósitos costeros del Pleistoceno superior en la costa norte de Menorca registran un interesante sistema que muestra una compleja interferencia entre deposición eólica, aluvial y coluvial (Pomar *et al.*, 2013; Pomar *et al.*, 2015b; Pomar, 2016; Pomar *et al.*, 2016). De los diversos afloramientos conocidos, el más completo y mejor preservado es Tirant-Fornells, situado cerca de la población de Fornells en la zona central de la costa norte. Estos depósitos muestran una interferencia entre diversos cuerpos de abanico aluvial y sistemas de dunas que resultan en una arquitectura estratigráfica compleja y muy variable (Fig. 7). Puntualmente es posible observar en la base de las secuencias sedimentarias la presencia de niveles de playas de cantos rodados atribuidos al estadio MIS 5e (Pomar, 2016).

Las características de las facies sedimentarias y su arquitectura son muy variables y reflejan las formas de las superficies deposicionales preexistentes controladas por la topografía del basamento, así como la interferencia entre los procesos eólicos y los procesos de formación de abanicos aluviales. El relieve controla por una parte el desarrollo de las dunas y, por la otra, los procesos de ladera y aluviales que contribuyen a formar los depósitos.

En la zona de Tirant-Fornells, los depósitos del Pleistoceno superior se localizan al pie de un pequeño sistema de colinas costeras (*Massís de Tirant*) caracterizado por la presencia de una alineación de diversas cuencas fluviales de poca extensión (Fig. 99). Los depósitos de abanico aluvial aparecen rellenando todo este tramo costero formando acantilados tallados por el oleaje de poca entidad (1-6 m snm), con el desarrollo de estrechas plataformas rocosas ligeramente inclinadas en su base. En las zonas axiales de las cuencas se observa encajado en los depósitos pleistocenos el canal de drenaje. Los acantilados exhiben una magnífica exposición de las facies y la arquitectura de los depósitos aluviales que muestran una gran variabilidad lateral y localmente en las zonas más deprimidas de las cuencas o sobre las divisorias aparecen niveles eólicos intercalados entre los cuerpos aluviales.

Los resultados del análisis sedimentológico indican que estos depósitos están constituidos mayoritariamente por capas de areniscas con un tamaño de grano situado en las arenas medias-gruesas bien clasificadas. Todo ello indica una granoselección coincidente con la producida en ambientes eólicos (Livingstone y Warren, 1996; Andreucci *et al.*, 2010; Fornós *et al.*, 2009; Tsoar y Pye, 2009). Además, la composición del sedimento mayoritariamente bioclástico, así como un elevado contenido en calcita, indica una procedencia marina del sedimento (Jaume y Fornós, 1992; Fornós y Ahr, 1997; Fornós *et al.*, 2002b; Fornós *et al.*, 2009). Por otra parte, los resultados del análisis de las estructuras sedimentarias ponen de manifiesto una deposición caracterizada mayoritariamente por procesos aluviales y coluviales (Fig. 9b). Esta naturaleza se pone en evidencia con la presencia de abundantes estructuras sedimentarias como estratificaciones horizontales, cruzadas de bajo ángulo, cruzadas en forma de canal, capas de forma lenticular y paleocanales. También es muy habitual observar contactos entre los distintos niveles en forma de superficies erosivas onduladas o en forma de canal encajado (Fig. 9b y c). Numerosos niveles de brechas o conglomerados se disponen en forma de capas masivas o rellenando estructuras en forma de canal. Algunas estructuras de paleocanales aparecen rellenas de niveles de

arenisca con estratificación cruzada que se interpretan como el avance de dunas sobre los abanicos (Fig 9c y d).



**Figura 9.** Depósitos de interferencia eólico-aluvial. A: Depósitos formando abanicos aluviales y depósitos de ladera sobre la costa en una de las zona estudiadas por Pomar (2016). B: Imagen detalle de una sección de estos depósitos expuestos en un arroyo encajado. Se trata de capas de calcarenitas bioclásticas que muestran abundantes estructuras sedimentarias de estratificación cruzada, cruzada en forma de canal, de bajo ángulo y superficies erosivas en forma de canal y onduladas. Se observan algunas estructuras de barras de meandros y superposición de canales típicas de flujos trenzados sobre la zona media de abanicos aluviales. C: Vista de un acantilado tallado sobre las calcarenitas bioclásticas pleistocenas que muestra una secuencia de abanico aluvial con un potente nivel eólico intercalado que avanzaba sobre canales de la superficie del abanico. D: Depósito eólico rellenando una estructura en forma de canal dentro de una secuencia de depósitos de ladera.

**Figure 9.** Aeolian-alluvial interference deposits. A: Alluvial fan and hillslope deposits on the coast in one of the studied sites by Pomar (2016). B: Detailed image of an exposed section within incised gully showing beds of bioclastic calcarenites with abundant sedimentary structures such as cross stratification, trough cross stratification, low-angle cross stratification and channel and wavy-shaped erosive surfaces. The typical braided stream structures on the mid-fan zone such as channel-infill bars and superimposed channels are observed. C: View of a cliff shaped on Pleistocene bioclastic calcarenites showing an alluvial fan sequence with a thick aeolian level interbedded. These aeolian sediments covered channels on the fan surface. D: Aeolian deposits infilling a channel-shaped structure within a hillslope deposit sequence.



## 7 | Implicaciones climáticas para la evolución del paisaje costero y nivel del mar durante el Pleistoceno superior

Las secuencias sedimentarias pleistocenas presentes a lo largo de las costas de Menorca con nueva información estratigráfica y cronológica mediante OSL, indica que la deposición de los sedimentos eólicos tuvo lugar durante períodos fríos, probablemente más áridos y ventosos, cuando el nivel del mar era más bajo que el actual. La consecuente degradación de la cubierta vegetal en este ambiente habría facilitado el transporte eólico tierra adentro desde zonas expuestas de la plataforma continental. Esta interpretación es consistente con la presencia de vegetación semiárida en el Mediterráneo asociada reducciones drásticas de la temperatura y la precipitación durante eventos climáticos fríos (Bout-Roumaizeilles *et al.*, 2007). La deposición eólica y aluvial estaba relacionada con períodos climáticos fríos entre 136 y 56 ka. Éstos fueron también períodos de niveles marinos bajos y momentos de máxima exposición de la plataforma continental y por tanto de los sedimentos carbonatados acumulados en la plataforma marina costera. Con vientos suficientemente fuertes durante estos períodos, este material habría sido transportado hacia el interior formando campos dunares.

Resumiendo los datos sedimentológicos descritos aquí, tenemos por una parte, el predominio de depósitos constituidos por arenas marinas transportadas por el viento y, por la otra, su disposición en forma de potentes paquetes sedimentarios formando abanicos aluviales. Todo ello indicaría el desmantelamiento de dunas costeras que avanzaban tierra adentro por parte de aguas de escorrentía que drenaban las cuencas durante avenidas repentinas (*flashfloods*), incorporándose de esta manera el sedimento eólico al sistema aluvial. Esta dinámica puede relacionarse con las fases climáticas *Dansgaard-Oesgcher* (alternancia de períodos fríos y áridos y períodos relativamente más húmedos). Además, el nivel del mar se mantuvo por debajo de -70 m durante gran parte del Pleistoceno superior, manteniendo el suficiente espacio de acomodación para el desarrollo tanto de procesos eólicos como aluviales (Pomar, 2016).

A partir de los datos que proporcionan diversos trabajos que relacionan el registro sedimentario, la evolución paleoclimática y la curva eustática durante el Pleistoceno superior (Hearty *et al.*, 1986; Hearty, 1987; Hillaire-Marcel *et al.*, 1996; Vesica *et al.*, 2000; Zazo *et al.*, 2003; Nielsen *et al.*, 2004; Tuccimei *et al.*, 2006; Dorale *et al.*, 2010; Fornós *et al.*, 2012; Onac *et al.*, 2012; Polyak *et al.*, 2014) y de las dataciones de niveles eólicos aportadas en distintos trabajos de sedimentología de depósitos pleistocenos (Pomar *et al.*, 2013; Pomar, 2016), es posible establecer la cronología climática y la evolución ambiental de las áreas litorales de Menorca durante el Pleistoceno superior. Según Pomar (2016), se observan hasta cinco períodos de actividad eólica desde finales del MIS 6 alrededor de 136 ka y hasta la transición MIS 4/3 alrededor de 50 ka (Fig. 7). Son periodos que se caracterizan por unas condiciones ambientales frías e importantes momentos de regresión marina. Además, parece que los principales eventos eólicos pueden relacionarse con las pulsaciones especialmente frías llamadas Heinrich events. Por tanto, esto parece confirmar que los períodos de deposición eólica parecen estar vinculados a períodos de nivel marino bajo (Andreucci *et al.*, 2010; Fornós *et al.*, 2009; Pavelic *et al.*, 2011; Fornós *et al.*, 2012; Andreucci *et al.*, 2014; Pascucci *et al.*, 2014; Del Valle *et al.*, 2016). Durante estos periodos grandes extensiones de bancos de arena habrían quedado expuestos a la acción del viento

sobre la zona costera de la plataforma continental que rodea la isla. Durante intervalos climáticos fríos, la cubierta vegetal era escasa lo que habría favorecido la erosión por aguas de escorrentía (Rose *et al.*, 1999); los vientos probablemente eran más fuertes y las dunas costeras habrían podido desplazarse tierra adentro avanzando sobre los relieves de la zona o sobre la zona distal de abanicos aluviales. Actualmente el transporte eólico de arena marina tiene lugar principalmente durante el invierno, momento en que la circulación general del oeste es más intensa forzando el predominio de vientos de componente noroeste con velocidades medias superiores a 8 m/s que se producen más de un 10% de las veces que se registran episodios ventosos (Servera, 1997; Puertos del Estado). Por tanto, es posible entender que unas condiciones meteorológicas similares fueron las responsables del transporte de arena eólica hacia el interior de la isla durante los periodos fríos del Pleistoceno superior pero con algunas particularidades que intensificarían los procesos.

Otros trabajos de las islas Baleares, así como también de zona del Mediterráneo occidental, indican que durante el último período glacial las costas estaban cubiertas por campos dunares (Pascucci *et al.*, 2008; Fornós *et al.*, 2009; Andreucci *et al.*, 2010; Pavelic *et al.*, 2011; Andreucci *et al.*, 2014; Del Valle, 2016; Del Valle *et al.*, 2016). De esta manera, estos resultados sugieren un reforzamiento de los procesos eólicos en grandes zonas del Mediterráneo occidental durante los períodos de enfriamiento y descenso del nivel del mar. Las simulaciones climáticas apuntan hacia una disminución de la influencia de la circulación del oeste durante períodos cálidos como el MIS 5e, al contrario de los períodos de cambio hacia un momento relativamente frío que favorece que la circulación del oeste vuelva a reactivarse en el Mediterráneo occidental (Moreno *et al.*, 2002; Kaspar *et al.*, 2007; Bardají *et al.*, 2009). Además, la intensificación de la entrada de vientos del noroeste en el Mediterráneo occidental durante el cambio de estadio cálido en estadio frío favorece la formación de tormentas que producen precipitaciones intensas debido a las temperaturas superficiales del mar relativamente altas (Moreno *et al.*, 2002; Bardají *et al.*, 2009). Este escenario climático junto con la reducción de la cubierta vegetal asociada a estos periodos habría favorecido por un lado el transporte eólico, y por el otro el transporte aluvial de sedimentos producido por las intensas precipitaciones donde el contexto topográfico (i.e. presencia de cuencas fluviales que capten la precipitación) favorece la formación de escorrentía.

### Agradecimientos

Estas investigaciones se integran dentro de los proyectos de investigación MINECO CGL2013-48441-P y CGL2016-79246-P (AEI/FEDER, UE).

### Referencias

- Abegg, F.E., Loope, D.B. y Harris, P.M. (Eds.) (2001): Carbonate eolianites-Depositional models and diagenesis. *SEPM Special Publication*, 71: 17-30.
- Alcover, J.A. (2004): Disentangling the Balearic first settlement issues. *Endins*, 26: 143-156.
- Andreucci, S., Pascucci, V., Murray, A. y Clemmensen L.B. (2009): Late Pleistocene coastal evolution of San Giovanni di Sinis, west Sardinia (Western Mediterranean). *Sedimentary Geology*, 216: 104-116.
- Andreucci, S., Clemmensen, L.B., Murray, A.S. y Pascucci, V. (2010): Middle to late Pleistocene coastal deposits of Alghero, northwest Sardinia (Italy): Chronology and evolution. *Quaternary International*, 222: 3-16.



- Andreucci, S., Panzeri, L., Martini, P., Maspero, F., Martini, M. y Pascucci, V. (2014): Evolution and architecture of a West Mediterranean Upper Pleistocene to Holocene coastal apron-fan system. *Sedimentology*, 61: 333-361.
- Argyilan, E.P., Avis, P.G., Krekeler, M.P.S. y Morris, C.C. (2015): The origin of collapse features appearing in a migrating parabolic dune along the southern coast of Lake Michigan. *Aeolian Research*, 19: 137-149.
- Bardají, T., Goy, J.L., Zazo, C., Hillaire-Marcel, C., Dabrio, C.J., Cabero, A., Ghaleb, B., Silva, P.G. y Lario, J. (2009). Sea level and climate changes during OIS 5e in the Western Mediterranean. *Geomorphology*, 104: 22-37.
- Bateman, M.D., Bryant, R.G., Foster, I.D.L., Livignstone, I. y Parsons, A.J. (2012). On the formation of sand ramps: A case study from Mojave Desert. *Geomorphology*, 161-162: 93-109.
- Bond, G.C., Showers, W., Elliott, M., Evans, M., Lotti R., Hajdas, I., Bonani, G. y Johnson, S. (1999). The North Atlantic's 1-2 kyr Climate Rhythm: Relation to Heinrich Events, Dansgaard-Oescher Cycles and the Little Ice Age. En: Clark, P.U., Webb, R.S. y Keigwin, L.D. (Eds., Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales. *American Geophysical Union, Geophysical Monograph*, 112: 35-58.
- Bourrouilh, R. 1983. *Estratigrafía, sedimentología y tectónica de la isla de Menorca y del nordeste de Mallorca (Baleares). La terminación nororiental de las cordilleras béticas en el Mediterráneo occidental*. Madrid, IGME. 672 pp.
- Bourrouilh, R y Magné, J. (1963): A propos de dépôts du Pliocene supérieur et du Quaternaire sur la côte nord de l'île de Minorque (Baléares). *Bulletin de la Société géologique de France*, 5: 298-302
- Bout-Roumazeilles, V., Combourieu, N., Peyron, O., Cortijo, E., Landais, A., y Masson-Delmotte, V. (2007): Connection between South Mediterranean climate and North African atmospheric circulation during the last 50,000 years BP North Atlantic cold events. *Quaternary Science Reviews*, 26: 3197-3215.
- Brooke, B. (2001): The distribution of carbonate eolianite. *Earth-Science Reviews*, 55: 135-164.
- Brooke, B.P., Olley, J.M., Pietsch, T., Playford, P.E., Haines, P.W., Murray-Wallace, C.V. y Woodroffe, C.D. (2014): Chronology of Quaternary coastal aeolianite deposition and the drowned shorelines of southwestern Western Australia – a reappraisal. *Quaternary Science Reviews*, 93: 106-124.
- Calvet, F. Plana, F. y Traveria, A. (1980): La tendencia mineralógica de las eolianitas del Pleistoceno de Mallorca, mediante la aplicación del Método de Chung. *Acta Geológica Hispánica*, 15(2): 39-44.
- Calvet, F. Pomar, L. y Esteban, M. (1975): Las rizocreaciones del Pleistoceno de Mallorca. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Universidad de Barcelona*, 30: 35-60.
- Campins, J. (1998): L'estudi de la tramuntana: de J. M. Jansà al PYREX. *Territoris*, 1: 111-122.
- Canals, M. y Ballesteros, E. (1997): Production of carbonate particles by ohytobentonic communities on the Mallorca-Menorca shelf, northwestern Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research II*, 44: 611-629.
- Carboni, S., Lecca, L., Hillaire-Marcel, C. y Ghaleb, B. (2014): MIS 5e at San Giovanni di Sinis (Sardinia, Italy): Startigraphy, U/Th dating and "eustatic" inferences. *Quaternary International*, 328-329: 21-30.
- Carew, J.L. y Mylroie, J.E. (2001): Quaternary carbonate eolianites of the Bahamas: Useful analogues for the interpretation of ancient rocks? En: Abegg, F.E., Harris, P.M. y Loope, D.B. (Eds.), Modern and Ancient Carbonate Eolianites: Sedimentology, Sequence Stratigraphy and Diagenesis. *SEPM Special Publication*, 71: 33-45.
- Clemmensen, L.B., Fornós, J.J. y Rodríguez-Perea, A. (1997): Morphology and architecture of a late-Pleistocene cliff-front dune, Mallorca, Western Mediterranean. *Terra Nova*, 9: 251-254.
- Clemmensen, L.B., Lisborg, T., Fornós, J.J. y Bromley, R.G. (2001): Cliff-front aeolian and colluvial deposits, Mallorca, Western Mediterranean: a record of climatic and environmental change during the last glacial period. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 48: 217-232.

- Coltori, M., Melis, E. y Patta, D. (2010): Geomorphology, stratigraphy and facies analysis of some Late Pleistocene and Holocene key deposits along the coast of Sardinia. *Quaternary International*, 222: 17-18.
- Cuerda, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Dir. Gral. Cultura. Conselleria de Cultura, Educació i Esports, Govern Balear. 310 pp.
- Cuerda, J., Sacarès, J. y Mercadal, B. (1966): Nuevos yacimientos marinos del Pleistoceno superior de Cala Santa Galdana (Menorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 12: 101-105.
- Davis, R.A. Jr (1983): *Depositional Systems: A genetic approach to sedimentary geology*. Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall Inc., 669 pp.
- Del Valle, L. (2016): El registre sedimentari eòlic del Plistocè litoral d'Eivissa. Tesis Doctoral. Palma, Universitat de les Illes Balears. 286 pp.
- Del Valle, L., Gómez-Pujol, L., Fornós, J.J., Timar-Gabor, A., Anechitei-Deacu, V. y Pomar, F. (2016): Middle to Late Pleistocene dunefields in rocky coast settings at Cala Xuclar (Eivissa, Western Mediterranean): Recognition, architecture and luminescence chronology. *Quaternary International*, 407: 4-13.
- Dorale, J.A., Onac, P.B., Fornós, J.J., Ginés, J., Ginés, A., Tuccimei, P. y Peate, D.W. 2010. Sea-level Highstand 81,000 Years Ago in Mallorca. *Science*, 327: 860-863.
- El-Asmar, H. M., Wood, P. (2000): Quaternary shoreline development. The northwestern coast of Egypt. *Quaternary Science Reviews*, 19: 1137-1149.
- El-Asmar, H.M. (1994): Aeolianite sedimentation along the north-western coast of Egypt: evidence for middle to Late Quaternary aridity. *Quaternary Science Reviews*, 13: 699-708.
- Elmejdoub, N., Mauz, B. y Jedoui, Y. (2011): Sea-level and climatic controls on Late Pleistocene coastal aeolianites in the Cap Bon peninsula, northeastern Tunisia. *Boreas*, 40: 198-207.
- Esteban, M. y Klappa, C.F. (1983): Subaerial exposure environment. En: Scholle, P.A., Bebout, D.G. y Moore, C.H. (eds.), Carbonate Depositional Environments. *Mem. American Association of Petroleum Geologists*, 33: 1-54.
- Fairbridge, R.W. y Johnson, D.L. (1978): Eolianite. En: Fairbridge, R.W. y Bourgeois, J. (eds.), *The Encyclopedia of Sedimentology*: 279-282. Stroudsburg, Dowden, Hutchinson and Ross.
- Fallot, P. (1922): *Etude géologique de la sierra de Majorque*. Tesis doctoral. Paris et Liège.
- Fallot, P. (1933): Le problème de l'île de Minorque. *Bulletin de la Société Géologique de France*, XXIII:3-44
- Faust, D., Yanes, Y., Willkommen, T., Roettig, C., Richter, D., Richter, D., Suchodoletz, H.V. y Zöller, L. (2015): A contribution to understanding of late Pleistocene dune sand-paleosol sequences in Fuerteventura (Canary Islands). *Geomorphology*, 246: 290-304.
- Fiol, L.L., Fornós, J.J., Gelabert, B. y Guijarro, J.A. (2005): Dust rains in Mallorca (Western Mediterranean): Their occurrence and role in some recent geological processes. *Catena*, 63: 64-84.
- Fornós, J.J. y Ahr, W. (2006): Present-day temperate carbonate sedimentation on the Balearic Platform, western Mediterranean: compositional and textural variation along a low-energy isolated ramp. En: Pedley, H.M. y Carannante, G. (Eds.), Cool-Water Carbonates: Depositional Systems and Palaeoenvironmental Controls. *Geological Society, London, Special Publications*, 255: 71-84.
- Fornós, J.J. y Ahr, W.M. (1997): Temperate carbonates on a modern, low-energy, isolated ramp: The Balearic platform, Spain. *Journal of Sedimentary Research*, 67: 364-373.
- Fornós, J.J. y Pons-Moyà, J. (1982): Icnitas de *Myotragus balearicus* del yacimiento de ses Piquetes (Santanyí, Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 26: 135-144.
- Fornós, J.J., Clemmensen, L.B., Gómez-Pujol, L. y Murray, A. (2009): Late Pleistocene carbonate aeolianites on Mallorca, Western Mediterranean: a luminescence chronology. *Quaternary Science Reviews*, 28: 2697-2709.
- Fornós, J.J., Clemmensen, L.B., Gómez-Pujol, L., Ginés, A. y Ginés, J. (2012): Pleistocene eolianites and low sea levels. En: Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Onac, B.P. y Fornós, J.J. (eds.). Mallorca: A Mediterranean benchmark for Quaternary studies. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 18: 85-110. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.

- Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L., Rosselló, V.M., Segura, F., Pardo, J.E. y Van Strydonck, M. (2007): El mantell eòdic de ses Arenes (Ciutadella de Menorca): dades preliminars i primeres datacions. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 50: 227-237
- Fornós, J.J., Balaguer, P., Gelabert, B. y 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., Bromley, R.G., Clemmensen, L.B. y Rodríguez-Perea, A. (2002b): Traces and trackways of *Myotragus balearicus* Bate (Artyodactyla, Caprinae) in Pleistocene aeolianites from Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 180: 277-313.
- Fornós, J.J. y Gelabert, B. (2011): Condicionants litològics i estructurals del carst a les illes Balears. *Endins*, 35. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 17: 37-52
- Fornós, J.J., Gelabert, B., Ginés, A., Ginés, J., Tuccimei, P. y Vesica, P.L. (2002a): Phreatic overgrowths on speleothems: a useful tool in structural geology in littoral karstic landscapes. The example of Eastern Mallorca (Balearic Islands). *Geodinamica Acta*, 15: 113-125.
- Frechen, M., Neber, A., Tsatskin, A., Boenigk, W. y Ronen, A. (2004): Chronology of Pleistocene sedimentary cycles in the Carmen Coastal Plain of Israel. *Quaternary International*, 121: 41-52.
- Fryberger, S.G. y Schenk, C.J. (1988): Pin stripe lamination: a distinctive feature of modern and ancient eolian sediments. *Sedimentary Geology*, 55: 1-15.
- Gardner, R.A.M. (1983): Aeolianites. En: Goudie, A.S. y Pye, K. (eds.). *Chemical sediments and geomorphology*: 265-300. London, Academic Press. London.
- Gelabert, B. (2003): La estructura geològica de Menorca: las zonas de Tramuntana y Migjorn. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la geografía física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 39-48. Palma, AGE, Universitat de València, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Gelabert, B., Sàbat, F. y Rodríguez-Perea, A. (1992): A structural outline of the Serra de Tramuntana of Mallorca (Balearic Islands). *Tectonophysics*, 203: 167-183.
- Giménez, J. (2003): Nuevos datos sobre la actividad post-Neógena en la Isla de Mallorca. *Geogaceta*, 33: 91-96.
- Glennie, K.W. y Evamy, B.D. (1968): Dikaka-plants and plant-root structures associated with Aeolian sand. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 23: 77-87.
- Gómez-Pujol, L., Roig-Munar, F.X., Fornós, J.J., Balaguer P. y Mateu, J. (2013): Provenance-related characteristics of beach sediments around the island of Menorca, Balearic islands (western Mediterranean). *Geo-marine Letters*, 33: 195-208.
- Guijarro, J.A. 1986. *Contribución a la Bioclimatología de Baleares*. Tesis Doctoral. Palma, Universitat de les Illes Balears. 232 pp.
- Gutiérrez-Elorza, M. (2002.): Quaternary. En: Gibbons, W. y Moreno, T. (eds.). *The Geology of Spain*: 335-366. London, Geological Society of London.
- Hearty, P.J. (1987): New data on the Pleistocene of Mallorca. *Quaternary Science Reviews*, 6: 245-257.
- Hearty, P.J., Miller, G.H., Stearns, C.E. y Szabo, B.J. (1986): Aminostratigraphy of Quaternary shorelines in the Mediterranean Basin. *Geological Society of American Bulletin*, 97: 850-858.
- Henningesen, D. (1990): Quärtare kalkige Åolianite von N-Menorca (Balearen, westliches Mittelmeer). *Eiszeitalter und Gegenwart*, 40: 120-125.
- Hillaire-Marcel, C., Gariépy, C., Ghaleb, B., Goy, J.L., Zazo, C. y Cuerda, J. (1996): U-series measurements in thyrrenian deposits from Mallorca-Further evidence for two last-interglacial high sea level in the Balearic Islands. *Quaternary Science Reviews*, 15: 53-62.
- James, N.P. y Clarke, J.A.D. (eds.) (1997): *Cool-water carbonates*. Tulsa. SEPM Special Publication, 56: 440 pp.
- Jansà, A. (1998): Meteorologia mediterrània: de Josep M. Jansà a avui. *Territoris*, 1: 171-186.

- Jansà, A. (2004): El clima del Migjorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història natural del Migjorn de Menorca. El medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 39-52. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Jaume, C. y Fornós, J.J. (1992). Composició i textura dels sediments de platja del litoral mallorquí. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 35: 93-110.
- Kaspar, F., Spangehl, T. y Cubasch, U. (2007). Northern Hemisphere winter storm tracks of the Eemian interglacial and the last glacial inception. *Climate of the Past*, 3: 181-192.
- Kindler, P. y Mazzolini, D. (2001): Sedimentology and petrography of dredged carbonate sands from Stocking Island (Bahamas). Implications for meteoric diagenesis and aeolianite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175: 369-379.
- Kindler, P., Davaud, E. y Strasser, A. (1997): Tyrrhenian coastal deposits from Sardinia (Italy): a petrographic record of high sea levels and shifting climate belts during the last interglacial (isotopic substage 5e). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 133: 1-25.
- Klappa, C.F. (1978): Biolithogenesis of Microcodium: elucidation. *Sedimentology*, 25: 489-522.
- Lancaster, N. y Tchakerian, V.P. (1996): Geomorphology and sediments of sand ramps in the Mojave Desert. *Geomorphology*, 17: 151-165.
- Leighton, C.L., Thomas, D.S.G., Bailey, R.M. (2014): Reproducibility and utility of dune luminescence chronologies. *Earth-Science Reviews*, 129: 24-39.
- Livingstone, I. y Warren, A. (1996): *Aeolian geomorphology: an introduction*. Harlow,. Addison-Wesley Longman, 211 pp.
- Martrat, B., Grimalt, J.O., López-Martínez, C., Cacho, I., Sierro, F.J., Flores, J.A., Zahn, R., Canals, M., Curtis, J.H. y Modell, D.A. (2004): Abrupt temperature changes in the Western Mediterranean over the past 250,000 years. *Science*, 306: 1762-1765.
- Mercadal, B. (1959): Noticia sobre la existencia de restos de terrazas del Tirreniense en la costa sur de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, vol. 5: 39-44.
- Mercadal, B. (1960). El Tirreniense en la costa Norte de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 6: 73-74.
- Mercadal, B., Villalta, J.F., Obrador, A. y Rosell, J. (1970): Nueva aportación al conocimiento del Cuaternario menorquín. *Acta Geológica Hispánica*, 5 (4): 89-93.
- Moreno, A., Cacho, I., Canals, M., Prins, M.A., Sanchez-Goñi, M.F., Grimalt, J.O. y Weltje, G.L. (2002): Saharan dust transport and high-latitude glacial climatic variability: the Alboran Sea record. *Quaternary Research*, 58: 318-328.
- Muhs, D.R., Budahn, J., Avila, A., Skipp, G., Freeman, J y Patternson, D. (2010): The role of African dust in the formation of Quaternary soils on Mallorca, Spain and implications for the genesis of Red Mediterranean soils. *Quaternary Science Reviews*, 29: 25.
- Muntaner, A. (1959): Nota preliminar sobre las formaciones tirrenienses de la Isla de Menorca (Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, vol. 5: 33-39.
- Munyikwa, K. (2005): Synchrony of Southern Hemisphere Late Pleistocene arid episodes: A review of luminescence chronologies from arid aeolian landscapes south of the Equator. *Quaternary Science Reviews*, 24: 2555-2583.
- Nielsen, K.A., Clemmensen, L.B. y Fornós, J.J. (2004): Middle Pleistocene magnetostratigraphy and susceptibility stratigraphy: data from a carbonate aeolian system, Mallorca, Western Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*, 23: 1733-1756.
- Nolan, M.H. (1895): Rasgos generales de la estructura geológica del archipiélago balear. *Bol. de la Comis. del Mapa Geológico de España*, 22: 101-120.
- Nolan, M.H. (1933): Nota sobre diversos puntos de la geología menorquina para dilucidar y comprobar. Trad. E. Castaños. *Revista de Menorca*, XXVIII: 152-159
- Obrador, A. y Pomar, L. (2004): El Miocè del Migjorn. In: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història natural del Migjorn de Menorca. El medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 73-92. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis
- Obrador, A., Pomar, L. y Taberner, C. (1992): Late Miocene breccia of Menorca (Balearic Islands) a basis for the interpretation of a Neogene ramp deposit. *Sedimentary Geology*, 79: 203-223.

- Onac, B.P., Ginés, A., Ginés, J., Fornós, J.J. y Dorale, J.A. (2012). Late Quaternary sea level history: a speleothem perspective. In: Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Onac, B.P. y Fornós, J.J. (eds.). *Mallorca: A Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 147-162. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Pappalardo, M., Chelli, A., Ciampalini, A., Rellini, I., Biagioni, F., Brückner, H., Fülling, A. y Firpo, M. (2013): Evolution of an Upper Pleistocene aeolianite in the northern Mediterranean (Liguria, NW Italy). *Ital. J. Geosci.*, 132, 2: 290-303.
- Pascucci, V., Andreucci, S., Clemmensen, L., Fanelli, F., Ibba, A., Zucca, C. y Madrau, S. (2008): *La successione tardo quaternaria della Sardegna Settentrionale: implicazioni paleogeografiche e paleoclimatiche*. Escursione E04, 84 Congresso Nazionale. Società Geologica Italiana. Sassari 15-17 Settembre 2008. Società Geologica Italiana.
- Pascucci, V., Sechi, D. y Andreucci, S. (2014): Middle Pleistocene to Holocene coastal evolution of NW Sardinia (Mediterranean sea, Italy). *Quaternary International*, 328-329: 3-20.
- Pavelic, D., Kovacic, M., Vlahovic, I. y Wacha, L. (2011): Pleistocene calcareous aeolian-alluvial deposition in a steep relief karstic coastal belt (island of Hvar, eastern Adriatic, Croatia). *Sedimentary Geology*, 239: 64-79.
- Polyak, V.J., Onac, B.P., Fornós, J.J., Dorale, J.A. y Tuccimei, P. (2014): Evidence for stable sea-level during Marine Isotope Stage 5e of the Last Interglacial from the Western Mediterranean. AGU meeting, San Francisco 14-15 desembre.
- Pomar, F. (2016): *Arquitectura i fàcies deposicionals de la interferència entre sedimentació al·luvial, col·luvial i eòlica a les Illes Balears durant el Pleistocè superior: implicacions paleoclimàtiques*. Tesi Doctoral. Palma, Universitat de les Illes Balears. 377 pp.
- Pomar, F., Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L. y Del Valle, L. (2013): El Pleistoceno superior de la zona de Tirant-Fornells (Norte de Menorca, Illes Balears): un modelo de interacción eólica y aluvial. *Geo-Temas*, 14: 123-126.
- Pomar, F., Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L. y Del Valle, L. (2015b). Interferència entre sedimentació eòlica i al·luvial (Alluvial-aeolian sedimentary interference). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 58:
- Pomar, F., Del Valle, L., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (2015a). Registro sedimentario litoral del Pleistoceno en las Islas Baleares (Mediterráneo occidental): implicaciones paleoclimáticas. *Geo-Temas*, 15: 65- 68.
- Pomar, F., Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L. y Del Valle, L. (2016): Dipòsits d'interferència eòlica-al·luvial al Pleistocè superior de les Illes Balears (Mallorca i Menorca, Mediterrània occidental): sedimentologia i implicacions paleoambientals. (Late Pleistocene aeolian-alluvial interference deposits in the Balearic Islands (Mallorca and Menorca, Western Mediterranean): sedimentology and palaeoenvironmental implications). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, En prensa.
- Pons, G.X. y Gómez-Pujol, L. (2003). Introducción al medio físico de Menorca (Illes Balears). In: Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L. (Eds.). *Introducción a la geografía física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 1-30. Palma, AGE, Universitat de València, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Preusser, F., Radies, D. y Matter, A. (2002): A 160,000-year record of dune development and atmospheric circulation in Southern Arabia. *Science*, 296: 2018-2200.
- Price, D.M., Brooke, B.P. y Woodroffe, C.D. (2001): Thermoluminescence dating of aeolianites from Lord Howe Island and south-west Western Australia. *Quaternary Science Reviews*, 20: 841-846.
- Pye, K. y Tsoar, H. (2009): *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 458 pp.
- Radies, D., Preusser, F., Matter, A. y Mange, M. (2004): Eustatic and climatic controls on the development of the Wahiba Sand Sea, Sultanate of Oman. *Sedimentology*, 51: 1359-1385.
- Rose, J., Meng, X. y Watson, C. (1999): Palaeoclimate and palaeoenvironmental responses in the western Mediterranean over the last 140 ka: evidence from Mallorca, Spain. *Journal of the Geological Society, London.*, 156: 435-448.

- Rosell, J. y Llopart, C. (2014): *El naixement d'una illa, Menorca. Guia geològica pràctica*. Segona edició. Maó, Institut Menorquí d'Estudis, 279 pp.
- Rosell, J., Obrador, A. y Mercadal, B. (1969): Estudio sedimentológico y estratigráfico de la Isla del Aire (Menorca). *Boletín Geológico y Minero*, LXXX-VI: 538-544
- Ruíz, J.M., Marín-Guirao, L. y Sandoval-Gil, J.M. (2009): Responses of the mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* to insitu simulated salinity increase. *Botanica Marina*, 52: 459-470.
- Sàbat, F., Gelabert, B., Rodríguez-Perea, A. y Jiménez, J. (2011). Geological structure and evolution of Majorca: Implications for the origin of the western Mediterranean. *Tectonophysics*, 510: 217-238.
- Schultz, M. (2002): On the 1470-year pacing of Dansgaard-Oescher warm events. *Paleoceanography*, 17: 1-9.
- Segura F.S., Pardo Pascual, J.E. y Palomar J. (2004): Els barrancs del Migjorn de Menorca. In: Fornós, J.J., Obrador A., y Rosselló, V.M. (eds), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el Medi Físic i l'Influx Humà*, Mon. Societat d'Història Natural de les Balears, Palma: 129-156. Palma, Societat d'Història Natural de Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Seierstad, I.K., Abbott, P.M., Bigler, M., Blunier, T., Bourne, A.J., Brook, E., Buchardt, S., Buizert, C., Clausen, H.B., Cook, E., Dahl-Jensen, D., Davies, S.M., Guillevic, M., Johnsen, S.J., Pedersen, D.S., Popp, T.J., Rasmussen, S.O., Severinghaus, J.P., Svensson, A. y Vinther, B.M. (2014): Consistently dated records from the Greenland GRIP, GISP2 and NGRIP ice cores for the past 104 ka reveal regional millennial-scale  $\delta^{18}O$  gradients with possible Heinrich event imprint. *Quaternary Science Reviews*, 106: 29-46.
- Servera, J. (1997). *Els sistemes dunars litorals de les illes Balears*. Departament de Ciències de la Terra, Tesi Doctoral. Palma. Universitat de les Illes Balears. 904 pp.
- Servera, J. y Riquelme, J. (2004): L'acció del vent: sistemes dunars actuals i eolianites. In: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.) *Història natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 213-233. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Siddall, M., Rohling, E.J., Almogi-labin, A., Hemleben, CH., Melschner, D., Schmelzer, I. y Smeed, D.A. (2003): Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. *Nature*, 423: 853-858.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Jiménez, J., Fornós, J.J., Cabrero, A., Bardají, T., Mateos, R.M., González-Hernández, F.M., Hillaire-Marcel, C.L. y Ghaleb, B. (2005): Mallorca island: geomorphological evolution and neotectonics. En: Desir, G., Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. (eds.), *Field Trip Guides. Sixth International Conference on Geomorphology*: 433-472. Zaragoza, The International Association of Geomorphologists.
- Sivan, D. y Porat, N. (2004). Evidence from luminescence for Late Pleistocene formation of calcareous aeolianite (kukar) and palaeosol (hamra) in the Carmel Coast, Israel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 211: 95-106.
- Sivan, D., Sisma-Ventura, G., Greenbaum, N., Bialik, O.M., Williams, F.H., Tamisiea, M.E., Rohling, E.J., Frumkin, A., Avnaim-Katav, S., Shtienberg, G. y Stein, M. (2016): Eastern Mediterranean sea levels through the last interglacial from a coastal-marine sequence in northern Israel. *Quaternary Science Reviews*, 145: 204-225.
- Solé Sabarís, L. (1962): Le Quaternaire marin des Baléares et ses rapports avec les côtes méditerranéennes de la Péninsule Iberique. *Quaternaria*, VI: 309-342.
- Thiel, C., Coltorti, M., Tsukamoto, S. y Frechen, M. 2010. Geochronology for some key sites along the coast of Sardinia (Italy). *Quaternary International*, 222: 36-47.
- Tuccimei, P., Ginés, J., Delitala, M.C., Ginés, A., Gràcia, F., Fornós, J.J. y Taddeucci, A. (2006): Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für geomorphologie NF*, 50 (1): 1-21.
- Tucker, M.E. y Wright, V.P. (1990): *Carbonate sedimentology*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 482 pp.
- Vesica, P.L., Tuccimei, P., Turi, B., Fornós, J.J., Ginés, A. y Ginés, J. (2000): Late Pleistocene paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope

- and U-series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca, Spain. *Quaternary Science Reviews*, 19: 865-879.
- Ward, W.C. (1975). Petrology and diagenesis of carbonate eolianites of Northeastern Yucatán Peninsula, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists. Studies in Geology*, 2: 500-571.
- Weaver, A.J. (1999): Millennial Timescale Variability in Ocean/Climate Models. En: Clark, P.U., Webb, R.S. i Keigwin, L.D. (eds.), *Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales. American Geophysical Union. Geophysical Monograph*, 112: 285-300.
- Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Bardají, T., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., González-delgado, J.A. y Soler, V. (2003): Pleistocene raised marine terraces of the Spanish Mediterranean and Atlantic coasts: records of coastal uplift, sea-level highstands and climate changes. *Marine Geology*, 194: 103-133.



# Mantos eólicos en la costa septentrional de Menorca: naturaleza y distribución

José Á. Martín Prieto<sup>1,2</sup>, Guillem X. Pons<sup>1,2,3</sup>, Francesc X. Roig-Munar<sup>4</sup>, Pere Fraga<sup>3</sup>, Antonio Rodríguez-Perea<sup>1,2</sup>, Bernadí Gelabert<sup>2,5</sup> y Miquel Mir-Gual<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma grupo de investigación BIOGEOMED.

<sup>2</sup> Societat d'Història Natural de les Balears, Palma.

<sup>3</sup> Institut Menorquí d'Estudis, IME, Maó.

<sup>4</sup> Q4atre Consultoria Ambiental, Es Migjorn Gran.

<sup>5</sup> Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

## RESUMEN

Han sido analizados un total de 11 mantos eólicos de Menorca (Islas Baleares). Su principal característica es que todos ellos están ubicados en la costa norte de la isla. Pueden agruparse en tres tipos principales: los relacionados con los acantilados verticales, los relacionados con lechos de torrentes, y un tercer tipo intermedio con características de ambos grupos anteriores, que corresponde a torrentes colgados. La génesis y la evolución pueden estar relacionadas con la erosión mecánica y/o movimientos verticales asociados con el nivel del mar eustático en el Holoceno.

**Palabras clave:** mantos eólicos, Pleistoceno superior - Holoceno, acantilados, torrentes, Menorca.

## ABSTRACT

Eleven aeolian sand sheets have been studied on the island of Menorca (Balearic Islands). Their principal feature is that they are all located on the north coast of the island. They can be grouped into three main types: those related to vertical cliffs, those related to stream channels, and a third intermediate type with characteristics of both previous groups, which corresponds to hanging channels in the mouths. The genesis and evolution can be related to mechanical erosion and/or vertical movements associated with eustatic sea levels in the Holocene.

**Keywords:** Aeolian sand sheets, Upper Pleistocene - Holocene, cliffs, gullies, Menorca.

## 1 | Introducción

La mayoría de los sistemas dunares activos y depósitos eólicos de la isla de Menorca han sido descritos a lo largo de las últimas décadas (Rita *et al.*, 1988; Servera, 1997; Cardona *et al.*, 2004; Roig-Munar *et al.*, 2006; Fornós *et al.*, 2007 y 2008). No obstante, hace unos años se observó que había unos depósitos sedimentarios no descritos en las Baleares. se han sido analizados un total de once depósitos sedimentarios (Fig. 1), mantos eólicos, generados por la acción del viento, de diferentes extensiones y alturas, que en conjunto ocupan una extensión total de 4.936.387 m<sup>2</sup> y que presentan interés debido a su particular situación, ya que están desvinculados de la fuente de alimentación sedimentaria que los alimenta (Fraga *et al.*, 2012; Pons *et al.*, 2012). Si bien se han definido once unidades de estudio, algunas de ellas se encuentran fragmentadas en otras unidades más pequeñas como Santa Teresa, Punta des Pare Fra Bernat y sa Mesquida, por lo que en total tenemos 16 áreas de estudio (Tabla 1).

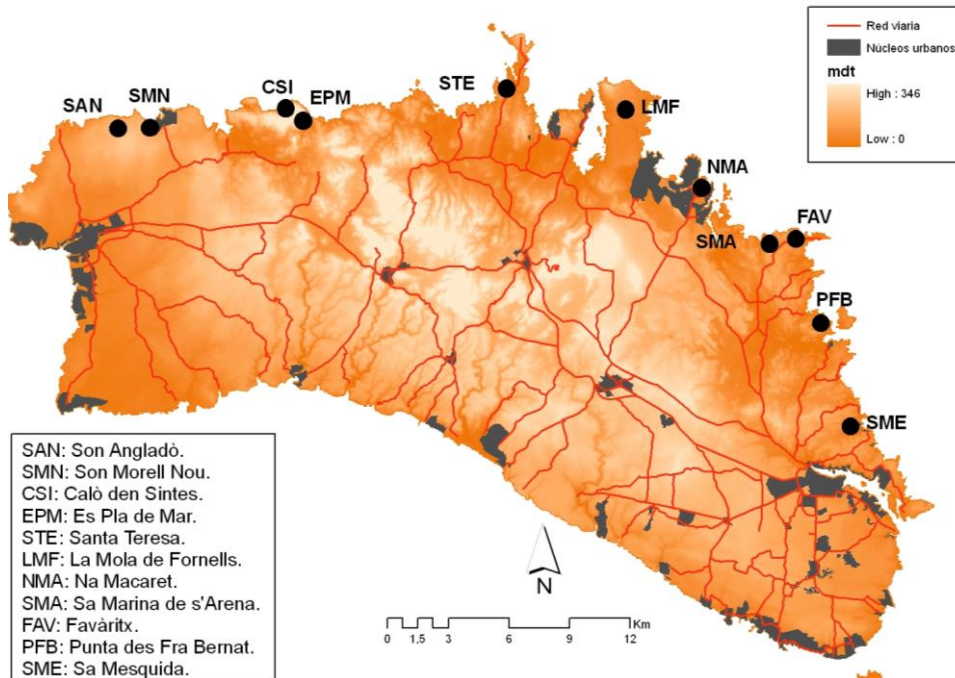
Un aspecto notable de estos depósitos, es que todos se sitúan a la costa de N de la isla (Fig. 1). En general presentan acumulaciones de arena, sin definir morfologías dunares claras, excepto el manto situado en sa Marina de s'Arena, que presenta pequeñas formaciones parabólicas (Roig-Munar *et al.*, 2008a) y en algunos casos con vegetación psamófila, como *Euphorbia paralias* (Punta des Pare Fra Bernat), *Pancratium maritimum* (Punta des Pare Fra Bernat y sa Mesquida) o *Lotus cytisoides*, que lo hace sobre varios mantos (Fraga *et al.*, 2012), lo que demuestra un cierto dinamismo en alguno de ellos.

Si bien es cierto que la mayoría de ellos aparecen cartografiados en los mapas geológicos (Bourrouilh, 1983), estos quedan oscurecidos por la magnitud de la geología que los rodea. Su

ubicación, lejos de carreteras, núcleos urbanos u otro asentamiento humano, ha facilitado que hasta ahora no se realizase ningún tipo de descripción ni análisis. Otro posible motivo de la falta de estudios puede deberse a la prácticamente poca explotación económica, frente a la importancia socio-económica de los sistemas playa-duna.

Los mantos eólicos desvinculados de la línea de costa, constituyen depósitos eólicos semiestabilizados o estabilizados en la mayoría de ellos, formados de material no consolidado, situados sobre promontorios rocosos, compuestos por diferentes materiales que van desde Carbonífero a Triásico, Jurásico, Cretácico y Mioceno. La mayoría de estos promontorios están coronados por eolianitas cuaternarias, sobre las cuales se desarrollan la mayoría de estos depósitos eólicos.

Las eolianitas son un rasgo distintivo del registro sedimentario del Pleistoceno (Abegg, *et al.*, 2001; Brooke, 2001; Fornós *et al.*, 2002a; Andreucci *et al.*, 2006; Andreucci *et al.*, 2010a). Estos depósitos pueden ser datados con precisión (Frenchen *et al.*, 2004) y pueden ser usados para evaluar relaciones con otros depósitos como terrazas marinas, paleosuelos, depósitos aluviales y coluviales, para obtener información paleoclimática, incluido oscilaciones del nivel del mar o evolución del paisaje (Carew y Mylroie, 2001; Coltori *et al.*, 2010; Elmejdoub *et al.*, 2011; Kindler y Mazzolini, 2001). Los depósitos pleistocenos han sido ampliamente estudiados en la vecina isla de Mallorca (Cuerva, 1989; Fornós *et al.*, 2005, 2009, 2012; Clemmensen *et al.*, 1997; Clemmensen *et al.*, 2001). Sin embargo, en la isla de Menorca apenas existen estudios en este campo. Rosell y Llompart (2002) señalan varios afloramientos de cordones de dunas consolidadas a diferentes alturas sobre acantilados, algunos de ellos afectados por la tectónica reciente. También la tesis de Pomar (2016) da un salto substancial en el conocimiento de estos sistemas dunares. Pons *et al.* (2017) realizan una aproximación al conocimiento de los depósitos cuaternarios desde el punto de vista paleontológico.



**Figura 1.** Localización de los mantos eólicos.

**Figure 1.** Aeolian sand sheet location.

	Superficie (m <sup>2</sup> )	Litología	H acant. (m)	Tipología	H. máx. (m)	H. mín. (m)
SAN	470.884	Mioceno	67	Acantilado	106.2	77.6
SMN	188.273	Mioceno	72	Acantilado	80.4	74.1
CSI	12.457	Triásico inf.		Torrente	66	36
EPM	28.042	Pérm./Cuatern		Torrente	21,5	4.4
STEA	93.295	Jurásico inf.	29	Acantilado	35	10
STEB	4.305	Jurásico inf.		Torrente	12,3	1,9
LMF	4.133.310	Jurás./Cretac.	51	Acantilado	76.3	13.6
NMA	315.906	Jurás./Cuat.	10	Acantilado	25	12
SMA	67.368	Carbonífero	56	Acantilado	69,3	30,8
FAV	20.340	Carbonífero	10	Torrente	38.9	15
PFBa	8.193	Carbon./Cuat.		Torrente	32.1	15
PFBb	23.193	Carbon./Cuat.	18	Acantilado	42.1	15.2
SMEa	30.345	Carbonífero	9	Acantilado	45.2	2.6
SMEb	11.360	Carbonífero	11	Torr. colg.	48.3	32.2
SMEc	9.270	Carbonífero	10	Torr. colg.	42.2	15
SMEd	21.484	Carbonífero		Torr. colg.	42.2	35.1
Media	362.535				15	9
Total	4.936.387					

**Tabla 1.** Datos generales de los mantos eólicos. H. Máx. y H. Mín., significa las alturas máxima y mínima entre la que se desarrolla el manto eólico. En cursiva, la altura de los torrentes colgados.

**Table 1.** *Aeolian sand sheet main attributes. H. Max. and H Min. refer to the maximum and minimum height where the Aeolian sand sheets can be found. Perched streams height in italics.*

## 2 | El marco geológico

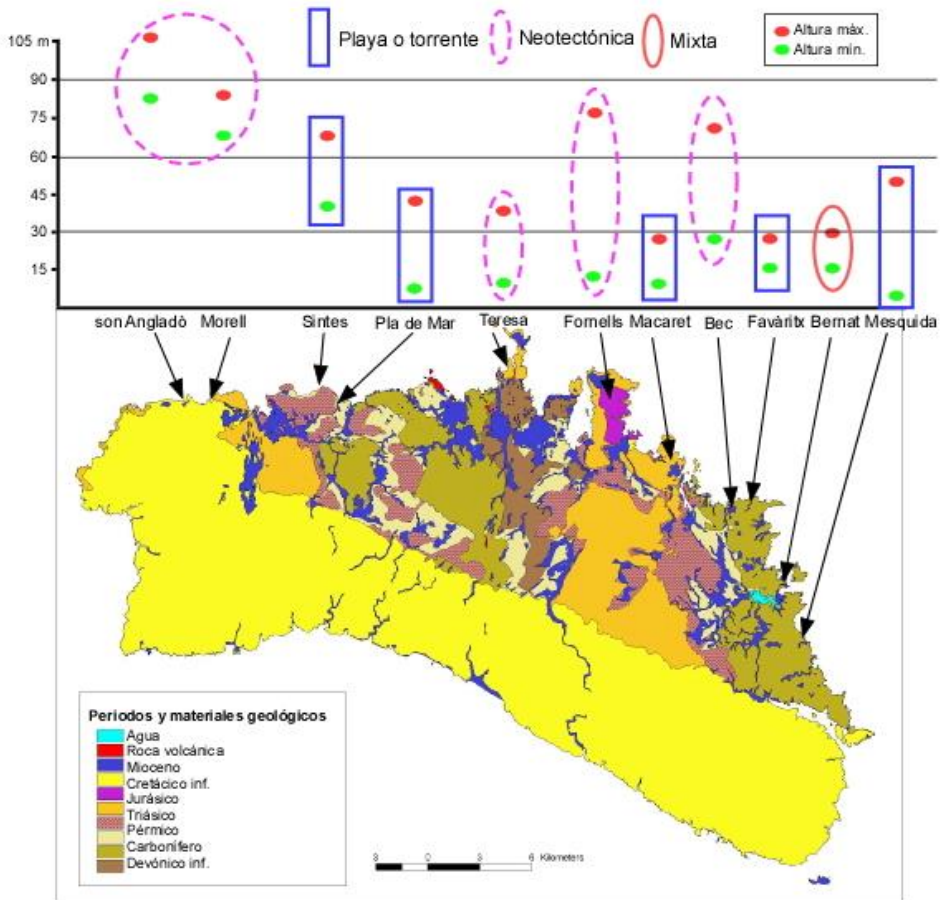
Tanto desde un punto de vista geológico como geomorfológico el relieve menorquín está fuertemente condicionado por la estructura y una evolución reciente de tiempos cuaternarios, desde la fracturación del *Migjorn* hasta los suaves relieves de *Tramuntana*. La separación entre estos dos dominios queda definida por una falla axial orientada de ESE-ONO, que recorre toda la isla desde el N de Ciutadella hasta el Port de Maó. De este modo, la estructura de *Tramuntana* refleja principalmente la etapa compresiva desarrollada durante el Oligoceno Superior y el Mioceno Medio, donde encontramos materiales preorogénicos (Paleozoico y Mesozoico), mientras que la estructura del *Migjorn* refleja básicamente la etapa extensiva del Mioceno Superior y Plioceno-Cuaternario, formada básicamente por materiales postorogénicos del Mioceno Superior (Fig. 2).

Así, el *Migjorn* se encuentra dominado por materiales terciarios, siendo fundamentalmente de naturaleza calcárea. Es en gran medida un área plana, que buza suavemente hacia el sur y que geológicamente corresponde a una plataforma carbonática del Mioceno medio y superior que forman un anticlinal muy laxo con el eje orientación N-S (Gelabert, 2003). Destaca su horizontalidad que llega hasta la misma línea de costa, mucho menos articulada que en la opuesta de *Tramuntana*.

Por el contrario, el sector septentrional, *Tramuntana*, se encuentra estructurado en un sistema de láminas cabalgantes que están recubiertas discordantemente por depósitos de edad que pertenecen al Mioceno Superior (Bourrouilh, 1983; Obrador, 1972). Destaca la heterogeneidad del Paleozoico y del Mesozoico, mayoritariamente

con litologías silíceas. Estos materiales se encuentran fallados y plegados por la orogenia alpina. La estructura geológica de la zona de *Tramuntana* consisten en un sistema de fallas extensivas, de orientación NE-SW y NW-SE de edad anterior al Oligoceno superior, plegado, cortado y parcialmente invertido por un sistema de cabalgamientos convergentes Hacia el WNW y que en algunos sectores (el central sobre todo) han combinado las estructuras hercinianos con los movimientos alpinos durante el período comprendido entre el Oligoceno superior y el Mioceno medio (Gelabert, 2003).

De este modo, la estructura de Tramuntana refleja principalmente la etapa compresiva desarrollada durante el Oligoceno superior y el Mioceno medio, mientras que la estructura del Migjorn refleja básicamente una etapa extensiva del Mioceno superior seguida de una compresión de menor escala e intensidad durante el Plio-Cuaternario. (Gelabert, 2003).



**Figura 2.** Geología y tipología de los diferentes mantos eólicos. La gráfica representa la altura mínima y máxima entre las que se desarrolla cada manto eólico.

**Figure 2.** Geology and aeolian sand sheet type. The upper graph shows the Aeolian sand sheet height emplacement.

**Figura 3.** Sistema de dunas remontantes de Monfogue. Vista oblicua hacia el SW. Fuente: MAGRANA.

**Figure 3.** Climbing dunes at Mongofre. View to SW. Photo by MAGRANA.



En general, la costa septentrional presenta un alto grado de articulación, con numerosos entrantes que dan lugar al desarrollo de sistemas dunares. El aspecto dominante es el de una costa de acantilados altos. En ocasiones encontramos formaciones del tipo *climbing dunes*, *cliff-top dunes* e incluso, cuando hay un trasvase de arena de una vaguada a otra, encontramos dunas del tipo *falling dune* (Servera, 2003). A esta última tipología destacan por la espectacularidad de las formas remontantes los sistemas de Cala Presili, el sistema dunar de Mongofre (Fig. 3) y el de Cala Pilar.

El carácter acusadamente recortado de la costa septentrional, sobre todo de su segmento central, tiene mucho que ver con la tectónica y con el relieve interior, de tal modo que si el nivel marino subiera 5 m, las calas y aguazales se convertirían en auténticas rías (Rosselló, 2003).

### 3 | Formación y génesis

La ubicación de los mantos distribuidos de manera regular a lo largo de la costa norte, así como la altura a la que se encuentran, no son hechos casuales, si no que obedece a una serie de factores que han condicionado su génesis y posterior desarrollo. Entre estos factores, tenemos dos: por un lado la posición relativa del nivel del mar y por el otro de tipo geológico.

El nivel del mar, no ha sido constante a lo largo de la historia de la tierra, si no que ha variado de manera notable. Las oscilaciones más recientes nos permiten conocer la complejidad que supone la superposición de varias subidas y descensos del nivel del mar en los últimos 100 ka. La última regresión marina, conocida en ambientes alpinos como Würm, alcanzó su máximo sobre los 17-18 ka., dando lugar a un descenso del NM superior a los 120 m por debajo del nivel del mar actual (Shackleton y Opdyke, 1973; Lambeck y Bard, 2000; Pomar, 2016). A partir de este momento, las condiciones climáticas cambian, dando lugar a una subida del nivel marino. Este comportamiento

continuó hasta alcanzar la posición máxima del NM que se sitúa entre 7.000-6.500 BP. (Goy *et al.*, 1997; Servera y Pons, 2007) y que es conocida como la transgresión Flandriense. En este periodo, el nivel del mar se situó unos 2-3 m por encima del nivel actual (Butzer, 1975; Cuerda, 1989; Ginés 2000; Mateu *et al.*, 2001).

A partir de este momento, en el archipiélago balear, se han registrado al menos dos ascensos más por encima del nivel actual, que han dado como resultado (juntamente con la primera, es decir, el máximo Flandriense) la formación de tres generaciones de campo dunares separados entre ellos por dos capas edáficas (Goy *et al.*, 1997, González-Hernández *et al.*, 2001; Servera y Pons, 2007). La aparición de *Xerocrassa cuerdai*, un molusco extinguido, en una eolianita en el punto más elevado del manto situado en sa Marina de s'Arena, con una datación relativa en torno a 4-5 ka BP, pone de manifiesto al menos una de las pulsaciones antes mencionada. Por su parte, Fornós *et al.* (2007; 2008), sobre el manto eólico de ses Arenes (al Norte de Ciutadella), señalan una intensa actividad eólica en torno al quinto milenio BP en el relleno de una paleo red fluvial.

Asumiendo condiciones de paleo-viento similares a la dirección predominante actual, tenemos las condiciones favorables para el desarrollo de *climbing-dunes* (Ferraz *et al.*, 2011), similares a las explicadas por Servera (2003) (ver Fig. 3). Las condiciones actuales de viento, tienen un marcada componente Norte, tanto en frecuencia como intensidad. Es el viento conocido como Tramuntana. Así un viento sostenido de 30 km/h o más, es más frecuente de esa dirección que la todas las direcciones juntas. Los vientos de más de 60 km/h o superiores, representan el doble de veces de Tramuntana que las otras direcciones juntas (Jansà, 2004).

Por tanto, dado un aporte preexistente de sedimento, la presencia de dunas transgresivas sobre costas rocosas, puede ser asociado con bajadas eustáticas del nivel del mar, que proporcionan sedimento y espacio para la formación de sistemas dunares (Andreucci *et al.*, 2010a).

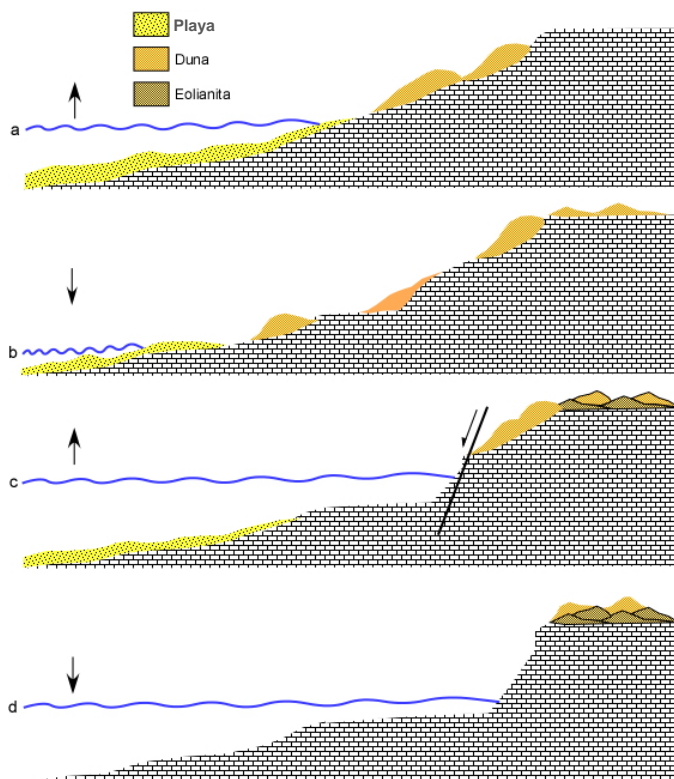
La formación y génesis también se pueden relacionar con fuertes procesos erosivos producto del impacto mecánico de oleaje, la inestabilidad de la pendiente, bioerosión, etc., también ligado a movimientos verticales del acantilado, afectados por la tectónica reciente (Rosell y Llupart, 2002). Ambos factores posiblemente han actuado de manera conjunta a lo largo del tiempo, pero con diferente efectividad, según el lugar (Roig-Munar *et al.*, 2016).

Un ejemplo de este funcionamiento mixto, lo tenemos en la costa SE de la isla de Mallorca, donde se han cuantificado retrocesos de 175 m en un periodo de 235 ka, sobre un acantilado pleistoceno, por medio de la combinación de procesos erosivos y tectónicos (Fornós *et al.*, 2005). En el caso de Menorca, y sobre materiales paleozoicos, también hay un ejemplo de procesos mixtos, se trata justamente del acantilado situado en el manto eólico de sa Marina de s'Arena. Por un lado, la erosión marina por el impacto de los temporales en la base del acantilado, afectando materiales blandos del carbonífero; y por otro la infiltración de agua que fluidifica las pizarras de la formación carbonífera y favorece el deslizamiento y caída de los materiales duros del Cuaternario. Se trata de un deslizamiento activo de tipo *rock-avalanche* dando lugar al acantilado costero y una componente de flujo que constituye el cuerpo del deslizamiento de 1 km de longitud sumergido en el mar (Roig-Munar *et al.*, 2016). La edad del deslizamiento es desconocida, pero probablemente se inició en un momento donde el nivel del mar era inferior al actual.



Si se observa la batimetría de la costa Norte de Menorca, aparecen morfologías similares de deslizamiento al del ejemplo de sa Marina de s'Arena. Es el caso de son Angladó, donde la cota -35 se encuentra a 1 km del acantilado o en el de sa Mola de Fornells, cuya cota -30 se halla a tan solo 120 m. Por lo tanto, los procesos de neotectónica ligados a la erosión marina, constituyen el otro factor que explican la ubicación de los mantos eólicos sobre acantilados verticales de hasta 50 m, como el caso de la Mola de Fornells o los 76 m de son Angladó.

En el esquema evolutivo de la Fig. 4, se plantea la hipótesis de formación y evolución de los mantos situados sobre los acantilados. En la fase inicial (Fig. 4a), con la máxima subida del nivel del mar en el óptimo Flandriense, tenemos una playa y un sistema dunar. Siguiendo los razonamientos de Servera (1997), González-Hernández *et al.* (2001) y Servera y Pons (2007), tenemos un primer descenso del nivel del mar (Fig. 4b) y por tanto con una mayor disponibilidad de sedimento, una ampliación de la superficie de playa y un sistema dunar más extenso, mientras que la duna del episodio anterior comienza a migrar hacia tierra. Este proceso se puede haber repetido con posterioridad, sedimentando los depósitos anteriores y dando lugar a la presencia de eolianitas, que se sitúan sobre el acantilado. Con posterioridad (Fig. 4c), movimientos verticales, unidos a una intensa erosión en la base del acantilado, dan como consecuencia el desligamiento de la fuente de alimentación del manto y su desconexión de la misma (Fig. 4d).



**Figura 4.** Formación de mantos eólicos vinculados a acantilados.

**Figure 4.** Aeolian sand sheets formation related to cliffs.

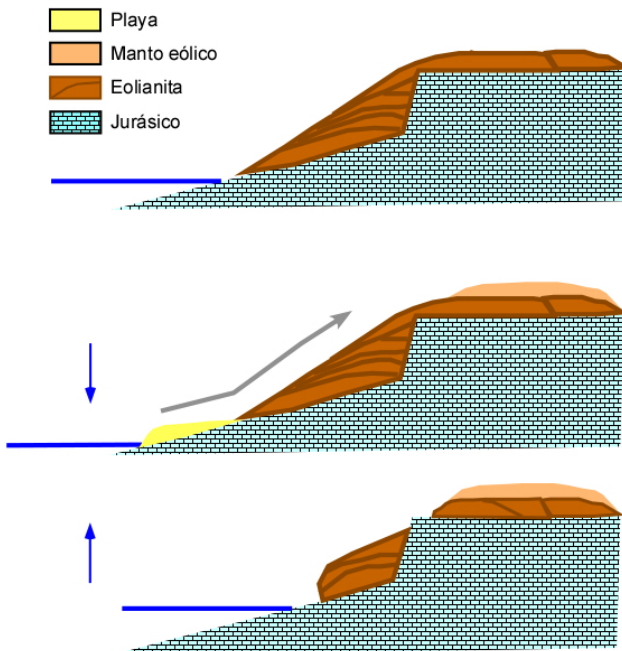




**Figura 5.** Rampas de eolianitas en el acantilado del manto de Santa Terea. A continuación de la rampa se puede apreciar el acantilado Jurásico. Vista hacia el NE.

**Figure 5.** Aeolianites ramp attached to the cliff where rests the Santa Teresa aeolian sand-sheet. Rear the cliff-front dunes crops out the Jurassic basement. View to the NE.

Se puede contemplar otra posible explicación sobre la formación de al menos dos mantos eólicos (Santa Teresa y Punta des Pare Fra Bernat). Se trata de la presencia de rampas de eolianitas sobre el acantilado, que con una inclinación entre sobre los 25-30°, pueden haber sido el nexo entre la fuente de alimentación y la cima del acantilado (Fig. 5). En la figura 6 se explica de manera esquemática su evolución a partir de sectores de costa donde la zona sumergida presenta una pendiente suave por la que se canaliza el sedimento y en planta se hallan condicionados por una topografía de salientes hacia el mar, que también ayudan a canalizar el flujo eólico. Procesos similares de formación de eolianitas han ocurrido a lo largo del Pleistoceno sobre acantilados miocenos de Mallorca, con la formación de rampas (Clemmensen *et al.*, 1997; 2001)



**Figura 6.** Formación de los mantos eólicos vinculados a acantilados y asociados a rampa. Ejemplo para el manto eólico de Santa Teresa.

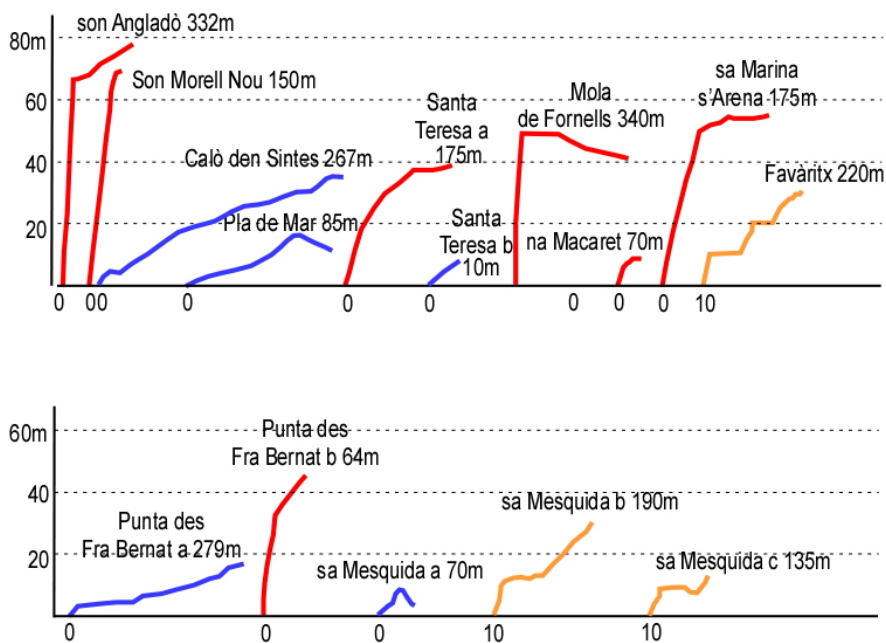
**Figure 5.** Aeolian sand sheet deposition in cliffy settings and related to former sand ramps and cliff-front dunes. Example based in Santa Teresa's aeolian sand-sheet.

#### 4 | Tipología y características

A partir del análisis topológico de todos los perfiles (Fig. 7), podemos observar que básicamente se concentran en tres grupos: por un lado aquellos mantos asociados a acantilados verticales. El segundo grupo se desarrolla a partir de la canalización del sedimento a través del cauce de un torrente sobre materiales carboníferos o triásicos. Finalmente, un tercer grupo vinculado a un torrente, pero en este caso un torrente colgado en su desembocadura (Favàritx y sa Mesquida b y c).

##### **Mantos asociados a acantilados**

El primer grupo, está formado por mantos asociados a acantilados verticales de marina i/o carboníferos y corresponden a Son Angladó, Son Morell Nou, Santa Teresa, Mola de Fornells, na Macaret, sa Marina de s'Arena y sa Punta des Fra Bernat (Figs. 2 y 7). El rango de alturas del acantilado está entre los 77 m en son Angladó y los de 10 m en na Macaret, con una altura media de 42 m. La distancia media sobre el acantilado a partir de la cual se desarrollan los mantos de esta tipología es de 148 m, siendo la máxima en la Mola de fornells con 300 m y la mínima en Punta des Pare Fra Bernat, que es de 54 m (Fig. 7). La característica fundamental de este grupo es la verticalidad de todos los acantilados (Fig. 8). En la figura 9, se puede apreciar alguna de las características de estos mantos.



**Figura 7.** Topología de los diferentes tipos de perfiles de todos los mantos eólicos estudiados. En rojo los vinculados a acantilados y en azul los que se vinculan a torrentes (el dato en metros de cada perfil representa la distancia desde la línea de costa hasta el inicio del depósito, las ordenadas corresponden a la altura topográfica). En naranja, torrentes colgados.

**Figure 7.** Cliff profile at different locations with aeolian sand dunes. Red profiles indicate those close related to cliffs, in green those influences by streams and in Orange those related to perched streams.



**Figura 8.** A la izquierda acantilado vertical sobre Mioceno de son Morell Nou. La zona boscosa situa al fondo a la izquierda, corresponde a al ubicación del manto eólico. Vista hacia el SW. Fuente: MAGRANA. Vista oblicua hacia el Sur del acantilado de sa Marina de s'Arena sobre Carbonífero. En el centro se puede apreciar el tono más claro del manto. Fuente: Google Earth.

**Figure 8.** Left, vertical cliff developed in Miocene rocks at son Morell Nou. The trees that can be appreciated on the plain correspond to the aeolian sand-sheet location. Source: Magrana. Right: Cliff shaped in carboniferous rocks at sa Marina de s'Arena. The yellow colors in the middle of the photo correspondes to the aeolian sand sheet. Source: Google Earth.



**Figura 9.** A la izquierda manto de Santa Teresa a y a la derecha, manto de na Macaret.  
**Figure 9.** Left, Santa Teresa Aeolian sand sheet. Right: Na Macaret aeolian sand sheet.

### **Mantos asociados a torrentes**

El segundo grupo está formado por aquellos mantos asociados a la vaguada de un torrente, sobre materiales carboníferos o triásicos (Figs. 2 y 7). En este grupo tenemos los mantos del Caló d'en Sintes, Pla de Mar, Santa Teresa b, Punta des Fra Bernat a y sa Mesquida a (Fig. 10). Su formación es similar a la de los mantos situado sobre acantilados, con subidas y bajadas del NM, en el que la vaguada del torrente actúa como canalizador del sedimento hasta la parte más elevada del mismo, donde la fuerza del viento ya no es capaz de transportar más sedimento, quedando finalmente depositado. La distancia a partir de la cual desarrolla el manto eólico para esta tipología es de 142 m de la línea de costa, con una altura media máxima en torno a los 13 m sobre el nivel del mar (la más baja de los tres grupos). La máxima distancia a la que se desarrolla esta tipología es la de Punta des Fra Bernat a, a 279 m y la máxima altura en Caló des Sintes a 36 m (Fig. 7). En la Fig. 11, se puede apreciar alguna de las características de estos mantos.





**Figura 10.** A la izquierda, situación del manto eólico del Pla de Mar. A la derecha manto en Santa Teresa.

**Figure 10.** Pla de Mar (left) and Santa Teresa (right) aeolian sand sheet locations.



**Figura 11.** A la izquierda, manto eólico del Pla de Mar. A la derecha manto en Santa Teresa.

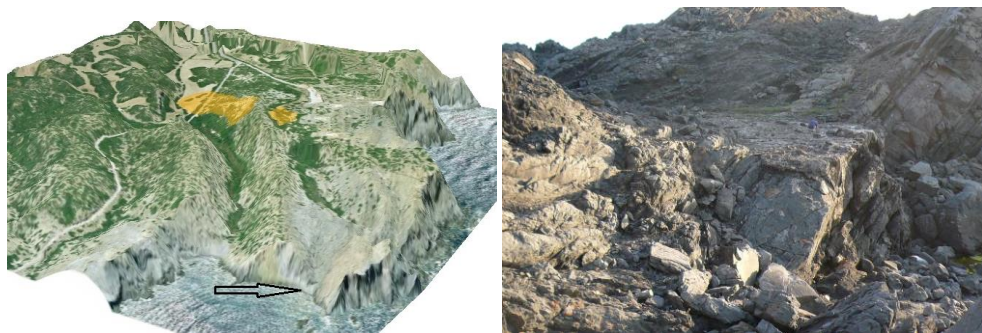
**Figure 11.** Pla de Mar (left) and Santa Teresa (right) aeolian sand sheet overviews.

### ***Mantos asociados a torrentes colgados***

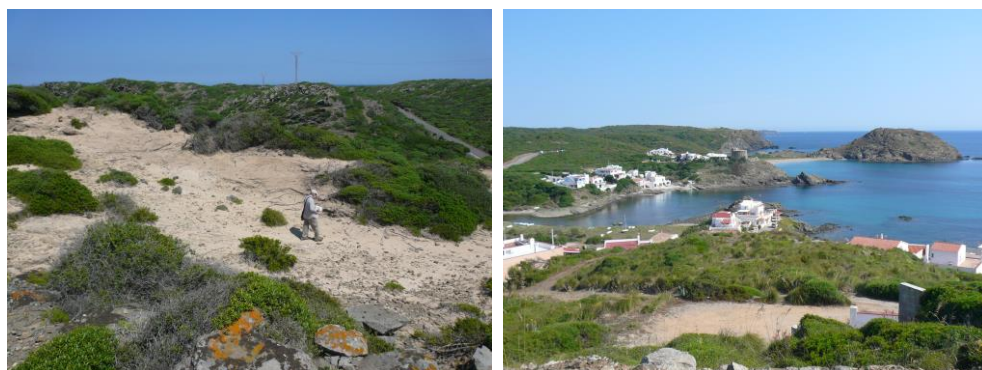
El último grupo, Favàritx (Fig. 12) y sa Mesquida b, c y d corresponde a la tipología de torrentes colgados que se sitúan a una altura media de 10 m sobre el nivel del mar y que por tanto, podría encontrarse en una situación intermedia entre los dos grupos anteriores. La distancia media a la que se desarrolla el manto eólico para este tipo es de aproximadamente 185 m de la línea de costa, con una altura media de 20 sobre el nivel del mar (Fig. 7). En la figura 13, se puede apreciar alguna de las características de estos mantos. Por lo que respecta al sedimento, a falta de un análisis en profundidad del mismo en cuanto a textura y mineralogía, la característica común es la presencia de arenas finas y medias (Fig. 14). También resulta importante el material “reciclado” procedente de eolianitas pleistocenas, que se han ido disgregando por la acción erosiva continuada del viento.

## **5 | La vegetación de los mantos eólicos**

La influencia de los suelos arenosos en la caracterización de la biodiversidad no es una facultad exclusiva de hábitats como los sistemas dunares, sino que también se



**Figura 12.** MDT de los mantos eólicos de Favàritx. A la derecha se puede apreciar la altura de desembocadura del torrente que corresponde a la flecha marcada en la figura de la izquierda.  
**Figura 12.** DEM with aeolian sand sheet at Favàritx (left). The arrow indicate the enlarged zone at right image. Detail on the stream mouth (right).



**Figura 13.** Manto eólico de Favàritx. A la derecha y en primer plano, el manto de sa Mesquida.  
**Figura 13.** Aeolian sand sheets at Favàritx (left) and sa Mesquida (right).

puede producir en otros ambientes, posiblemente menos conocidos. La mayoría de trabajos realizados últimamente en hábitats de suelos arenosos han puesto en evidencia la importancia de estos ambientes y la necesidad de su conservación (Roig-Munar *et al.*, 2008a, 2008b; 2009a; 2009b; 2009c).

El inventario florístico realizado en los 16 mantos eólicos de Menorca dan como resultado global un catálogo florístico de 391 taxones, esto representa aproximadamente un 30% del conjunto de flora vascular de la isla. De este conjunto de taxones vegetales la gran mayoría (48%), sólo aparecen en un máximo de tres mantos eólicos, mientras que un 25% sólo lo hacen en un manto. En el extremo opuesto, 11 taxones se han encontrado en todas las localidades estudiadas. Se debe destacar que ninguna de estas plantas más frecuentes se puede considerar característica o indicadora de suelos arenosos en la isla, pero al mismo tiempo tampoco son estrictamente taxones de ambientes alterados o antropizados. Este hecho pondría en evidencia que estos mantos eólicos, a pesar de estar formados por sustrato alterado por naturaleza, en este caso, se trata de sistemas o formaciones en proceso de estabilización.

**Figura 14.** Aspecto del sedimento completamente disgregado de sa Marina de s'Arena

**Figure 14.** Aeolian sand sediments at sa Marina de s'Arena.



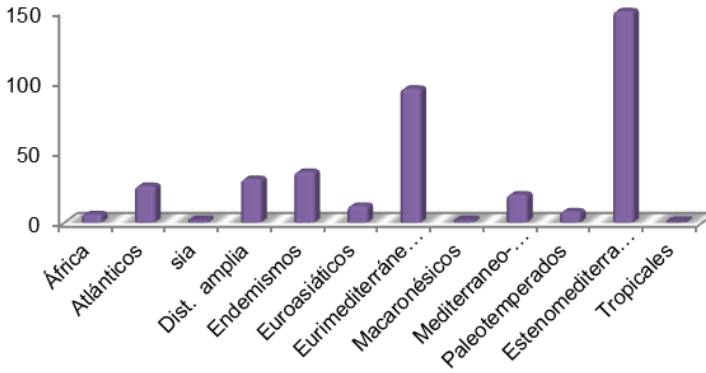
Los taxones que mejor caracterizan a los suelos arenosos en Menorca no aparecen hasta el grupo de frecuencia en 10 localidades: *Helichrysum stoechas*, *Juniperus phoenicea*, *Limonium echioides*, *Vulpia ciliata*. En cambio, una planta supuestamente característica de los sistemas dunares de Menorca (*Scrophularia ramosissima*) sólo se ha localizado en cuatro mantos eólicos. Todos estos datos de presencia vienen a confirmar, al menos hasta este punto, que efectivamente, los mantos eólicos estudiados, aunque su origen marino y la constitución arenosa del sustrato, se encuentran ya en una etapa de consolidación avanzada.

En cuanto a los grupos taxonómicos (Tabla 2), concretamente las familias mejor representadas son: gramíneas (44), compuestas (52), leguminosas (45), lo son también para el conjunto de la flora de la isla. En cambio, en las que siguen: cariofiláceas (16), labiadas (14), euforbiáceas (10), liliáceas (10), hay cambios en comparación al conjunto de la flora de Menorca. En los mantos eólicos, las crucíferas desaparecen de esta lista de familias más representadas, mientras que toman protagonismo otros grupos como las cistáceas, que a menudo muestran una cierta especialización para crecer en suelos arenosos pobres. Lo mismo se podría decir por otras familias como las gentianáceas, las plumbagináceas o las orquídeas. Esta especialización de ciertas familias en condiciones edáficas concretas se hace evidente cuando estas muestran concentraciones en mantos eólicos con características particulares.

Familia	Nº taxones	Familia	Nº taxones
Compositae	52	Cistaceae	9
Leguminosae	45	Cyperaceae	8
Graminae	42	Scrophulariaceae	7
Caryophyllaceae	16	Orchiaceae	7
Labiatae	14	Rubiaceae	6
Liliaceae	10	Plumbaginaceae	6
Euphorbiaceae	10	Plantaginaeae	6
Umbelliferae	10	Geraniaceae	6

**Tabla 2.** Grupos taxonómicos.

**Table 2.** Taxonomic groups.

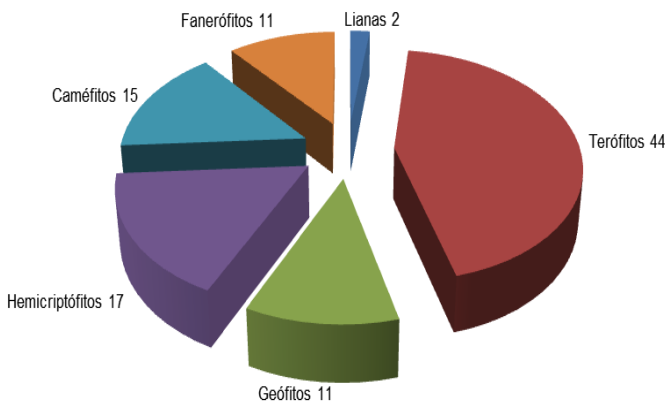


**Figura 15.**  
Biogeografía  
**Figure 15.**  
Biogeography

En el caso de las categorías biogeográficas (Fig. 15), la tendencia vuelve a ser coincidente con los resultados obtenidos por el conjunto de la flora de la isla, pero aquí también de una manera exagerada con respecto a los grupos dominantes, esto es los taxones mediterráneos (62%), por tanto, el carácter mediterráneo de estos mantos eólicos queda bien de manifiesto. Sólo en casos concretos, tales como aquellos situados en sustratos silíceos o situaciones más frescas (es Pla de Mar) se observa una mayor representación de grupos como los atlánticos o euromediterráneos.

En cuanto a los endemismos, aparecen mejor representados en mantos eólicos caracterizados por su extensión y la progresión hacia el interior (Mola de Fornells, Na Macaret). Otro resultado que proporciona información es la importancia de los taxones atlánticos en mantos eólicos caracterizados por la presencia de hábitats húmedos (Sa Mesquida).

El espectro de las formas vitales es también bastante coincidente con el que se obtiene para el conjunto de la flora de Menorca (Fig. 16). Predominan claramente los terófitos (44%) y los otros grupos se sitúan a bastante distancia con unos valores bastante similares entre ellos. Así por ejemplo, los terófitos muestran un valores sensiblemente más bajos en aquellos de extensión más reducida y con una mayor predominio de la vegetación arborecente (Caló de en Sintes). El caso contrario, los terófitos están aún mejor representados, en aquellas localidades donde el manto eólico está más alterado (presencia de tierras cultivo: Santa Teresa, Son Morell, Son Angladó).



**Figura 16.** Formas vitales de las plantas presentes en los mantos eólicos de Menorca.  
**Figure 15.** Vital forms of the plants present at the Menorcan aeolian sand sheets.



## 6 | Paleontología

Algunos de los mantos eólicos estudiados cuentan con moluscos terrestres fósiles. Gasull (1963) describe una nueva especie del Cuaternario, *Xerocrassa cuer dai*, un endemismo exclusivo de Menorca, hallada en un duna wurmiense, en unos limos amarillos, situada frente al mar en dos localidades próximas (Sa Mesquida y Cap Negre), localidades que se corresponderían con el manto eólico de sa Mesquida (vid. Vicens y Pons, en este mismo volumen).

Con posterioridad Quintana (1995) aporta nuevos datos sobre la especie, así como otras localidades y sus asociaciones malacológicas con los endemismos que perduran hasta la actualidad y presentes en distintos mantos eólicos: *Tudorella ferruginea*, *Iberellus companyonii*, *Xerocrassa nyeli*, *Oxychilus lentiformis*. A estas localidades añadiría na Macaret. Además, en la prospección y cartografía de los mantos eólicos de Menorca, hemos incorporado dos localidades más: sa Marina de s'Arena y Favàritx.

*Xerocrassa cuer dai* no se ha encontrado, hasta el momento, ni en los sedimentos continentales del mioceno superior de Punta Nati-Cala's Pous, ni en los sedimentos pleistocénicos más antiguos de la isla, es decir, los existentes en Cap de Cavalleria, Cap de Fornells o Sivinar de Mongofra, entre otros (Mercadal et al., 1970). Sí aparece, sin embargo, en los depósitos dunares más modernos, acompañado, en ocasiones, de *Chondrula gymnesica*, especie que tuvo su máximo desarrollo durante el interglaciar Riss-Würm y que debió desaparecer al comienzo de la última glaciación (Mercadal et al., 1970). Esta especie se encuentra generalmente asociada a sedimentos dunares costeros (Gasull, 1963; Quintana, 1995), siendo rara en cuevas. En Es Pas d'en Revull, una localidad interior, sólo se han encontrado unos pocos ejemplares. Resulta ser una especie muy interesante, endémica de Menorca, extinguida de la isla posiblemente en tiempos prehistóricos (Quintana, 2001).

De esta manera, mientras *Xerocrassa cuer dai* no sea encontrada en los sedimentos del mioceno superior o en el pleistoceno más antiguo de la isla, el límite temporal de esta especie puede situarse, por su asociación a *Chondrula gymnesica*, en el Riss o el interglaciar Riss-Würm. Su distribución temporal superior también es dudosa, aunque es posible que esta especie haya perdurado hasta tiempos muy recientes, como lo demuestran los ejemplares subfósiles de Binimel.là, El Pilar o Punta Nati - Cala's Pous. En una cueva de esta última localidad, *Xerocrassa cuer dai* se ha encontrado asociada a restos subfósiles de *Myotragus balearicus*; existen pruebas de que en Mallorca este mamífero se extinguió más allá del segundo milenio aC (Bover y Alcover, 2003). Tanto *Xerocrassa cuer dai* como *Myotragus balearicus* no fueron depositados en el interior de la cavidad de forma coetánea, por lo que es muy posible que este gasterópodo hubiese incluso perdurado algún tiempo después de la extinción de *Myotragus*.

## 7 | Conclusiones

Se han analizado un total de 16 mantos eólicos distribuidos a lo largo de la costa Norte de Menorca ocupando una superficie aproximada de 4.936.387 m<sup>2</sup>. Teniendo en cuenta que el manto de la Mola de Fornells se extiende a lo largo de 4.133.310 m<sup>2</sup>, la superficie media es de 362.535 m<sup>2</sup>. Hay que comentar que, aunque se han estudiado un total de once mantos eólicos, desde el inicio del estudio hasta la fecha, aunque se han encontrado algún manto más, de pequeñas dimensiones, todos ellos localizados

en la costa norte. Las alturas máximas y mínimas medias entre las que se desarrolla el manto eólico son de 15 y 9 m respectivamente, siendo la máxima a son Angladó y la mínima en Santa Teresa b, con 106 y 1.9 m respectivamente. La mayoría de los mantos se encuentran depositados sobre materiales mesozoicos (Caló d'en Sintes, Pla de Mar, Santa Teresa, Mola de Fornells y na Macaret), el resto lo hacen sobre Paleozoico (sa Marina de s'Arena, Favàritx, Punta des Fra Bernat y sa Mesquida) y sobre Cenozoico (son Angladó y son Morell Nou).

Podemos distinguir tres tipologías principales: mantos eólicos vinculados a acantilados verticales, a vaguadas de torrentes y el tercer grupo se corresponde con torrentes colgados, que vendría a ser una situación intermedia entre los dos primeros.

Los procesos erosivos de los acantilados por la acción mecánica del oleaje, acompañados o no por fracturas verticales (neotectónica) han jugado un papel importante en la génesis y formación de los mantos, al igual que los movimientos eustáticos del nivel del mar durante el Holoceno. En cualquier caso, los factores que parecen condicionar el desarrollo de los mantos eólicos en la costa Norte de Menorca son: exposición subaérea de sedimento, cambios en el nivel el mar, movimientos verticales el terreno, erosión marina y vientos litorales capaces de transportar sedimento.

En cuanto al aspecto florístico y de vegetación del estudio de los mantos eólicos, en general, predomina un tipo de vegetación o comunidades vegetales más características de suelos estables, pero a la vez, en la gran mayoría de ellos es posible identificar especies o comunidades que los relacionan claramente con los suelos arenosos del litoral. Como en el caso de los sistemas dunares, los endemismos vegetales son relativamente frecuentes, en algunos casos, con un cierto nivel de especialización.

El presente estudio ahonda en un conjunto de sistemas eólicos subactuales apenas abordados en la literatura científica, aunque quedan muchos aspectos por profundizar y hábitat prioritario de la Directiva Hàbitats, no descrito en Menorca. Entre otros, explicar la total ausencia de este tipo de mantos eólicos en el sur de la isla de Menorca.

### Agradecimientos

El presente trabajo fue fruto de una beca de investigación del *Institut Menorquí d'Estudis* (IME) hacia la *Societat d'Història Natural de les Balears* (G.X. Pons coordinador). También ha sido posible gracias a la ayuda del proyecto "Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español" (CS02015-64468-P) del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

### Bibliografía

- Abegg, F.E., Loope, D.B. & Harris, P.M. (Eds.) (2001): Carbonate eolianites-Depositional models and diagenesis. *SEPM Special Publication*, 71: 17-30.
- Alcover, J.A. (2004): Disentangling the Balearic first settlement issues. *Endins*, 26: 143-156.
- Andreucci, S. Pascucci, V. & Clemmensen L.B. (2006): Upper Pleistocene coastal deposits of West Sardinia: a record of sealevel and climatic change. *GeoActa*, 5: 79-96.
- Andreucci, S. Pascucci, V., Murray, A. y Clemmensen L.B. (2009): Late Pleistocene coastal evolution of San Giovanni di Sinis, west Sardinia (Western Mediterranean). *Sedimentary Geology*, 216: 104-116.

- Andreucci, S, Clemmensen, L.B. y Pascucci, V. (2010a): Transgressive dune formation along a cliffed coast at 75 kyr in Sardinia, Western Mediterranean: a record of sea-level fall and increased windiness. *Terra Nova*, 22 (6): 424-433.
- Andreucci, S, Clemmensen, L.B.; Murray, A.S. y Pascucci, V. (2010b): Middle to late Pleistocene coastal deposits of Alghero, northwest Sardinia (Italy): Chronology and evolution. *Quaternary International*, 222: 3-16.
- Bourrouilh, R. 1983. Stratigraphie, sédimentologie et tectonique de île de Minorque et du Nord-Est de Majorque (Baléares). La terminaison Nord-orientale des Cordillères Bétiques en Méditerranée occidentale. *Memorias del Instituto Geológico y Minero de España*, 99: 1-672
- Bover, P. y Alcover, J.A. 2003. Understanding Late Quaternary Extinctions: The Case of *Myotragus balearicus* (Bate, 1909). *Journal of Biogeography*, 30 (5): 771-781.
- Brooke, B. (2001): The distribution of carbonate eolianite. *Earth-Science Reviews*, 55: 135-164.
- Butzer, K.W. (1975): Pleistocene littoral-sedimentary cycles of the Mediterranean Basin: a Mallorcan view. En: Butzer, K.W., Isaac, G. (Eds.), *After the Australopithecines*: 25-71. Moulton Press, The Hague.
- Carew, J.L. y Mylroie, J.E. (2001): Quaternary carbonate eolianites of the Bahamas: Useful analogues for the interpretation of ancient rocks? En: Abegg, F.E., Harris, P.M. y Loope, D.B., *Modern and Ancient Carbonate Eolianites: Sedimentology, Sequence Stratigraphy and Diagenesis*. SEPM Special Publication 71: 33-45.
- Clemmensen, L.B. Fornós, J.J. & Rodríguez-Perea, A. (1997): Morphology and architecture of late Pleistocene cliff-front dune, Mallorca, Western Mediterranean. *Terra Nova*, 9: 251-254.
- Clemmensen, L.B. Lisborg, T.; Fornós, J.J. y Bromley, R. (2001): Cliff-front Aeolian and colluvial deposits, Mallorca, Western Mediterranean: a record of climatic and environmental change during the last glacial period. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 48: 217-232.
- Coltori, M., Melis, E. y Patta, D. (2010): Geomorphology, stratigraphy and facies analysis of some Late Pleistocene and Holocene key deposits along the coast of Sardinia. *Quaternary International*, 222: 17-18.
- Cuerda, J. (1989): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. (segunda edición). Dir. Gral. Cultura, Conselleria de Cultura, Eduació i Esports. Govern Balear. Mallorca.
- Ferraz, M., Cowell, P., v Rebelo, L., (2011). Coastal-change estimates inferred from remnant cliff-top dunes. *Journal of Coastal Research*, SI 64:661-665.
- Fornós, J.J., Balaguer, P., Gelabert, B. y 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., Gómez-Pujol, L., Rosselló, V. M., Segura, F., Pardo, J. y van Strydonck, M. (2007): El mantell eòlic de ses Arenes (Ciutadella de Menorca): dades preliminars i primeres datacions. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 50: 227-237.
- Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L.L., Rosselló, V.M<sup>a</sup>, Segura, F. y Pardo, J.E. (2008): El sistema eòlic de ses Arenes (Ciutadella de Menorca). En Pons, G. X. (ed.), *V Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears*. SHNB, 72-76. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fornós, J. J., Clemmensen, L.B., Gómez-Pujol, L., y Murray, A. S. (2009): Late Pleistocene carbonate aeolianites on Mallorca, Western Mediterranean: a luminescence chronology. *Quaternary Science Reviews* 28: 2697-2709.
- Fornós, J. J., Clemmensen, L.B., Gómez-Pujol, L., Ginés, A y Ginés, J. (2012): Pleistocene eolianites and low sea levels. En 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, 85-110. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fraga, P., Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J A. Pons, G. X. y Rodríguez, A. (2012): La flora vascular dels mants eòlics de Menorca: diversitat florística i anàlisis estadístiques. *Reneix Document Tècnic* 1. Maó, Institut Menorquí d'Estudis, IME.
- Frechen, M., Neber, A., Tsatskin, A., Boenigk, W. y Ronen, A. (2004): Chronology of Pleistocene sedimentary cycles in the Carmen Coastal Plain of Israel. *Quaternary International*, 121: 41-52.

- Gasull, L. (1963): Descripción de unas nuevas formas del género *Helicella* (*Xeroplexa*) de Baleares. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 9: 83-92.
- Gelabert, B. (2003): La estructura geológica de Menorca: las zonas de Tramuntana y Migjorn. En Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds). 2003. *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 39-48. Palma, AGE, Universitat de València, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Ginés, J. (2000): *El karst litoral en el Levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Dep. Ciències de la Terra, UIB.
- González-Hernández, F. M., Goy, J. L., Zazo, C. y Silva, P. G. (2001): Actividad eólica – cambios del nivel del mar durante los últimos 170.000 años (litoral de Mallorca, Islas Baleares). *Rev. Cuaternario & Geomorfología*, 15 (3-4), 67-75.
- Goy, J. L., Zazo, C. y Cuerda, J. (1997): Evolución de las áreas margino-litorales de la costa de Mallorca (I. Baleares) durante el último y presente interglaciar: nivel del mar holoceno y clima. *Bol. Geológico y Minero*, 108 (4-5): 455-463.
- Jansà, A. (2004): El clima del Migjorn. En Fornós, J. J., Obrador, A. y Rosselló, V. M. (eds), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'íflux humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears 11: 39-52. Palma, Insititut Menorquí d'Estudis, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Kindler, P. y Mazzolini, D. (2001) Sedimentology and petrography of dredged carbonate sands from Stocking Island (Bahamas). Implications for meteoric diagenesis and aeolianite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175: 369-379.
- Lambeck, K. y Bard, E. (2000): Sea-level change along the French Mediterranean coast for the last 30.000 years. *Earth Planet. Sci. Letters* 175: 203-222.
- Mateu, G.; Viñals, M. J.; Moreiro, M y Nadal, G. (2001): La Transgresión Flandriense a través de los foraminíferos bentónicos del Mar Balear. En Pons, G. X. y Guijarro, J. A. (eds). *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Monografies de la Societat d'Història natural de les Balears 9: 13-32. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Mercadal, B., Villalta, J.F., Obrador, A. y Rosell, J. (1970): Nueva aportación al conocimiento del Cuaternario menorquín. *Acta Geol. Hisp.*, 5 (4): 89-93,
- Obrador, A. (1972): *Estudio estratigráfico y sedimentológico dde los materiales Miocenos de la Isla de Menorca*. Rev. De Menorca, 183 pp.
- Pomar, F. (2016): *Arquitectura i fàcies deposicionals de la interferència entre la sedimentació al·luvial, col·luvial i eòlica a les illes balears durant el pleistocè superior: implicacions paleoclimàtiques*. Tesis Doctoral. Dept. Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears.
- Pons, G. X., Martín-Prieto, J.A., Roig-Munar, F.X., Fraga, P., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B y Mir-Gual, M. (2012): Mantos eólicos de Menorca (Islas Baleares). En González-Díez, A. (Coord.), *Avances de la Geomorfología en España. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*: 367-370. Santander, Universidad de Cantabria.
- Pons, G.X., Vicens, D. y Mir-Gual, M. (2017): Aproximación al inventario de yacimientos del Cuaternario en el litoral de Menorca (*Illes Balears*). En: Carcavilla, L., Duque-Macías, J., Giménez, J., Hilario, A., Monge-Ganuzas, M., Vegas, J. y Rodríguez, A. Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural. *Cuadernos del Museu Geominero*, 21: 75-80.
- Quintana, J. (1995). Nuevas localidades con *Xeroplexa cuerdae* (Gasull, 1963) (Gastropoda: Pulmonata). *Rev de Men.*, 27-39.
- Quintana, J. (2001). Fauna malacológica presente en los sedimentos holocénicos del Barranc d'Algendar (Ferrerries, Menorca). *Spira*, 1(1): 33-40.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Fraga, P. y Pons, G.X. (2008a): Descripció del sistema dunar de l'arenal de Sant Jordi (Cala en Calderer, nord de Menorca), Illes Balears. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 51: 117-130.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Fraga, P. y Rodríguez-Perea, A. (2008b): Descripció geoambiental del dipòsit eòlic de Sa Marina de s'Arena (nord de Menorca, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 51: 103-116.

- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Pons, G.X. y Fraga, P. (2009a): El sistema de dunes remuntants de Sant Llorenç (Trebalúger, Sud Menorca, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 52: 141-154.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Pons, G.X. y Fraga, P. (2009b): El sistema platja-duna de cala Escorxada (Sud Menorca, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 52: 155-168.
- Roig-Munar, F.X., Fraga, P., Martín-Prieto, J.A., Pons, G.X. y Rodríguez-Perea, A. (2009c): Fixació i estabilització de sistemes dunars a les Illes Balears per processos de forestació: el cas de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 52: 129-140.
- Rosell, J. y Llompart, C. (2002): *El naixement d'una Illa, Menorca. Guia de geologia pràctica*. Maó, Institut Menorquí d'Estudis.
- Roselló, V. M. (2003): Geomorfología general de Menorca. En Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds). 2003. *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 49-64. Palma, AGE, Universitat de València, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Servera, J. (1997): Els sistemes dunars litorals a les Illes Balears. Tesi Dcotoral, Dept. Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 904 pp. 2 vols.
- Servera, J. (2003): Los sistemas playa-duna holocenos y actuales de Menorca. En Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds). 2003. *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 123-138.
- Servera, J. y Pons, G. X. (2007): Trets mineralògics y textural e la seqüència dunar holocena de la depressió de Campos (Mallorca). En Pons, G. X. y Vicens, D. (eds.), *Geomorfologia litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerda Barceló*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears 14: 353-374. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Shackleton, N.J. y Opdyke, N.D. (1973): Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific Core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volume on a 105 year and 106 year scale. *Quaternary Research*, 3: 39-55.



# Registro fósil del Cuaternario litoral de Menorca

Damià Vicencs<sup>1,2</sup> y Guillem X. Pons<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Societat d'Història Natural de les Balears, SHNB, Palma.

<sup>2</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>3</sup> Institut Menorquí d'Estudis, IME, Maó.

## RESUMEN

Se realiza un inventario del registro paleontológico de los depósitos litorales del Cuaternario en Menorca a partir de la bibliografía. La isla no es rica en yacimientos de playas fósiles y estos se hallan mayoritariamente en el litoral S. El registro fósil de taxones de origen marino es discreto y no se han hallado muchos fósiles termófilos. Los moluscos son los más abundantes en detrimento de otras clases en donde los fósiles se presentan escasamente. Los paleosuelos y eolianitas se hallan distribuidos por todo el litoral menorquín y el registro paleontológico es el propio de una isla, un número no muy alto de taxones terrestres con un elevado grado de endemismos. Los fósiles terrestres mayoritarios son también moluscos.

**Palabras clave:** Cuaternario, Pleistoceno, yacimientos, Mollusca, Menorca.

## ABSTRACT

An inventory of the paleontological record of the coastal deposits of the Quaternary in Menorca is made from the bibliography. The island is not rich in deposits of fossil beaches and these are mostly on the coast S. The fossil record of marine-derived taxa is discrete and many thermophilic fossils have not been found. Molluscs are the most abundant to the detriment of other classes where the fossils are presented sparingly. Palaeosols and Eolianites are distributed throughout the coast of Menorca and the paleontological record is that of an island, a not very high number of terrestrial taxa with a high degree of endemism. The majority fossils are mollusks.

**Keywords:** Quaternary, Pleistocene, Paleontological sites, Mollusca, Menorca.

## 1 | Introducción

Menorca es la segunda isla en extensión de las cinco islas mayores y el centenar de islotes que componen el archipiélago de las islas Baleares. Sus 716 km<sup>2</sup> suponen casi el 14% de la superficie del archipiélago, mientras que su perímetro, con 285,7 km de la línea de costa, representa el 23,06% del linde marítimo-terrestre de las islas. Menorca presenta una forma rectangular de disposición E-W basculada, levemente, en su extremo oriental hacia el sur (Pons y Gómez-Pujol, 2003).

Las *Illes Balears* tienen la suerte de poseer yacimientos cuaternarios de origen kárstico y de origen litoral, los cuales han proporcionado fósiles para realizar multitud de trabajos relacionados con el registro paleontológico. Sin lugar a dudas el conocimiento de la fauna vertebrada insular del Mioceno, Plioceno y Cuaternario es conocida gracias a los yacimientos kársticos (Sondaar *et al.*, 1995), aunque los yacimientos del litoral han aportado conocimientos complementarios, como las icnitas de varios vertebrados, algún hueso de ave, etc. Los invertebrados fósiles del Cuaternario, mayoritariamente los moluscos, son conocidos por los fósiles procedentes de yacimientos litorales (Cuerda 1975) y de los kársticos (Vicencs y Pons, 2011).

Las primeras referencias sobre afloramientos cuaternarios de Menorca las hallamos en trabajos de Nolan (1895, 1933) y Fallot (1922, 1933) en donde el Cuaternario aparece como un apartado dentro de la obra.





**Figura 1.** Benet Mercadal i Pons (1925-1999). Investigador pionero del Cuaternario de Menorca.

**Figure 1.** Benet Mercadal i Pons (1925-1999). Pioneer researcher on the Quaternary of Menorca.

La paleontóloga Dorothea Bate, también a principios del s. XX (Bate 1914, 1918), da a conocer la fauna de vertebrados del Pleistoceno de Menorca, destacando el peculiar caprino *Myotragus balearicus* y Andrews (1915) realiza un trabajo específico sobre este. Tienen que transcurrir bastantes años para que los trabajos de paleontología de vertebrados se reinicien, así Bate (1944) describe la musaraña fósil *Nesiotites hidalgo* a partir de materiales procedentes de Mallorca y de Menorca. Posteriormente es Mercadal (1959) quien cita *M. balearicus* en la *Cova Murada* y en otras localidades de la isla (Mercadal 1966, 1967).

El naturalista Benet Mercadal (Fig. 1) publicó artículos desde finales de los 50 hasta mediados de los 80, la gran mayoría de ellos relacionados con la estratigrafía y paleontología del Cuaternario menorquín, siendo una figura clave en el conocimiento de la geología de la isla. Importantes investigadores como Bauzá, Cuerda, Obrador, Rosell, Villalta, Pretus, etc, no dudaron en colaborar con él (Obrador, 1999). Su legado, una colección geológica y paleontológica está depositada en el Museo de Menorca (Fernández *et al.*, 2017).

Ya en los inicios de los 80 aparecen toda una serie de trabajos sobre paleontología de vertebrados que incluyen la descripción de especies antiguas de mamíferos autóctonos, de aves, reptiles, anfibios, que van de una cronología del Plioceno superior al Pleistoceno superior, y escritos por diversos paleontólogos como son: Agustí, Alcover, Kotsakis, Mourer-Chauviré, Moyà-Solà, Pons-Moyà, Sanchis y Reumer (Seguí *et al.*, 1998).

En los años 90 salen a la luz publicaciones, que como las anteriores se realizan a partir de materiales procedentes de yacimientos kársticos. Seguí *et al.* (1998) presentan los resultados de la excavación de la *Cova C-2 (Ciutadella)*, de donde se exhumaron 1762 huesos de *M. balearicus* y 53 de *Elyomys morpheus*, así como restos de aves y de moluscos. El mismo autor presenta su tesis referida al registro paleornitológico de yacimientos de origen kárstico de Mallorca y Menorca (Seguí, 1998). Quintana (1998a) cita la presencia del molusco *Xerocrassa frater* en yacimientos kársticos y también, en otro trabajo, realiza un inventario de los yacimientos de vertebrados del Mio-Pleistoceno (Quintana 1998b).

Josep Quintana realiza una serie de artículos que culminan en una tesis referida al conejo gigante de Menorca, *Nuralagus rex*, que aunque sea pre-Cuaternario, es impres-

**Figura 2.** G. X. Pons (izq.) y J. Quintana (der.) en un stand de la SHNB y del IME en la Feria de la Ciencia 2008, en Palma. Quintana es un investigador clave el estudio de la fauna Pliocena y Cuaternaria continental de Menorca, así como de la actual.

**Figure 2.** G. X. Pons (left) and J. Quintana (right) at a SHNB and IME booth at the 2008 Science Exhibition in Palma. Quintana is a key researcher in the study of nowadays and the Pliocene and Quaternary continental fauna of Menorca.



cindible para comprender el componente faunístico en condiciones de insularidad del Cuaternario (Quintana 2005). Sin lugar a dudas este investigador (Fig. 2) es una figura clave en cuanto al estudio del Cuaternario menorquín tanto de la fauna vertebrada como invertebrada continental (Bover, 2008).

Cuerda (1975) en su magistral obra “Los tiempos Cuaternarios en Baleares” sintetiza lo que se conoce del Cuaternario de Menorca.

Bourrouilh (1983) publica su tesis que trata sobre la estratigrafía y tectónica de Menorca y nordeste de Mallorca, dedicando un apartado al Cuaternario menorquín.

Gasull (1963a; 1963b; 1964; 1965; 1969) realizó estudios sobre la fauna de moluscos continentales actuales de las Baleares, cita también el registro fósil y las localidades en donde se habían hallado.

Vicens y Pons (2011) enumeran los taxones de invertebrados citados en yacimientos menorquines de origen kárstico.

Recientemente, Pomar (2016) realiza una tesis en dónde se estudia la arquitectura y facies deposicionales de la interferencia entre la sedimentación aluvial, coluvial y eólica del Pleistoceno superior en afloramientos de Menorca y Mallorca. En la isla de Menorca estudia distintas localidades, como son *Tirant-Fornells*, *Algaiarens*, *Ets Alocs*, *Binimel-là*, *Cavalleria-Cala Mica* y *Pedrer de sa Nitja*. Este mismo autor considera que los estudios que tratan de los depósitos del Cuaternario de Menorca son escasos y dispersos en las últimas décadas, si bien algunos de los trabajos ponen de manifiesto la importante presencia de yacimientos cuaternarios.

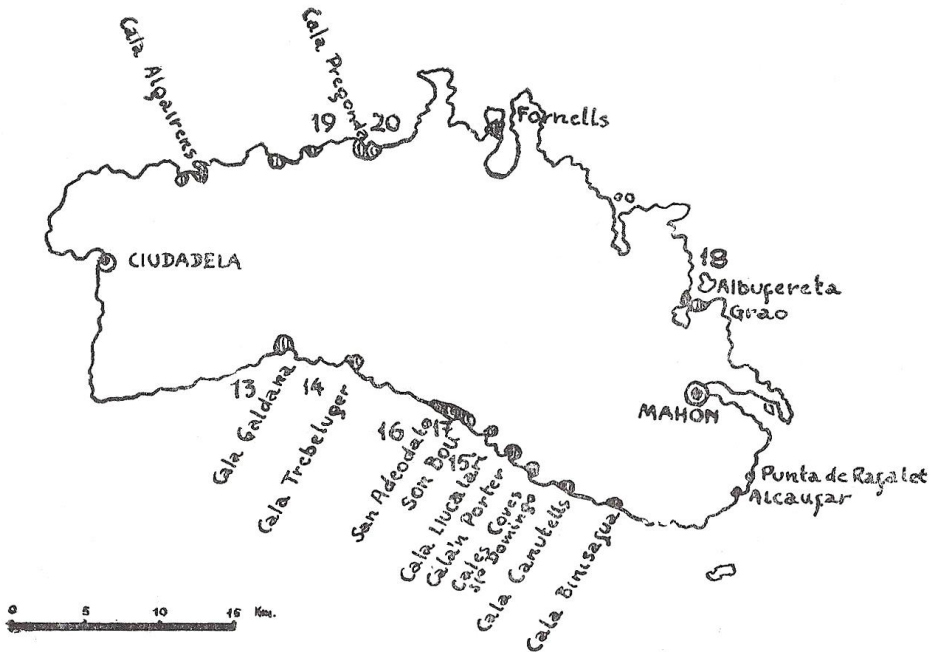
No quisiéramos acabar esta breve introducción sin comentar que existen dos excelentes monografías sobre la isla de Menorca. La primera, coincidiendo con las XVIII Jornadas de Geografía Física se realizó un monográfico sobre la Geografía Física de Menorca (Rosselló *et al.*, 2003). La segunda, se trata exclusivamente la zona de Migjorn (sur) de Menorca, una completa historia natural que comprende tanto la geografía física como el papel del hombre en su modelado (Fornós *et al.*, 2004).

## 2 | Estudio del registro paleontológico del Cuaternario litoral: antecedentes

La primera cita sobre la presencia de niveles cuaternarios con fósiles marinos proviene de Nolan (1933), y dice que hay unos depósitos arcillosos con *Cardium rusticum* y *Cerithium vulgatum* en sa Boval.

Hay que esperar un cuarto de siglo para retomar los estudios sobre el Cuaternario de Menorca, así Mercadal (1959) en un trabajo de la costa Sur menorquina menciona una serie de yacimientos con fauna marina y / o continental (Fig. 1). El mismo año, Muntaner (1959) estudia el yacimiento de *son Bou*, y al año siguiente, Mercadal (1960) hace referencia a que en la zona septentrional de la isla no ha encontrado ningún fósil, refiriéndose implícitamente a los depósitos de playa con fósiles marinos, ya que después habla de yacimiento donde si ha encontrado gasterópodos terrestres.

Solé-Sabarís (1962) en un trabajo sobre el Cuaternario de las Islas Baleares, sintetiza todo el conocimiento sobre el Cuaternario marino de Menorca (Fig. 3 y 4). Según su opinión, las formaciones cuaternarias marinas en Menorca son escasas y tienen poca extensión, al contrario de lo que pasa en Mallorca y en Ibiza. Casi al mismo tiempo, los depósitos discordantes post-miocenos de *la Mola de Fornells* son estudiados por Bourrouilh y Magné (1963), dándoles una cronología comprendida entre el Plioceno superior y el Pleistoceno inferior. Gasull (1963a) aporta citas de moluscos terrestres endémicos procedentes de yacimientos del Pleistoceno superior. Este mismo autor describe *Xerocrassa cuerdoi*, endemismo menorquín extinto del Pleistoceno superior (Gasull, 1963b). Años más tarde, Quintana (1995b) amplía las localidades donde se ha encontrado este taxón.



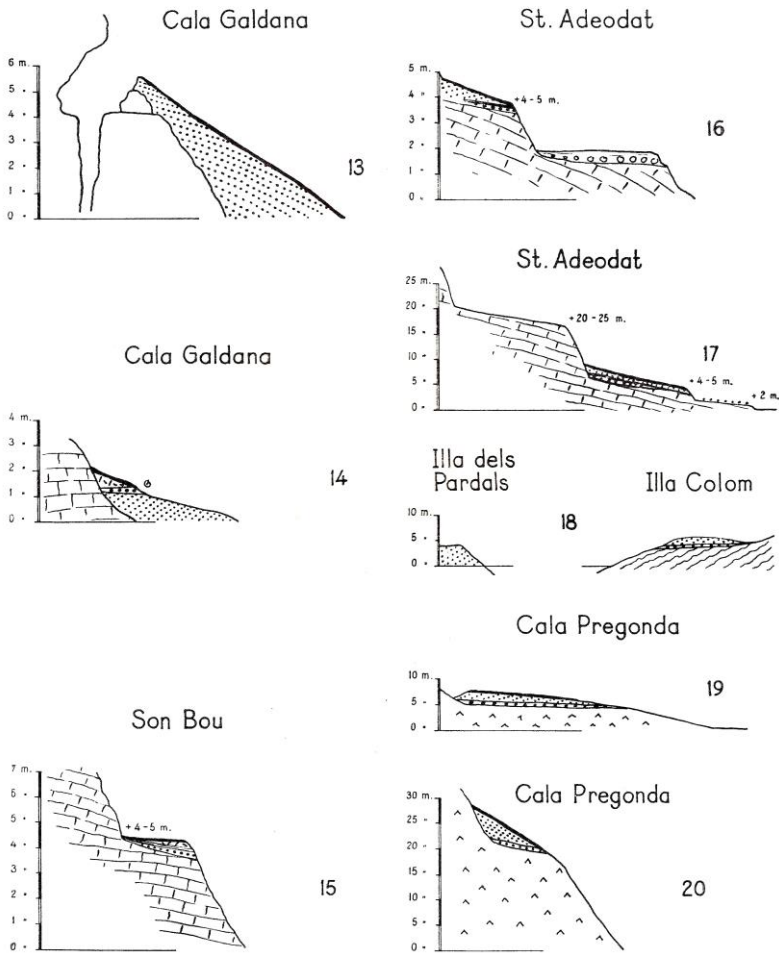
**Figura 3.** Localización de los depósitos marinos tirrenienses según Solé-Sabarís (1964). La figura fue realizada por el cuaternarista menorquín Benet Mercadal, corrigiendo algunos errores que aparecían en la obra original de Solé-Sabarís (1962).

**Figure 3.** Location of the Tyrrhenian marine deposits according to Solé-Sabarís (1964). The figure was made by the minorcan quaternarist Benet Mercadal, correcting some errors that appeared in the original work of Solé-Sabarís (1962).

En la Revista de Menorca aparece la parte del trabajo de Solé-Sabarís (1962) publicado en Quaternaria que trata de Menorca, y que Benet Mercadal traduce al castellano, ya que el trabajo original estaba en francés. En esta versión aparece un detalle interesante ya que se rectifican localidades mal situadas sobre Menorca en el trabajo original (Fig. 3).

Cuerda *et al.* (1966) revisan algunos de los yacimientos antes estudiados, localizaron ranuras litorales correspondientes a dos niveles marinos, y a unos 500 m al O de *cala Santa Galdana* localizaron un yacimiento del Pleistoceno superior inédito hasta entonces.

Los materiales continentales cuaternarios de la Isla del Aire fueron estudiados por Rosell *et al.* (1969) y poco después Mercadal *et al.* (1972) estudian los moluscos fósiles presentes y amplían los conocimientos que se tenían sobre los diferentes ni-



**Figura 4.** Cortes estratigráficos realizados por Solé-Sabarís (1962) en la isla de Menorca.  
**Figure 4.** Stratigraphic sections by Solé-Sabarís (1962) on the island of Menorca.

veles cuaternarios, así al N de la Isla del Aire, un nivel marino donde no se encontró ningún taxón bioindicador lo atribuyen al Paleotirreniense con reservas. Por encima de estos materiales hay niveles con unos fósiles atribuidos a coprolitos de *Myotragus*, y por encima playas del Pleistoceno superior.

Unas tobas calcáreas, cerca de Mahón, son descritas por Obrador y Mercadal (1969a), y también son descritos unos depósitos continentales cuaternarios en el puerto (Obrador y Mercadal, 1969b).

Mercadal *et al.* (1970) comentan la problemática referente la cronología de los afloramientos de la *Mola de Fornells*, el *Cap de Cavalleria* y los de *l'illa de s'Aire*. Entre ellos hay paleosuelos limosos, de color rojo, con rizolitos y gasterópodos terrestres. En la *Mola de Fornells*, el *Cap de Cavalleria* y la *Punta de na Guillermina*, le dan una cronología entre el Emiliense (Pleistoceno inferior) y el Milaziense (Pleistoceno medio reciente). Los niveles eólicos de la *Illa de l'Aire* le dan una cronología entre el Paleotirreniense y el Eutirreniense.

Cuerda (1975) realiza un estado de la cuestión, y comenta que Menorca es relativamente rica en yacimientos del Pleistoceno superior, aunque son pobres en fauna si se les compara con los de Mallorca, y además, contienen pocos ejemplares de las especies termófilas.

Restos de playa del Pleistoceno superior, situadas en la *cova des Pont*, en *Binibèquer*, son citadas y brevemente descritas por Mercadal y Petrus (1980).

Obrador y Mercadal (1981) hacen un resumen de las aportaciones hechas sobre el Cuaternario.

Henningesen (1990) describe las diferentes tipologías de eolianitas del Norte de la isla, así como su cronología.

Rastros de *Myotragus* y de *Hypnomys* son descritos por Quintana (1993) en los sedimentos dunares pleistocénicos de las *penyes d'Alparico (Ciutadella de Menorca)*. Posteriormente, se vuelven a describir huellas de *Hypnomys* en la *cova de sa Duna* (Quintana y Arnau, 2004).

Quintana (2006a) revisa el estatus taxonómico del extinto molusco *Mastus pupa* de Menorca y Mallorca, y todos los datos sugieren la descripción de una nueva especie, *Chondrula gymnesica*, con los estratotipos en Menorca (Fig. 5).



**Figura 5.** *Chondrula gymnesica* (citada en la literatura como *Mastus pupa*) descrita por Quintana (2006) como especie válida y endémica de las Gimnesias, cuya localidad tipo es Punta des Vernís (N Menorca).

**Figure 5.** *Chondrula gymnesica* (formerly known as *Mastus pupa*) described by Quintana (2006) as a valid and endemic species of the Gymnesic Is., whose locus typicus is Punta des Vernís (N Menorca).



Pomar *et al.* (2013) en la zona de *Tirant-Fornells* datan dos niveles de eolianitas mediante técnicas de termoluminiscencia (OSL). También reinterpretan ciertos depósitos considerados origen eólico pero que en tienen un origen aluvial.

Aparte de todo lo dicho hasta ahora, son especialmente importantes las aportaciones hechas por Quintana (1995a; 1998b), muchas de las cuales están basadas en yacimientos de origen cárstico del Cuaternario antiguo; sobre las icnitas de vertebrados del Pleistoceno superior (Quintana 1993; Quintana y Arnau 2004); sobre los moluscos fósiles y actuales del Cuaternario (ver bibliografía).

Vicens (2015) en su tesis doctoral sobre el Cuaternario de Mallorca realiza un amplio resumen de los datos que se conocen de Menorca.

### 3 | Los yacimientos

Cuerda (1975), refiriéndose a los depósitos de playas fósiles, indica que Menorca es relativamente rica en yacimientos del Pleistoceno superior, sin embargo tienen un registro fósil pobre si los comparamos con los de Mallorca y además se han hallado pocos ejemplares de moluscos termófilos. Pons *et al.* (2017) consideran que Menorca es más bien pobre en yacimientos cuaternarios con fósiles marinos.

Referente a la distribución de los yacimientos de playa se hallan en mayor número en el litoral S de la isla. Los yacimientos con fósiles terrestres se hallan distribuidos por todo el litoral. En la Tabla 1 y la Fig. 6 quedan recogidos todos los yacimientos



**Figura 6.** Localización de los depósitos del Cuaternario citados en el texto (ver tabla 1).

**Figure 6.** Location of Quaternary deposits cited in the text (see table 1).

Yacimiento	Municipio	Edad	Fauna	Referencia
1 *Cova C-2●	Ciutadella	Ps-H	T	Quintana (1995b); Seguí et al., (1998)
2 Punta de na Guillemina	Ciutadella	Pli-Pi	T	Mercadal et al., (1970)
3 Algaiarens ♦	Ciutadella	Ps	T, M	Quintana (1995,2006); Pomar (2016)
4 La Vall	Ciutadella	H	T	Quintana (1995b)
5 El Pilar	Ciutadella	H	T	Quintana (1995b)
6 Es Alocs	Ferrieres	Ps	T	Pomar (2016)
7 Cala Pregonda	Es Mercadal	Ps	M	Cuerda (1975)
8 Binimel·là	Es Mercadal	Ps	T	Quintana (1995b)
9 Cala Mica	Es Mercadal	Ps	T	Pomar (2016)
10 Platja de Cavalleria	Es Mercadal	Ps	T	Pomar (2016)
11 Cap de Cavalleria	Es Mercadal	Pli-Pi	T	Mercadal et al., (1970)
12 Cala Tirant	Es Mercadal	Ps	T	Mercadal et al., (1970)
13 Es Ciprer-Baix des Guix ♦	Es Mercadal	Ps	T	Pomar (2016)
14 Baix des Guix	Es Mercadal	Ps	T	Mercadal (1960); Cuerda (1975)
15 Mola de Fornells	Es Mercadal	Pli-Pi	T	Bourrouilh y Magné (1963)
16 Na Macaret●	Es Mercadal	Ps	T	Quintana (1998)
17 Na Macaret	Es Mercadal	H	T	Datos inéditos
18 *Platja des Savinar	Maó	Ps	T	Mercadal et al., (1970)
19 *Es Bec Vermell	Maó	Ps	T	Pons et al., (2017)
20 Cap de Favàritx	Maó	Ps-H	T	Quintana y Vilella (2001)
21 Cala Presili	Maó	Ps	T	Pons et al., (2017)
22 Illa d'en Colom	Maó	Ps	SF ♦	Solé-Sabaris (1962)
23 Es Grau	Maó	Ps	T	Mercadal (1960; 1967)
24 Sa Mesquida	Maó	Ps	T	Gasull (1963)
25 Cap Negre	Maó	Ps	T	Gasull (1963)
26 *Illa de Llatzaret●	Maó	Ps-H	T	Obrador y Mercadal (1969)
27 Cala Figuera	Es Castell	Ps	T	Gasull (1963a)
28 Cala des Rafalet	Es Castell	Ps	M	Mercadal (1959; 1962a)
29 Illa de l'Aire	Sant Lluís	Ps	M	Mercadal et al., (1972)
30 Illa de l'Aire	Sant Lluís	Pli-Pi	T	Mercadal et al., (1970)
31 Cala de Biniancolla	Sant Lluís	Ps	T	Mercadal (1959; 1962a)
32 Cova des Pont	Sant Lluís	Ps	M	Mercadal y Petrus (1980)
33 Binissafüller	Sant Lluís	Ps	T	Mercadal (1959, 1962a)
34 Racó d'en Benet	Sant Lluís	Ps	T	Mercadal (1959)
35 Es Canutells	Maó	Ps	T, M	Mercadal (1959)
36 Cova de ses Atxes	Maó	Ps	M	Mercadal (1966)
37 Calescoves	Alaior	Ps	T, M	Mercadal (1959, 1962b; 1966)
38 *Cova de sa Duna	Alaior	Ps	T	Quintana y Arnau (2004)
39 Cala en Porter	Alaior	Ps	M	Mercadal (1959; 1962b)
40 Cala de Llucalari	Alaior	Ps	T	Mercadal (1959)
41 Platges de Son Bou	Alaior	Ps	T, M	Muntaner (1959); Mercadal (1962b)
42 Platja de Binigaus	Es Migjorn Gran	Ps	T	Mercadal (1966)
43 Cala Trebalúger	Es Migjorn Gran	Ps	M	Mercadal (1959; 1962b)
44 Cala Galdana	Ferrieres	Ps	T, M	Mercadal (1959)
45 *Racó des Rost	Ciutadella	Ps	M	Cuerda et al. (1966)
46 Macarella	Ciutadella	Ps	T	Gasull (1964)
47 *Penyes d'en Perico	Ciutadella	Ps	T	Quintana (1993)
48 Caleta d'en Gorries	Ciutadella	Ps	T, M	Mercadal (1966)
49 Cala en Blanes	Ciutadella	Ps	T, M	Mercadal (1966)

**Tabla 1.** Yacimientos litorales de la isla de Menorca del Plioceno-Cuaternario. Pli: Plioceno. Pi: Pleistoceno inferior. Ps: Pleistoceno superior. H: Holoceno. El registro fósil puede ser de origen continental (T) y de origen marino (M). Las referencias bibliográficas no son exhaustivas. (●): yacimientos de origen kárstico. (♦): Localidades que se corresponden con una zona.

**Table 1.** Pliocene-Quaternary littoral deposits on the Menorca island. Pli: Pliocene. Pi: Lower Pleistocene. Ps: Upper Pleistocene. H: Holocene. The fossil record may be continental origin (T) or marine origin (M). Bibliographic references are not exhaustive. (●): Karstic origin sites. (♦): Locations that correspond to a zone.



aunque se ha realizado una corrección toponímica siguiendo los criterios del NOTIB (Nomenclàtor Toponímic de les Illes Balears, <http://notib.recerca.iec.cat/>) a excepción de los topónimos que presentan un asterisco (\*), en donde se ha seguido al IDEIB (<http://www.ideib.cat/>) o simplemente se ha citado al topónimo que utilizó el autor del artículo original. También se ha optado por citar los yacimientos del litoral que Gasull (1963a; 1963b; 1964; 1965; 1969) enumera en sus trabajos, aunque no los sitúa sobre un mapa preciso, ni tampoco los sitúa estratigráficamente.

Pomar (2016) analiza y describe muy detalladamente depósitos del Pleistoceno medio-superior de Menorca y además realiza la cronología mediante técnicas de datación absoluta de uno de ellos. La citación de fósiles es escasa ya que no era el objetivo de la tesis, sin embargo si cita la presencia de icnitas de *Myotragus* en algunos niveles de estos depósitos y la omnipresente bioturbación producida por vegetación en muchos de los niveles arenosos descritos en la tesis. Nosotros solo le dedicamos atención a la cita de icnitas.

Pons *et al.* (2017) presenta un listado previo de los yacimientos litorales del Cuaternario menorquín, y que en este trabajo ha sido ampliado. En este capítulo se ha realizado mayoritariamente un análisis a partir de los datos aportados por la bibliografía y nuevas localidades inéditas.

### **Cova C-2**

Yacimiento de origen cárstico en donde se halló *Xerocrassa cuerdaei* en unos limos rojos transportados desde el exterior de la cueva hacia el interior por el agua de escorrentía (Quintana 1995b). *X. cuerdaei* se halló asociado a moluscos endémicos y otros alóctonos de reciente introducción, y también a *Myotragus balearicus* (Quintana 1995b; Seguí *et al.*, 1998). Citado por Quintana (1995b) con el topónimo de Cala's Pous.

### **Punta de na Guillemina**

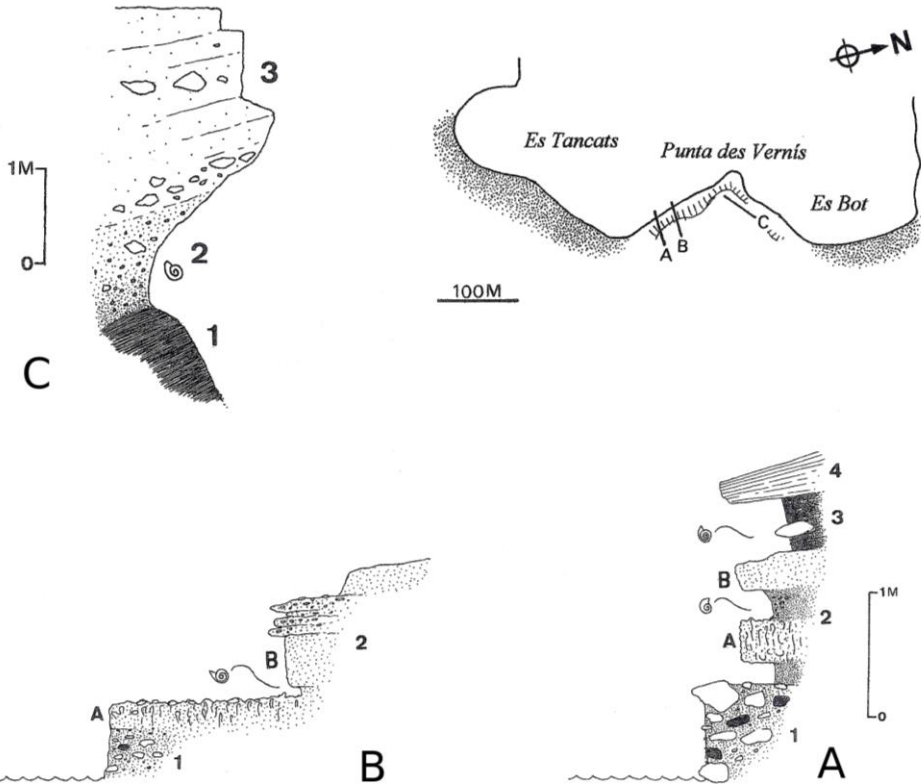
Este afloramiento es poco conocido ya que no se figuran fotografías del mismo en los artículos que lo citan, ni tampoco se describe. Mercadal *et al.* (1970) le asignan una edad fini-Mindel. Es probable que la edad se sitúe entre el Plioceno superior y el Pleistoceno medio.

### **Algaiarens**

El primero que citó este yacimiento marino es Mercadal, que actuó de traductor en el artículo de Solé-Sabarís (1964), comentando que hay una terraza marina con fósiles y halló *Chondrula gymnesica* en los niveles continentales. Una año antes Gasull (1963a) cita *Oxychilus lentiformis*, *Iberellus companyonii* y *Xerocrassa nyeli* en unos limos rojos.

Cuerda (1975) dice que hay una terraza marina del Pleistoceno superior y que solamente halló *Chamelea gallina*.

Quintana (1995b) realiza un corte al O de la playa des Tancats (Fig. 10). Hay una serie sedimentaria en donde el nivel basal està constituido por un conglomerado con clastos heterométricos y una matriz rojiza. Le sigue un nivel poco potente de unos 30 cm de arenas rojizas y algunos clastos angulosos, con *O. lentiformis*, *I. companyonii* y *X. nyeli*, y algún molusco marino. Por encima se hallan unas arenas claras consolidadas, y que también se hallan entre la playa des Tancats y la des Bot, con *Ch. gymnesica*, *X. nyeli*, *X. cuerdaei*, *I. companyonii* y *O. lentiformis*.



**Figura 7.** Situación del yacimiento del Pleistoceno superior de Punta des Vernís (Algaiarens), según Quintana (2006a). Localización de los cortes A, B y C. Cortes A y B: 1- Brecha basal. 2- Nivel arenoso, con un subnivel inferior A caracterizado por la existencia de morfologías tubulares, y un subnivel B sin estructuras remarquables. 3- Nivel arcilloso rojo. 4- Nivel superior de arenas. (Cortes E-0). Corte C: 1- Arcillas rojas. 2- Limos arenosos grises. 3- Nivel superior de arenas. (Corte SO-NE).

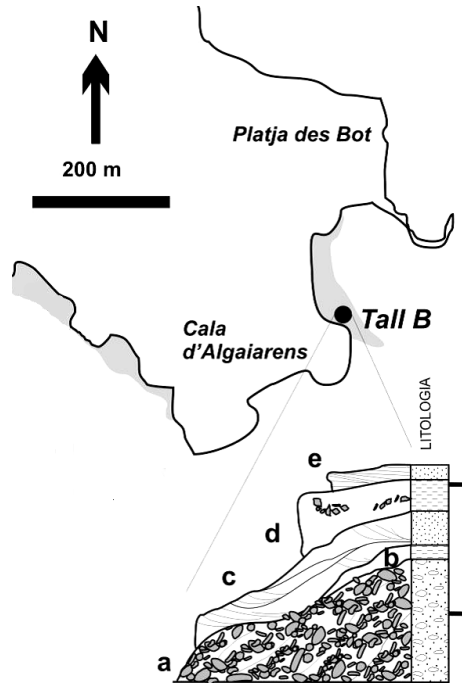
**Figure 7.** Location of the Upper Pleistocene site of Punta des Vernís (Algaiarens), according to Quintana (2006a). Location of cuts A, B and C. Cortions A and B: 1- Basal gap. 2- Sandy level, with a lower sub-level A characterized by the existence of tubular morphologies, and a sub-level B without remarkable structures. 3- Red clay level. 4- Upper level of sands. (Cuts E-0). Cut C: 1- Red clays. 2- Gray sandy limes. 3- Upper level of sands. (SO-NE Cut).

Quintana (2006a) describe el yacimiento de la Punta des Vernís, situado entre las playas des Tancats y la des Bot. Este Afloramiento del Pleistoceno superior contiene el estratotipo del molusco endémico extinto de las Gimnésicas *Chondrula gymnesica*. El autor realiza tres cortes estratigráficos (Fig. 7) y es quien reconsidera la posición taxonómica del érido *Mastus pupa*, separándola de ella y describiendo una nueva especie, endémica, y de distribución gimnésica, *Chondrula gymnesica*.

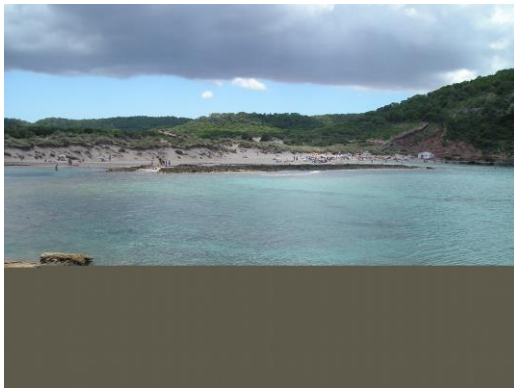
Pomar (2016) también realiza un corte geológico en la Punta des Vernís (Fig. 8). En el corte B, en el nivel a) también recoge la cita de *Strombus bubonius* (= *Persististrombus latus*) en el depósito que hay en el centro de la playa des Tancats. Sería la primera cita de la especie en Menorca. No obstante, recientes visitas por

**Figura 8.** Corte geológico de Pomar (2016) en el S de la Punta des Vernís. En la obra original consta como Tall B de Cala Algaiarens.

**Figure 8.** Geological cut of Pomar (2016) in the S of the Punta des Vernís. In the original work it appears as Cut B of Cala Algaiarens.



nuestra parte no han podido localizar la especie y podría tratarse de un error. En uno de los cortes (nivel a, zona superior) hemos encontrado algún ejemplar de *Acanthocardia tuberculata* (Fig. 9). También cita la presencia de icnitas de *Myotragus balearicus* en una eolianita la zona.



**Figura 9.** Playa de Algaiarens o des Tancats, fotografiada desde la Punta des Vernís (izquierda). Corte de Pomar (2016) (nivel a, zona superior de cantos redondeados) con *Acanthocardia tuberculata* (derecha).

**Figure 9.** Beach of Algaiarens or des Tacats photographed from Punta des Vernís (right). Profile of Pomar (2016) (level a, upper area) with *Acanthocardia tuberculata*. (left).

### **La Vall**

En las canteras de arena abandonadas se halló *Xerocrassa cuer dai* junto con otros moluscos endémicos y otros de reciente introducción (Quintana 1995b).

### **El Pilar**

Quintana (1995b) cita *Xerocrassa cuer dai* en tres tipos diferentes de sedimento, que por la presencia de moluscos alóctonos es indicativo que perduró probablemente hasta tiempos muy recientes.

### **Es Alocs**

Pomar (2016) cita la presencia de icnitas de *Myotragus balearicus* en facies de ambiente eólico.

### **Cala Pregonda**

Solé-Sabarís (1962) interpreta que hay dos niveles marinos. Uno a unos + 4-5 m y el otro a + 20 m (Fig. 4). El situado a menos altura se halla al E de la cala y está constituido por finos guijarros mezclados con limos rojos; por encima hay una eolianita. El depósito que está a más altura es más reducido.

### **Binimel-là**

Quintana (1995b) cita la presencia de *Xerocrassa cuer dai* en un suelo amarillento junto con alguna especie de introducción reciente como es *Theba pisana* y otras endémicas, como són *Tudorella ferruginea* y *Oxychilus lentiformis*, entre otras.

### **Cala Mica**

Pomar (2016) cita la presencia de icnitas de *Myotragus balearicus* en una eolianita.

### **Platja de Cavalleria**

Pomar (2016) cita la presencia de icnitas de *Myotragus balearicus* en facies de ambiente aluvial. Es la primera vez que se citen icnitas del rupicaprino endémico en un ambiente aluvial.

### **Cap de Cavalleria**

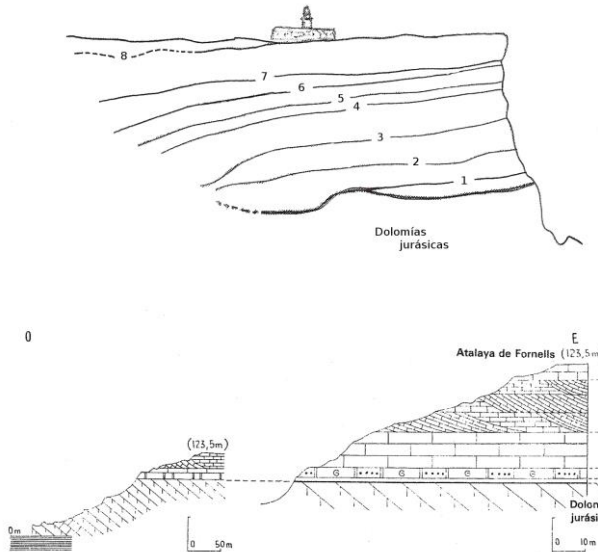
Mercadal *et al.* (1970) citan *Oxychilus lentiformis*, *Cer nuella virgata* (?), *Trochoidea pyramidata* (?), *Xeroplexa nyeli*, *Eobania vermiculata*, *Otala lactea*, *Iberellus companyonii*, *Rumina decollata*, *Rumina decollata* var. *maxima* y *Tudorella ferruginea*. Mercadal *et al.* (1970) asignanban una edad fini-Mindel al conjunto faunístico citado.

Bourrouilh y Magné (1963) y Bourrouilh (1983) comenta que hay *Archelix* sp., *Rumina decollata* y *Tudorella ferruginea*, dando una cronología del Plioceno superior-Cuaternario antiguo.

Quintana *et al.* (2011) describen una nueva especie de babosa fósil, *Parmacella balearica*, a partir de limacelas halladas en el paleosuelo más moderno (el número 8) que forma parte de una serie sedimentaria del Plioceno superior-Pleistoceno inferior (Fig. 10).

### **Cala Tirant**

Mercadal *et al.* (1970) citan *Chondrula gymnesica*.



**Figura 10.** Corte superior: Cap de Cavalleria según Quintana *et al.* (2011). Los números correlativos indican la posición de los diferentes paleosuelos que separan los niveles calcareníticos, más potentes. La escala del afloramiento viene definida por el faro. Corte inferior: Mola de Fornells según Bourrouilh y Magné (1963). La secuencia del Plioceno superior-Cuaternario se dispone discordante sobre las calizas del Jurásico.

**Figure 10.** Upper section: Cap de Cavalleria according to Quintana *et al.* (2011). The correlative numbers indicate the position of the different paleosols that separate the calcarenitic levels, more powerful. The scale of the outcrop is defined by the lighthouse. Lower section: Mola de Fornells according to Bourrouilh y Magné (1963). The upper Pliocene - Quaternary sequence is discordant on Jurassic limestones.

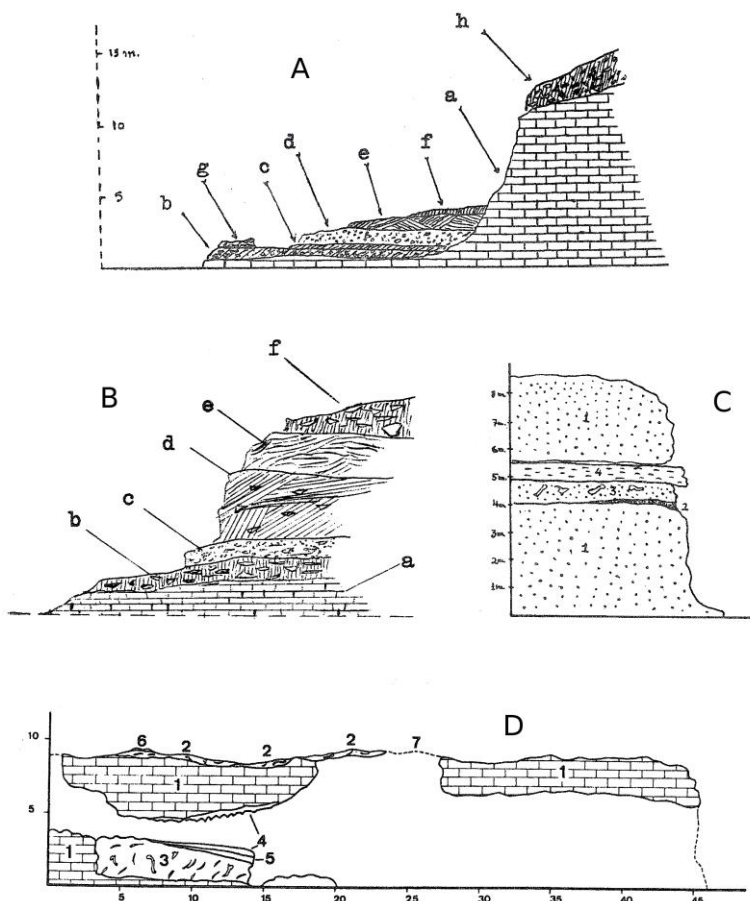
### Es Ciprer- Baix des Guix

Pomar (2016) describe y realiza un análisis sedimentológico y estratigráfico de los depósitos pleistocenos que constituyen un sistema de abanicos aluviales en esta zona. Este autor realiza la no despreciable cifra de 56 columnas estratigráficas e identifica 13 facies características que han sido agrupadas en 4 asociaciones de facies principales: ambiente costero, ambiente aluvial, ambiente coluvial y ambiente eólico. Cita la presencia de icnitas de *M. balearicus* en facies de ambiente eólico y en facies de ambiente aluvial.

### Baix des Guix

Mercadal (1960) cita cerca del cementerio de Fornells, *Chondrula gymnesica*, *Iberellus companyonii*, *Xerocrassa nyeli*, y *Oxychilus* sp. También cita dos especies marinas como son *Patella* sp. y *Pseudochama gryphina*, y que fueron transportadas por el viento.

Cuerda (1975) realiza un corte en una localidad que denomina Cala Guix (Fig. 11-B) y que probablemente se corresponda con la localidad citada por Mercadal (1960). Se trata de una secuencia continental y cita los moluscos terrestres anteriores.



**Figura 11.** A- Racó des Rost, segons Cuerda *et al.* (1966): a- Calcáreas del Mioceno. b- Arenas y limos rojos con *Cerastoderma glaucum*. c- Arenas groseras cementadas. d- Arenas limosas con *Cerastoderma glaucum*. e- Eolianita. f- Limos amarillentos. g- Limos arenosos con bloques y fósiles marinos del Tirreniense III. h- Limos amarillentos con clastos angulosos. B- Cala Guix, según Cuerda (1975): a- Calcareas secundarias. b- Limos arenosos con clastos angulosos y *Ch. gymnesica*. c- Arenas marinas cementadas de final de playa. d- Eolianita de grano grosero con *Ch. gymnesica*. e- Eolianita del Würm. f- Brecha con cantos angulosos. C- Es Colomar, según Mercadal (1967): 1- Eolianita del Riss. 2- Terraza marina. 3- Eolianita con *Myotragus* sp. 4- Crosta calcárea. D- Cova des Pont (Binibèquer): 1- Mioceno. 2 y 3- Limos achocolatados con *Testudo*. 4- Colada estalagmítica. 5 y 6- Playa del MIS 5e con fósiles marinos.

**Figure 11.** A- Racó des Rost, according to Cuerda *et al.* (1966): a- Calcareous from the Miocene. b- Sands and red limes with *Cerastoderma glaucum*. c- Coarse sands cemented. d- Sands of sand with *Cerastoderma glaucum*. e- Eolianite. f- Yellowish limes. g- Sandy limes with blocks and marine fossils of the Tirrenian III. h- Yellowish limes with angular clasts. B- Cala Guix, according to Cuerda (1975): a- Calcareous secondary. B) Sandy limes with angular clasts and *Ch. gymnesica*. C- Cemented marine sands at the end of the beach. D- Eolianite of coarse grain with *Ch. gymnesica* E-Würm eolianite. f- Breccia with angled edges. C- Es Colomar, according to Mercadal (1967): 1- Riss eolianite. 2- Marine terrace. 3- Eolianite with *Myotragus* sp. 4- Calcareous crust. D- Cova des Pont (Binibèquer): 1 - Miocene. 2 and 3 chocolate-colored limes with *Testudo*. 4- Stalagmite wash. 5 and 6- MIS 5e beach with marine fossils.

**Figura 12.** La Mola de Fornells visto desde la entrada de la bahía de Fornells

**Figure 12.** La Mola de Fornells seen from Fornells.



### **Mola de Fornells**

Bourrouilh y Magné (1963) y Bourrouilh (1983), asignan a los materiales de la Mola de Fornells una edad Plioceno superior-Cuaternario antiguo, a partir del estudio de la microfauna. Citan en la base de estos depósitos un nivel con *Rumina decollata* y *Tudorella ferruginea* (Fig. 10 y 12). Mercadal *et al.* (1970) atribuyen a estos sedimentos una edad del fini-Mindel y se basan en la abundante presencia de *Rumina decollata* de talla normal y de talla gigante hallados en la vecina isla de Mallorca desde la base del Mindel, citado por Cuerda (1965) y Gasull (1966).

Mercadal *et al.* (1970) citan *Oxychilus lentiformis*, *Cernuella virgata* (?), *Trochoidea pyramidata* (?), *Xeroplexa nyeli*, *Theba pisana*, *Eobania vermiculata*, *Otala lactea*, *Iberellus companyonii*, *Rumina decollata*, *Rumina decollata* var. *maxima* y *Tudorella ferruginea*.

### **Na Macaret**

Se trata de un yacimiento de modestas dimensiones y de origen cárstico, formado por limos rojos muy cementados situados sobre las dolomías jurásicas. Se halló *Xerocrassa frater*, *Oxychilus lentiformis* y semillas de *Cneorum* (Quintana 1998a). Por la zona también hay mantos eólicos (Martín-Prieto *et al.*, 2017) en donde se halló *Xerocrassa cuerdaei*.

### **Platja des Sivinar**

Situada a la finca de Mongofre Nou. Mercadal *et al.* (1970) citan *Chondrula gymnesica*. Posteriormente, Bourrouilh (1983) describe la secuencia cuaternaria que hay en la zona, comentando que hay pulmonados terrestres.

### **Es Bec Vermell**

En esta localización que hay un manto eólico (Martín-Prieto *et al.*, 2017), se han observado conchas de moluscos endémicos, entre ellos *X. cuerdaei*.



### **Cap de Favàritx**

*Xerocrassa cardonae* ha sido encontrada en los sedimentos dunares del Pleistoceno superior-Holoceno próximos al Cap de Favàritx (Quintana y Vilella 2001). En esta zona, antes de llegar al Cap, existe un manto eólico (Martín-Prieto *et al.*, 2017) con moluscos sub-fósiles (*Xerocrassa cuerdae*).

### **Cala Presili**

En esta localización hay una duna remontante del Pleistoceno superior, en donde se ha observado la presencia de *Xerocrassa cuerdae*.

### **Illa d'en Colom**

Solé-Sabarís (1962) presenta un corte (Fig. 4). Comenta que el O de la isla se observa a unos +5-6 m unos finos clastos bien rodados con algunos bloques, dando la impresión de un nivel marino. Por encima hay limos rojos y eolianitas.

### **Es Grau**

En unas eolianitas, Mercadal (1960) cita *Iberellus companyonii*, *Xerocrassa nyeli*, y *Oxychilus* sp. Pocos años después, Mercadal (1967) realiza un corte estratigráfico en es Colomar (Fig. 11-C), en donde hay restos de playa cuaternaria a unos + 4 m y que atribuye al MIS 5e, probablemente por la altura en que se hallan estos sedimentos ya que no cita ninguna especie. Cuerda (1975) interpreta que se trata de una cueva de abrasión marina excavada en una eolianita del Riss.

Solé-Sabarís (1962) comenta que se puede observar un nivel entre + 4 m y + 6 m y eolianitas en las casas des Grau.

Fornós *et al.* (1996) realizan sondeos en la albufera des Grau y estudian las muestras observando diversas facies. Destacan las facies bioconstruidas con *Cladocora caespitosa*, indicativas de condiciones plenamente marinas anteriores a la albufera actual. Los autores le atribuyen una cronología holocena.

### **Sa Mesquida**

Gasull (1963a) cita *Oxychilus lentiformis* en una eolianita y *Iberellus companyonii* en unos limos rojos. Gasull (1963b) describe el endemismo *Xerocrassa cuerdae*, hallado en unos limos amarillentos debajo de una eolianita wurmiense a unos + 50 m.

### **Cap Negre**

Gasull (1963a) cita *Iberellus companyonii* en unos limos amarillentos debajo de una duna. Gasull (1963b) cita *Xerocrassa cuerdae* en un mismo nivel que la localidad anterior.

### **Illa de Llatzaret**

Se trata de un yacimiento de origen kárstico en donde se halló *Myotragus balearicus*, *Hypnomys* y los moluscos *Oxychilus lentiformis*, *Iberellus companyonii* y *Ceruellla virgata* (Obrador y Mercadal, 1969). Por los fósiles presentes la cronología es probable que esté entre el Pleistoceno superior y el Holoceno.

### **Cala Figuera**

Gasull (1963a) cita *Iberellus companyonii* en una eolianita a +4 m.

### **Cala des Rafalet**

Mercadal (1959) cita restos de terrazas marinas a +2 y +4 m, con los siguientes taxones: *Arca naoe*, *Barbatia barbata*, *Spondylus gaederopus*, *Cardita calyculata*, *Haliotis tuberculata lamellosa*, *Patella* sp. y *Phorcus turbinatus*. Poco después, Mercadal (1962a) vuelve a citar el yacimiento y presenta dos fotografías del mismo, situándolo en la Punta des Rafalet. Cuerda (1975) recoge esta información.

### **Illa de l'Aire**

Situada al SE de Menorca. Según Rosell *et al.* (1969) esta isla desde el punto de vista sedimentológico puede dividirse en tres unidades: la septentrional e inferior, que probablemente se corresponde a un medio de bahía o estuario; la central, constituida por eolianitas; y la meridional, separada de las eolianitas por un nivel de rubefacción con fauna terrestre. Asignan una edad del Pleistoceno inferior al Pleistoceno medio, ya que en la parte superior de la secuencia hay restos de playa tirreniense.

Mercadal *et al.* (1970) citan *Oxychilus lentiformis*, *Cernuella virgata* (?), *Trochoidea pyramidata* (?), *Xeroplexa nyeli*, *Theba pisana*, *Otala lactea*, *Iberellus companyonii*, *Cornu aspersum* y *Tudorella ferruginea*. En este yacimiento se han encontrado numerosos coprolitos de *Myotragus balearicus*, y que si atendemos a lo investigado en Mallorca por Mas y Ripoll (2011) podría tratarse de cámaras de pupación de coleópteros.

Según Mercadal *et al.* (1972) en toda la zona N de la isla aflora un material de origen marino que constituye el basamento de la isla. Se han hallado los siguientes fósiles: *Spondylus gaederopus*, *Anomia ephippium*, *Acanthocardia tuberculata*, *Arcopella balaustina*, *Haliotis tuberculata lamellosa* y *Luria lurida*. Los autores mencionados le atribuyen una cronología del Cuaternario, indicando que sea probable que sea del Paleotirreniense.

En el Racó de s'Estància, un nivel marino por encima de las eolianitas presenta los siguientes taxones: *Barbatia barbata*, *Spondylus gaederopus*, *Anomia ephippium*, *Lima paucicostata*, *Pseudochama gryphina*, *Patella caerulea*, *Alvania cancellata*, *Rissoa violacea*, *Dendropoma cristatum*, *Bittium reticulatum* var. *latreille*, *Theridium vulgatum* y *Stromatonita haemastoma*. Este nivel por estar a + 6 m los autores anteriores le atribuyen una cronología del Eutirreniense.

En la costa E, frente s'Escull des Cagaires y a + 1 m, hay retazos de sedimentos marinos con los siguientes fósiles: *Arca naoe*, *Barbatia barbata*, *Spondylus gaederopus*, *Lima paucicostata*, *Haliotis tuberculata lamellosa*, *Diodora gibberula*, *Patella caerulea*, *Patella ulyssiponensis*, *Phorcus turbinatus*, *Phorcus turbinatus* var. *major*, *Hexaplex trunculus*, *Stromatonita haemastoma*, *Columbella rustica*, *Nassarius incrassatus* y *Conus ventricosus*. Los autores le atribuyen una cronología del Neotirreniense.

### **Cala de Biniancolla**

Mercadal (1959) comenta que hay limos rojos con moluscos terrestres.

### **Cova des Pont**

Localidad situada en Binibèquer, en donde hay un interesante yacimiento de *Cheirogaster gymnesica*. También hay depósitos marinos del Pleistoceno superior (Mercadal y Pretus, 1980). Hay un nivel que alcanza los + 3 m, con *Barbatia barbata*, *Spondylus gaederopus*, *Lima lima* y *Haliotis tuberculata lamellosa* que los autores anteriores consideran del MIS 5e (Fig. 11-D). Otro nivel situado a + 9 m, contiene *Arca*

*noae* y *Spondylus gaederopus* y es considerado un nivel más antiguo del MIS 5e que el anterior. Según nuestra opinión los dos depósitos pueden ser coetáneos y es difícil precisar si son del MIS 5e o del MIS 5a por no contener especies termófilas. El nivel más alto, el de + 9 m, es una tempestita.

Trias (1985) realiza la topografía de la cavidad y comenta que a pesar de su evolución clástica es plausible suponer una espeleogénesis inicial en régimen freático a partir de las diaclasas existentes. Vicens *et al.* (2011) la ponen como ejemplo de cavidad de abrasión marina en un estado evolutivo avanzado.

### **Binissafüller**

Mercadal (1959) comenta que hay un suelo de alteración sobre una eolianita cuaternaria, en donde se ha hallado *Iberellus companyonii*, *Xerocrassa nyeli* y *Oxychilus* sp.

Gasull (1963a) cita *Oxychilus lentiformis* en unos limos rojos. También cita *I. companyonii*, sin indicar en que materiales lo halló. Gasull (1964) cita *Xerocrassa nyeli*.

### **Cap Roig-Racó d'en Benet**

Localización denominada por Mercadal (1959) como “frente a los Islotes d'en Marsal”. En unos limos achocolatados cita *Iberellus companyonii*, *Xerocrassa nyeli*, y *Oxychilus* sp.

### **Es Canutells**

En esta localidad hay dunas cuaternarias las cuales descansan sobre conglomerados que descienden hacia el mar (Mercadal, 1959) (Fig. 13-C). Este mismo autor cita restos de playa cuaternaria a unos + 4 m, citando *Arca noae*, *Barbatia barbata*, *Anomia ephippium*, *Ctena decussata*, *Patella* sp., *Diodora gibberula*, *Bursa scrobilator*. En una eolianita cita *Iberellus companyonii*, *Xerocrassa prietoi*, *Tudorella ferruginea* y *Chondrula gymnesica*.

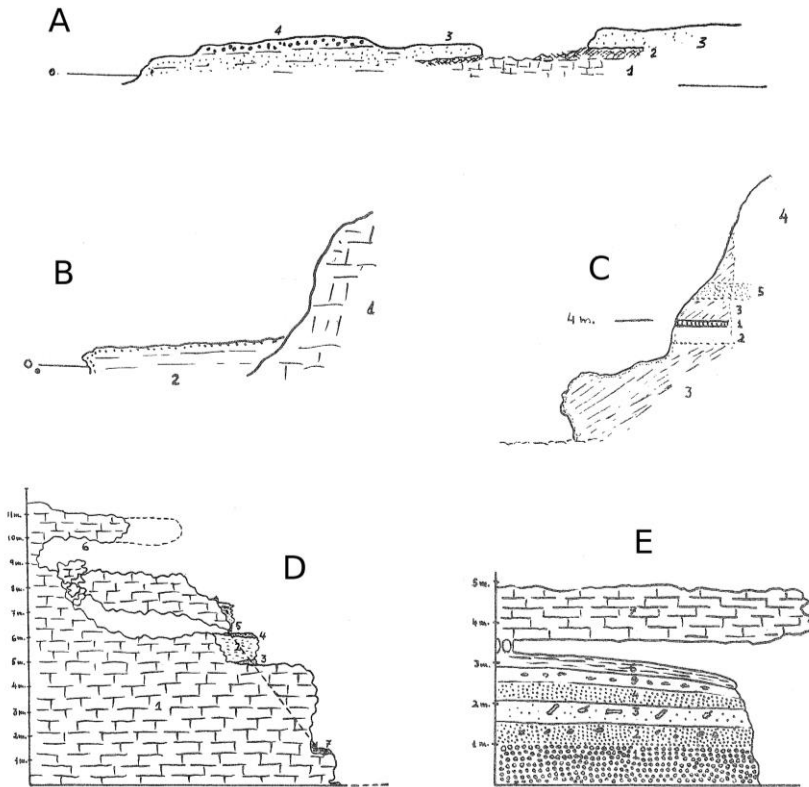
Gasull (1963a) cita *Oxychilus lentiformis* en unos limos rojos; también cita *Tudorella ferruginea* y *Iberellus companyonii* en esta localidad, sin especificar en qué materiales los encontró. Gasull (1964) cita *Xerocrassa nyeli*, sin especificar los materiales. Gasull (1965) cita *Chondrula gymnesica* en unos limos rojos.

Cuerda (1975) en la eolianita cita los moluscos anteriores y *Oxychilus lentiformis*. En lugar de *X. prietoi* cita *X. nyeli*. Cuerda (1975) no precisa la edad dentro del Pleistoceno superior. Lo más probable es que este nivel marino, por la presencia de *Bursa scrobilator*, solo hallado en el MIS 5e de las Baleares (Cuerda, 1987; Vicens 2015), sea de esta edad.

En la zona hay una cavidad, en donde se puede observar en una pared, arenas cementadas de origen eólico del Cuaternario reciente y erosionadas por el mar (Trias y Ginés, 1989).

### **Cova de ses Atxes**

Cavidad situada al W de es Canutells. En el interior de la cueva hay una playa cuaternaria a unos + 4 m. Mercadal (1966) cita las siguientes especies: *Arca noae*, *Barbatia plicata*, *Spondylus gaederopus*, *Cerastoderma glaucum*, *Monoplex parthenopeus* y *Conus ventricosus*. Por la presencia de fauna termófila, Mercadal (1966) le asigna una edad del Eutyrrheniense (=MIS 5e). Edad corroborada por Cuerda (1975).



**Figura 13.** A- Son Bou, según Muntaner (1959): 1- Calcáreas del Mioceno. 2-Limos arenosos rojos con *Ch. gymnesica*. 3- Arenas cementadas con *Ch. Gymnesica* y algún fósil marino. 4- Playa fósil entre +1,5 m y + 2 m, con fósiles marinos. B- Trebalúger, según Mercadal (1959): 1- Calizas del Mioceno. 2- Playa del Tirreniense + 2 m. C- Es Canutells, según Mercadal (1959): 1- Terraza marina. 2- Limos achocolatados. 3- Conglomerados. 4- Acantibdo antiguo. 5- Eolianitas. D- Cala en Blanes, según Mercadal (1967): 1- Mioceno. 2- Limos rojos con gasterópodos. 3- Terraza marina. 4- Terraza marina del Tirreniense II con fósiles. 5- Limos pardos con *Myotragus balearicus*. 6- Cueva. 7- Depósito osífero proveniente de los limos pardos, sobre el que descansan restos de playa del Tirreniense III. E- Caleta d'en Gorrias según Mercadal (1966): 1- Cantos rodados con alguna especie marina. 2- Playa con arenas rojizas y fósiles. 3- Limos rojizos con *Myotragus*. 4- Eolianita. 5- Conglomerado y eolianita. 6- Crosta calcárea. 7- Acantilado miocénico.

**Figure 13.** A- Son Bou, according to Muntaner (1959): 1- Calcareous from the Miocene. 2-Red sandy limes with *Ch. gymnesica*. 3 - Cemented sands with *Ch. gymnesica* and some marine fossils. 4- Fossil beach between +1.5 m and + 2 m, with marine fossils. B- Trebalúger, according to Mercadal (1959): 1- Miocene Limestones. 2- Playa del Tirreniense + 2 m. C- It is Canutells, according to Mercadal (1959): 1- Marine terrace. 2- Chocolate limos. 3- Conglomerates. 4- Acantibdo ancient. 5 - Eolianites. D- Cala in Blanes, according to Mercadal (1967): 1- Miocene. 2- Red limes with gastropods. 3- Marine terrace. 4 - Marine terrace of the Tirrenian II with fossils. 5- Gray limbs with *Myotragus balearicus*. 6- Cave. 7- *Oscilla* deposit from the brown silks, on which rests the beach of the Tirrenian III. E- Caleta d'en Gorrias according to Mercadal (1966): 1- Boulders with some marine species. 2- Beach with red sands and fossils. 3- Reddish limes with *Myotragus*. 4- Eolianite. 5- Conglomerate and Eolianite. 6- Calcareous crust. 7- Myocene Cliff.

### **Calescoves**

Mercadal (1959) cita una playa cuaternaria a unos + 2m en la calita que hay en el Oeste de la cala (*cala de Sant Domingo*), y en unos limos rojos dice que hay gasterópodos terrestres, pero no cita ninguna especie. También comenta que la punta que separa la calita anterior de la que hay en la zona oriental, hay una playa cuaternaria sin fósiles a + 1m, y por encima un suelo de alteración con clastos y finalizando la secuencia una eolianita con *Chondrula gymnesica*.

Un año después Mercadal (1960) halla taxones anteriormente no citados en *Cales Coves*, con son *Patella caerulea*, *Phorcus turbinatus*, *Stromatonita haemastoma* y *Conus ermineus*, sin embargo no precisa la localización exacta.

Gasull (1963a) cita los moluscos terrestres *O. lentiformis* y *I. companyonii* y *X. nyeli* en unos limos rojos.

Mercadal (1966) comenta que al W de la cala existe una potente eolianita del Riss conteniendo limos rojos con pulmonados terrestres. La eolianita ha sido explotada por el hombre.

Cuerda (1975) asigna una cronología del Eutyrrheniense (=MIS 5e) al depósito marino, comentando que en algunos puntos se hallan recubiertos por limos rojos con *Myotragus*.

### **Cova de sa Duna**

Quintana y Arnau (2004) describen las pisadas i rastros de *Hypnomys* localizados en la superficie de una eolianita del Pleistoceno superior que rellena parcialmente la cova de sa Duna. La ausencia de marcas de la cola se ha interpretado como un indicio de que *Hypnomys* no arrastraba la cola al desplazarse.

### **Cala en Porter**

A unos + 0,8 m hay restos de playa cuaternaria con la siguiente fauna (Mercadal, 1959): *Arca noae*, *Barbatia barbata*, *Ungulina* af. *cuneata*, *Chama gryphoides*, *Pseudochama gryphina*, *Cerastoderma glaucum*, *Donax trunculus*, *Patella lusitanica*, *Phorcus turbinatus*, *Stromatonita haemastoma*, *Columbella rustica*, *Conus ventricosus*, *Trimusculus mammillaris*. Mercadal (1959) comenta que *S. haemastoma* presenta por lo menos tres variaciones morfológicas.

Cuerda (1975), a su vez, comenta que la única especie de interés estratigráfico es *Ungulina* cf. *cuneata*, y que cronológicamente bien pudiera ser del Neotyrrheniense (=MIS 5a).

Gasull (1965) cita *Chondrula gymnesica* en una eolianita limosa.

### **Cala de Llucalari**

En la parte occidental de la cala, Mercadal (1959) comenta que hay potentes bancos de conglomerados que alternan con eolianitas hasta alcanzar los 20 m. En una eolianita, a unos + 6 m se extrajo un diente de *Odontaspis* sp. y el bivalvo *Donax trunculus*. Vicens y Gràcia (1999) comentan que es muy probable que el diente de *Odontaspis* sp. se trate de un fósil reelaborado procedente del Mioceno.

Mercadal (1959) comenta que en esta localidad se han hallado los mismos moluscos terrestres que en otras localidades, sin embargo no precisa cuales. Gasull (1964) cita *Xerocrassa nyeli* en esta localidad, sin especificar en qué materiales se halló.

### **Platges de Son Bou**

Mercadal (1959) cita la localidad y comenta que Muntaner ha recogido ejemplares de especies marinas. Muntaner (1959) presenta un corte estratigráfico en donde la playa cuaternaria se halla por encima de materiales continentales con moluscos terrestres pleistocenos, citando *Iberellus companyoni* y *Chondrula gymnesica* (Fig. 13-A). En la playa cuaternaria cita: *Arca noae*, *Glycymeris nummaria*, *Acanthocardia tuberculata*, *Chamelea gallina*, *Patella caerulea*, *Bursa scrobilator*, *Euthria cornea*, *Stromatonita haemastoma*, *Conus ermineus* y *Conus ventricosus*.

Muntaner (1959) le asigna una cronología del nivel de + 2 m del Tirreniense II, que equivaldría al piso Neotirreniense, y en la actualidad al MIS 5a.

Solé-Sabarís (1962) reconoce el nivel de + 4 m (Fig. 4). Da un listado de los fósiles recogidos por Muntaner y cree que la playa de + 2 m está adosada a la de + 4 m.

Cuerda (1975) por la presencia de *Bursa scrobilator* y de *Conus ermineus* le asigna una cronología Eutyrrheniense (MIS 5e). También cita la presencia de *Melania tuberculata*.

Gasull (1965) cita *Chondrula gymnesica* en unos limos rojos.

### **Platja de Binigaus**

Mercadal (1966) comenta que hay unos conglomerados con las cuatro especies de pulmonados terrestres. *Chondrula gymnesica* es la que menos abunda. Gasull (1969) cita *Xerocrassa nyeli* y *Iberellus companyonii*. Mercadal *et al.*, (1970) citan *Ch. gymnesica*.

Según Solé-Sabarís (1962), en Sant Adeodat se distingue el nivel de + 2m, sin fósiles, netamente adosado al nivel de +4 m. También se puede observar una superficie de abrasión entre 20 m y 25 m (Fig. 4). Sant Adeodat se halla al N de las playas de Binigaus y de Binicodrell.

### **Cala Trebalúger**

Mercadal (1959) comenta que en el Este de esta cala (Fig. 14-B) hay una extensa terraza marina del Tirreniense del nivel de + 2 m (del MIS 5a), en donde se han recogido las siguientes especies: *Arca noae*, *Ctena decussata*, *Chama gryphoides*, *Cerastoderma glaucum*, *Donax trunculus*, *Patella rustica*. También comenta que hacia el Oeste hay eolianitas y conglomerados con algunas especies terrestres, sin citar cuales son. Posteriormente, Solé-Sabarís (1962) comenta la aportación anterior. Mercadal *et al.* (1970) citan *Chondrula gymnesica* en esta localidad. Cuerda (1975) comenta que con la fauna banal presente solo se puede decir que es del Pleistoceno superior.

### **Cala Galdana**

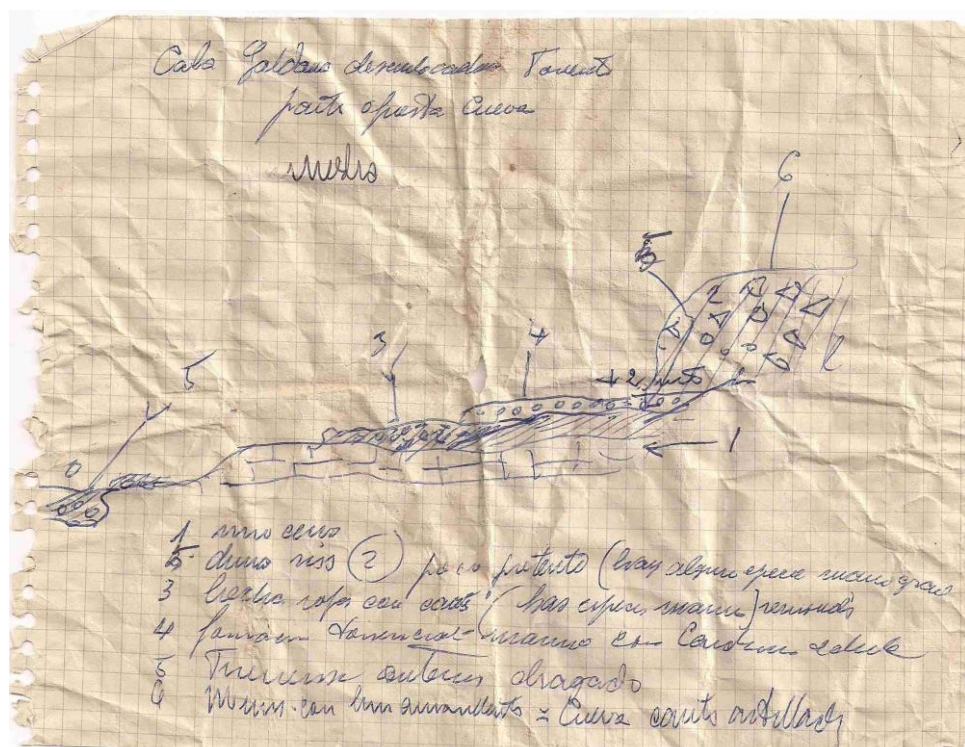
En esta cala hay una playa cuaternaria, en donde Mercadal (1959) cita *Ostrea sp.*, *Loripes lucinalis*, *Chama gryphoides*, *Pseudochama gryphina*, *Cerastoderma glaucum*, *Donax trunculus*, *Irus irus*, *Patella caerulea* y *Stromatonita haemastoma*. Este mismo autor dice que hay bastantes pulmonados terrestres en los conglomerados que descansan sobre la terraza marina tirreniense.

Solé-Sabarís (1962) comenta que la playa fósil se situa a + 1m, constituida por arenas cementadas y ricas en fósiles. La playa esta sobre una eolianita fuertemente cementada. Por encima hay limos rojos y una costra calcárea. Cita taxones del nivel marino no citados anteriormente, como son: *Lima lima*, *Ctena decussata*, *Paludestrina*

sp. (=Hydrobia?), *Rissoa guerini*, *Mangelia* sp. Este autor presentó dos cortes estratigráficos (Fig. 4).

Cuerda (1975) sitúa cronológicamente la terraza marina de la desembocadura del torrente en el Eutyrrheniense (=MIS 5e) y da la lista de fósiles recogidos por Solé-Sabarís (1962), destacando la abundancia de *Cerastoderma glaucum* con morfologías propias de un estuario. Según el autor hay unos limos rojo-amarillentos relacionados estratigráficamente con la playa fósil, en donde hay *Oxychilus lentiformis*, *Xerocrassa nyeli* e *Iberellus companyonii*. También recuerda que cerca está la cavidad que D. Bate citó *Myotragus*, y que por encima de la brecha osífera hay unos limos amarillentos con *Ch. gymnesica*. También cabe comentar que Cuerda *et al.* (1966) localizaron ranuras litorales correspondientes a niveles marinos de + 12 m y de + 7 m, que sitúan cronológicamente en el interglacial Riss-Würm, y que según las interpretaciones actuales no serían de esta edad (ver Ginés *et al.*, 2012). Gasull (1965) cita *Chondrula gymnesica* en unos limos rojos, y que no sabemos en donde los halló. Recientemente, catalogando la colección Cuerda se halló un corte realizado en el campo por J. Cuerda (Vicens y Pons, 2013) (Fig. 14), en donde se dibuja un corte más complejo que el realizado por Solé-Sabarís (1962).

Revisando la colección Benet-Mercadal, en una bolsa con ejemplares de *C. glaucum*



**Figura 14.** Anotación inédita de Cala Galdana, realizada por Joan Cuerda. Hallada de forma casual y completamente arrugada mientras se catalogaba la colección Cuerda-SHNB.

**Figure 14.** Unpublished field sketch from Joan Cuerda discovered during SHNB Cuerda's Collection revision and catalogue works.





**Figura 15.** *Cerastoderma glaucum* (izquierda) y fragmentos de *Persististrombus latus* (derecha) del yacimiento de Cala Galdana (colección Benet Mercadal).

**Figure 15.** *Cerastoderma glaucum* (left) and fragments of *Persististrombus latus* (right) of the Cala Galdana deposit (Benet Mercadal collection).

de grandes dimensiones, aparecieron dos fragmentos de *Persististrombus latus* (Fig.15). Esta sería la primera cita confirmada de especie termófila en Menorca.

### **Racó des Rost**

Localidad situada entre Macarella y cala Santa Galdana. Cuerda (1966) presenta un interesante corte estratigráfico (Fig. 11-A), en donde hay tres niveles con fósiles marinos. Los dos niveles más antiguos contienen *Cerastoderma glaucum*, y es por ello que delatan la presencia de un antiguo estuario y posterior presencia de aguas estancadas sin comunicación con el mar, y que el autor atribuye cronológicamente al Tirreniense II (=MIS 5e). El nivel más moderno contiene especies marinas y por la estratigrafía es posterior a los niveles fosilíferos anteriores, siendo del Tirreniense III (=MIS 5e). En este último nivel se halló la especie termófila *Barbatia plicata*.

Cuerda (1975) reproduce nuevamente el corte y en esta ocasión rectifica la distancia de la localidad hasta *cala Galdana*. En el primer trabajo, Cuerda *et al.* (1966) daba una distancia de 500 m, y en Cuerda (1975) es de 1000 m al Oeste de la cala, es por este motivo que creemos que la localización puede ser en el Racó des Rost.

### **Macarella**

Gasull (1964) cita *Xerocrassa nyeli*. Gasull (1969) cita *Oxychilus lentiformis* en unos limos rojos. El mismo autor cita *Iberellus companyonii*.

En la col. Vicens-SHNB se hay *I. companyonii*, *O. lentiformis* y *Xerocrassa* sp. procedentes de unas brechas rojizas situadas por encima de una eolianita, en el W de la cala. También hay *Chama gryphoides* procedentes de unos conglomerados basales y *Donax* sp. procedente de la eolianita.

### **Ses Penyes d'es Perico**

Quintana (1993) describe un rastro de *Myotragus* localizado en eolianitas de esta localidad. Por primera vez en las Islas Baleares se indicaba la existencia de icnitas atribuidas a *Hypnomys mopheus*.

### **Caleta d'en Gorries**

Mercadal (1966) presenta la estratigrafía que hay en una cueva litoral presente en esta localización. Hay hasta + 1 m cantos rodados cementados con fósiles marinos, y sobre ellos, arenas finas rojizas de 40 cm de potencia (Fig. 13-E). Este autor cita los siguientes taxones: *Lithothamnion* sp, Antozoa indet, *Paracentrorus lividus*, *Arca noae*, *Ctena decussata*, *Patella lusitanica*, *Fissurella gibberula*, *Homalopoma sanguineum*, *Dendropoma cristatum*, *Thylacoides arenarius* y *Radix balthica*.

Cuerda (1975) figura en su obra el corte geológico a partir del autor anterior.

Mir (1979) presenta la topografía de esta cavidad, en donde la abrasión marina ha actuado en distintos ocasiones durante el Pleistoceno superior.

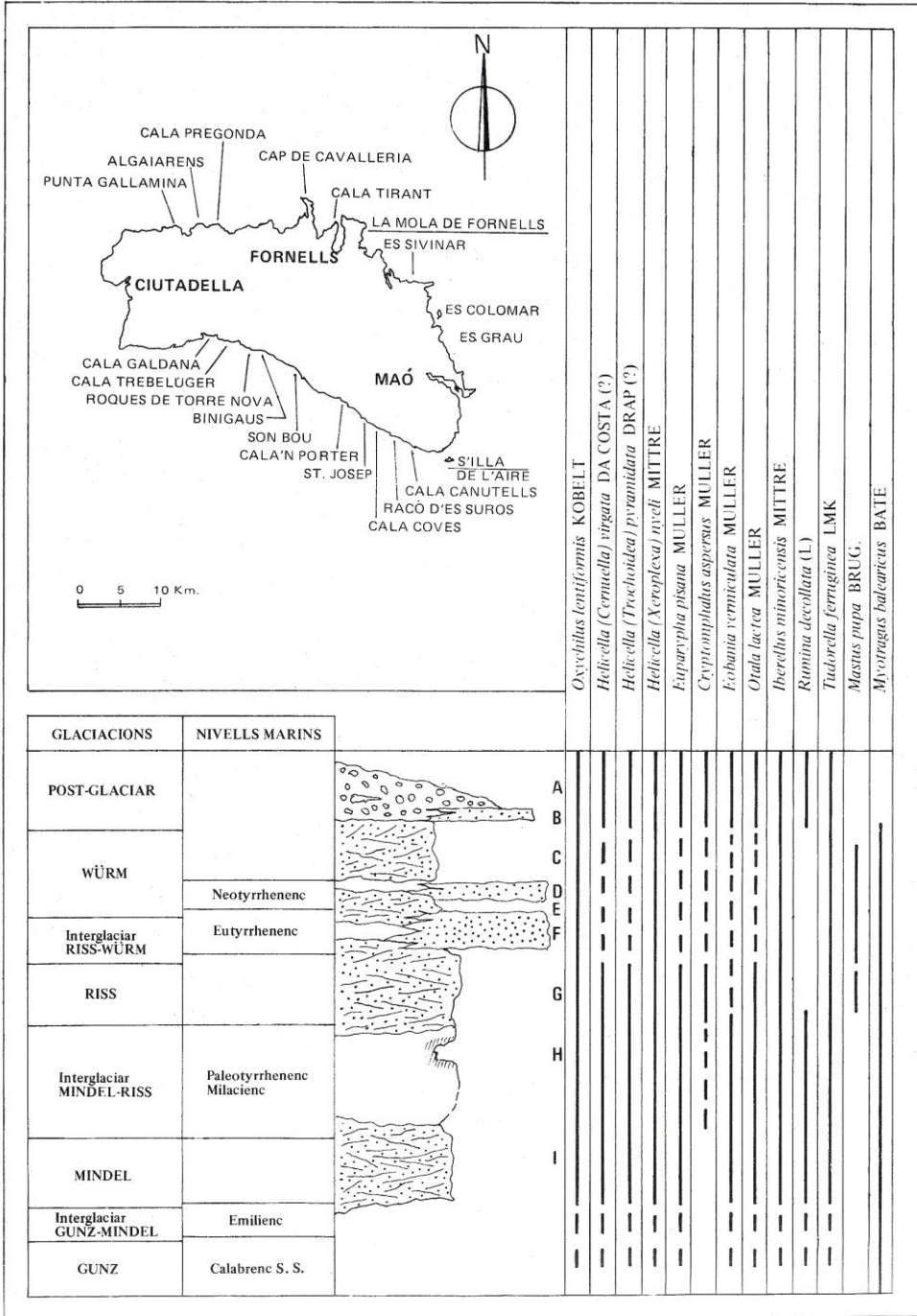
### **Cala en Blanes**

Localidad estudiada por Mercadal (1966; 1967) (Fig. 13-D). Cuerda (1975) recoge lo dicho por el autor anterior. Mercadal (1966) cita los siguientes taxones, hallados en un depósito situado a + 6 m: *Lithothamnion* sp, Antozoa indet, *Arca noae*, *Barbatia barbata*, *Striarca lactea*, *S. lactea* var. *gaimardi*, *Spondylus gaederopus*, *Lima lima*, *Chama gryphoides*, *Pseudochama gryphina*, *Ctena decussata*, Veneridae indet., *Patella ferruginea?*, *Astraea rugosa*, *Melarhaphé neritoides*, *Bittium reticulatum* var. *latreillei*, *Stromatonia haemastoma*, *Stromatonia haemastoma* var. *laevis*, *Mitrella scripta*, *Gemphos viverratus*, *Mitra* sp,

Mercadal (1966) da una cronología Eutirreniense (= MIS 5e) por la altura a la que se halla este depósito y por la presencia de fauna termófila.

**Figura 16.** (página siguiente) Cuadro de distribución estratigráfica de los moluscos terrestres y situación de los afloramientos cuaternarios de Menorca según Mercadal *et al.* (1970): A- Derrubios de pendiente, angulosos y cementados. Fornells, cala Tirant, etc. B- Playas marinas recientes. C- Niveles eólicos de cala Galdana, Cala Mesquida, Es Grau, Na Macaret y S'Arenal d'es Castell; D- Niveles marinos de Son Bou, Cala Galdana, San Adeodat, Llucalari, Santo Domingo (Solé-Sabarís, 1962). E- Niveles eólicos de Es Canutells, Cala Coves, Cala en Porter Son Bou, Binigaus, Cala Trebalúger, Cala Galdana, etc. (Mercadal 1959, 1960, 1966). F- Niveles marinos de Son Bou, Na Macaret, Albufereta, Cala Blanes (Solé-Sabarís, 1962; Mercadal, 1959, 1966). G- Niveles eólicos de S'Illa de l'Aire, Es Canutells, Racó d'es Suros, Cala Coves, Racó de Sant Josep, Cova de Sant Josep, Es Colomar (Es Grau), Fornells, Pregonda, els Brechs de Santa Ana (Mercadal, 1966). H- Ranuras de abrasión de Son Bou, Cala Coves, San Adeodat (Solé-Sabarís 1962; Mercadal, 1966). I- Niveles eólicos de La Mola de Fornells, Cap de Cavalleria y Punta de na Guillemina. (Reproducido de Obrador y Mercadal, 1981).

**Figure 16.** (next page) Stratigraphic distribution of the land molluscs and situation of the quaternary outcrops of Menorca according to Mercadal *et al.* (1970): A- Slope, angular and cemented stripping. Fornells, Calla Tirant, etc. B- Recent marine beaches. C- Aeolian levels of Galdana cove, Cala Mesquida, Es Grau, Na Macaret and S'Arenal d'es Castell; D- Sea levels of Son Bou, Cala Galdana, San Adeodat, Llucalari, Santo Domingo (Solé-Sabarís, 1962). E-levels of Es Canutells, Cala Coves, Cala en Porter Son Bou, Binigaus, Cala Trebalúger, Cala Galdana, etc. (Mercadal 1959, 1960, 1966). F- Marine levels of Son Bou, Na Macaret, Albufereta, Cala Blanes (Solé-Sabarís, 1962; Mercadal, 1959, 1966). G- Eolic levels of S'Illa de l'Aire, Es Canutells, Racó d'es Suros, Cala Coves, Racó de Sant Josep, Cova de Sant Josep, Es Colomar (Es Grau), Fornells, Pregonda, els Brechs de Santa Ana (Mercada, 1966). H-Abrasion grooves of Son Bou, Cala Coves, San Adeodat (Solé-Sabarís 1962; Mercadal, 1966). I- Wind levels of La Mola de Fornells, Cap de Cavalleria and Punta de na Guillemina. (Reproduced from Obrador & Mercadal, 1981).



### 3 | Los fósiles marinos

Los fósiles marinos con interés estratigráfico hallados en los yacimientos de Menorca son escasos y entre estos podemos citar: *Barbatia plicata*, *Ungulina cuneata*, *Patella ferruginea*, *Monoplex parthenopeus*, *Bursa scrobilator*, *Stromatonita haemastoma* var. *laevis*, *Gemophos viverratus* y *Conus ermineus*. El resto de los fósiles hallados en las depósitos cuaternarios marinos de Menorca no tienen interés estratigráfico y estarían dentro de la denominada “fauna banal” de Cuerda (1975; 1987). Se ha seguido la nomenclatura binomial dada por válida en Worms (World Register of Marine Species / [www.marinespecies.org](http://www.marinespecies.org)), en la gran mayoría de taxones.

Es probable que exista algún error al actualizar las denominaciones taxonómicas originales dadas por los autores que estudiaron el Cuaternario menorquín y es por ello que queremos comentar lo siguiente: *Vermetus cristalis* lo hemos actualizado como *Dendropoma cristatum*; la denominación de Corollinaceae indet. en las obras originales, creemos que se trata de algún taxón de Antozoa; *Venus* sp., al poder ser diversos taxones, se ha optado por la denominación de Veneridae indet; *Arcopella balaustina*, *Lima paucicostata* y *Homalopoma sanguineum* nunca se han citado en el Cuaternario de las Islas Baleares y es por ello que sin poder ver los ejemplares deben considerarse como citas dudosas. Según Oliver *et al.*, (2016) el bivalvo *Arcopella balaustina* tiene su hábitat entre la plataforma continental y el talud, en arenas limosas, entre 150 m y 500 m de profundidad. Es probable que sea una confusión con un taxón de apariencia similar. Se han citado diferentes especies del género *Lima* en el Cuaternario balear (Cuerda 1987), es probable que la cita de *Lima paucicostata* sea una cita de *Lima lima*. Referente a la cita del gastropoda *Homalopoma sanguineum* podría ser en realidad algún taxón de la familia Trochidae.

Destaca la presencia de *Persististrombus latus* dos fragmentos localizados en la colección Benet Mercadal, de Cala Galdana (Fig.15), primera cita confirmada de especie termófila en Menorca.

El número total de taxones marinos citados es de 60 taxones: 1 de clase Florideophyceae, 1 de la clase Anthozoa, 1 de la clase Echinoderma, 20 de la clase Bivalvia y 37 de la clase Gastropoda (ver anexo I).

### 4 | Los fósiles continentales

Entre los depósitos continentales aparecen las clases Mammalia y Gastropoda (Fig. 16 a 18) e Insecta del Reino Animalia y bioturbaciones del Reino Plantae. De la primera, mayoritariamente a partir de icnitas en eolianitas, y de la segunda a partir de conchas fósiles en paleosuelos, eolianitas y brechas de ladera. También son abundantes los rizolitos, presentes en las eolianitas, si bien no se saben los taxones de Plantae que produjeron estas bioturbaciones. Otro tipo de fósiles son las cámaras de pupación de Insecta, conocidos anteriormente como coprolitos de *Myotragus*.

Respecto la posición taxonómica y nomenclatural de los Gastropoda hay notables discrepancias entre los diferentes autores que han tratado el tema. Hemos optado por seguir a Beckmann (2007) con algunas modificaciones.

Mercadal *et al.* (1970) establecen una síntesis general de los depósitos cuaternarios eólicos de la isla, basándose en la fauna de gasterópodos presente (Fig. 16).

Mercadal *et al.* (1970) citan *Ceruellia virgata*, *Trochoidea pyramidata*, *Eobania vermiculada* y *Otala lactea* en algunos yacimientos pleistocenos de Menorca. Quintana (2006b) comenta que si bien no se puede descartar la presencia de estas especies en el registro paleontológico de la isla, el hecho que su identificación se haya realizado a



**Figura 17.** Dos ejemplares, in situ, de *Iberellus companyonii* en el manto eólico de es Bec Vermell (Maó).

**Figure 17.** Two specimens, in situ, from *Iberellus companyonii* of the aeolian sand sheet of Es Bec Vermell (Maó).



**Figura 18.** *Xerocrassa cuerdaei*, endemismo terrestre exclusivo de yacimientos cuaternarios del norte de Menorca (especímenes de na Macaret). Fotografía Josep Quintana.

**Figure 18.** *Xerocrassa cuerdaei*, terrestrial endemism exclusive to quaternary deposits of northern Menorca (na Macaret specimens). Photography Josep Quintana.

partir de moldes internos mal conservados aconseja considerar su origen y su estatus taxonómico con mucha cautela.

Cuerda (1965; 1975), Gasull (1966) y Pons y Palmer (1996) indican qué moluscos terrestres son endémicos de las Islas Baleares. Comentan la fauna malacológica común del Pleistoceno de Menorca y Mallorca. Son los siguientes taxones: *O. lentiformis*, *X.*

*nyeli*, *I. companyonii* (Fig. 16), *T. ferruginea* y *Ch. gymnesica*. Este último actualmente extinto.

En la monografía de Forés (2015) se describen las especies del género *Xerocrassa* que han perdurado hasta nuestros días en las islas Gimnésicas (Menorca, Mallorca, Cabrera e islotes adyacentes).

Un molusco exclusivo de Menorca es *X. cuerdoi* (Fig. 17), también en la actualidad extinto (Quintana 1995b). Otro endemismo menorquín, *Xerocrassa cardonae*, ha sido hallado fósil en los sedimentos dunares del Pleistoceno superior-Holoceno próximos al Cap de Favàritx (Quintana y Vilella 2001).

Quintana (2006b) presenta un estado de la cuestión sobre los moluscos terrestres y comenta qué especies son autóctonas y cuales son especies introducidas.

Con la descripción de mantos eólicos en Menorca (Pons *et al.*, 2012), también aparecen nuevas dunas fósiles que aportan nuevas localidades del Pleistoceno superior-Holoceno.

### Agradecimientos

Este capítulo querría rendir homenaje a unos auténticos pioneros y maestros del Cuaternario de las Baleares, que de forma discreta, pero constante, fueron sembrando unos conocimientos sólidos de esta disciplina y que hoy en día son un auténtico referente. Personas como Joan Cuerda, Andreu Muntaner y especialmente Benet Mercadal en Menorca, todos ellos vinculados a la Societat d'Història Natural de les Balears, han hecho de la paleontología del Cuaternario una disciplina puntera en las Baleares.

También nuestro más sincero agradecimiento a nuestro amigo Dr. Josep Quintana, que nos ha cedido algunas imágenes y con su lectura crítica del manuscrito y sus sugerencias ha hecho mejorar este capítulo.

La elaboración de este artículo ha sido posible gracias a la ayuda del proyecto "Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español" (CS02015-64468-P) del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

### Bibliografía

- Andrews, C. W. (1914): Description of the skull and skeleton of a peculiarly modified rupicaprine antelope (*Myotragus Balearicus*, Bate) with a notice of a new variety «*Myotragus balearicus* var. major. *Philosoph. Transactions Royal Society*. London. Vol. 206. Serie B.
- Bate, D. (1909): Preliminary note on a new artiodactyle from Mallorca *Myotragus balearicus*, gen. et sp. nov. *Geological Magazine*, 5: 385-389.
- Bate, D. (1914): The pleistocene ossiferous deposits of the Balearic Islands. *Geological Magazine*, 6: 347-354.
- Beckmann, K. H. (2007): *Die Land- und Süßwassermollusken der Balarischen Inseln*. ConchBooks. Hackenheim. 255 p.
- Bourrouilh, R. (1983): *Estratigrafía, sedimentología y tectónica de la isla de Menorca y del noreste de Mallorca (Baleares). La terminación nororiental de las Cordilleras Béticas en el Mediterráneo occidental*. Memorias del IGME 99, 672 pp. Madrid.
- Bourrouilh, M. R. y Magne. (1963): A propos de dépôts du Pliocène supérieur et du Quaternaire sur la côte Nord de l'île de Minorque (Baléares). *Bull. Soc. géol. France*, 5: 298-302.
- Bover, P. (2008): Els nostres naturalistes. Josep Quintana Cardona. *Circular de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 33: 5-6.

- Cuerda, J. (1965): Données paléontologiques pour l'étude de la malacofauna terrestre de Baléares orientales. *Rapp. Proc. Verb. Reun. C.I.E.S.M.* 18, 507-510.
- Cuerda, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Conselleria de Cultura, Educació i Esports. Dir. Gral. de Cultura. Govern Balear. Palma de Mallorca. 1ª Edición, 310 p.
- Cuerda, J. (1987): *Moluscos marinos y salobres del pleistoceno balear*. Caja de Baleares "Sa Nostra". Palma. 420 p.
- Cuerda, J., Sacarés, J. y Mercadal, B. (1966): Nuevos yacimientos marinos del Pleistoceno superior de Cala Santa Galdana (Menorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears.*, 12: 101-105.
- Fernández, M., Florit, J., Obrador, A., & Quintana, J. (2017): La colección geológica y paleontológica de Benito Mercadal Pons (1925-1999). In: Carcavilla, L., Duque-Macías, J., Giménez, J., Hilario, A., Monge-Ganuzas, M., Vegas, J., & Rodríguez, A. (Eds.), Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. *Cuadernos del Museo Geominero*, 21: 39-44.
- Forés, M. (2015): *Hàbitat y conquiologia del genero Xerocrassa Montesorato 1892 (Gastropoda: Pulmonata: Hygromiidae) de Mallorca, Menorca, Cabrera y sa Dragonera*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 21; 181 pp.
- Fornós, J.J., Barón, A. y Pons, G.X. (1996): Arrecifes de coral hermatípicos (*Cladocora caespitosa*) en el relleno holoceno de la zona de Es Grau (Menorca, Mediterráneo Occidental). *Geogaceta*, 20(2): 303-306.
- Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.) (2004): *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11, 378 pp.
- Fornós, J.J., Clemmensen, L.B., Gómez-Pujol, L. y Murray, A.S. (2009): Late Pleistocene carbonate aeolianites on Mallorca, Western Mediterranean: a luminescence chronology. *Quaternary Science Reviews*, 28: 2697-2709.
- Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Onac, B.P. y Fornós, J.J. (eds) (2012): *Mallorca: a Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18. 220 pp
- Gasull, Ll. (1963a): Algunos moluscos terrestres y de agua dulce de Baleares. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 9: 3-80.
- Gasull, Ll. (1963b): Descripción de unas nuevas formas del género *Helicella* (*Xeroplexa*) de Baleares. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 9: 83-92.
- Gasull, Ll. (1964): Las *Helicella* (*Xeroplexa*) de Baleares. Gasteropoda Pulmonata. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 10: 3-67.
- Gasull, Ll. (1965): Algunos moluscos terrestres y de agua dulce de Baleares. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 11:7-161.
- Gasull, L. (1966): La insularidad de las islas Baleares desde el punto de vista de la malacología terrestre. *Bol. Soc. Hist. Nat. Bal.* 12, 149-156.
- Gasull, Ll. (1969): Adiciones y rectificaciones a la fauna malacológica terrestre y de agua dulce de Baleares. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 15: 59-73.
- Henningsen, D. (1990): Quartäre kalkige Äolianite von N-Menorca (Balearen, westliches Mittelmeer). *Eiszeitalter und Gegenwart*, 40: 120-125.
- IDEIB. Infraestructura de dades de les Illes Balears (2017). <http://www.ideib.cat/>. Consultado el 25-06-2017.
- Martín-Prieto, J.A., Pons-G.X., Roig Munar, F.X., Fraga, P., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B. y Mir-Gual, M. (2017): *Mantos eólicos en la costa septentrional de Menorca: naturaleza y distribución*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears 25. En este mismo volumen.
- Mas, G. y Ripoll, J. 2010. Cambres de pupació d'insectes coleòpters del Pliocè-Pleistocè inferior de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània occidental). Significació paleoambiental i cronoestratigràfica. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 53: 91-106.
- Mercadal, B. (1959): Noticias sobre la existencia de restos de terrazas del tirreniense en la costa Sur de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 5: 39-44.
- Mercadal, B. (1960): El tirreniense de la costa Norte de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 6: 73-74.
- Mercadal, B. (1962a): Nota geológica y geográfica de San Luis. *Revista de Menorca*. 51-63.



- Mercadal, B. (1962b): El *Strombus bubonius* y los restos de terrazas tyrrenienses de Menorca. *Revista de Menorca*, p. 412-419.
- Mercadal, B. (1966): Nuevas aportaciones al conocimiento del Cuaternario de Menorca. *Revista de Menorca*, III-4: 148-161.
- Mercadal, B. (1967): Nuevos yacimientos de *Myotragus* en Menorca y su cronología. *Boll. Soc. Hist. Nat. de Balears*, 13: 63-75.
- Mercadal, B. y Pretus L. (1980): Nuevo yacimiento de *Testudo gymnesicus* Bate, 1914 en la isla de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 24: 15-21.
- Mercadal, B.; Obrador, A. y Rosell, J. (1972): Fauna malacológica del Cuaternario marino de la isla del Aire (Menorca). *Acta Geológica Hispánica*, 6: 178-179.
- Mercadal, B., Villalta, J. F., Obrador, A. y Rosell, J. (1970): Nueva aportación al conocimiento del Cuaternario menorquín. *Acta Geol. Hispánica*, 5(4): 89-93, Barcelona.
- Mir, F. (1979): Noves aportacions al coneixement de les coves de Menorca. *Endins*, 5-6: 19-28.
- Muntaner, A. (1959): Nota preliminar sobre las formaciones tirrenienses de la Isla de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 5: 33-39.
- Nolan, M.H. (1933): Nota sobre diversos puntos de la geología menorquina para dilucidar y comprobar. Trad. E. Castaños. *Revista de Menorca*, 28: 152-159
- NOTIB (Nomenclator Toponímico de les Illes Balears. (2017). <http://notib.recerca.iec.cat/>. Consultado el 25-06-2017.
- Obrador, A. (1999): Benet Mercadal i Pons (1925-1999). In *Memoriam*. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 42: 194-197.
- Obrador, A. y Mercadal, B. (1969a): Presencia de depósitos travertínicos lacustres de edad Cuaternaria en la isla de Menorca (Balears). *Revista de Menorca*, 7: 3-8.
- Obrador, A. y Mercadal, B. (1969b): Sobre la presencia de depósitos cuaternarios continentales en el Puerto de Mahón. *Revista de Menorca*, 7: 171-173.
- Obrador, A. y Mercadal, B. (1981): *Geomorfología* (Enciclopedia de Menorca). Obra Cultural Balear de Menorca, 1, 265-320, Maó.
- Oliver, P. G., Holmes, A. M., Killeen, I. J. & Turner, J. A. (2016). *Marine Bivalve Shells of the British Isles*. Amgueddfa Cymru - National Museum Wales. Available from: <http://naturalhistory.museumwales.ac.uk/britishbivalves> [Accessed: 21 June 2017].
- Pomar, F. (2016): *Arquitectura i fàcies deposicionals de la interferència entre la sedimentació al·luvial, col·luvial i edíca a Illes Balears durant el Pleistocè superior: implicacions paleoclimàtiques*. Tesis doctoral. UIB. 375 pp.
- Pomar, F., Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L. y Del Valle, L. (2013): El Pleistocè superior de la zona de Tirant-Fornells (nord de Menorca, Illes Balears). In: Pons, G. X., Ginard, A., & Vicens, D. (edit.). *VI Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*. Soc. Hist. Nat. Balears. 86-88.
- Pons, G. X. y Gómez-Pujol, L. (2003): Introducción al medio físico de Menorca. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 10: 1-30.
- Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A., Roig-Munar, F.X., Fraga, P., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B. y Mir-Gual, M. (2012): Mantos eólicos de Menorca (Islas Baleares). In: González Díez, A., et al. *Avances de la geomorfología en España 2010-2012. XII Reunión Nacional de Geomorfología* (Santander). 367-370.
- Pons, G. X. y Palmer, M. (1996): *Fauna endèmica de les Illes Balears*. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 5: 1-307.
- Pons, G.X., Vicens, D. & Mir-Gual, M. (2017): Aproximación al inventario de yacimientos del Cuaternario en el litoral de Menorca (*Illes Balears*). In: Carcavilla, L., Duque-Macías, J., Giménez, J., Hilario, A., Monge-Ganuzas, M., Vegas, J. y Rodríguez, A. *Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural*. Cuadernos del Museo Geominero, 21, Instituto Geológico y Minero de España. 75-80.
- Quintana, J. (1993): Descripción de un rastro de *Myotragus* e icnitas de *Hypnomys* del yacimiento cuaternario de Ses Penyes d'es Perico (Ciutadella de Menorca, Balears). *Paleontologia i Evolució*, 26-27: 271-279.

- Quintana, J. (1995b). Nuevas localidades con *Xeroplexa cuerdoi* (Gasull, 1963)(Gastropoda: Pulmonata). *Rev. Menorca*: 27-39.
- Quintana, J. (1998a): Presencia de *Trochoidea frater* (Dohrn y Heynemann, 1862) (Gastropoda: Helicidae) en los depósitos cársticos de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 41: 49-56.
- Quintana, J. (1998b): Aproximación a los yacimientos de vertebrados del Mio-Pleistoceno de la isla de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 41: 101-117.
- Quintana, J. (2005): *Estudio morfológico y funcional de Nuralagus rex (Mammalia, Lagomorpha, leporidae)*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. 360 pp +Anexo III, Medidas osteológicas: lepóridos actuales y *Nuralagus rex*. 142 pp.
- Quintana, J. (2006a): Reconsideració taxonòmica de *Chondrula (Mastus)* fósil de Mallorca i Menorca (Gastropoda: Pulmonata: Enidae). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 49: 21-38.
- Quintana, J. (2006b): Mol-luscs terrestres autòctons i introduïts a l'illa de Menorca (Illes Balears, Mediterrània occidental). *Spira*, 2(1): 17-26.
- Quintana, J. (1993): Descripción de un rastro de *Myotragus* e icnitas de *Hypnomys* del yacimiento cuaternario de Ses Penyes d'es Perico (Ciudadella de Menorca, Balears). *Paleontologia i Evolució*, 26-27: 271-279.
- Quintana, J. y Arnau, P. (2004): Descripció dels rastres i les petjades d'*Hypnomys* Bate, 1918 (Mammalia: Gliridae) de la cova de sa Duna (Alaior, Menorca). *Endins*, 26: 7-14.
- Quintana, J. y Vilella, M. 2001. Sobre la validez taxonómica de *Trochoidea (Xerocrassa) cardonae* (Hidalgo, 1867) (Gastropoda: Hygromniidae). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 44: 41-55.
- Quintana, J., Moyà, S. y Kohler, M. (2005): El conejo gigante de los depósitos cársticos de Punta Nati-Cala's Pous (Menorca, Illes Balears). In Alcover, J.A. & Bover, P. (eds.): Proceedings of the International Symposium "Insular Vertebrate Evolution: the Palaeontological Approach": Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 12: 297 -308.
- Quintana, J., Obrador, A. y Fernández, M. (2011): Primera cita de un parmacélideo (Gastropoda: Pulmonata) en las Islas Baleares (Mediterráneo occidental). Descripción de una nueva especie fósil: *Parmacella balearica* sp. nov. *Spira* 4(1-2): 11-16.
- Rosell, J., Obrador, A. y Mercadal, B. (1969): Estudio sedimento lógico y estratigráfico de la isla del Aire (Menorca). *Bol. Geol. Min. España*, 80(6): 538-544, Madrid.
- Roselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds). 2003. *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 10: 232 pp. Palma de Mallorca. AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Seguí, B. (1998): *Els ocells fòssils de Mallorca i Menorca. Successió estratigràfica d'aus en els reblliments càrstics de les Gimnèsies*. Tesis Doctoral. Univ. de les Illes Balears. 234 pp.
- Seguí, B., Bover, P., Trias, M. & Alcover, J. A. 1998. El jaciment fòssilífer de la cova C-2 (Ciudadella de Menorca). *Endins* 22: 81-97.
- Solé Sabarís, L. (1962): Le Quaternaire marin des Balears et ses rapports avec les côtes méditerranéennes de la Peninsule Iberique. *Quaternaria*, 6: 309-342.
- Trias, M. (1985): les campanyes espeleològiques del 84 a Menorca. *Endins*, 10-11: 3-12.
- Vicens, D. (2015): *El registre paleontològic dels dipòsits litorals quaternaris a l'illa de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània occidental)*. Tesis Doctoral. UIB. 985 pp.
- Vicens, D. y Gràcia, F. 1999. *Carcharodon carcharias* (Linnaeus, 1758) en el Plistocè superior de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 42: 167-170.
- Vicens, D. y Pons, G. X. (2011): Els invertebrats fòssils als jaciments d'origen càrstic de les Illes Balears. *Endins* 35 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 17: 283-298.
- Vicens, D. y Pons, G.X. (2013): La col·lecció no catalogada de Joan Cuerda Barceló. Inici de la seva catalogació a la SHNB. In: Pons, G.X., Ginard, A. y Vicens, D. (edit.). *VI Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*. Soc. Hist. Nat. Balears. 452.
- Vicens, D., Gràcia, F., Ginard, A., Crespí, D. y Balaguer, P. (2011): Cavitats litorals de gènesi marina a les Illes Balears. *Endins* 35 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 17: 133-142.
- WoRMS Editorial Board (2017). World Register of Marine Species. Disponible en <http://www.marinespecies.org> . Consultado el 25-06-2017.

**Anexo I.** Taxones citados en yacimientos litorales con fósiles marinos del Pleistoceno de Menorca. Se ha seguido a WorMS (World Register of Marine Species / [www.marinespecies.org](http://www.marinespecies.org)), exceptuando los señalados con un asterisco (\*) que se ha seguido a Cuerda (1987). Los taxones señalados con un rombo (◆) son citas dudosas.

**Annex I.** Taxes cited in coastal deposits with marine fossils of the Pleistocene of Menorca. Worms (World Register of Marine Species / [www.marinespecies.org](http://www.marinespecies.org)) have been followed, except those marked with an asterisk (\*) followed by Cuerda (1987). The taxa marked with a rhombus (◆) are dubious citations.

### **Reino Plantae**

Clase Florideophyceae

FAMÍLIA HAPALIDIACEAE

*Lithothamnion* Heydrich, 1897

### **Reino Animalia**

Clase Anthozoa

FAMÍLIA SCLERECTINIA INCERTIDAE SEDIS

*Cladocora caespitosa* (Linné, 1767)

Clase Echinoidea

FAMÍLIA PARECHINIDAE Mortensen, 1903

*Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816)

Clase Bivalvia

FAMÍLIA ARCIDAE Lamarck, 1809

*Arca noae* Linné, 1758

*Barbatia barbata* (Linné, 1758)

*Barbatia plicata* (Dillwyn, 1817)

FAMÍLIA NOETIDAE Stewart, 1930

*Striarca lactea* (Linné, 1758)

FAMÍLIA GLYCYMERIDIDAE Dall, 1908 (1847)

*Glycymeris nummaria* (Linné, 1758)

FAMÍLIA SPONDYLIDAE Gray, 1826

*Spondylus gaederopus* Linné, 1758

FAMÍLIA ANOMIIDAE Rafinesque, 1815

*Anomia ephiphium* Linné, 1758

FAMÍLIA LIMIDAE Rafinesque, 1815

*Lima lima* (Linné, 1758)

◆*Lima paucicostata* G. B. Sowerby II, 1843

FAMÍLIA LUCINIDAE J. Fleming, 1828

*Ctena decussata* (O.G.Costa, 1829)

FAMÍLIA UNGULINIDAE Gray, 1854

*Ungulina* aff. *cuneata* (Spengler, 1798)

FAMÍLIA CHAMIDAE Lamarck, 1809

*Chama gryphoides* Linné, 1758

*Pseudochama gryphina* (Lamarck, 1819)

FAMÍLIA CARDITIDAE Férussac, 1822

*Cardita calyculata* (Linné, 1758)

FAMÍLIA CARDIIDAE Lamarck, 1809  
*Acanthocardia tuberculata* (Linné, 1758)  
*Cerastoderma glaucum* (Bruguière, 1789)  
 FAMÍLIA TELLINIDAE Blainville, 1814  
 ◆*Arcopella balaustina* (Linnaeus, 1758)  
 FAMÍLIA DONACIDAE Poli, 1795  
*Donax trunculus* Linné, 1758  
 FAMÍLIA VENERIDAE Rafinesque, 1815  
*Irus irus* (Linné, 1758)  
*Chamelea gallina* (Linné, 1758)

Classe Gastropoda

FAMÍLIA HALIOTIDAE Rafinesque, 1815  
*Haliotis tuberculata lamellosa* (Lamarck, 1822)  
 FAMÍLIA FISSURELLIDAE Fleming, 1822  
*Diodora gibberula* (Lamarck, 1822)  
 FAMÍLIA PATELLIDAE Rafinesque, 1815  
*Patella caerulea* Linné, 1758  
*Patella ulyssiponensis* Gmelin, 1791  
*Patella rustica* (Linné, 1758)  
*Patella ferruginea* Gmelin, 1791  
 FAMÍLIA TROCHIDAE Rafinesque, 1815  
*Phorcus turbinatus* (Born, 1778)  
 \**Phorcus turbinatus* (Born, 1778) var. *major*  
 FAMILIA COLONIIDAE Cossmann, 1917  
 ◆*Homalopoma sanguineum* (Linnaeus, 1758)  
 FAMÍLIA TURBINIDAE Rafinesque, 1815  
*Bolma rugosa* (Linné, 1767)  
 FAMÍLIA LITTORINIDAE Children, 1834  
*Melarhaphé neritoides* (Linné, 1758)  
 FAMÍLIA HYDROBIIDAE Stimpson, 1865  
*Hydrobia* ?  
 FAMÍLIA RISSOIDAE Gray, 1847  
*Alvania cancellata* (da Costa, 1778)  
*Rissoa guerini* Recluz, 1843  
*Rissoa violacea* Desmarest, 1814  
 FAMÍLIA VERMETIDAE Rafinesque, 1815  
*Thylacoides arenarius* (Linné, 1758)  
*Dendropoma cristatum* (Biondi, 1859)  
 FAMÍLIA CERITHIIDAE Fleming, 1822  
 \**Bittium reticulatum* (Da Costa, 1778)  
 \**Bittium reticulatum* (Da Costa, 1778) var. *latreillei*  
 \**Thericium vulgatum* (Bruguière, 1792)  
 FAMÍLIA STROMBIDAE Rafinesque, 1815  
*Persististrombus latus* (Gmelin, 1791)  
 FAMÍLIA CYPRAEIDAE Rafinesque, 1815  
*Luria lurida* (Linné, 1758)  
 FAMÍLIA RANELLIDAE Gray, 1854  
*Monoplex parthenopeus* (Salis Marschlin, 1793)  
 FAMÍLIA BURSIDAE Thiele, 1925  
*Bursa scrobilator* (Linné, 1758)  
 FAMÍLIA MURICIDAE Rafinesque, 1815  
*Hexaplex trunculus* (Linné, 1758)

*Stromatonita haemastoma* (Linné, 1767)

\**Stromatonita haemastoma* (Linné, 1767) var. *laevis*

FAMÍLIA COLUMBELLIDAE Svainson, 1840

*Mitrella scripta* (Linné, 1758)

*Columbella rustica* (Linné, 1758)

FAMÍLIA BUCCINIDAE Rafinesque, 1815

*Euthria cornea* (Linnaeus, 1758)

*Gemophos viverratus* (Kierner, 1834)

FAMÍLIA NASSARIIDAE Iredale, 1916 (1835)

*Nassarius incrassatus* (Strøm, 1768)

FAMÍLIA MITRIDAE Swainson, 1829

*Mitra* Lamarck, 1798

FAMÍLIA CONIDAE Fleming, 1822

*Conus ermineus* Born, 1778

*Conus ventricosus* Gmelin, 1791

FAMÍLIA MANGELIIDAE P. Fischer, 1883

*Mangelia* Risso, 1826

FAMÍLIA TRIMUSCULIDAE J. Q. Burch, 1945 (1840)

*Trimusculus mammillaris* (Linné, 1758)

# Gestión litoral en Menorca: un modelo basado en criterios geomorfológicos

Francesc X. Roig-Munar<sup>1</sup>, José Ángel Martín-Prieto<sup>2</sup>, Antonio Rodríguez-Perea<sup>2</sup> y Pau Balaguer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Q4atre Consultoria Ambiental, Es Migjorn Gran.

<sup>2</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma

<sup>3</sup> ICTS SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (MINECO-CAIB), Palma.

## RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos con la gestión basada en criterios geomorfológicos sobre los sistemas playa-duna de Menorca. En la última década, éstos demuestran que es necesario gestionar el sistema sin priorizar la demanda, así como aplicar medidas que emulen los procesos naturales. De este modo se obtienen escenarios de recuperación y equilibrio. Así mismo se demuestra que el abandono de las técnicas de gestión basadas en criterios geomorfológicos revierte de forma regresiva la recuperación del sistema, dándose casos de deterioración de sistemas que estaban recuperándose por falta de gestión

**Palabras clave:** gestión litoral, sistemas playa-duna, Menorca.

## ABSTRACT

The results obtained within a coastal management programme based on geomorphological criteria on the beach-dune systems of Menorca are analysed. The results obtained in the last decade demonstrate that it is necessary to manage the system without prioritizing the demand, as well as applying measures emulating the natural processes. In this way recovery and equilibrium processes are obtained.

**Keywords:** coastal management, beach-dune systems, Menorca.

## 1 | Introducción

El litoral, las playas, en tanto que producto turístico, se conciben como un espacio que mediante diversas ofertas de ocio persigue la satisfacción de las expectativas del turista, sin que ello suponga el reconocimiento o que se preste atención a las características geoambientales del sistema costero. De hecho, en la mayoría de casos, el litoral se entiende como un simple soporte físico de los equipamientos y de las actividades asociadas a la industria turística. En este contexto la voluntad de satisfacer las necesidades de consumo, la propia demanda y, sobretodo, la oferta turística, ha acabado por banalizar el propio recurso natural, transformando los atributos naturales de las playas a merced de necesidades coyunturales, subjetivas y corto-placistas de la demanda del mercado.

Las playas, en tanto que sistema natural y soporte de las actividades humanas, son un espacio con múltiples dimensiones en las que interactúan agentes y procesos naturales, socioeconómicos y administrativos (Ariza *et al.*, 2008) y en donde las funciones de los sistemas playa-duna son múltiples. Cabe citar su papel como soporte de la diversidad biológica (Nordstrom, 2008), la protección de la costa (Jiménez *et al.*, 2012), sus valores paisajísticos (Pintó *et al.*, 2014) así como la satisfacción de las necesidades turístico-recreativas (Sardà *et al.*, 2013). En este sentido, cualquier sistema de gestión litoral debe tener en cuenta la integración de todas y cada una de las dimensiones y/o funciones físicas y ambientales (Roig-Munar *et al.*, 2012; Balaguer *et al.*, 2011), simultáneamente a los esfuerzos por mantener las características o las dimensiones socio-económicas del sistema (Ariza *et al.*, 2011).

En este contexto y entre las diferentes aproximaciones o esquemas de gestión del litoral, la comprensión del litoral a partir de los modelos de interacción playa-duna aparece como una herramienta de trabajo eficiente y con muchas potencialidades para los gestores litorales, en tanto que ofrece un marco conceptual y una base filosófica que acotan el abanico de las estrategias y acciones que dan respuesta de una forma integrada a las múltiples dimensiones de las playas. Los antecedentes al marco teórico de los sistemas playa-duna hay que buscarlos en las contribuciones de Short y Hesp (1982), quienes estudiaron la interacción playa-duna con énfasis en la morfodinámica y la respuesta a la energía del viento y de las olas. Con posterioridad, los modelos de Psuty (1988, 2004) proporcionaron un punto de partida para identificar las variables más importantes como el suministro de sedimento en el sistema playa-duna y así predecir el comportamiento de la *foredune*. A su vez, Hesp (2002) sintetizaría los modelos de Hesp (1988), Carter (1988) y Arens y Wiersma (1994) en una clasificación morfo-ecológica a partir de los diferentes estados de conservación del primer cordón dunar costero.

Sin embargo, dichos enfoques y tal conocimiento distan mucho de ser utilizados por los agentes implicados o los responsables en la toma de decisiones de gestión y planificación costera (Hesp, 2002). Obviar las interacciones entre la playa y el primer cordón dunar puede resultar una mala gestión litoral, donde los problemas de erosión y sostenibilidad se agravan de forma continuada a lo largo del tiempo y acaban presentando dificultades para mantener el estado natural de los sistemas playa-duna (Rodríguez-Perea *et al.*, 2002; Roig-Munar, 2011). A todo cabe sumar que la creciente demanda de uso de estos espacios públicos en las últimas décadas ha causado problemas adicionales derivados de su gestión, por lo que es esencial incluir la implicación de los usuarios en la conservación de dichos espacios como un factor clave de su planificación y ordenación (Michael *et al.*, 2002; Silva, 2006; Roig-Munar *et al.* 2012).

Menorca es la isla del archipiélago balear que en menor medida ha sufrido los impactos y las transformaciones asociadas a la economía turística. Aprovechando esta circunstancia se implementó a principios del segundo milenio un programa de gestión y limpieza de las playas de Menorca, mancomunado por los diferentes ayuntamientos y gestionado por el Consell Insular de Menorca, que permitió el ensayo de diferentes técnicas y aproximaciones a la gestión litoral bajo el prisma de la conciliación del marco conceptual de los sistemas playa-duna, de sus características morfológicas y ecológicas, y de las vocaciones o potencialidades de carácter turístico-recreativo (Roig *et al.*, 2009). El presente trabajo, pretende detallar los elementos clave del enfoque desarrollado, así como sus principales hitos y un marco metodológico que se caracteriza por ahondar en el esquema de una gestión eficiente, dinámica y adaptativa, en cuanto responde a las características del sistema, su vocación de conservación y potencialidad de uso, a la par que genera un sistema de indicadores que permite tener una radiografía no sólo del grado de conservación y los impactos de los diferentes sistemas playa-duna, sino de la eficiencia del propio modelo de gestión.

## **2 | Características del litoral de Menorca a efectos de gestión**

La situación de las islas Baleares y por extensión de Menorca, en el centro de la cuenca del Mediterráneo occidental, confiere a sus playas unas características propias



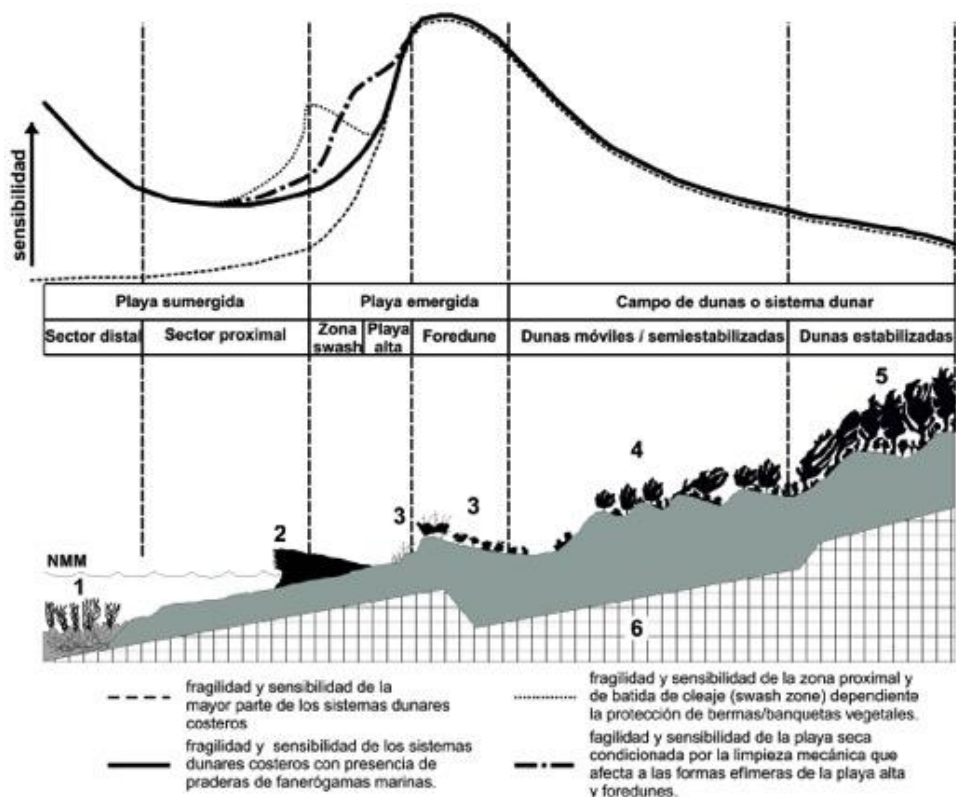
y diferenciadas respecto de otros litorales arenosos. Estas son fundamentalmente la ausencia de mareas, la naturaleza de su sedimento y la presencia de *Posidonia oceanica* en sus aguas costeras.

La marea, podemos considerarla inexistente, con un rango que oscila en torno a los 0.3 m (cf. Puertos del Estado), siendo más importante la oscilación del nivel del mar por la influencia de la presión atmosférica. En cuanto al sedimento de las playas menorquinas, la principal característica es su composición, mayoritariamente bioclástico, aunque que con importantes diferencias entre la región del *Migjorn*, donde la componente bioclástica alcanza el 89,1 % del volumen del sedimento, y la región de *Tramuntana*, donde los elementos biogénicos suponen el 71,7 % del sedimento (Gómez-Pujol *et al.*, 2013). La textura, básicamente, arenas de medias a gruesas y su composición mayoritariamente biogénica, apuntan a las praderas de *Posidonia oceanica* como la principal fuente de sedimento y, en menor medida, a la erosión de acantilados, con cantidades variables de material terrígeno (Gómez-Pujol *et al.*, 2013). La ausencia de una red fluvial permanente que aporte sedimento al sistema litoral es otra de las características que contribuyen al escaso peso del material terrígeno. A efectos prácticos, todas estas circunstancias implican una serie de singularidades o especificidades en el modelo de gestión: En primer lugar, un sistema litoral en el que las entradas de sedimento son escasas, puesto que los ritmos de producción de sedimento biogénico son lentos y a escalas que se alejan del marco temporal de los intereses socio-económicos, y por tanto la sensibilidad del sistema y su capacidad de resiliencia es más frágil. En segundo lugar y por otro lado, está el papel de la *Posidonia oceanica*, una fanerógama marina endémica del mar Mediterráneo, que habita preferentemente sobre sustrato blando a una profundidad variable entre -0,1 y -40 m, y que juega un papel fundamental en la morfodinámica litoral. La posidonia se extiende formando amplias praderas y su producción primaria, hojas muertas, rizomas, raíces y epífitos, juegan un papel importante en el equilibrio morfosedimentario del litoral (Boudouresque *et al.*, 2016). Uno de los destinos de sus hojas, es su deposición sobre la playa donde se forma acumulaciones de hojarasca, ribazones o bermas vegetales, “*banquettes*”, a las que se ha atribuido la capacidad de reducir el impacto de las olas sobre la playa (Roig-Munar, 2005; Simeone, 2008; Boudouresque, 2010; Simeone y De Falco, 2013).

Las praderas de posidonia configuran la protección natural de la zona costera ya que sus rizomas fijan el sedimento y dan lugar a estructuras que amortiguan la acción de las olas, aumentando la rugosidad y disminuyendo la profundidad crítica que provoca la modificación y disipación del oleaje (Fonseca y Fisher, 1986). La absorción de las olas puede llegar a ser entre el 30 y 40% de la energía total (Boudouresque *et al.*, 1982). De este modo la tasa de erosión de sedimentos es de entre 4 y 6 veces inferior a la ausencia de esta pradera (Terrados y Duarte, 2000). A su vez conforman el hábitat del ecosistema que constituye la producción neta de sedimento arenoso más importante del litoral Balear (Jaume y Fornós, 1992) y la mayor “fábrica” de carbonatos de la plataforma interna del Mediterráneo (Canals y Ballesteros, 1997; Fornós y Ahr, 1997, 2011). Actualmente, la superficie que ocupa esta fanerógama a lo largo de la costa menorquina es de aproximadamente 81,68 km<sup>2</sup>, un 11,8% de la superficie de la isla (cf. OBSAM). Sin embargo, recientes estudios ponen de manifiesto una regresión de su superficie en el ámbito balear (Marbà *et al.* 2014; Telesca *et al.*, 2015), lo que podría suponer un aspecto negativo sobre el litoral y el recurso natural de las playas.

La isla de Menorca tiene una longitud de 433 km, de los cuales tan sólo el 9 % son costas arenosas (Balaguer *et al.*, en este volumen). En el caso de Menorca, Roig-Munar (2011) afirma que se ha conservado o se mantienen 42 sistemas dunares, el 86% de los sistemas de la isla, de los cuales 6 deben considerarse como parcialmente destruidos debido a la construcción y/o a su uso intensivo.

Los sistemas playa-duna de Menorca presentan cuatro puntos de sensibilidad y/o fragilidad (Fig. 1): el primero de ellos, común a los sistemas dunares continentales, es la alteración, erosión y/o desaparición de los primeros cordones dunares, que resultan básicos para la estabilización del sistema y para dar respuesta morfodinámica a los efectos de los temporales marinos más energéticos (Brown y McLachan, 1990). La segunda zona de mayor sensibilidad, en relación a los sistemas



**Figura 1.** Esquema general de los sistemas dunares litorales y sus diferentes grados de sensibilidad de acuerdo con el área geográfica en que se desarrollan. Según Brown y McLachlan (1990), Rodríguez-Perea *et al.* (2000) y Roig-Munar y Martín-Prieto (2005). 1: praderas de fanerógamas marinas; 2: banquetas/bermas vegetales formadas por *Posidonia oceanica*; 3: vegetación herbácea de playa alta y primer cordón dunar; 4: vegetación de porte arbustivo; 5: vegetación de porte arbóreo; y 6: sustrato sobre el que se desarrolla el sistema dunar litoral.

**Figure 1.** Beach-dune system zonation and sensitiveness. Modified from Brown y McLachlan (1990), Rodríguez-Perea *et al.* (2000) y Roig-Munar y Martín-Prieto (2005). 1: seagrass meadows; 2: *P. oceanica* seagrass berms; 3: foredune and herbaceous vegetation; 4: bush vegetation; 5: trees; 6: background.

playa-duna de Baleares fue descrita por Rodríguez-Perea *et al.* (2000) y concierne a las praderas de *Posidonia oceanica* como espacio productor de sedimento, estabilizador de la playa sumergida y en la playa seca, y disipador de la energía del oleaje. La tercera y cuarta curva se establecen sobre las bermas vegetales de *Posidonia oceanica* y la propia playa emergida (Roig-Munar, 2004; Roig-Munar y Martín-Prieto, 2005), por su importancia como zona de transferencia sedimentaria entre sectores playa-duna emergido y sumergido, y como aporte de materia orgánica entre la playa y las comunidades vegetales, así como elemento amortiguador del impacto de las olas de los temporales o del *runup* sobre la playa seca. A partir de dicho esquema conceptual, pueden diferenciarse cuatro puntos críticos de gestión para la minimización de impactos y la intervención sostenible de las playas en aras de su mantenimiento y recuperación, así como por extensión, para el correcto desarrollo de sus funciones ecológicas y socioeconómicas.

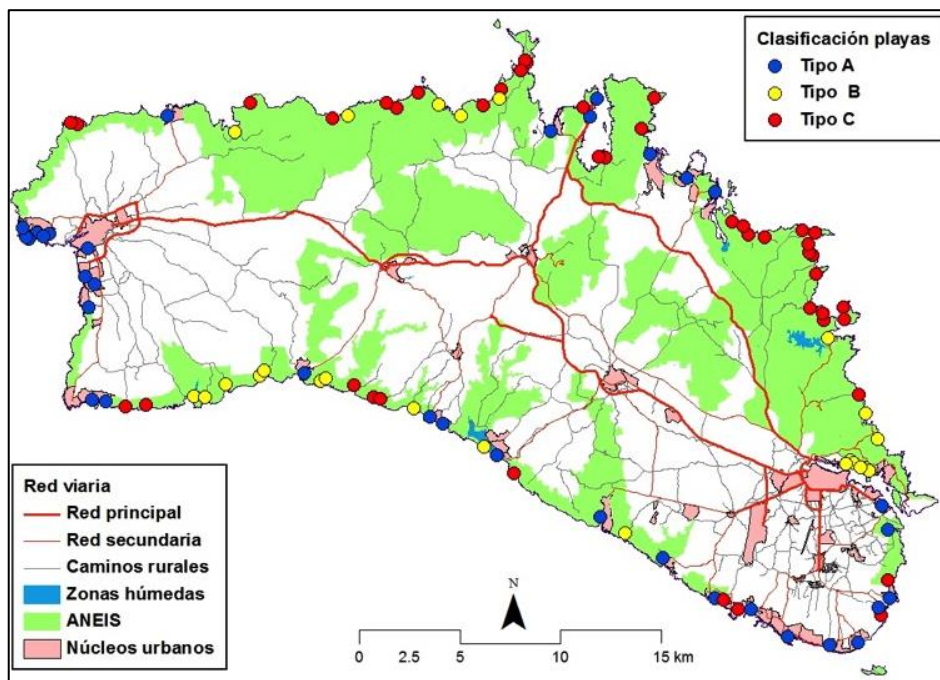
Hasta hace pocos años el perfil de los sistemas dunares en Menorca presentaban erosión y fragmentación en sus frentes con reactivación de procesos de transporte eólico, atribuible a un incremento de la presión antrópica sobre el sistema producto de una gestión incorrecta (Rita *et al.*, 1988; Servera, 1998; Cardona *et al.*, 2004; Roig-Munar, 2006). Las formas dunares presentaban signos de desestructuración, o bien su desaparición, pudiendo encontrarse vegetación del frente dunar desplazada en los cordones más interiores favoreciendo mayores superficies de playa en detrimento del cordón dunar (Martín-Prieto *et al.*, 2009, Roig-Munar, 2011). El resultado fue la aparición de formas erosivas tipo *blowout* que progresando hacia el interior del sistema dunar agravan en la degradación del sistema y de los elementos naturales de la playa para hacer frente a los temporales (Roig-Munar, 2011).

### 3 | El modelo Menorca

A partir del marco conceptual descrito en el punto anterior y aprovechando los efectos de una ley autonómica de carácter urbanístico, la Ley de Espacios Naturales (LEN) 1/91, que a partir de la figura o del instrumento de las Áreas Naturales de Especial Interés (ANEI), protegió el 43% del territorio, y eliminó la presión urbanística al 23% del litoral, en el año 2000 se inicia un plan de gestión litoral basado en criterios geomorfológicos, ambientales y sociales (Roig-Munar, 2003) que luego ha sido exportado a otras islas y dominios geográficos, así como ha inspirado algunos instrumentos normativos de conservación que están actualmente en fase de desarrollo. El modelo que surge de esta menorquina incluye cuatro elementos que se detallan en los siguientes apartados:

#### ***Clasificación de playas como herramienta***

Con el fin de gestionar correctamente las playas, el año 2000 se realizó una clasificación de playas para la aplicación de medidas de gestión diferenciadas en función de la vocación de conservación y/o los valores naturales de cada playa y su potencialidad como producto o como espacio turístico y socio-económico (Roig-Munar, 2003). Esta clasificación distinguía tres tipos de playas (Fig. 2):



**Figura 2.** Clasificación de playas para su gestión.

*Figure 2.* Beach classification for management purposes.

- Playas A: situadas en áreas urbanas o turísticas, con servicios de playa y accesibilidad rodada a pie de playa,
- Playas B: situadas en ANEIS, con altos índices de frecuentación, accesibilidad rodada relativamente cercana y sin servicios, y
- Playas C: situadas en ANEIS, con bajos índices de frecuentación y con accesibilidad exclusivamente peatonal.

No se trata tan sólo de una categorización de playas, sino que en paralelo se implementa un sistema de indicadores (Roig-Munar, 2003) que incluyen 36 variables relacionadas con su uso, su gestión y su frecuentación (Leatherman, 1997; Morgan et al., 2000) y con el estado de conservación del sistema playa-duna (Nordstrom, y Arens, 1998; Hesp, 2002). Este sistema de indicadores y su análisis estadístico (i.e. ACP o cluster) permite predecir los cambios y tendencias de cada playa y ha supuesto una herramienta de gestión capaz de diagnosticar y pronosticar el estado de conservación y evaluar las implicaciones por parte de la administración y los agentes implicados de las diferentes estrategias de gestión y limpieza de las playas.

Así en cada una de las playas se optará por diferentes modelos y técnicas de gestión que se traducirán en cambios en las actuaciones mecánicas para su limpieza, el estado de conservación del sistema, la facilidad de acceso y de disponibilidad y distancia de servicios y equipamientos, los períodos y frecuencia de la limpieza de playas y dunas, así como la temporalización de retirada de las acumulaciones de bermas vegetales o la restitución y uso de las mismas.

### **Implicación social, empresarial y política**

Algunas transformaciones del litoral tienen su razón de ser en la voluntad de los gestores por alcanzar la calidad “adecuada”, convirtiendo las playas en bienes naturales funcionales o de servicios. En Menorca las campañas de concienciación e implicación socioeconómica y política se inician a partir del año 2000 hasta 2010. Las campañas de concienciación tenían por objetivo informar a los usuarios, empresarios y responsables de la administración sobre los ecosistemas litorales, especialmente sobre su fragilidad y dar a conocer el grado de conformidad y satisfacción con algunas de las medidas adoptadas. Las principales medidas adoptadas durante las iniciativas de implicación de los diferentes agentes, era paliar los efectos erosivos en el sistema playa duna, estas fueron:

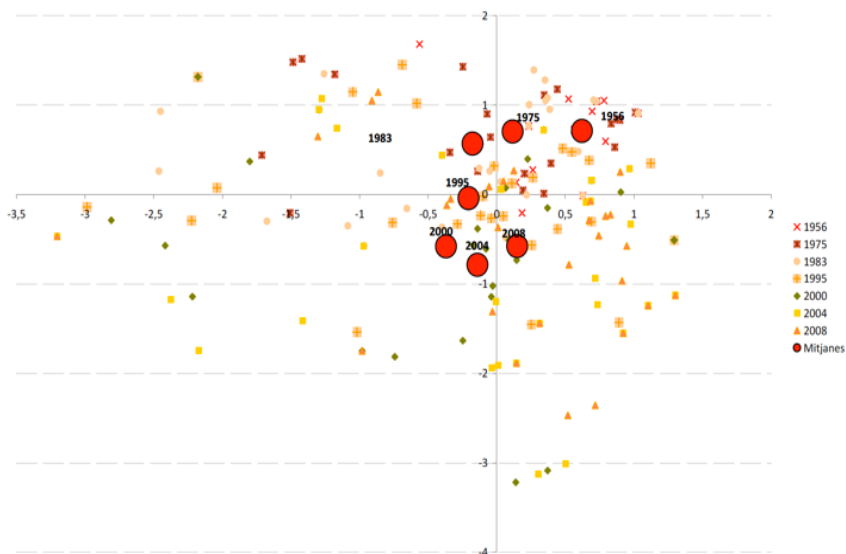
- La regulación de usos sobre las formas dunares, principalmente sobre el *foredune*, y eliminación, reducción y/o reubicación de servicios,
- El mantenimiento de las bermas vegetales de *Posidonia oceanica* acumuladas en las playas y la reducción de la limpieza mecanizada,
- La adecuación de estacionamientos fuera o alejados de las playas y rediseño de los mismos en base a la capacidad de carga de las física y ecológica de las playas.

### **Evolución espacio-temporal de los sistemas dunares**

El primer análisis de sistemas dunares fue realizado por Rita *et al.* (1988), analizando 7 sistemas y evaluando la presión a la que estaban sometidos y las tendencias observadas. Servera (1997), realizó la descripción geomorfológica de 13 sistemas playa-duna, apuntando sus causas de regresión. Cardona *et al.* (2004), analizan la evolución histórica de 9 sistemas dunares, tomando como referencia a Rita *et al.* (1988) hasta el año 2002. Roig-Munar (2011) realizó un análisis espacio-temporal (1956-2008) de 28 sistemas dunares y relacionó su evolución con las medidas de gestión. Este se basó en un ACP sobre una matriz de 15 variables donde 4 factores explicaban la evolución dunar, siendo los factores más importantes aquellos que incidían sobre la *foredune* (Hesp, 2002) y su gestión (Brown y McLachlan, 1998; Roig-Munar *et al.*, 2008; Martín-Prieto *et al.*, 2007). De este modo se obtuvieron 4 cuadrantes que permiten establecer las tendencias espacio-temporales de los sistemas dunares en función de su uso y gestión (Fig. 3). Este modelo presenta una variable clave, su frente dunar, que determina el estado de conservación en todo su conjunto (Fig. 1). Este análisis espacio-temporal constituye una herramienta para medir y controlar el estado de conservación de los sistemas mediante variables, determinando tendencias de evolución relacionadas con la gestión y la respuesta del sistema.

### **Evolución espacio temporal entre línea de costa y foredune**

Roig-Munar (2011) y Roig-Munar *et al.* (2008, 2013) analizaron la evolución de los sistemas dunares y la relación entre superficies de playas y retroceso de *foredune*, llegando a la conclusión que el problema radicaba en la pérdida de estabilidad y consiguiente incremento de movilidad hacia el sector dunar interno debido a una falta de gestión y ordenación que afectan principalmente el sector playa y *foredune*. En este sentido Mir-Gual (2014), analizó las morfologías erosivas en el frente dunar de Tirant (Norte de Menorca), concluyendo que estas reactivaban procesos dinámicos internos que no serían renaturalizados sin una adecuada gestión del frente dunar. Roig-Munar *et al.* (2007), argumentaban que la recuperación de los sistemas dunares mediante la



**Figura 3.** Evolución espacio-temporal de los sistemas dunares.

**Figure 3.** Dune systems space-time evolution.

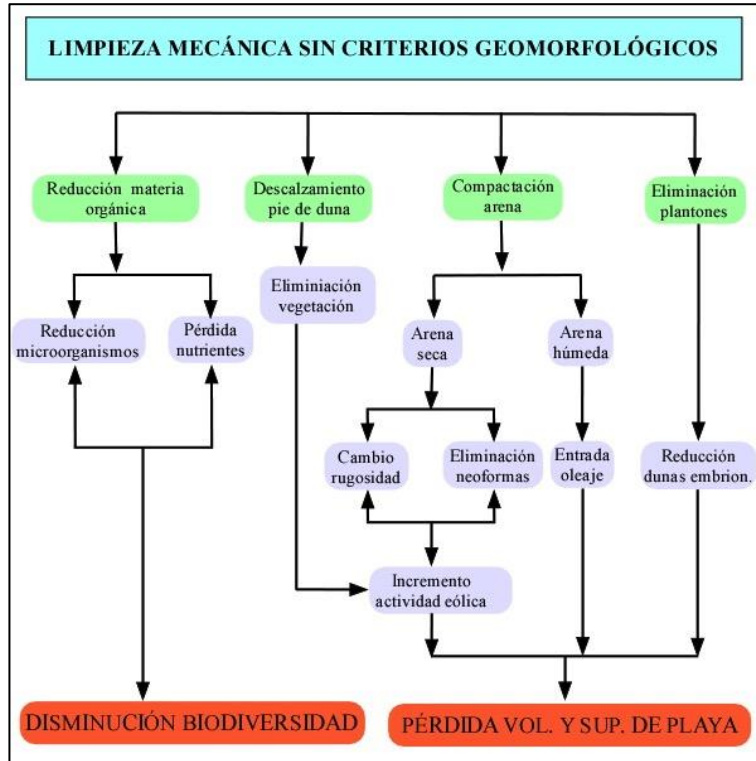
aplicación de sistemas blandos de retención requería una gestión adaptada a las necesidades de cada sistema. Con una restauración asociada a métodos y técnicas blandas poco agresivas, como son sistemas pasivos (Román-Sierra et al., 2004; Roig-Munar et al., 2012). Esta gestión requiere de una metodología práctica basada en el estudio del comportamiento espacial y temporal de las morfologías dunares (Castro, 2005; Chase y Thomas, 2006; del Valle et al., 2008; Roig-Munar et al., 2013; Martín-Prieto et al., 2016) y en base a un análisis realizado sobre fotografía aérea y la realización de una cartografía temática (Martín-Prieto et al., 2007, 2016), emular medidas de gestión blandas para renaturalizar el máximo el sistema (Roig-Munar et al., 2012).

#### 4 | Análisis de los impactos geombientales y consecuencias de los sistemas tradicionales de limpieza de playas

##### *Limpieza mecánica de playas*

Las limpieza de playas se centra básicamente en el “lavado y alisamiento extensivo” de la superficie de playa. Ambas prácticas han sido puestas de manifiesto como las principales causas de degradación de los sistemas dunares (Roig-Munar, 2002, 2003) puesto que conllevan la alteración y desaparición de fauna intersticial del substrato arenoso (Pretus et al., 2004), deterioran la vegetación de playa alterando la secuencia natural de comunidades vegetales (Carter, 1980), afectan e impiden el desarrollo de dunas embrionarias y condicionan la evolución del *foredune*. La maquinaria pesada con la que se procede a la limpieza de la playa produce una compactación del suelo (Bird, 1996) y la modificación del perfil natural de la playa, descompensando los balances sedimentarios entre playa-duna, a raíz del cambio de la rugosidad natural y la capacidad de transporte eólico (Brown y McLachlan, 1990;

**Figura 4.** Consecuencias geomorfológicas de la limpieza mecanizada sobre el sistema playa-duna.  
**Figure 4.** Beach mechanic cleaning geomorphic effects on the beach-dune system.



Rodríguez-Perea *et al.* 2000; Roig-Munar, 2004). Por tanto el resultado a lo largo del tiempo es una pérdida de volumen de sedimento y por extensión de superficie de playa seca (Fig. 4).

**Retirada de Posidonia oceanica de la playa subáerea**

Las bermas vegetales de restos de *Posidonia* son una masa vegetal de hojas y rizomas que se depositan en la zona límite de acción del *swash*, extendiéndose en dirección hacia tierra (Fig. 5). Por tanto su presencia o ausencia resulta determinante en la configuración y equilibrio del perfil de la playa-duna (Roig-Munar y Martín-Prieto, 2005). Los efectos de protección de las bermas de *Posidonia oceanica* sobre la playa han sido descritos en el Mediterráneo, evidenciando el importante papel protector de defensa de estas acumulaciones frente a los oleajes y su aportación de sedimento y materia orgánica al sistema subaéreo (Boudouresque y Meinesz, 1982; Roig-Munar y Martín-Prieto, 2005; Simeone, 2008; Boudouresque, 2010; Cantasano, 2011; Simeone y de Falco, 2012 y 2013). La retirada de estas bermas, basada en criterios de limpieza, supone una pérdida de volumen y superficie de playa debido a la forma de retirada, transporte y deposición (Fig. 6). Estas prácticas se realizan generalmente sin criterios técnicos por lo que se eliminan anualmente cientos de metros cúbicos de sedimento que se encuentra incorporado en las *banquettes* (Roig-Munar y Martín-Prieto, 2005; Simeone 2008, Simeone y de Falco 2013), alterando negativamente el balance sedimentario del sistema. El efecto de la maquinaria además





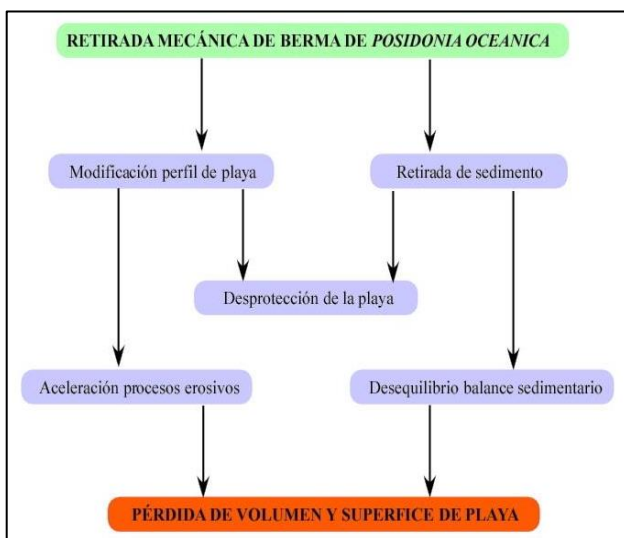
**Figura 5.** Berma de *P. oceanica* depositada en la línea de costa (izquierda) y estratos de hojas entre niveles de arena (derecha) en Son Saura del Sud (Menorca).

**Figure 5.** *P. oceanica* seagrass berm along the coastline (left) and interdigitised between sandy levels (right) at Son Saura del Sud (Menorca).

puede tener consecuencias negativas sobre la playa, como la modificación del perfil o la compactación de la arena. Esta compactación cambia la rugosidad natural y elimina morfologías efímeras de playa, acrecentando el ángulo de incidencia del viento, favoreciendo la entrada de oleaje e incrementando los procesos erosivos (Bouderesque y Meinesz, 1982; Brown y McLachlan, 1990; Simeone, 2008). La eliminación de la berma, puede alterar los procesos de *runup* sobre la playa, aumentando su fragilidad en el caso de temporales (Roig-Munar y Martín-Prieto, 2005; de Falco *et al.*, 2008).

### **Aplicación de técnicas blandas de gestión en los sistemas dunares**

Roig-Munar *et al* (2009) realizaron una valoración geoambiental y económica de gestiones blandas y pasivas aplicadas en los sistemas dunares Menorca. Se trata de técnicas de recuperación más lentas que requieren adecuarse a las características



**Figura 6.** Consecuencias geomorfológicas de la retirada sistemática de las bermas de *P. oceanica*.

**Figure 6.** Effects of the *P. oceanica* seagrass berm retrieval from beach face.

de cada unidad de gestión. Estos métodos son aplicados en espacios donde se conserva un mínimo de calidad geoambiental y morfológica del sistema playa-duna. Los resultados de las técnicas son valorados económicamente y ambientalmente.

### **Restricciones en la limpieza mecánica de la playa**

Las restricciones en la limpieza mecánica, tanto en periodicidad, como en áreas de actuación, son un factor importante para la restauración de los primeros cordones dunares. Los resultados obtenidos a lo largo de cinco años en cuatro sistemas playa-duna han sido la recuperación de 12.207 m<sup>2</sup> con una potencia media de 0,36 m de morfologías y vegetación dunar pionera, equivalente a un volumen de 879 m<sup>3</sup> de morfologías recuperadas. El impacto ambiental de estas actuaciones es nulo y su coste económico anual ronda los 0,05 €/m<sup>3</sup> recuperado (Tabla 1). La restricción de una limpieza mecánica se realiza tan solo en períodos estivales (mayo a setiembre), y centrada en las áreas de playa emergida y en áreas de máximo uso antrópico, lejos de las zonas de pie de foredune para favorecer el mantenimiento de morfologías dunares efímeras y vegetación asociada, a la vez que permite recuperar morfologías dunares hacia la zona de playa mediante el adelanto de los cordones disuasorios. Estas actuaciones tan solo estaban previstas en playas de tipología A (Fig. 2).

### **Trampas de interferencia eólica**

Se trata de la instalación de barreras de diferente porosidad y altura con el objetivo de interferir la velocidad del viento y acumular el sedimento que transporta. Se optó por el uso de materiales vegetales (cañizo y/o espartina) en las discontinuidades morfológicas delanteras y en los canales de deflación y morfologías *blowout*. Los mejores resultados se obtienen con el uso de porosidades del 50% y alturas de 1-1,5 m, generando una sombra de deposición en torno a 5 y 10 veces la altura de la trampa. Los costes unitarios anuales son de 0,51 €/ m<sup>3</sup> y el impacto ambiental es nulo (Tabla 1).

### **Utilización de cordones disuasorios**

La colocación de estacas unidas mediante cuerdas para impedir el paso de usuarios hacia el interior de los sistemas dunares permite una recuperación lenta y progresiva de morfologías y vegetación asociada. La técnica favorece la recolonización vegetal de senderos sobre el sistema. Las ganancias volumétricas no superan espesores de 0,30 m pero favorecen de forma acelerada y progresiva la colonización vegetal y la creación de morfologías asociadas. Los costes anuales son bajos, entorno el

<b>Sistema de recuperación</b>	<b>Coste anual</b>	<b>Impacto</b>
Restricciones en la limpieza mecánica de la playa	0,05 €/ m <sup>3</sup>	Nulo
Uso de bermas de <i>Posidonia oceanica</i> en la playa	28 €/ m <sup>3</sup>	Nulo
Uso de restos de <i>Posidonia oceanica</i> como barrera eólica	0,19 €/ m <sup>3</sup>	Nulo
Uso de restos de <i>Posidonia oceanica</i> en playas urbanas	95,06 €/ m <sup>3</sup>	Muy bajo
Utilización de cordones disuasorios del paso en dunas	0,25 €/ m <sup>3</sup>	Nulo
Trampas de interferencia eólica	0,51 €/ m <sup>3</sup>	Nulo

**Tabla 1.** Comparación de las valoraciones geoambientales y económicas de los diversos sistemas de recuperación. Fuente: Roig-Munar *et al.* (2009).

**Table 1.** Monetary comparison between different beach-dune system management options. After Roig\_Munar *et al.* (2009).

0,25 €/m<sup>3</sup> y el impacto ambiental asociado es nulo (Tabla 1). Estos cordones pueden ser adelantados de forma puntual una vez se recupera el sistema dunar, tareas que han de ir asociadas a la sectorialización de las tareas de limpieza mecánica que permitan la recuperación de los frentes de *foredune* en la parte alta de playa.

### **Uso de restos de posidonia**

La acumulación de restos de posidonia retirados mecánicamente sobre el sistema sirven como técnica de interferencia eólica (Roig Munar et al., 2004). Se han usado como pantallas eólicas en discontinuidades dunares y en canales de deflación, aportando al sistema materia orgánica y sedimento intercalado, favoreciendo la rápida colonización vegetal y actuando como pantalla de interferencia eólica. El coste de la técnica equivale a 0,19 €/ m<sup>3</sup> sin impacto ambiental asociado (Tabla 1).

### **Uso de restos de posidonia en la playa emergida**

La retirada de bermas de *Posidonia oceanica* genera importantes pérdidas de sedimento (Fig. 6) que son transportados y depositados fuera del ambiente playa-duna, produciéndose así su pérdida sedimentaria definitiva (Roig-Munar y Martín-Prieto, 2005). Nivelar el perfil natural de playa sobre las bermas vegetales recubriéndolas con arena, permite la ganancia temporal de superficie de playa y acelera de forma inversa los procesos naturales de adosamiento y sedimentación de barras sumergidas sobre bermas. El impacto ambiental asociado es prácticamente nulo y su coste unitario es de 28 €/m<sup>3</sup> recuperado (Tabla 1).

### **Retorno de restos de Posidonia**

Los restos vegetales retirados de *Posidonia oceanica* pueden ser reservados mediante acopios para su posterior retorno a la zona de *swash*. La devolución de los restos acelera de forma artificial la creación de bermas naturales de acumulación y la protección natural de playa, aportando el sedimento intercalado en su retirada. El coste anual por m<sup>3</sup> es elevado, 95,06 €, y el impacto ambiental asociado es puntual, estando asociado al impacto de su retirada y posible desprotección de la playa emergida (Tabla 1).

### **Una gestión con criterios de zonación geomorfológica**

A partir de la Tabla 1 pueden definirse las técnicas a aplicar en cada sistema playa-duna teniendo en cuenta los diferentes sectores y grados de sensibilidad geoambiental definidos en la Figura 1, así como las diferentes tipologías de playas representadas en la Figura 2 y los impactos y beneficios geoambientales, a corto y medio plazo, descritos en este trabajo. Estas técnicas de gestión se basan en Roig-Munar (2002 y 2011) y su objetivo es la paliación basada en la temporada de uso y aprovechamiento de playas.

En la Figura 7 se representan los sectores playa, *foredune* y sistema dunar, coincidiendo con los sectores sensibles a la gestión y uso, descritas en la Figura 2 y las medidas y técnicas de gestión de la Tabla 1. Inicialmente las gestiones amparadas en la limpieza mecanizada y retirada de *Posidonia oceanica* habían sido definidas solo para realizarlas en playas de tipología A y en temporada estival (de mayo a setiembre), mientras que el resto de técnicas de intervención, como son trampas y delimitación del perímetro de los sistemas han sido utilizadas en todas las categorías de playa (A, B y C). Observamos en la Tabla 2 que algunas de las gestiones mecánicas que generan impactos continuos sobre el sistema playa y los frentes dunares (Fig. 4 y 6), hoy por

Estrategia de gestión por tipología de playa	PLAYA			FOREDUNE			SISTEMA DUNAR		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Retirada de <i>Posidonia</i>	👍	👎							
Retorno de <i>Posidonia</i> a la playa	👍	👎							
Restos de <i>Posidonia</i> para restaurar dunas				👍	👍		👍		
Cribado de playas	👍	👎							
Cordones disuasorios				👍	👍	👍	👍	👍	👍
Avance acordonamientos				👍	👍	👍			
Trampas de interferencia			👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍

**Figura 7.** Aplicación de técnicas de gestión por sectores de playa, temporada y tipología de playas y dunas. 👍: técnicas recomendadas. 👎: técnicas no recomendadas pero actualmente utilizadas en estos sectores.

**Figure 7.** Beach management practices and beach-dune system geomorphic zonation and beach type. 👍: Commended techniques. 👎: Not commended techniques.

Hoy son aplicadas, hecho que genera impactos por pérdidas de sedimento y por modificaciones del perfil playa-duna, así como una confinación de las morfologías dunares recuperadas sin posibilidad de avance de los cordones disuasorios para la recuperación del frente dunar.

## 5 | Evolución de los sistemas playa-duna mediante medidas de gestión sostenible

Se analiza la evolución de tres sistemas dunares de Es Grau, s'Olla y Tirant (Fig. 2), sometidos a diferentes gestiones mencionadas en el apartado anterior (Tabla 1), mediante las fotografías aéreas de 2002 a 2015 y se relacionan con los métodos y efectos de una gestión sostenible del sistema playa-duna, con especial incidencia en los sectores 2, 3 y 4 de las curvas de sensibilidad geoambiental (Fig. 1). Estos sistemas presentan similitudes en las formas de erosión asociadas a las prácticas de gestión.

Sistema	1988	1997	2002	2006	2008	2010	2012	2015	2017
Es Grau	Regular	4	2	2	2	1	1	1	1
S'olla	Malo	5	5	4	3	3	2	2	2
Tirant	Regular	4	4	4	4	3	2	5	5

**Tabla 2.** Valoración de los sistemas dunares dalanteros basado en la clasificación morfoecológica de Hesp (2002) y en la clasificación utilizada por Rita *et al.* (1988).

**Table 2.** Dune systems evaluation according Hesp (2002) morphological and ecological classification and according with Rita *et al.* (1988).



**Figura 8.** Estabilización natural del sistema dunar delantero por la restricción de actuaciones de limpieza mecanizada. Playas des Grau (izquierda) y Son Bou (derecha).

**Figure 8.** *Foredune natural stabilization associated to the reduction of mechanical activities. Beaches of Es Grau (left) and Son Bou (right).*

Se ha evaluado el estado ambiental de sus cordones dunares delanteros en base a la clasificación de Hesp (2002), que clasifica el estado ambiental de *foredunes* en 5 estadios, siendo el estadio 1 óptimo y el 5 degenerativo, y su relación con las medidas de gestión aplicadas (Fig. 1).

Observamos en la Tabla 2 que desde el 2002 se aprecia cierta mejora en la recuperación lenta y progresiva del frente dunar de los tres sistemas que ha sido gestionados en base a criterios geomorfológicos, excepto en el caso de Tirant, que en el año 2002 revierte la tendencia de recuperación hacia una tendencia de erosión grave, pasando a un estadio 5, debido a la falta de aplicación de medidas de gestión sobre un sistema muy dinámico.

### **Sistema playa-duna de es Grau**

La playa forma parte de un sistema dunar bien desarrollado y que presenta un buen estado de conservación a lo largo de todo su cordón delantero. Este sistema dunar forma una barra de arena vegetada que separa el mar de la zona húmeda de s'Albufera d'es Grau, con un arenal que se extiende hasta 500 m hacia el interior. Se trata de un sistema dunar restinga, de tipología B, donde hasta la década de los 2000 las gestiones realizadas eran mecánicas y sin ningún tipo de regulación de usos (Fig. 6).

Según Servera (1997), las morfologías dunares no tienen capacidad de respuesta a las desestabilizaciones observadas. Sin embargo, la gestión realizada con la instalación de cordones disuasorios y la restricción de la limpieza mecánica ha invertido esa tendencia regresiva. El resultado ha sido un incremento de la superficie vegetada, además de volumen de la *foredune*.

Podemos observar en la Figura 8, como el sistema dunar delantero se ha estabilizado con recolonización natural de vegetación psamófila y ganancias sedimentarias sin necesidad de intervenciones mediante trampas barrera. En la Tabla 2 se puede seguir la evolución del sistema dunar delantero basado en los criterios de Hesp (2002). Partíamos de un estadio 4 en el año 1997 a un estadio 2 entre 2002 y 2006 y finalmente a un estadio 1 en el año 2017 (Fig. 9).

**Figura 9.**  
Evolución espacial y temporal del sistema playa-duna de Es Grau.

**Figure 9.**  
*Spatial and temporal evolution of Es Grau beach-dune system*



### **Sistema playa-duna de s'Olla**

Se trata de un sistema dunar de tipología A, encajado entre dos relieves estructurales que condicionan la dinámica eólica de marcada componente N. La destrucción de la primera línea de dunas es determinante a la hora de valorar el comportamiento geomorfológico del sistema. La sinergia entre la desaparición de la *foredune* y la disminución de la superficie vegetada hace que el sistema sea muy activo desde el punto de vista sedimentario, incrementando la vulnerabilidad erosiva de la playa, la cual se manifiesta en el desarrollo tierra adentro de dos importantes canales de deflación de grandes dimensiones (Fig. 10).

Hasta la década de los años 2000, las gestiones realizadas eran fundamentalmente mecánicas y sin ningún tipo de regulación de usos sobre el sistema dunar (Roig-Munar *et al.*, 2004). La gestión realizada en este sistema obedecía a la restauración urgente debido a la fragmentación y el carácter regresivo del sistema en todo su conjunto, pero fundamentalmente en la *foredune*, la cual entre 1956 y 2012 retrocedió un promedio de 33.48 m, con una media anual de -0.60 m/a (Mir *et al.*, 2015).

La gestión se basó en la instalación de cordones disuasorios y la restricción de la limpieza mecánica a lo largo de toda la playa emergida y la restricción indiscriminada de retirada de *Posidonia oceanica*. Por lo que respecta al sistema dunar delantero, este fue gestionado mediante cordones disuasorios, trampas sedimentarias (tanto espartina como cañizo), aportación de *Posidonia oceanica* y siembra de *Ammophila arenaria*. El resultado (Fig. 10) se puede observar en la recuperación del frente dunar





**Figura 10.** Acciones de gestión y de recuperación en el sistema dunar de s'Olla.  
**Figure 10.** Management and restoration actions at s'Olla dune system.

del año 2006, con una *foredune* incipiente (Fig. 11). A medida que se aplican las técnicas de gestión blandas en el sistema, éste se estabiliza hasta el año 2015 con un incremento de la superficie vegetada, revertiendo la situación negativa inicial a una de positiva y registrándose un crecimiento de la *foredune* de 0,96 m de potencia, con una media anual de 0,02 m/a y una estabilización de los procesos erosivos de su frente dunar (Mir-Gual *et al.*, 2015). Actualmente (2017) las gestiones de cribado se realizan en toda la extensión de playa alta, no permitiendo la regeneración de morfologías incipientes en la playa alta e impidiendo la generación de morfologías que permitan adelantar los cordones disuasorios.

En la Tabla 2 se puede seguir la evolución del sistema dunar delantero basado en los criterios de Hesp (2002). Este sistema se encontraba inicialmente en un estadio 5 de máxima degradación y que ha ido evolucionando a un estadio 1 en 2017, favorecido por la aplicación de las medidas de gestión sostenibles en cada una de los puntos sensibles del sistema (Fig. 1).

### **Sistema playa-duna de Tirant**

Se trata de un sistema dunar de tipología B, encajado entre dos relieves y fuertemente condicionado por la dinámica eólica de componente N. Las morfologías dunares delanteras presentaban un estado de degradación importante, al igual que, condicionada por una extracción masiva de áridos en el sector interno del sistema dunar hasta mediados de la década de 1990 (Servera, 1997). Hasta la década de los 2000 las gestiones realizadas eran fundamentalmente mecánicas y sin ningún tipo de regulación de usos (Roig-Munar *et al.*, 2004).

Por lo que respecta al sistema dunar delantero, este ha presentado diferentes grados de alteración en las últimas décadas, siendo objeto de un plan de gestión que redujo su limpieza mecánica de playa aérea y restringió la retirada de *Posidonia oceanica*, hecho que permitió de forma temporal la recuperación de las morfologías altas de playa en su contacto con *las foredune*. Así mismo el sistema fue objeto de un plan de restauración mediante trampas de interferencia (espartina y cañizo), el uso de bermas retiradas de *posidonia* dentro de canales de deflación y la instalación de vallados para impedir el paso de usuarios dentro del sistema. Estas gestiones fueron



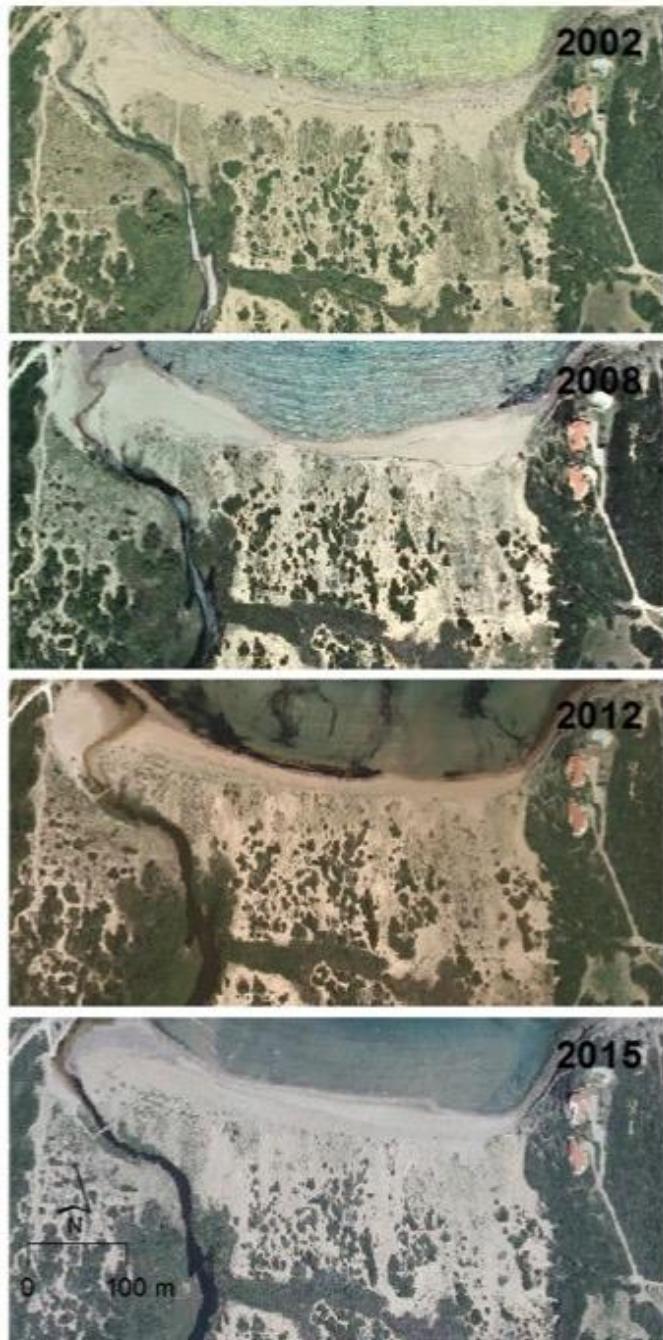


**Figura 11.** Evolución espacial y temporal del sistema playa-duna de s'Olla.  
**Figure 11.** Spatial and temporal evolution of s'Olla beach-dune system

desarrolladas hasta el año 2012, especialmente sobre sus morfologías erosivas *blowout*, las cuales fueron prácticamente selladas con vegetación. El sistema dunar delantero fue parcialmente recuperado mediante la aplicación de estas gestiones sos-

**Figura 12.**  
Evolución espacial y temporal del sistema playa-duna de Tirant.

**Figure 12.**  
*Spatial and temporal evolution of Tirant beach-dune system*



tenibles, que posteriormente dejaron de aplicarse amparadas en la crisis económica. Esta falta de continuidad en la gestión del frente dunar delantero ha facilitado su reactivación mediante las morfologías *blowouts* y la creación de nuevos canales de

deflación dirección con dirección N-S a partir del año 2010 (Fig. 12), con una importante fragmentación de su frente dunar, multiplicando por cinco su superficie (Garriga-Sintes *et al.*, 2017). Se pone de manifiesto en la Tabla 2 la evolución seguida por el sistema dunar delantero basado en los criterios de Hesp (2002) y como este sistema se encontraba inicialmente en un estadio 4 hasta el año 2008. Mediante la implantación de medidas de gestión se pasó a un estadio 3 y 2 para acabar en una dinámica erosiva y un estadio 5 en 2017.

## 5 | Conclusiones

El trabajo contribuye a demostrar que un cambio en el concepto de gestión, a partir de un marco conceptual que descansa en criterios geomórficos y ecológicos, así como en una apuesta por el uso de técnicas blandas y con el necesario soporte social para su implementación, puede invertir las tendencias erosivas de un sistema playa-duna sin comprometer su uso y explotación, procurando la recuperación, restauración y mantenimiento de las zonas dañadas que no sean capaces de restaurarse por si solas debido a la falta de mecanismos naturales eficaces.

La aplicación de criterios geomorfológicos es de vital importancia en la gestión de sistemas dunares, y su conservación dependerá del uso racional del sistema. Para ello, además de ordenar y restringir en la medida de lo posible una frecuentación excesiva, bien mediante cordones disuasorios o reordenación de aparcamientos, debe procurarse la instalación de barreras de interferencia eólica que sustituyan temporalmente la vegetación y permitan reiniciar la retención y acumulación de sedimento.

Conocer la evolución espacio-temporal, la dinámica eólica y sedimentaria del sistema, y los impactos que generan las gestiones y usos es necesario para conseguir el éxito de la acción de gestión. Confiar en la capacidad de regeneración vegetal, apoyarla e incluso acelerarla siguiendo sus patrones naturales es la estrategia más adecuada para recuperar *blowouts* y canales de deflación, que posteriormente serán revegetados de forma natural, una vez los procesos erosivos hayan desaparecido. En los tres casos expuestos se ha revertido la tendencia erosiva del sistema dunar y el avance de la playa en detrimento del sistema dunar, recuperando y estabilizando las morfologías dunares delanteras (Roig-Munar, 2011).

A pesar de lo expuesto a lo largo de este trabajo este modelo, basado en criterios geomorfológicos y de capacidad de carga ha dejado de ser aplicado en los últimos años, con la retirada mecánica de *Posidonia oceanica* y limpiezas mecánicas en playas de tipología B, sin presupuestos para el mantenimiento de las medidas de gestión para retener sedimento en muchos sistemas dunares, la instalación de servicios en playas de tipología B, y con la ampliación de algunos estacionamientos para dar más cabida a la demanda. Esta reversión del modelo a corto plazo puede desencadenar procesos erosivos en sistemas que fueron restaurados y dar carta de naturaleza a hábitos de gestión contraproducentes para el sistema.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Dr. Lluís Gómez-Pujol las sugerencias y comentarios críticos a propósito de la versión preliminar del presente trabajo.

## Bibliografía

- Arens, S.M. & Wiersma, J., (1994): The Dutch foredunes: Inventory and classification. *J. Coastal Res.*, 10 (1): 189-202.
- Ariza E. (2011): An analysis of beach management framework in Spain. Study case: the Catalan coast *Journal of Coastal Conservation*, 15: 445-455.
- Ariza, E., Jiménez, J.A. y Sardá, R. (2008): Seasonal evolution of beach waste and litter during the bathing season on the Catalan coast. *Waste Management*, 28(12): 2604-2613.
- Balaguer P, Diedrich A, Sardá R, Fuster M, Cañellas B. y Tintoré J. (2011): Spatial analysis of recreational boating as a first key step for marine spatial planning in Mallorca (Balearic Islands, Spain). *Ocean & Coastal Management*, 54: 241-249.
- Bird, E. (1986): *Beach management*. Chichester., Wiley. 218 pp.
- Brown, A. C. y McLachlan, A. M. (1990): *Ecology of sandy shores*. Amsterdam, Elsevier.
- Cardona, X., Carreras, D., Fraga, P., Roig-Munar, F.X. y Estaún, I. (2004): Avaluació de l'estat dels sistemes dunars de Menorca 2002. En: Pons, G.X (ed.). *IV Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*: 307-308. Palma de Mallorca, Soc. Hist. Nat. Balears.
- Carter, R.W. (1980): Human activities and geomorphic processes: The example of recreation pressure on the Northern Ireland coast. *Z. Geomorph. N. F.*, 34: 155-164.
- Carter, R.W. (1988): *Coastal environments, an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. London, Academic Press. 617 pp.
- Hesp P.A. (1988): Morphology, dynamics and integral stratification of some established foredunes in southeast Australia. *Journal of Sedimentology and Geology*, 55: 17-41.
- Hesp, P.A. (2002): Fore dunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48: 245-268.
- Jimenez, J.A., Sancho-Garcia, A., Bosom, E., Valdemoro, H.I. y Guillen, J., (2012): Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008. *Geomorphology*, 143, 24-33.
- Leatherman, S.P. (1997): Beach rating: a methodological approach. *Journal for Coastal Research*, 3(1): 253-8.
- Martín Prieto, J. A., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Mir Gual, M., Pons Buades, G. X. y Gelabert B. (2016): La erosión histórica de la playa de sa Ràpita (S. Mallorca). *Investigaciones Geográficas*, 66: 135-154.
- Martín-Prieto, J.A., Roig-Munar, F.X., Pons, G.X. y Rodríguez-Perea, A. (2009): La foredune como elemento estabilizador en el sistema playa-duna. En: Morales, J.A., Cantado, M., Rodríguez, A. y Delgado I. (eds.). *Nuevas contribuciones sobre geomorfología litoral*: 45-48. Huelva, Universidad de Huelva.
- Michael, M., Carlos Pereira Da, S. y Cooper, J.A.G., (2002): A comparative study of the perception and value of beaches in rural Ireland and Portugal: implications for coastal zone management. *J. Coast. Res.*, 18 (1): 14-24.
- Morgan, R., Gatell, E., Junyent, R., Micallef, A., Özhan, E.I. y Williams, A.T. (2000): An improved user-based beach climate index. *Journal of Coastal Conservation*, 6: 41-50.
- Nordstrom, K.F. y Arens, S.M. (1998): The role of human actions in evolution management of foredunes in The Netherlands and New Jersey, USA. *Journal of Coastal Conservation*, 4: 169-180.
- Nordstrom, K.F., (2008): *Beach and dune restoration*. Cambridge, Cambridge University Press, 187 p.
- Ojeda, J., Vallejo, I., Hernández, L. y Alvarez, J. (2007): Fotogrametría digital y LIDAR como Fuentes de información en geomorfología litoral (marismas mareales y sistemas dunares): el potencial de su análisis espacial a través de SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 44, 215-233.
- Pintó, J., Martí, C y Fragüell, R.M. (2014): Assessing current conditions of coastal dune systems of Mediterranean developed shores. *Journal of Coastal Research*; 30(4): 832-842.

- Pretus, J.L., Obrador, B., Canals, A. y Roig-Munar, F.X. (2004): Caracterització del medi intersticial de les platges de Menorca i intent de diagnosi del seu valor indicador de la qualitat ambiental. En: Pons, G.X (ed.), *IV Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*. Palma, Soc. Hist. Nat. Balears.
- Psuty, N.P. (1988): Sediment budget and dune/beach interaction. *J. Coastal Res*, 3: 1-4
- Rita, J., Rodríguez, A. y Tébar, F. (1988): *Sistemas dunares de Menorca. Valoración Geoambiental y estado de conservación*. Document inèdit. Menorca, IME, 109 pp.
- Rodríguez-Perea, A., Servera, J. y Martín-Prieto, J.A. (2000): *Alternatives a la dependència de les platges de les Balears de la regeneració artificial: Informe METADONA*. Palma, Universitat de les Illes Balears. 110 pp.
- Roig-Munar, F. X. (2001): *Aplicació de criteris geomorfològics en la gestió dels sistemes litorals arenosos de les Illes Balears*. Tesi doctoral. Departament de Ciències de la terra. Palma, Universitat de les Illes Balears, 141 pp
- Roig-Munar, F., Comas, E., Martín-Prieto, J. y Rodríguez-Perea, A. (2008): Seis casos de estudio de análisis de la evolución temporal de 28 sistemas playa-duna de Menorca (1956-2004). En: Pons, G.X. (ed.), *V Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències y resums*: 353-356. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Roig-Munar, F.X, Rodríguez-Perea, A. y Martín-Prieto, J.A. (2004): Influencia antrópica en la alteración del sistema playa-duna de Son Bou (Menorca). En: Benito, G. y Díez-Herrero, A. (eds.), *Contribuciones Recientes sobre Geomorfología*: 375-384. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC.
- Roig-Munar, F.X. (2002): El Pla de neteja integral del litoral de Menorca. Aspectes geomòrfics, ambientals i socials. *Boll. Geografia Aplicada.*, 3-4: 51-64.
- Roig-Munar, F.X. (2003): Identificación de variables útiles para la clasificación y gestión de calas y playas. El caso de la isla de Menorca (I. Balears). *Boletín de la A.G.E.*, 35: 175-190.
- Roig-Munar, F.X. (2004): Análisis y consecuencias de la modificación artificial del perfil playa-duna por el efecto mecánico de su limpieza. *Investigaciones geográficas*, 33: 87-103.
- Roig-Munar, F.X. y Martín-Prieto, J.A. 2005. Efectos de la retirada de bermas vegetales de *Posidonia oceanica* sobre playas de las islas Baleares: consecuencias de la presión turística. *Investigaciones Geográficas de Mexico*, 57: 39-52.
- Roig-Munar, F.X., Comas Lamarca, E., Rodríguez-Perea, A. y Martín Prieto, J.A (2005): Management of Beaches on the Island of Menorca (Balearic Islands): The Tension between Tourism and Conservation. *Journal Coastal Research*, SI 49: 89-93.
- Roig-Munar, F.X., Martín, J.A., Rodríguez-Perea, A., Mir-Gual, M. y Gelabert, B. (2013): Alteraciones asociadas a factores antrópicos (1956-2007) en los sistemas playa-duna de Menorca. *Geotemas*; 13: 119-122.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Comas Lamarca, E. y Rodríguez-Perea, A. (2006). Space-time analysis (1956-2004) of human use and management of the beach dune systems of Menorca (Balearic I.). *Journal of Coastal Research*, SI 48: 107-111.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X. y Mir-Gual, M. (2012): Alternativas ambientales en la gestión de playas y sistemas dunares en las Islas Baleares. En: Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á., Mir-Gual, M. y Cabrera, J.A. (eds.), *La gestión integrada de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa*: Mon. Soc. Hist. Nat. Balears. 19: 77-91. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea A., Martín-Prieto J.A. y Pons G.X. (2009): Soft Management of Beach-Dune Systems as a Tool for their Sustainability. *Journal Coastal Research*, SI 56: 1284-1288.
- Sardá, R., Conde, R., Casadesús, M., Sánchez, A., Lozoya, J.P., Pintó, J. y Jiménez, J.A. (2013): Erosión en las playas y gestión desintegrada: la problemática actual de la playa de s'Abanell. En: Sardá, R., Pintó, J., Valls, J.F. (eds.) *Hacia un nuevo modelo integral de gestión de playas*: 51-72. Girona, Documenta Universitaria
- Servera, J. (1997): *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesi doctoral. Departament de Ciències de la Terra. Palma, Universitat de les Illes Balears. 2 vol. 908 pp. y atlas 138 pp.

- Short, A.D. y Hesp, P.A. (1982): Wave, beach and dune interactions in South Eastern Australia. *Marine Geology*, 48: 259–284.
- Silva, C.P.D. (2006): Landscape perception and coastal management: a methodology to encourage public participation. *Journal of Coastal Research*, SI39. 930–934.

# Actividad humana en el litoral de Menorca durante la Prehistoria

Montserrat Anglada<sup>1</sup>, Antoni Ferrer<sup>2</sup> y Damià Ramis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Associació Arqueologia i Patrimoni, Ciutadella.

<sup>2</sup> Institut Menorquí d'Estudis, IME, Maó

## RESUMEN

Durante la prehistoria de las Baleares, diferentes manifestaciones humanas se han ido sucediendo en su litoral (de hábitat pero también de carácter funerario y/o ritual), como resultado de las actividades socio-económicas desarrolladas por los grupos humanos que habitaron las islas durante más de dos mil años (2300-123 a.C.). Este trabajo presenta una síntesis de los tipos de yacimientos arqueológicos localizados y documentados en la isla de Menorca, relacionándolos con los datos existentes sobre el aprovechamiento económico de recursos costeros y con las evidencias de relaciones marítimas e intercambio con otras regiones del Mediterráneo Occidental.

**Palabras clave:** prehistoria, islas Baleares, edad del bronce, edad del hierro, yacimientos prehistóricos costeros, recursos costeros, conexiones marítimas.

## ABSTRACT

During the prehistory of the Balearic Islands, different human manifestations (habitat but also funerary and ritual) have taken place on the coast, as a result of the socio-economic activities carried out by the groups that inhabited the islands during more than two thousand years (2300-123 BC). This paper presents a synthesis of the main types of archaeological sites located and documented in the island of Menorca, relating them to existing data on the economic exploitation of coastal resources and to the evidence of maritime relations and exchange with other regions of the Western Mediterranean.

**Keywords:** Prehistory, Balearic islands, Bronze Age, Iron Age, Pretalayotic, Talayotic, prehistoric coastal sites, coastal resources, maritime connections.

## 1 | Introducción

La isla de Menorca, con una extensión de 701 km, es la más oriental de las islas Baleares. Junto con Mallorca constituye el conjunto conocido como Gimnesias, con una prehistoria bien diferenciada de la Pitiusas, formadas por Ibiza y Formentera. Menorca se encuentra situada en el centro del Mediterráneo Occidental, a una distancia de unos 35 km de Mallorca, 200 km de la Península Ibérica, 320 km del norte de África, 350 km de Cerdeña y 370 km de la desembocadura del Ródano. Es, por tanto, la isla Mediterránea más alejada de las costas continentales.

Geológicamente, la isla se divide en dos partes bien diferenciadas. La mitad sur está formada por calcarenitas miocenas, muy porosas, que permiten que el agua de lluvia se filtre fácilmente hacia el subsuelo. La parte norte está formada por materiales geológicos más antiguos, paleozoicos, triásicos y jurásicos, que retienen en superficie el agua de lluvia, creando gran cantidad de zonas húmedas estacionales. Muchas de estas zonas no fueron aptas para la agricultura y la ganadería hasta que fueron drenadas a partir de la Época Moderna. Esta división geológica influyó de modo decisivo en la distribución de los asentamientos humanos prehistóricos, concentrándose la mayoría en la mitad sur de la isla.

El primer poblamiento humano de Menorca, como el del resto de las Baleares, es aún más tardío que el del resto de islas del Mediterráneo, ya que las evidencias más



antiguas de presencia humana no pueden situarse más allá del III milenio cal BC. (López Pons, 2000).

Las primeras oleadas de colonos que llegan a Menorca tienen muchos rasgos en común con aquellos que se instalan en Mallorca y, tal y como se ha visto a través de recientes investigaciones (Sureda *et al.*, 2017) también presentan algunos rasgos en común con los primeros habitantes de las Pitiusas. Pese a todo, la insularidad propiciará un proceso de divergencia cultural, que distanciará la cultura de las Gimnesias y las Pitiusas, a lo largo del segundo milenio cal BC. Las comunidades de Mallorca y Menorca, en cambio, continuarán compartiendo la mayor parte de los rasgos culturales hasta inicios del bronce final. A partir de éste momento se detectan fenómenos arquitectónicos y rituales correspondientes a una mayor complejidad social. Aunque se utiliza el mismo término –talayótico– para referirse a las manifestaciones sociales de ambas islas, a partir de este momento se irá formando en cada una de ellas una identidad cultural propia, que se acentuará en las fases finales de la Edad del Hierro.

A pesar de que las comunidades humanas que habitaron Menorca durante la prehistoria presentaban una economía escasamente vinculada al medio marino, utilizaron la zona litoral en diferentes momentos, ya sea como lugar de hábitat, para ubicar sus espacios rituales y funerarios, como vía de entrada de materiales de importación o para extraer materias primas de forma puntual.

## 2 | Esquema general de la prehistoria de Menorca

Actualmente existen diferentes esquemas sobre la periodización de la prehistoria de las Gimnesias. En este trabajo se seguirá un planteamiento basado a grandes rasgos en el modelo propuesto por Rosselló-Bordoy (1972) para Mallorca, con dos grandes periodos, Pretalayótico y Talayótico, divididos a su vez en diferentes fases cada uno de ellos. Este esquema, basado en periodos amplios, permite enfatizar el importante grado de continuidad cultural a lo largo de la prehistoria del archipiélago balear. Es necesario aclarar que el planteamiento original sitúa el límite entre Pretalayótico y Talayótico hacia mediados del II milenio cal BC, a partir de la calibración de las fechas clásicas (e.g. Plantalamor, 1997; 2005). No obstante, en el presente trabajo el origen del mundo talayótico se sitúa, en Menorca, en el último cuarto del II milenio cal BC, a la luz de los datos recopilados, durante los últimos años, en los yacimientos de Cornia Nou (Anglada *et al.*, 2014) y Cap de Forma (Depalmas, 2014).

La primera etapa de la prehistoria de las Baleares, el Bronce Inicial (ca. 2500/2300-1700/1600 cal BC), se iniciaría con la llegada de las primeras comunidades humanas en un momento indeterminado del III milenio cal BC. Esta fase correspondería a grandes rasgos con el Pretalayótico inicial y se ha definido como un estadio de colonización, en el cual la mayor parte de la cultura material muestra claras similitudes con las probables regiones de origen de los pobladores iniciales, especialmente el área pirenaica oriental y Languedoc. En esta primera etapa encontramos las bases del desarrollo posterior de la arquitectura monumental tanto funeraria, con los sepulcros megalíticos, como de habitación con las primeras navetas con muros ciclópeos (Ramis, 2010). Éstos últimos edificios presentan planta de herradura alargada y constituían seguramente unidades habitacionales unifamiliares.

Las comunidades humanas de éste periodo presentan ya los rasgos económicos que caracterizarán a la población de Menorca y Mallorca durante gran parte de la prehistoria: ganadería de caprinos, bovinos y suidos (por orden de importancia) combinada probablemente con el cultivo de cereales. La explotación de recursos silvestres, tanto terrestres como marinos, parece ocupar un lugar totalmente irrelevante en este sistema productivo.

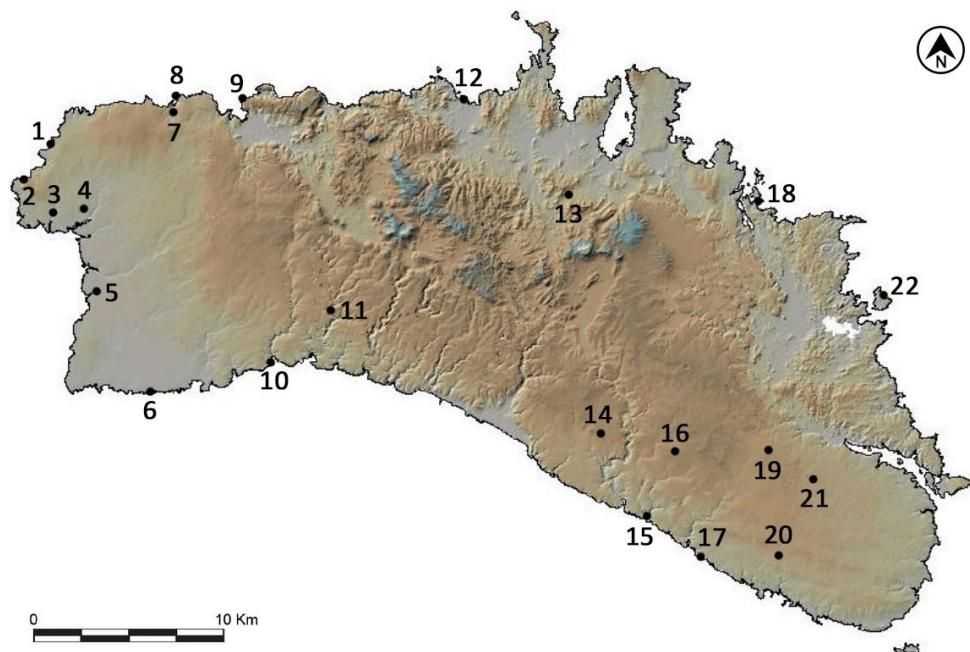
La segunda fase, Bronce Medio (ca. 1700/1600-1200 cal BC), coincidente a grandes rasgos con el Pretalayótico Final, muestra una marcada continuidad con la anterior. Se trata de una fase de consolidación de la ocupación del archipiélago con la aparición y desarrollo de la primera cultura autóctona. Esto puede observarse en la monumentalidad de las estructuras domésticas, las navetas, que pasarán a constituir el tipo característico de casa en las Baleares durante este período. A su vez, se detecta por primera vez la aparición de los poblados, formados por la agrupación en número variable de navetas, aunque sin apreciarse ningún elemento de organización urbana.

Hacia el último cuarto del II milenio cal BC se produce el colapso gradual de la sociedad de los poblados de navetas en Mallorca y Menorca. Éstos son progresivamente abandonados (Ramis y Salas, 2014) en paralelo con el inicio de la mayor transformación que se producirá durante la prehistoria en las Gimnesias con el inicio de la cultura talayótica. El período Talayótico Inicial comprende el Bronce Final y el inicio de la Edad del Hierro (ca. 1200-500 cal BC.) y se caracteriza por la emergencia de monumentos arquitectónicos de carácter público en forma de torre, entre los que destacan los llamados talayots, a cuyo alrededor surgen nuevos poblados.

La etapa final de la prehistoria en estas dos islas corresponde al período Talayótico Final y se inscribe en las segunda Edad del Hierro (ca. 500-siglo I a.C.). Se caracteriza por un conjunto de cambios probablemente interrelacionados en un ambiente de creciente jerarquización social y con la influencia de las potencias coloniales que luchan por el control del Mediterráneo occidental. Así, aproximadamente a partir de los siglos VI-V a.C. aparecen o cobran protagonismo importantes cambios en la esfera ideológica reflejados en el abandono de los talayots y la aparición de los santuarios (e.g. Coll, 1997). De igual manera, el proceso generalizado de amurallamiento de los poblados talayóticos se situaría hacia mediados del I milenio a.C., según los ejemplos analizados (Hernández-Gasch y Aramburu-Zabala, 2005; Pons, 2009). En este mismo momento destaca la llegada, que será masiva a partir del siglo IV a.C., de materiales de importación, especialmente ánforas vinarias y vajillas cerámicas procedentes de la Ibiza púnica. Esta etapa concluirá a partir de la conquista romana del archipiélago en el año 123 a.C., según los textos clásicos. Probablemente la primera fase de la dominación romana de Mallorca y Menorca estaría representada por diversos campamentos situados cerca de la costa y datados a fines del siglo II a.C. La verdadera romanización de las islas se produciría a partir de mediados del siglo siguiente (e.g. López Mullor, 2015).

### **3 | Los asentamientos costeros a lo largo de la prehistoria**

La investigación sobre los yacimientos prehistóricos costeros de Baleares presenta una larga tradición. Mascaró Passarius (1968) sistematizó los asentamientos costeros amurallados, relacionando ejemplos de Menorca y Mallorca. Esta aproximación fue



**Figura 1.** Mapa de Menorca con la ubicación de los principales yacimientos arqueológicos mencionados en el texto. 1 Cova des Mussol, 2 Es Pop Mosquer, 3 Hipogeo de Torre del Ram, 4 Ses Talaies de n'Alzina, 5 Cala Blanca, 6 Cala Vell, 7 Necrópolis de Cala Morell, 8 Poblado de Es Coll de Cala Morell, 9 Sa Punta Rotja, 10 Macarelleta, 11 Cova des Càrritx, 12 Salairó, 13 Biniguardó, 14 Torre d'en Galmés, 15 Calescoves, 16 Torralba d'en Salort, 17 Cap de Forma, 18 Mongofre, 19 Talatí de Dalt, 20 Biniparratxet Petit, 21 Cornia Nou, 22 Sa Mitja Lluna.

**Figure 1.** Map of Minorca with the location of the main archaeological settlements in the text. 1 Cova des Mussol, 2 Es Pop Mosquer, 3 Hipogeuum of Torre del Ram, 4 Ses Talaies de n'Alzina, 5 Cala Blanca, 6 Cala Vell, 7 Necropolis of Cala Morell, 8 Settlement of Es Coll de Cala Morell, 9 Sa Punta Rotja, 10 Macarelleta, 11 Cova des Càrritx, 12 Salairó, 13 Biniguardó, 14 Torre d'en Galmés, 15 Calescoves, 16 Torralba d'en Salort, 17 Cap de Forma, 18 Mongofre, 19 Talatí de Dalt, 20 Biniparratxet Petit, 21 Cornia Nou, 22 Sa Mitja Lluna.

reproducida por Pericot (1972). Años más tarde, Plantalamor profundiza, en sus trabajos sobre la arquitectura prehistórica de la isla de Menorca, en la cuestión de los cabos costeros fortificados (Plantalamor, 1991a; 1991b), relacionando esta tipología de asentamientos con un ejemplo de Formentera situado en Sa Cala (La Mola) que había sido identificado por Fernández (1977). Una nueva actuación efectuada desde el Museo de Menorca en aquellos años consistió en la excavación de la naveta de habitación situada en Cala Blanca, Ciutadella (Juan y Plantalamor, 1997). A mediados de los años noventa se realizó el levantamiento planimétrico de las construcciones situadas en el cabo costero de Cala Morell (Ciutadella) (Juan y Plantalamor, 1996). Este estudio permitió constatar que las estructuras situadas en el interior del recinto respondían a la tipología de las navetas de habitación.

Paralelamente, desde el Museo de Menorca y la Universidad de Sassari se puso en marcha un proyecto de investigación sobre los asentamientos costeros fortificados en Menorca, encabezado inicialmente por Lluís Plantalamor y Giovanni Tore, a los que se

añadirían Giuseppina Tanda y Anna Depalmas. Este proyecto se centró especialmente en las excavaciones en el recinto de Cap de Forma (Maó) (Plantalamor *et al.*, 1999, Depalmas, 2014). Estas excavaciones continuaron hasta 2014 bajo la dirección de Anna Depalmas.

En los últimos años, por otra parte, el equipo del área de prehistoria de la Universidad de las Islas Baleares ha publicado algunos trabajos de síntesis de todo el ámbito gimnésico, a partir de los datos anteriormente expuestos (Guerrero, 2007; Guerrero, 2008, Calvo *et al.*, 2011).

En 2011 se inició un nuevo proyecto de investigación sobre este tipo de asentamientos, impulsado por el *Museu d'Història de Manacor*, al que posteriormente se le añadió el *Museu Municipal de Ciutadella*. Este proyecto se basa en la excavación arqueológica de los cabos costeros fortificados de la edad del bronce de Sa Ferradura (Mallorca) y Es Coll de Cala Morell (Menorca) (Anglada *et al.*, en prensa).

Los lugares de hábitat costeros prehistóricos de Menorca responden básicamente a dos tipologías: asentamientos en lugares de costa baja, sin estructuras defensivas y asentamientos en cabos costeros u otras zonas de difícil acceso, con estructuras defensivas. En ambos grupos, en todos aquellos casos de los que se dispone de elementos de datación, estos asentamientos se sitúan en la Edad del Bronce. El mejor exponente del primer grupo sería la naveta de Cala Blanca (Fig. 1 y 2). En este caso concreto, el extremo del edificio opuesto a la entrada no se ha conservado, pero debemos suponer que, al igual que las otras navetas de habitación que se conocen, tendría forma absidal. La entrada del edificio está orientada hacia el oeste, directamente hacia el mar. Este hecho la diferencia de la mayor parte de las otras navetas de habitación, en las que la entrada se orienta hacia el sur. Los datos referentes a la cronología de ocupación de este edificio proceden de dos dataciones radiocarbónicas: una de ellas se sitúa entre el 1750 y el 1500 cal BC, y la otra entre el 1450 y el 1250 cal BC (Juan y Plantalamor, 1997).

La excavación permitió recuperar una gran cantidad de fragmentos de cerámica, correspondientes a recipientes de tamaños diversos. También se detectaron restos de recipientes que se habían utilizado para fundir cobre o bronce y un molde de una pun-

**Figura 2.**  
Naveta de habitación de  
Cala Blanca

**Figure 2.**  
*Dwelling naveta of cala  
Blanca*





**Figura 3.** Vista aérea del poblado costero de Es Coll de Cala Morell.

**Figure 3.** Aerial view of the site of Es coll de Cala Morell.

ta de lanza. Se puede afirmar, por tanto, que en este lugar se llevaron a cabo trabajos metalúrgicos.

Por otra parte, se recuperaron una gran cantidad de restos óseos de animales domésticos: sobre todo cabras y ovejas y, en menor proporción, vacas y cerdos. Al igual que en la mayor parte de yacimientos prehistóricos de Menorca y Mallorca, destaca la escasez de restos de animales marinos. Tan solo se han podido identificar algunas conchas de moluscos y restos de un cormorán, pero no restos de peces ni instrumentos relacionados con la pesca. El tipo de explotación ganadera que se deduce de los restos óseos documentados es poco intensivo.

Por otra parte, se pudieron recuperar restos de molinos manuales, que se suelen relacionar con la molienda de cereales. Los habitantes de este lugar, por tanto, practicarían posiblemente una economía mixta agrícola y ganadera.

El estudio de los huesos ha permitido documentar un interesante conjunto de herramientas fabricadas con este material: aparte de algunas agujas y punzones ya documentados durante la excavación, se han podido identificar otros punzones y espátulas fabricadas con omóplatos de vaca (Ramis y Anglada, 2012).

Uno de los ejemplos mejor conocidos de los lugares de hábitat en situaciones de difícil acceso y con presencia de estructuras defensivas lo constituye el asentamiento de Es Coll de Cala Morell. Este yacimiento se encuentra situado sobre un promontorio rocoso de unos 35 metros de altura, que cierra la cala del mismo nombre por el lado noreste, en la parte septentrional de Menorca, sobre un sustrato de dolomías jurásicas (Fig. 1 y 3). Se trata de una zona con una gran incidencia de la salinización eólica, con poca vegetación y poco adecuada para la agricultura o la ganadería.

El asentamiento se encuentra protegido, por la parte donde se une a tierra firme, por una serie de lienzos de muralla de piedra en seco, construidos aprovechando los desniveles naturales del terreno. Dentro del recinto se observan hasta trece navetas de habitación de unos ocho metros de largo por tres metros de ancho en la mayoría de los casos y orientadas hacia el sur y suroeste. Están construidas mediante muros de doble paramento, con piedras de dimensiones pequeñas y medianas (Fig. 4). Algunas de estas estructuras se adosan a la muralla que delimita el recinto. En el centro del



yacimiento se observan dos depresiones de factura antrópica de unos ocho metros de largo por cuatro de ancho, interpretadas como depósitos para recoger el agua de lluvia (Juan y Plantalamor, 1996). En el punto más alto del promontorio se observa una estructura de tendencia circular construida con grandes bloques de piedra, de finalidad hasta ahora desconocida.

Se han realizado hasta el momento seis campañas de excavación en este yacimiento, entre los años 2011 y 2016, durante las cuales se han excavado y restaurado dos de las navetas (11 y 12) existentes en el yacimiento, además de la construcción situada en la parte más alta del yacimiento y parte de uno de los depósitos de recogida de agua.

Las fechas radiocarbónicas obtenidas sobre muestras procedentes de la naveta 11 sitúan su ocupación aproximadamente entre 1600/1500 cal BC y 1300/1200 cal BC. Por lo que respecta a la naveta 12, sólo se pudo obtener una datación del nivel de ocupación, con un resultado de 1410-1220 cal BC. En consecuencia, según los resultados obtenidos a partir de estas dos estructuras, puede establecerse que esta parte del asentamiento de Es Coll de Cala Morell estaba ocupada al menos desde ca. 1600/1500 cal BC, y fue abandonada en un momento indeterminado del siglo XIII cal BC (Anglada *et al.*, 2017b). Las dos navetas excavadas se encuentran unidas al lado interior del muro que delimita el recinto.

La naveta 11 presenta un espacio interno organizado a partir de una estructura de combustión ubicada en posición central (Anglada *et al.*, 2015). A cada lado de este elemento se disponen dos banquetas bajas construidas con piedras (Fig. 4). Los materiales recuperados en las navetas tienen un carácter doméstico. Ante la fachada se observa un espacio de unos 4 m<sup>2</sup>, delimitado por el ábside de la naveta 12, donde se documentó la base de un molino de vaivén, sobre una banqueta de piedra, y otros elementos relacionados con el procesado de alimentos. La parte móvil del molino manual antes mencionado se recuperó en el interior del edificio, cerca de la estructura de combustión. La cerámica incluye fragmentos de grandes contenedores, ollas y recipientes para el consumo. Algunos molinos de mano, percutores de piedra y punzones de hueso representan las industrias ósea y lítica. Los restos óseos son abundantes y casi todos los restos pertenecen a mamíferos domésticos. La excavación mostró que ambos edificios fueron abandonados de modo pacífico.



**Figura 4.**  
Naveta de habitación 11 de  
Es coll de cala Morell  
(Ciutadella, Menorca)

**Figure 4.**  
*Dwelling naveta 11 at Es  
coll de cala Morell.*

La naveta 12, a pesar de presentar una dinámica estratigráfica ligeramente diferente, permitió documentar una distribución interna similar, con un hogar en posición central. Al contrario que en la naveta 11, no se pudo documentar la presencia de ningún molino manual, pero si otros elementos óseos y líticos (punzones, percutores, etc.) parecidos a los que se habían identificado en la otra naveta.

Existe otro asentamiento de características muy similares a Es Coll de Cala Morell, aunque de dimensiones más reducidas: Es Castellet des Pop Mosquer. Se trata también de un asentamiento en cabo costero, protegido por una muralla, con una naveta bien conservada y posibles restos de otra estructura similar. En este caso, el yacimiento se sitúa sobre calcarenitas miocenas, también en la parte noroeste de la isla (Anglada *et al.*, 2010) (Fig. 1).

Otro yacimiento fortificado, ubicado en un cabo costero, del cual se dispone de numerosos datos, es Cap de Forma, ubicado sobre la plataforma miocénica que ocupa el sur de la isla (Fig. 1). Su cronología es ligeramente más reciente que la de Cala Morell, situándose su ocupación entre los siglos XIII y X cal BC (Depalmas, 2014). La muralla que lo protege está mucho más desarrollada que la de Cala Morell o la de Es Pop Mosquer y, por otro lado, en el interior del recinto se combinan los muros rectos transversales a la muralla, con una construcción de planta alargada, parecida a una naveta de habitación. En el interior del recinto, igual que en Cala Morell, se observa un depósito para la recogida del agua de lluvia, excavado en la roca. Tipológicamente, las estructuras arquitectónicas pueden vincularse con los primeros momentos del periodo Talayótico Inicial (ca. 1200-500 cal BC). Se trata del único caso claro de asentamiento de la fase talayótica ubicado en un entorno costero.

Existe otro tipo de cabos costeros fortificados, con unas características diferentes a todos los que se han mencionado anteriormente. En esta tipología, representada por los castellets de Calescoves y Macarelleta, en la costa sur (Fig. 1), el espacio delimitado por la muralla es de dimensiones mucho mayores (unas 4 hectáreas en el caso de Calescoves y unas 2 hectáreas en Macarelleta, lo que contrasta con las 0,4 hectáreas de Cala Morell o Cap de Forma). Por otro lado, ambos asentamientos están situados a la entrada de calas que presentan fuentes permanentes de agua potable, algo que no ocurre en los otros casos. Calescoves y Macarelleta, por otro lado, presentan además sendos pozos con escaleras, excavados en la roca, que alcanzan la capa freática y permitirían abastecer a los asentamientos de agua potable sin necesidad de abandonar el recinto amurallado. No se han realizado hasta el momento investigaciones sistemáticas en ninguno de los dos yacimientos, si bien en el caso de Calescoves se ha publicado la topografía del asentamiento (Sánchez López *et al.*, 2013). En el interior de las dos zonas amuralladas no se detectan estructuras arquitectónicas o materiales cerámicos en superficie que permitan una adscripción cronológica. Pese a todo, las características mencionadas permiten proponer que ambos asentamientos corresponderían a una cronología y una realidad social diferentes, aunque no determinadas todavía, a las que se constatan en otros cabos costeros fortificados como Cala Morell y Cap de Forma.

Respecto a los asentamientos del Talayótico Final (ca. 500-siglo I a.C.) se puede afirmar que siguen el mismo patrón, respecto a su ubicación, que los de la fase precedente, situándose en el interior de la isla. En la mayor parte de los casos, de hecho, la población se concentra en los núcleos urbanos formados durante la etapa anterior. Durante esta fase, por lo tanto, tampoco se encuentran asentamientos situados en ubicaciones costeras. Se conoce un poblado, no obstante, que estaba



situado a 600 metros al norte de la cala donde ahora se ubica el puerto de Ciutadella: Ses Talaies de n'Alzina (Navarro 2004) (Fig. 1).

#### 4 | Las manifestaciones funerarias y rituales junto al mar

Los espacios funerarios muestran, en Menorca, una gran diversidad desde los primeros momentos de la Prehistoria (Plantalamor *et al.*, 2012), aunque el ritual de inhumación colectiva será una constante hasta finales de la Edad del Hierro. Así, durante las fases iniciales del poblamiento humano de la isla se construyen dólmenes (Ses Roques Llises, Montplè, etc.) y cuevas con fachada megalítica (Biniái Nou, Cuevas 11 y 12 de Cala Morell). Los hipogeos de planta alargada, excavados en la roca (Torre del Ram, Son Mercer de Dalt) corresponden también a este momento, aunque son mucho menos abundantes. Sin embargo, ninguna de estas tipologías se encuentra verdaderamente ligada a entornos costeros. En Menorca se conoce el caso de un posible sepulcro de tradición dolménica, aún sin excavar, ubicado a pocos metros de la costa, cerca de Cala Vell (Ciutadella) (Fig. 1). Cabe mencionar también que el hipogeo de Torre del Ram, aunque no ocupa la zona estrictamente litoral, está ubicado a solo 500 metros de Cala'n Brut (Ciutadella) (Fig. 1).

Los sepulcros megalíticos darán paso, en un proceso evolutivo endémico de la isla, a los sepulcros de triple paramento (Son Olivaret, Ses Arenetes) y, posteriormente, a las navetas de planta circular (Biniac-L'Argentina) y de planta alargada (Es Tudons, Rafal Rubí) ya a finales del segundo milenio cal BC (Plantalamor y Marqués, 2003; Gili *et al.*, 2006). Ninguno de estos espacios funerarios se encuentra tampoco ubicado cerca de la costa si no que, por el contrario, sus constructores eligieron ubicaciones en el interior de la isla.

Las cuevas con cierre ciclópeo, cuyo origen se sitúa también en los momentos finales del segundo milenio cal BC, se encuentran habitualmente en las paredes de barrancos en el interior de la isla, aunque en algunos casos puntuales ocupan situaciones costeras, como es el caso de la Cova des Morts de Mongofre (Fig. 1 y 5).

Algunas cuevas naturales, con escasas modificaciones, también tuvieron un uso ritual durante el segundo milenio cal BC. Algunas de ellas, como la Cova des Mussol, se encuentran en ambientes costeros (Fig. 1). La Cova des Mussol es una cavidad de difícil acceso situada en los acantilados de la costa norte de Ciutadella. Las evidencias de estas prácticas rituales tan arcaicas se documentaron en la primera sala de esta cavidad. Se identificó una pequeña hoguera, hecha sobre una base de fragmentos cerámicos, donde se habían quemado plantas de propiedades aromáticas, tal como se desprende de los estudios del polen y los carbones. Además, los estudios de micromorfología del sedimento indicaron que la sala había sido frecuentada en tres ocasiones. Por otra parte, se encontraron los restos de dos ejemplares (siempre un inmaduro y un adulto) de oveja, de cabra, de cerdo y de buey. No habían sido consumidos, y probablemente habían sido depositados a modo de ofrenda. El otro elemento que llamó la atención de los arqueólogos fue la presencia de conjuntos de estalactitas colocados intencionadamente en la estructura de combustión y en zonas cercanas. Desde esta sala se habían visitado otros puntos más interiores de la cueva, donde se encontraron fragmentos cerámicos que tipológicamente se relacionaron con esta fase de frecuentación.

Después de un lapso de más de dos siglos sin evidencias arqueológicas, la Cova des Mussol es objeto de una segunda fase de frecuentación de carácter ceremonial a finales del II milenio cal BC. Fue en zonas más interiores de la cueva donde se encontraron las nuevas evidencias. Entre ellas hay que destacar dos tallas sobre madera de acebuche que representan una cabeza humana y otra de carácter zooantropomorfo, las cuales formaban parte de un conjunto de 17 objetos de madera (Lull *et al.*, 1999). En las salas se encontraron pequeños vasos cerámicos propios del Bronce final que habían servido para la iluminación.

A comienzos del I milenio cal BC, la primera sala de la Cova des Mussol es habilitada como espacio funerario: se han documentado restos humanos de un mínimo de cinco adultos (tres mujeres y dos hombres) y de un niño. El ajuar asociado a los difuntos consistía en pequeños objetos de bronce depositados en agujeros de la pared de la sala. Entre ellos destacan una punta de flecha, un escoplo y un colgante bicónico. Pero, paralelamente, los espacios más recónditos de la cavidad continúan dotados de un significado ritual. Este se manifiesta en la deposición intencionada de nueve útiles de bronce en esta área, especialmente en puntos de difícil acceso. El más singular es un espejo, encontrado directamente sobre el suelo, pero también se pueden destacar un cuchillo triangular con pedúnculo, un escoplo y una punta de lanza aserrada. Finalmente, además de los metales, se debe mencionar el hallazgo, formando parte de este contexto, de dos discos de marfil (elaborados sobre colmillo de elefante) en un estado deficiente de conservación (Lull *et al.*, 1999).

Tal y como ya se ha mencionado, se conoce al menos una cueva natural con cierre ciclópeo, utilizada con finalidad funeraria, ubicada en un entorno costero: la Cova dels Ossos de Mongofre Nou. Aunque se trata de una cavidad que había sufrido alteraciones, su excavación permitió recuperar numerosos restos humanos, pertenecientes a unos 300 individuos, que habían sido inhumados a principios del primer mi-



**Figura 5.** Vista desde la Cova dels Morts (Mongofre). Imagen: Joan De Nicolás.  
**Figure 5.** View from Cova dels Morts (Mongofre). Photo: Joan de Nicolás.

lenio cal BC (Bergadà y De Nicolás, 2005). Las evidencias rituales detectadas en Mongofre Nou son parecidas a las que se documentan en la Cova des Càrritx, una cavidad natural, también con cierre ciclópeo, aunque ubicada en un barranco del interior de la isla y mucho mejor conservada. En este caso, fue utilizada como necrópolis durante un periodo aproximado de seis siglos, entre ca. 1400 y ca. 800 cal BC. A lo largo de este periodo, a pesar de la documentación de cambios, el tipo de rituales practicados y el tratamiento de los difuntos presentan un carácter colectivo.

En la Cova des Càrritx (Fig. 1) se recuperaron cerca de 35 mil restos óseos humanos que fueron objeto de un estudio monográfico (Rihuete, 2000). Sólo se documentaron tres cuerpos parcialmente en conexión anatómica. Todo el resto de huesos se encontraban completamente desarticulados, formando un osario. Se estimó un número mínimo de 210 individuos inhumados.

En los momentos iniciales de la necrópolis, el sistema de enterramiento consistía en depositar directamente sobre el suelo de la cueva los cuerpos recogidos en diferentes posiciones dentro de sudarios. A comienzos del I milenio cal BC se documenta la práctica de la deposición secundaria de cráneos. La primera sala de la cavidad era el sitio de deposición inicial de los cuerpos en el proceso de descomposición de los tejidos blandos. La atención preferente sobre los cráneos, con paralelos en otras necrópolis mallorquinas y menorquinas, se pone en relación con cambios socioculturales durante estos momentos.

Durante la Edad del Hierro se asiste a una importante diversificación de los lugares de enterramiento, y también de los rituales funerarios. Coll (1995) realizó una sistematización de las estructuras funerarias del I milenio cal BC en Mallorca que, con muy pocas variaciones, también resulta aplicable en Menorca. En cuanto a las cuevas funerarias, en primer lugar continúan en uso estructuras procedentes de periodos anteriores. Es el caso de las cavidades naturales, algunas de ellas con cierre ciclópeo de la boca. Por otro lado, se documenta la reutilización de estructuras artificiales de épocas anteriores.

Paralelamente aparecen necrópolis de cuevas artificiales de nueva tipología. Se combinan ejemplos de planta simple y polilobulada. Un elemento muy característico de muchos de estos hipogeos serán las columnas exentas, formadas por el propio sustrato geológico en el que se excava la cueva. En Menorca, el principal elemento distintivo es la alta concentración de hipogeos, formando las grandes necrópolis de cuevas artificiales situadas en las paredes de barrancos y de los acantilados costeros. Los principales ejemplos del último grupo son Cap de Forma y Calescoves (Fig. 6 y 7), situadas en lugares claramente litorales, y Cala Morell, ubicada en el barranco que se abre tras la cala, a unos cientos de metros hacia el interior (Fig. 1). En la mayor parte de los casos, estas necrópolis se disponen en paredes rocosas correspondientes a la parte miocénica de la isla.

Veny (1982) realizó una sistematización de las cavidades artificiales de Calescoves, definiendo dos tipologías principales. La primera está formada por cuevas de planta sencilla (circular u ovalada) con ritual de inhumación y materiales que se sitúan a comienzos del I milenio cal BC.

En segundo lugar, se distingue otro grupo formado por cuevas con una puerta de entrada rectangular. En ellas se van combinando toda una serie de elementos arquitectónicos ausentes en las de planta sencilla: patio de entrada, fachada, nichos o lóbulos, pilares y pilastras. Los ajueres de estas cavidades son propios de la Edad del Hierro y, por tanto, se fechan hacia la segunda mitad I milenio cal BC. Además se docu-



**Figura 6.**  
Necrópolis de cuevas de  
Cap de Forma.  
**Figure 6.**  
Necropolis of hipogea at  
Cap de Forma

menta una mayor variedad de rituales, incluyendo la presencia de cal en algunos casos.

A este segundo grupo pertenece el ejemplo de la necrópolis que ha sido objeto de excavación arqueológica más recientemente, el hipogeo XXI de Calescoves. Presenta una cámara de tendencia trapezoidal con un gran pilar exento en la parte interior de la cavidad. Las dataciones sitúan su uso aproximadamente durante el segundo cuarto del I milenio cal BC, ligeramente anterior al marco cronológico propuesto previamente. Los rituales funerarios incluyen la presencia de restos de camillas y de ataúdes de madera. Formando parte del ajuar, además de la cerámica, se documentan objetos de bronce y hierro. Cabe destacar la presencia de gran cantidad de vértebras caudales de vacuno, mostrando el significado de las colas de buey como ofrenda funeraria. En cuanto a los restos humanos, se ha adelantado la presencia de un mínimo de 186 individuos (Gornés *et al.*, 2006).

El significado de la ubicación costera de estas necrópolis de la Edad del Hierro es difícil de determinar, pues se encuentran cuevas de características similares en paredes rocosas del interior de la isla. El hecho que las mayores concentraciones en

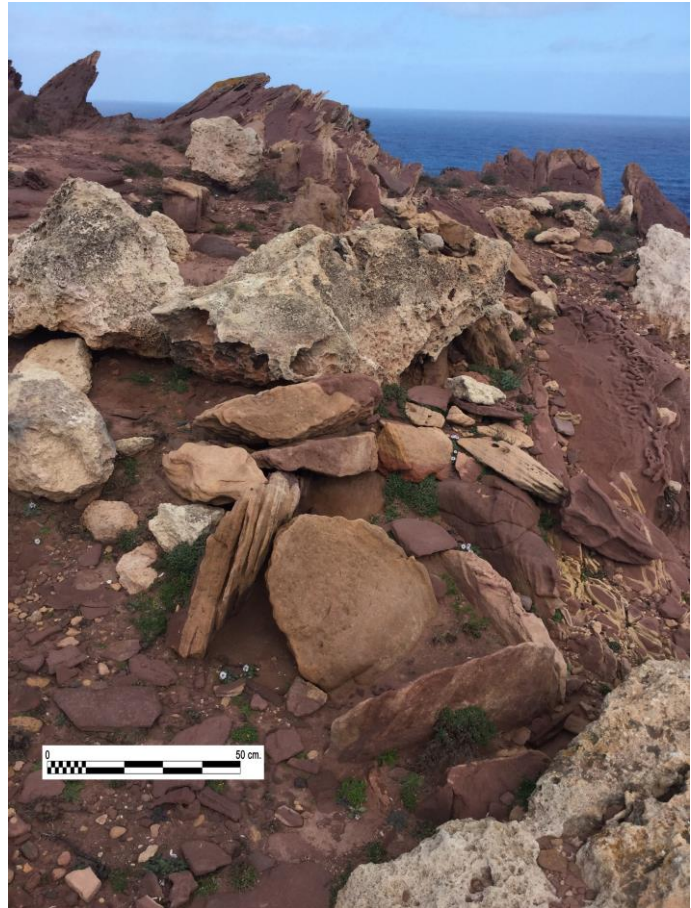


**Figura 7.**  
Vista de la necrópolis de  
Calescoves.  
**Figure 7.**  
View of the necropolis of  
Calescoves.



necrópolis se hallen en la costa puede tener un significado simbólico, pero también debe tenerse en cuenta que las paredes rocosas más extensas y adecuadas para excavar este tipo de cuevas artificiales se encuentran en muchas ocasiones al lado del mar. Tan solo el estudio sistemático y la comparación entre los restos antropológicos y los ajuares de las necrópolis de costa y de interior podrían arrojar algo de luz sobre estas cuestiones. Desgraciadamente, las cuevas funerarias de la Edad del Hierro no expoliadas son muy escasas, por lo que el material potencialmente disponible para dichos estudios comparativos no es abundante.

Otro tipo de espacio funerario costero prehistórico, dado a conocer recientemente (De Nicolás y Pons, en prensa) lo constituyen las cistas de inhumación individual, de las que se tienen ejemplos en Sa Punta Rotja (Ciutadella), Salairó (Mercadal) (Fig. 1 y 8) y posiblemente en S'Argossam (Maó). Se trata de estructuras de pequeñas dimensiones, de las que se dispone de pocos datos, pues se han encontrado expoliadas y/o gravemente erosionadas por su proximidad al mar. En la excavación de las estructuras de Salairó se documentaron restos de recipientes cerámicos indígenas. Los restos humanos muestran evidencias de cremación previa a la inhumación. La cronología de estas estructuras, en base a las tipologías cerámicas y las dataciones ra-



**Figura 8.**  
Imagen de una de las cistas funerarias de Punta Rotja (Ciutadella).

**Figure 8.**  
*Image of one of the burial cists at Punta Rotja (Ciutadella).*

diocarbónicas, se sitúa entre los siglos III y II a.C. Las enormes diferencias existentes con los rituales habituales de inhumación colectiva en cavidades permiten proponer que serían consecuencia de la introducción de nuevos elementos culturales por parte del mundo púnico.

## 5 | El aprovechamiento económico de los recursos costeros

Durante la Edad del Bronce no hay evidencias de pesca ni en Menorca ni en Mallorca. Únicamente se documenta la presencia de pequeñas cantidades de moluscos marinos con un efecto inapreciable en la dieta de las poblaciones prehistóricas. Los únicos datos de pesca en Baleares en este periodo provienen de un ambiente tan marginal como es la isla de Formentera (López Garí *et al.*, 2013). Esta falta de explotación de los recursos marinos se constata de forma clara incluso en yacimientos costeros como Cala Morell. Así, parece que el aprovechamiento de los productos del mar es una nueva estrategia de obtención de alimentos que arranca en los momentos finales de la cultura talayótica, como consecuencia de la influencia cultural del mundo púnico. En el sector este de Cornia Nou (Fig. 1), por ejemplo, en niveles de los siglos IV-III a.C., se documentaron restos de moluscos marinos, aunque representan un porcentaje muy pequeño de los restos faunísticos, dominados por los mamíferos domésticos (Anglada *et al.*, 2017a). La misma situación se documenta en Biniparratx Petit (Fig. 1), entre los siglos III y II a.C. (De Nicolás, 2015), aunque en los sectores A y D de este yacimiento se menciona la presencia ocasional de restos de cetáceos en cronologías avanzadas de la edad del hierro (Guerrero, 2007). Se puede inferir una posible práctica de la pesca a partir de la presencia de anzuelos metálicos en el Círculo Cartailhac de Torre d'en Galmés (Fig. 1), en el siglo II a.C. (Sintes y Isbert, 2009), y de las evidencias de producción de harina de pescado en los molinos de mano de Talatí de Dalt (Fig. 1) (Juan y Pons, 2005). En todos los casos, sin embargo, se trata de aportaciones puntuales, en el contexto de una economía de base agrícola y ganadera.

Actualmente se dispone de evidencias de la explotación prehistórica de otros recursos situados, de forma incidental, en la zona costera. El ejemplo mejor documentado es la extracción de minerales cupríferos en Sa Mitja Lluna de la illa d'en Colom (Fig. 1) (Hunt *et al.*, 2014) situada al noroeste de Menorca y separada de ésta por una distancia inferior a 300 metros. La proximidad de este islote habría permitido la explotación de los recursos minerales, por parte de las comunidades prehistóricas, sin necesidad de embarcaciones complejas. Las dataciones radiocarbónicas han permitido datar trabajos extractivos durante los siglos centrales del segundo milenio cal BC, aunque no se puede descartar que la explotación se iniciara antes y se prolongara más en el tiempo.

## 6 | Los contactos marítimos

Es evidente que los primeros pobladores humanos de la isla llegaron por vía marítima. Desde la primera colonización, el contacto con el exterior nunca se llegaría a interrumpir por completo. Algunos materiales, como el sílex o el estaño (este último necesario para la fabricación de bronce) no se encuentran en Menorca de forma natural, de modo que su presencia en la isla responde al comercio marítimo. A pesar

**Figura 9.**

Fragmento de cráneo de ciervo (*Cervus elaphus*), documentado en el edificio sur de Cornia Nou (Maó, Menorca).

**Figure 9.**

Fragment of deer skull (*Cervus elaphus*), documented in the south building of Cornia Nou (Maó, Menorca).



de que, como se ha mencionado, Menorca cuenta con minerales cupríferos, es muy probable que parte del cobre que se documenta en la isla durante la Prehistoria llegara desde el exterior, en estado puro o formando parte de alguna aleación. Estos materiales habrían llegado en forma de materia prima para la metalurgia local indígena, o bien en forma de objetos ya elaborados (Delibes y Fernández-Miranda, 1988; Montero *et al.*, 2005).

Así, los materiales exógenos aparecen en el registro arqueológico de forma esporádica durante el segundo milenio cal BC. Aparte del sílex, menos común, que aparece de forma esporádica durante las fases iniciales, y el bronce, más abundante, cabe señalar las cuentas de fayenza del tipo I.A.1b *Barrel Disc* (Beck, 1928) documentadas con frecuencia en contextos funerarios de finales del segundo milenio y principios del I milenio cal BC, tales como las cuevas LIV y LVI de Cales Coves (Veny, 1982) o el hipogeo XXI de esta misma necrópolis (Gornés *et al.*, 2006), la cova des Càrritx (Lull *et al.*, 1999) o la Cova de Biniguardó (Anglada *et al.*, 2013). Se trata de materiales fabricados fuera de la isla, aunque los centros de producción no se han situado con precisión (Martínez y Vilaplana, 2014). A inicios del primer milenio cal BC cabe destacar la presencia, en la Cova des Mussol, de dos objetos fabricados con marfil de elefante, una materia prima obviamente importada (Lull *et al.*, 1999).

Si exceptuamos el caso dudoso y excepcional de un jarrito cicládico (Topp, 1985; Mederos, 1996) supuestamente hallado en Menorca y que se situaría entre finales del III milenio y principios del II milenio cal BC, las primeras cerámicas de importación no se documentan hasta un momento tan tardío como el siglo VI a.C. (Castrillo, 2005). Se trata de ánforas púnicas ebusitanas, de las que seguirán llegando ejemplares de forma abundante, junto con otros materiales cerámicos, especialmente a partir del siglo IV a.C. (e.g. Hernández-Gasch y Quintana, 2013).



Otro indicador de las relaciones marítimas de las comunidades humanas de Menorca lo constituyen las introducciones animales. La datación de restos de conejo, gallina y ciervo (Fig. 9) en la isla antes de mediados I milenio cal BC debería situarse en el contexto del inicio de una incipiente relación de intercambios, entre los fenicios y el mundo talayótico, que supondría la llegada a las islas de diferentes bienes exóticos o de prestigio, aunque con un volumen y con una variedad muy limitados en comparación con las regiones vecinas (Ramis *et al.* en prensa).

Esta situación se corresponde con la expansión del ratón doméstico en el Mediterráneo occidental, que se sitúa a principios del I milenio cal BC y se ha vinculado con la actividad marítima de griegos y fenicios (Cucchi *et al.*, 2005). Así, el género *Mus* ha sido identificado tanto en Son Matge (Sanders, 1979), en Mallorca, como Torralba d'en Salord (Sanders, 1984), la Cova des Mussol (Alcalde, 1999a) y la Cova des Càrritx (Alcalde, 1999b), en Menorca, en todos los casos en contextos fechados entre finales del II y el comienzo del I milenio cal BC.

Pero, además de la introducción de nuevas especies, se producen cambios faunísticos vinculados a aspectos básicos de la subsistencia, como es la llegada, a Menorca y el este de Mallorca, de nuevas variedades de oveja (y tal vez de buey) de un tamaño mucho mayor a las existentes en aquellos momentos. Este hecho, junto con la explotación de la fuerza de tracción de los équidos, debió suponer cambios importantes en la producción de alimentos de determinadas comunidades (Ramis, 2017).

A partir de la segunda mitad del primer milenio cal BC, asistimos a la llegada de nuevas especies por causas poco claras. Es el caso de pequeños carnívoros como el gato y la comadreja, la tortuga de agua y nuevas especies de caracoles terrestres. La ausencia de evidencias claras de aprovechamiento de los caracoles los poblados talayóticos permite proponer que se trataría de introducciones en los poblados involuntarias vinculadas a un mayor flujo de embarcaciones foráneas en las islas. Y en el caso del gato, los ejemplares de Biniparratx Petit sugieren que al menos durante la parte final de su vida sirvieron como animales domésticos (Morales, 2009). Se trata de introducciones sin función económica clara, pero que demuestran una mayor permeabilidad de la sociedad talayótica a las influencias llegadas a través del mar.

## 7 | Conclusiones

La relación de las comunidades prehistóricas menorquinas con el entorno costero nunca fue muy estrecha, si bien es cierto que su intensidad irá variando a lo largo de los dos milenios de presencia humana previos a la romanización de la isla.

Durante gran parte del segundo milenio, pese a la ausencia de organismos marinos en la dieta de las comunidades humanas, parece evidente que los habitantes de Menorca y Mallorca disponían de medios para atravesar sin dificultades la distancia que separa ambas islas. Durante este periodo, las similitudes culturales entre los dos territorios solamente pueden explicarse como consecuencia de contactos regulares y, quizá, intercambios de población. No hay que olvidar, no obstante, que los materiales exógenos son durante este periodo elementos excepcionales, y que las evidencias disponibles apuntan a una sociedad agrícola y ganadera, que representa un papel enormemente marginal en las redes comerciales del momento.

Esta situación se observa también al estudiar los materiales procedentes de yacimientos costeros como Cala Morell, interpretados tradicionalmente como lugares relacionados con el contacto de las poblaciones menorquinas con el exterior. Así, es posible proponer que la ubicación costera de estos asentamientos pudo haber sido una cuestión incidental, consecuencia de la búsqueda de lugares escarpados y fácilmente defendibles, en un contexto de inestabilidad social. Cabe destacar que los dos cabos costeros fortificados menorquines que han sido objeto de investigaciones sistemáticas (Cala Morell y Cap de Forma) fueron abandonados, respectivamente, en dos momentos diferentes del Bronce Final, una etapa en la que precisamente se intensifican los intercambios entre las comunidades humanas del Mediterráneo Occidental.

El periodo talayótico inicial (ca. 1200-500 cal BC), parece ser un periodo en que las comunidades humanas de la isla viven especialmente de espaldas a la costa. En yacimientos de hábitat como Cornia Nou, la presencia de restos de animales marinos y productos de importación es prácticamente nula. Los espacios funerarios, representados por las cuevas con cierre ciclópeo y las fases finales de las navetas funerarias, se sitúan prácticamente siempre en el interior de la isla. Exceptuando el ya mencionado yacimiento de Cap de Forma, que perdura hasta los primeros años del primer milenio cal BC (Depalmas, 2014) no se conocen asentamientos costeros de esta cronología. Por otro lado, éste es el momento en que prácticamente empieza a percibirse la divergencia cultural entre Menorca y Mallorca. Pese a todo, durante la primera mitad del primer milenio cal BC se empiezan a construir algunas de las necrópolis en cuevas, muchas de ellas en ubicaciones costeras, que llegarán a su apogeo durante la fase siguiente, a partir de mediados del primer milenio cal BC.

El poblamiento de la fase final del periodo talayótico (ca. 500-siglo I a.C.) sigue el mismo patrón que en el periodo anterior. No se documentan, de hecho, poblados de nueva planta, si no que la población se concentra básicamente en los núcleos urbanos del talayótico inicial, en el interior de la isla, algunos de los cuales experimentan un notable crecimiento. Pese a todo, éste será el periodo de la prehistoria en el que las comunidades humanas menorquinas más miraran hacia la costa. En primer lugar, fondeaderos como el de Calescoves constituyen la vía de entrada, a través del comercio púnico, de grandes cantidades de productos de importación: ánforas vinarias, recipientes relacionados con el consumo de líquidos, objetos metálicos y cuentas de pasta vítrea. Paralelamente, y seguramente de modo relacionado, se constata un lento incremento del consumo de productos marinos. Tampoco puede obviarse el acentuado desarrollo que las necrópolis costeras tendrán durante esta etapa. A pesar de que, como ya se ha mencionado, se documentan algunos conjuntos funerarios en el interior, es significativo que Calescoves, la mayor necrópolis de esta etapa, comparta espacio con uno de los principales fondeaderos de la isla.

## Bibliografía

- Alcalde, G. (1999a): Cova des Mussol. Informe técnico del análisis de huesos de roedores. En: Lull V., Micó, R., Rihuete, C., Risch, R. (eds). *La Cova des Càrritx y la Cova des Mussol. Ideología y sociedad en la prehistoria de Menorca*. Barcelona: Consell Insular de Menorca. pp. 443.
- Alcalde, G. (1999b): Estudio arqueozoológico de restos de los roedores de la Cova des Càrritx. In: Lull, V., Micó, R., Rihuete, C., Risch, R. En: *La Cova des Càrritx y la Cova des Mussol*.

- Ideología y sociedad en la prehistoria de Menorca: 543-548.* Barcelona: Consell Insular de Menorca.
- Anglada, M., Ferrer, A. y Plantalamor, L. (2013): *Objectes per a l'altra vida. La col·lecció Humbert Ferrer.* Museu de Menorca. Maó.
- Anglada, M., Ferrer, A., Plantalamor, L. y Ramis, D. (2010): Aixecament planimètric d'es Castellet (Ciutadella), un assentament prehistòric costaner a la zona occidental de Menorca. *Bolletí de la Societat Arqueològica Lul·liana*, 66: 267-278.
- Anglada, M., Ferrer, A., Plantalamor, L., Ramis, D., Van Strydonck, M. y De Mulder, G. (2014): Chronological framework for the early Talayotic period in Menorca: the settlement of Cornia Nou. *Radiocarbon*, 56 (2): 411-424.
- Anglada, M., Ferrer, A., Ramis, D. y Salas, M. (2015): Les llars de foc en els caps costaners de Sa Ferradura (Manacor) i Es Coll de Cala Morell (Ciutadella). En: Andreu, C., Ferrando, C., Pons, O. (Eds.), *L'entreixit del temps. Miscel·lània d'estudis en homenatge a Lluís Plantalamor Massanet: 59-72.* Govern de les Illes Balears, Palma.
- Anglada, M., Ferrer, A., Plantalamor, L. y Ramis, D. (2017a): Continuitat cultural en època de canvis: la producció i preparació d'aliments a Cornia Nou (Maó, Menorca) durant els segles IV-III aC. En: Prados, F., Jiménez, H. y Martínez, J.J. (Coord.), *Menorca entre Fenicis i Púnics: 137-156.* Universidad de Murcia, Murcia.
- Anglada, M., Ferrer, A., Ramis, D., Salas, M., Van Strydonck, M., León, M.J. y Plantalamor, L. (2017b): Dating prehistoric fortified coastal sites in the Balearic Islands. *Radiocarbon* (en premsa).
- Beck, H. C. (1928): Classification and Nomenclature of Beads and Pendants. *Archaeologia (second series)*, 77: 1-76.
- Bergadá, M. M. y de Nicolás, J. C. (2005): Aportación de la micromorfología al conocimiento de las prácticas pastoriles de finales de la Edad de Bronce en el yacimiento de la Cova des Morts. *Mayurqa*, 30:181-202.
- Calvo, M., Javaloyas, D., Alberó, D., García-Rosselló, J. y Guerrero V. (2011): The ways people move: mobility and seascapes in the Balearic Islands during the late Bronze Age (c. 1400–850/800 bc). *World Archaeology* 43(3): 345-63.
- Castrillo, M. (2005): Fenicis i púnics a Menorca: vint-i-cinc anys d'investigació i noves dades aportades per les àmfores fenicio-púniques a l'illa. *Fonaments: Prehistòria i Món Antic als Països Catalans*, 12: 149-168.
- Coll, J. (1995). Aproximación a la sistematización y cronología de las estructuras funerarias de la cultura talaiótica en Mallorca. *Bar International Series*, 611: pp. 296-296.
- Coll, J. (1997): Arquitectura ritual versus arquitectura doméstica en la cultura talaiótica. E: *La pedra en sec. Obra, paisatge i patrimoni. Actes del IV Congrés Internacional de Construcció de Pedra en Sec (Mallorca, 1994).* Consell Insular de Mallorca, Palma, pp. 467-482.
- Cucchi T., Vigne, J.D. y Auffray, J.C. (2005): First occurrence of the house mouse (*Mus musculus domesticus* Schwarz & Schwarz, 1943) in the Western Mediterranean: a zooarchaeological revision of subfossil occurrences. *Biological Journal of the Linnean Society*, 84: 429-45.
- Depalmas, A. (2014): New data from fortified coastal settlement of Cap de Forma, Mahon, Menorca (Balearic Islands). *Radiocarbon*, 56 (2): 425-437.
- De Nicolás, J.C. (2015): L'aprofitament dels recursos de la mar a la prehistoria i l'antiguitat menorquina i altres activitats vinculades. En: *La pesca en el mediterrani occidental les claus de l'acció de l'home en el Mare Nostrum*: 151-200. Publicacions des Born, 23-24. Ciutadella.
- De Nicolás, J.C. y Pons Carreras, M.A. (en premsa): Enterraments en cista vora la mar a Salairó, es Mercadal, una nova tipologia de jaciments funeraris del talaiòtic final de Menorca.
- Delibes, G. y Fernández-Miranda, M. (1988): *Armas y utensilios de bronce en la Prehistoria de las Islas Baleares.* Studia Archaeologica, 78.
- Fernández, J.H. (1977): Últimos descubrimientos prehistóricos en la isla de Formentera (Balears). En: *XVI Congreso Nacional de Arqueología, Vitoria, 1975.* Secretaría General de los Congresos Arqueológicos Nacionales, Zaragoza, pp. 471-478.
- Gili, S., Lull, V., Micó, R., Rihuete, C. y Risch, R. (2006): An island decides: megalithic burial rites on Menorca. *Antiquity*, 80: 829-842.

- Gornés, J.S., Gual, J. y Gómez, J.L. (2006): Avanc dels contextes arqueològics i de la cronologia absoluta de l'hipogeu XXI de Calascoves. *Mayurqa*, 31: 165-181.
- Guerrero, VM. (coord.) (2007): *Prehistoria de las Islas Baleares. Registro arqueológico y evolución social antes de la Edad del Hierro*. British Archaeological Reports, International Series 1690. Archaeopress, Oxford.
- Guerrero, V.M. (2008): El Bronce Final en las Baleares. Intercambios en la antesala de la colonización fenicia del archipiélago. Contacto cultural entre el Mediterráneo y el Atlántico (siglos XII-VIII a.n.e). En: Celestino, S., Rafel, N. y Armada, X.L. (eds.), *Contacto cultural entre el Mediterráneo y el Atlántico (siglos XII-VIII a.n.e)*. La precolonización a debate: 183-217. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- Hernández-Gasch, J. y Aramburu-Zabala, J. (2005): Ses Païsses, 1999-2000. [http://www.arqueobalea.es/articulos/Excavaciones\\_SP99-00.pdf](http://www.arqueobalea.es/articulos/Excavaciones_SP99-00.pdf)
- Hernández-Gasch, J. y Quintana, C. (2013): Cuando el vino impregnó la isla de Mallorca: el comercio púnico-ebusitano y las comunidades locales durante la segunda mitad del siglo V y el siglo IV a.C.. *Trabajos de Prehistoria*, 70 (2): 315-331.
- Juan, G. y Plantalamor, L. (1996): L'aixecament planimètric del cap costaner de Cala'n Morell. Treballs del Museu de Menorca 15. Museu de Menorca, Maó.
- Juan, G. & Plantalamor, L. (1997): *Memòria de les excavacions a la naveta de Cala Blanca (1986-1993)*. Treballs del Museu de Menorca, 21. Museu de Menorca, Maó.
- Juan Tresserras, J. y Matamala Mellin, J. (2005): Anàlisi de matèria orgànica, En: Juan Benejam, G. & Pons Machado, J. (eds.), *Talati de Dalt 1997-2001, 5 anys d'investigació a un jaciment talaític tipus de Menorca*. Treballs del Museu de Menorca, 29. Museu de Menorca, Maó.
- López Garí, J.M., Marlasca, R., McMinn, M. y Ramis, D. (2013): L'explotació dels recursos animals a les Pitiüses a inicis del segon mil·lenni cal BC: un tret diferencial? En: Riera, M. y Cardell, J. (Coord.), *V Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (Palma, 28 a 30 de setembre, 2012)*: 35-42. Documenta Balear, Palma.
- López Mullor, A. (2015): Les excavacions de la Mancomunitat de Catalunya a l'illa de Mallorca. En: Rovira, J. y Casanovas, A. (Eds.), *La dècada prodigiosa 1914-1924*: 127-144. Museu d'Arqueologia de Catalunya, Barcelona.
- López Pons, A. (2000): El poblament inicial de l'illa de Menorca. En: Guerrero, V., Gornés, S. (Coords.), *Colonización humana en ambientes insulares. Interacción con el medio y adaptación cultural*: 195-214. Universitat de les Illes Balears, Palma.
- Lull, V., Micó, R., Rihuete, C. y Risch, R. (1999): *La Cova des Càrritx y la Cova des Mussol. Ideologia y sociedad en la prehistoria de Menorca*. Consell Insular de Menorca. Barcelona.
- Martínez Mira, I. y Vilaplana Ortego, E. (2014): Análisis de las cuentas de collar de la tumba 19 de la necrópolis de Boliche. En: A. J. Lorrio (dir.): *La Necrópolis orientalizante de Boliche (Cuevas del Almanzora, Almería)*: 235-268. Madrid.
- Mascaró Passarius, J. (1968): *Historia de las Baleares*. Gráficas Miramar. Palma.
- Mederos, A. (1996): Interludio oriental. Consideraciones sobre una cerámica cicládica en el Museo de Menorca (Islas Baleares). *Tabona*, 9, pp. 99-411.
- Montero, I., Gornés, S., De Nicolás, J. y Gual, J. (2005): Aproximación a la metalurgia prehistórica de Menorca entre el 2000 y el 650 cal a.C. *Mayurqa*, 30(1), pp. 289-306.
- Morales, J.V. (2009): Estudi de la fauna del jaciment de Biniparratx Petit (Sant Lluís, Menorca): La cisterna sud i el dipòsit nord. En: Hernández-Gasch, J. (ed.), *Memòria científica. La Casa 1 de Biniparratx Petit (Sector B) – "Casa Serra-Belabre" (Sant Lluís, Menorca)*. Campanyes de 2000, 2001 i 2003. Informe inédito.
- Navarro, F.J. (2004): *Excavaciones arqueológicas en el yacimiento de Ses Talaies de n'Alzina*. Consell Insular de Menorca. Llibres del Patrimoni Històric i Cultural, 2. Maó.
- Pericot, L. (1972): *The Balearic Islands*. Thames & Hudson. Southampton.
- Plantalamor, L. (1991a): Los asentamientos costeros de la isla de Menorca. In: *Atti del II Congresso Internazionale di Studi Fenici e Punici, 9-14 Novembre 1987, Vol. 3*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, pp. 1151-1160.

- Plantalamor, L. (1991b): *L'arquitectura prehistòrica i protohistòrica de Menorca i el seu marc cultural*. Trabajos del Museo de Menorca, 12. Museu de Menorca, Maó.
- Plantalamor, L. (1997): La prehistòria de las islas Baleares. *Espacio, Tiempo y Forma, Serie I, Prehistoria y Arqueología*, 10: 325-389.
- Plantalamor, L. 2005. Les illes de Mallorca i Menorca abans de la conquesta romana. En Tugores, F. (coord.), *El món romà a les Illes Balears*: 11-15. Barcelona, Fundació La Caixa.
- Plantalamor, L., Anglada, M. y Ferrer, A. (2012): Els aixovars dels sepulcres col·lectius de l'illa de Menorca: elements de tradició neolítica i calcolítica i evidències de relacions amb l'exterior. *Rubricatum. Revista del Museu de Gavà*, 5: 433-440.
- Plantalamor, L. y Marqués, J. (2003): *El sepulcre d'Alcaldús. El Megalitisme de Menorca en el context de la Mediterrània Occidental*. Treballs del Museu de Menorca 26. Museu de Menorca, Maó.
- Plantalamor, L., Tanda, G., Tore, G., Baldaccini, P., Del Vais, C., Depalmas, A., Marras, G., Marneli, P., Mulè, P., Oggiano, G. y Spano, M. (1999): Cap de Forma (Minorca) la navigazione nel Mediterraneo occidentale dall'età del Bronzo all'età del Ferro. *Antichità Sarde*, 5: 11-160.
- Pons, G. (2009). Excavacions arqueològiques al poblat prehistòric des Pou Celat (Porreres): alguns elements d'interès. En: Salas, M. (Coord.), *1ª Trobada d'Arqueòlegs de les Illes Balears. Manacor, 15 i 16 de setembre de 2006*: 89-96. Consell Insular de Mallorca, Palma.
- Ramis, D. (2010): From Colonisation to Habitation: Early Cultural Adaptations in the Balearic Bronze Age. En: Van Dommelen, P. y Knapp, B. (Eds.), *Material Connections in the Ancient Mediterranean. Mobility, Materiality and Mediterranean Identities*: 64-84. Routledge, Londres.
- Ramis, D. (2017). Evidències de contactes exteriors al món talaiòtic a partir de l'estudi del registre faunístic. En: Prados, F.; Jiménez, H. y Martínez, J.J. (Coord.), *Menorca entre Fenicis i Púnics*: 201-217. Murcia, Universidad de Murcia.
- Ramis, D. y Salas, M. (2012): Chronology of the S'Hospitalet Vell Naveta Village: An Example of Bronze Age Settlement in the Balearic Islands. *Radiocarbon*, 56 (2): 375-385.
- Ramis, D., Anglada, M., Ferrer, A., Plantalamor, L. y Van Strydonck, M. (2017): Faunal introductions to the balearic islands in the early 1st millennium CAL BC. *Radiocarbon* (en prensa).
- Ramis, D. & Anglada, M. (2014): Una aproximació a l'explotació dels recursos faunístics a Menorca durant l'edat del Bronze: la naveta de cala Blanca (Ciutadella). *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 55: 175-197.
- Rihuete, C. (2000): *Dimensiones bio-arqueológicas de los contextos funerarios. Estudio de los restos humanos de la necrópolis de la Cova des Càrritx (Ciutadella, Menorca)*. Tesis Doctoral, Departament d'Antropologia Social i Prehistòria, Divisió de Prehistòria, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Rosselló-Bordoy, G. (1972): La prehistoria de Mallorca. Rectificaciones y nuevos enfoques al problema. *Mayurqa*, 7: 115-154.
- Hunt, M.A., Llull, B., Perelló, L. y Salvà, B. (2014): Aprovechamiento de recursos cupríferos en la Edad del Bronce de Menorca: la mina de Sa Mitja Lluna (Illa den Colom). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 24. pp. 85-109.
- Sánchez López, E., Gutiérrez Rodríguez, M. y Orfila Pons, M. (2013): Los asentamientos costeros de Menorca: el caso de Es Castellet (Calescoves, Alaior). En: Riera, M., Cardell, J. (Coord.), *V Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (Palma, 28 a 30 de setembre, 2012)*: 59-68. Documenta Balear, Palma.
- Sanders, E.A.C. (1979): The animals found in the cave of Son Boronat (Mallorca) and some preliminary notes on possible changes in the subrecent rodent populations of Mallorca. *Bolletí de la Societat Arqueològica Lul·liana* 37: 51-58.
- Sanders, E.A.C. (1984): Evidence concerning late survival and extinction of endemic Amphibia and Reptilia from the Bronze and Iron Age settlement of Torralba den Salort (Alaior, Menorca). En Hemmer, H. y Alcover, J.A. (eds), *Història Biològica del Ferreret*. 123-128. Monografies Científiques, 3. Palma, Moll.

- Sintes, E. y Isbert, F. (2009): Investigación arqueológica y puesta en valor del Recinto Cartailhac: una unidad doméstica del siglo II ANE en el poblado talayótico de Torre d'en Galmés. *Patrimonio cultural de España*, 1: 251-260.
- Sureda, P., Camarós, E., Cueto, M., Teira, L. C., Aceituno, F. J., Alberó, D., Álvarez-Fernández, E., Bofill, M., López-Dóriga, I., Marín, D., Masclans, A., Picornell, Ll., Revelles, J., Burjachs, F. & Masclans, A. (2017): Surviving on the isle of Formentera (Balearic Islands): Adaptation of economic behaviour by Bronze Age first settlers to an extreme insular environment. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12: 860-875.
- Topp, C. (1985): *El jarrito cicládico supuestamente hallado en Menorca*. Trabajos del Museo de Menorca, 4. Museu de Menorca, Maó.
- Veny, C. (1982): *La necrópolis protohistórica de Cales Coves*. Menorca. Bibliotheca Praehistorica Hispana, XX. Madrid.





## Parte II: Itinerarios de Geomorfología Litoral de Menorca



**Societat d'Història  
Natural de les Balears**



# Diagnosís geomorfológica y gestión territorial litoral en el marco del proyecto LIFE-RENEIX

Agustí Rodríguez<sup>1</sup>, Irene Estaún<sup>2,3</sup>, Joan Solà<sup>2</sup>, Mireia Comas<sup>2</sup>, Pere Fraga<sup>2</sup> y Eva Cardona<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geoservei, Projectes i Gestió Ambiental, Maó

<sup>2</sup> Institut Menorquí d'Estudis, IME, Maó

<sup>3</sup> Consell Insular de Menorca, Maó

## RESUMEN

La zona comprendida entre las playas de Binimel·là y Cala Mica (Es Mercadal, Norte de Menorca) presenta unos excepcionales valores botánicos, ecológicos y geológicos. Estos valores naturales se han visto sometidos durante años a una gran amenaza de degradación relacionada especialmente con antiguos movimientos de tierras y la apertura incontrolada de accesos rodados. El proyecto LIFE+RENEIX trabajó en la restauración de las zonas degradadas, para alcanzar su restitución paisajística, mediante una cuidadosa cartografía de diagnóstico de puntos críticos del drenaje, de peligro geológico en taludes naturales y antrópicos y de la evolución temporal en relación con fenómenos erosivos.

**Palabras clave:** *tipos de costa, gestión litoral, Menorca*

## ABSTRACT

The area between the beaches of Binimel·là and Cala Mica (Es Mercadal, Northern Menorca) has exceptional botanical, ecological and geological values. For many years, these natural values have suffered a great threat of degradation specially related to old landslides and the uncontrolled opening of roadways. The LIFE+RENEIX project worked in the restoration of degraded areas in order to achieve its landscape restitution, using a meticulous mapping of critical drainage points, geological hazards on natural and anthropic slopes and temporal evolution of erosive phenomena.

**Keywords:** *coast type, coastal management, Menorca*

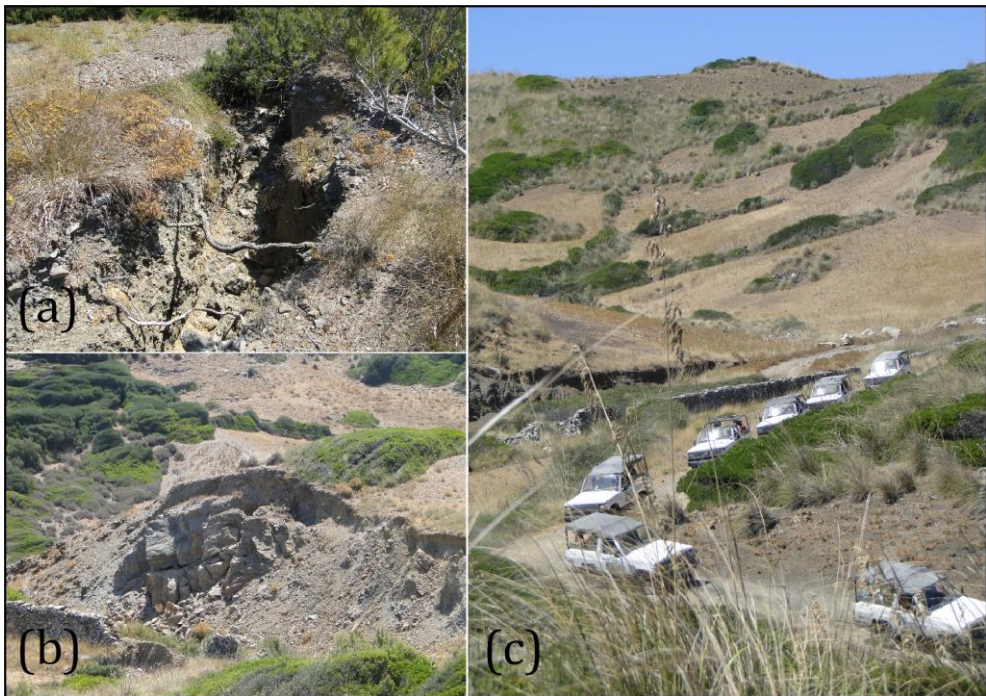
## 1 | Introducción

Entre los años 2009 y 2014 el Consell Insular de Menorca ejecutó el proyecto LIFE Naturaleza LIFE+RENEIX [LIFE07NAT/E/000756] "*Restauración de hábitats de especies prioritarias en la isla de Menorca*", con el objetivo principal de restaurar zonas afectadas por procesos severos de degradación, donde se localizan algunas de las comunidades vegetales más singulares y/o amenazadas de la isla, incluyendo especies de interés prioritario (como *Feméniasia balearica*), algunos endemismos vegetales u otras plantas consideradas muy raras por su distribución restringida.

Para alcanzar esta meta, fue necesaria la recuperación de los valores paisajísticos de las áreas objeto de actuación. El proyecto LIFE+RENEIX, centró su actividad en 4 zonas de la isla (El Pilar-Ets Alocs, Es Murtar, Pas d'en Revull y Binimel·là), que presentaban problemáticas comunes para la flora amenazada que sintéticamente se podrían resumir en: la degradación por procesos urbanísticos, la presencia de procesos erosivos activos, la sobrefrecuentación humana y la proliferación de accesos rodados incontrolados. Entre ellas destaca la zona comprendida entre las playas de Binimel·là y Cala Mica (Macizo de Binimel·là), donde se concentraron una parte importante de las actuaciones proyectadas. El convencimiento por parte del equipo técnico del proyecto que el medio físico es un condicionante clave habitualmente poco tenido en cuenta al valorar y planificar actuaciones para la restauración paisajística y

ecol3gica de una zona, permiti3 la participaci3n de un equipo de ge3logos. Este trabaj3 en la caracterizaci3n de los rasgos geol3gicos y geomorfol3gicos del Macizo de Binimel·là para determinar y garantizar la viabilidad de las actuaciones a emprender con el objetivo de conseguir una recuperaci3n integral para restaurar la zona.

El àrea que comprende el Macizo de Binimel·là se caracteriza por presentar unos valores botànicos y ecol3gicos con un elevado inter3s de conservaci3n conjuntamente con un excepcional valor patrimonial geol3gico, todos ellos sometidos durante muchos a3os a profundos procesos de degradaci3n. Los or3genes de esta situaci3n hay que buscarlos en diferentes factores antr3picos relacionados, inicialmente, con antiguos movimientos de tierras y la apertura de accesos rodados causados por las pretensiones de construir una urbanizaci3n turística en los a3os setenta que no prosper3. Ademàs, en la ùltima d3cada, esta degradaci3n se ha visto especialmente acelerada por la proliferaci3n de pràcticas agresivas con veh3culos motorizados, as3 como tambi3n, aunque en menor medida, por un inter3s social creciente relacionado con un paraje espectacular de calas vírgenes y su paisaje natural circundante. Lo que lleva asociado una elevada frecuentaci3n y el desarrollo de actividades econ3micas blandas como senderismo, paseos a caballo, cicloturismo o màs intensas como excursiones en veh3culos 4x4 (Fig. 1).



**Figura 1.** Ejemplos de la alteraci3n del medio f3sico en el Macizo de Binimel·là; (a) Càrcavas, (b) inestabilitats en taluds antr3picos y (c) pràcticas incontroladas con veh3culos motorizados.

**Figure 1.** Examples of land degradation at Binimel·là; (a) Rills and gullies; (b) slips and slidings; (c) environmental damage caused by vehicles.

## 2 | Valor y marco geológico

Menorca presenta una gran variabilidad paisajística que está condicionada fundamentalmente por sus características geológicas. La isla está constituida por dos comarcas geológicas muy diferentes (*Tramuntana* y *Migjorn*), separadas por una línea de fractura con orientación NO-SE que sigue más o menos la carretera principal que une las dos principales localidades (Maó y Ciutadella). Así, esta carretera actúa como límite entre los materiales preorogénicos, predominantemente siliciclásticos, de la región de *Tramuntana* (Paleozoico y Mesozoico) y los materiales postorogénicos carbonatados de la región de *Migjorn* (Mioceno).

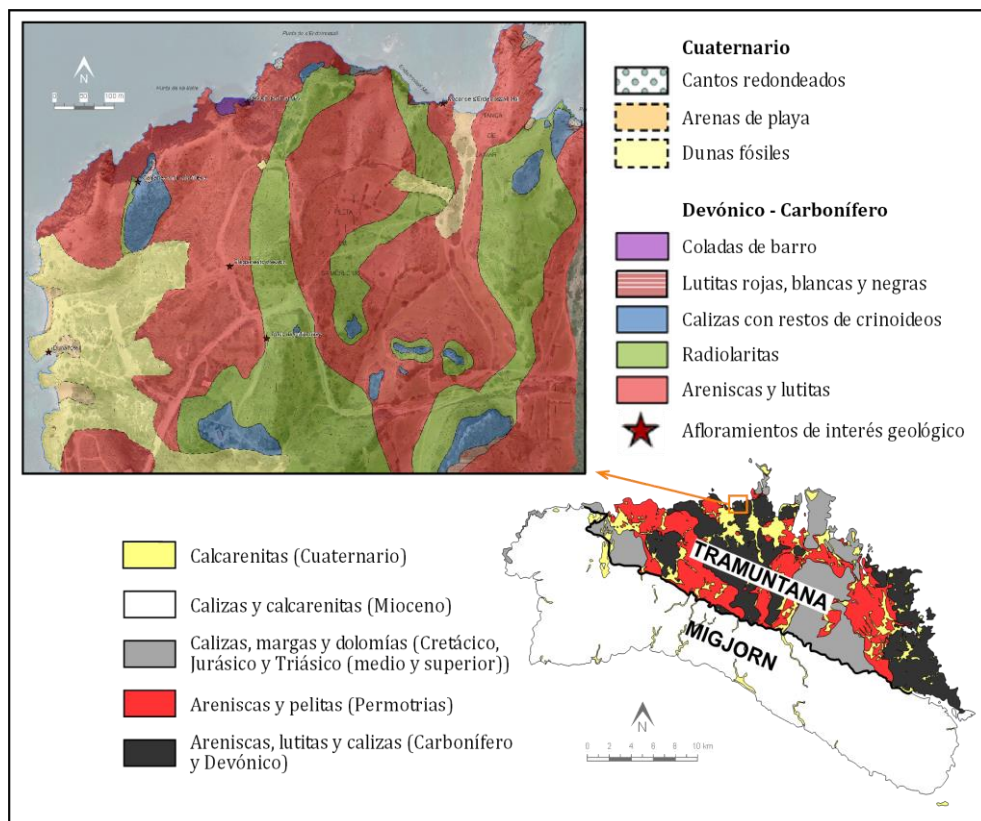
Persisten dudas sobre la edad de las rocas que forman la serie de Binimel·là, ya que muchos de los fósiles que se encuentran en las rocas de la zona corresponden a organismos que fosilizaron durante el Devónico y posteriormente en el Carbonífero fueron resedimentados, sufriendo así varios ciclos de sedimentación. De este modo, las rocas que se encuentran en Binimel·là abarcan parte del Devónico hasta el comienzo del Carbonífero, un periodo de tiempo que en Menorca presenta numerosos interrogantes.

Las areniscas y la *llosella* (roca sedimentaria predominantemente arcillosa de aspecto pizarroso) del Paleozoico forman la serie geológica de Binimel·là junto con una sorprendente mezcla de numerosas litologías poco frecuentes en el conjunto de la comarca de *Tramuntana* (radiolarites, calizas con acumulaciones de restos del crinoideo *Balearocrinus breimeri* (Bourrouilh & Termier, 1972), lutitas rojas, blancas y negras, coladas de barro, nódulos fosfatados y rocas volcánicas intrusivas – cuarzoqueratofidos (Bourrouilh, 1973)– y efusivas (basaltos (Hermite, 1879)) (Figura 2). Una serie que se extiende en dirección N-S, con un notable carácter discontinuo y que se caracteriza por encontrarse muy deformada, formando espectaculares estructuras plegadas complejas como consecuencia de los intensos movimientos orogénicos

Así, la serie geológica de Binimel·là, se caracteriza por una gran variabilidad litológica, de difícil orden cronológico, donde los materiales fueron sedimentados en un área probablemente no lejana y posteriormente se vieron afectados por procesos de deslizamiento que los hicieron mezclar y transportar hasta la posición que ocupan actualmente. Esta serie ha sido interpretada por algunos autores (Bourrouilh, 1973; Rosell & Elizaga, 1989), como un nivel olistostrómico intercalado en la parte media de la serie carbonífera menorquina, donde se alternan materiales sedimentados en fondos abisales junto con otros interpretados como niveles de mares someros. Cabe destacar que estos materiales de edad paleozoica, en Binimel·là están cubiertos discordantemente por dunas fósiles del Cuaternario con espectaculares laminaciones cruzadas a gran escala (Fig. 2).

## 3 | Diagnósis geomorfológica y geodinámica

Una parte importante del paisaje que observamos lo conforma el modelado del relieve, la geomorfología. Las formas que observamos, si inicialmente obviamos la cubierta vegetal, son el resultado de cómo la geología ha dado respuesta a los principales procesos geodinámicos, de escorrentía superficial (con procesos de erosión, transporte y sedimentación), gravitacionales (con caídas de bloques, movi-



**Figura 2.** Situaci3n geogr3fica y geol3gica simplificada del 3rea de estudio.  
**Figure 2.** Study site location and simplified geological map.

mientos planares, deslizamientos, etc.) y de la din3mica marina con la acumulaci3n y la erosi3n de playas. Interpretar esta geomorfolog3a nos lleva a entender los procesos geodin3micos naturales ocurridos en el 3mbito de estudio de Macizo de Binimel-l3. Detectar rasgos morfol3gicos an3malos o aspectos no previstos, como indicadores de algo, pone en alerta de procesos din3micos naturales influenciados por el hombre. As3, identificar procesos geodin3micos alterados y caracterizar sus efectos es lo que permite decidir si es necesario actuar para devolver el proceso a su estado natural y es lo que permite proponer determinar las actuaciones a desarrollar.

### Red de drenaje

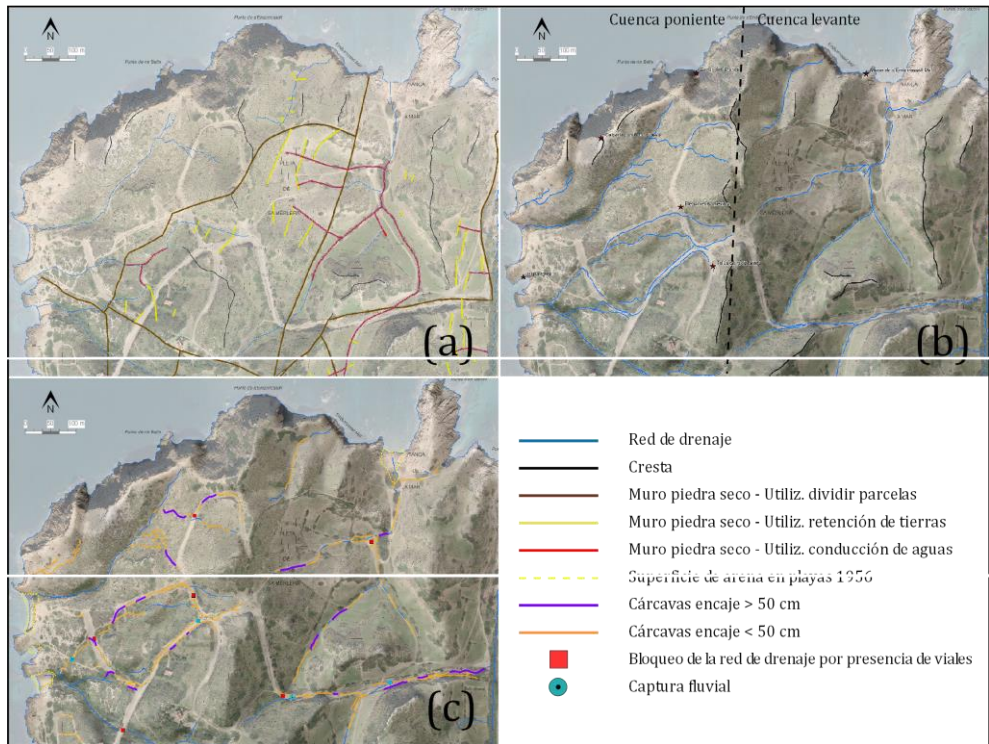
La reconstrucci3n de la red de drenaje original, mediante el uso de las ortofotoim3genes m3s antiguas y la identificaci3n de elementos etnol3gicos utilizados para su conducci3n, permiten obtener una imagen bastante precisa y cercana a la del equilibrio natural de la escorrent3a. As3, se interpreta como red natural a la correspondiente al a3o 1956, a3o del que se disponen las fotograf3as a3reas m3s antiguas, dado que el efecto antr3pico era m3nimo e implicaba un equilibrio m3s pr3ximo al natural. Aunque evidente, cuando se observan las canalizaciones de muros de piedra en seco que permitan la conducci3n del agua, se debe tener en cuenta que estas



canalizaciones de pared seca respetan en gran medida el curso natural del agua como lo demuestra su buen grado de definición.

La red de drenaje de la zona de estudio queda subdividida en dos unidades o cuencas de recepción principales. La primera ocupa la mitad de poniente del Macizo de Binimel·là y sus cursos fluviales desembocaban en las pequeñas playas que forman el margen este de la cala de Binimel·là, mientras que la segunda unidad comprende la mitad de levante del ámbito de estudio y por ella circulaba originariamente el torrente principal del macizo con desembocadura en el norte, en la playa conocida como caló de s'Enderrossall. Durante la ejecución del proyecto LIFE+RENEIX se comprobó que estas cuencas mostraban cambios considerables respecto al año 1956, como consecuencia de la apertura de viales que provocaron que la red de drenaje se tuviera que adaptar a un nuevo equilibrio altamente inestable (Fi. 3).

Los cursos fluviales se encontraban muy influenciados por la presencia de los viales de la urbanización fallida. La apertura de estos accesos rodados implicó la alteración de los trazados naturales de la red de drenaje, de su longitud y pendiente, además de la superficie de la cuenca, resultando la presencia de áreas donde se incre-



**Figura 3.** Consecuencias de la alteración de la red de drenaje en el Macizo de Binimel·là. (a) Geomorfología original superpuesta a la ortofoto-imagen actual; (b) Geomorfología previa a la intervención en el marco del LIFE+RENEIX; (c) Efectos de la red de drenaje inestable sobre el medio geológico.

**Figure 3.** Human impacts on the drainage network at Binimel·là. (a) Original network; (b) LIFE+RENEIX Project former landform; (c) Impacts on drainage network.



mentaba la capacidad erosiva del agua superficial por mayor capacidad de incisión lineal de los torrentes y que implicaba la formación de cárcavas. Estos procesos eran habituales principalmente en los viales construidos paralelamente a la red de drenaje natural, que a la práctica, provocaron una reducción del perfil longitudinal y un aumento de su pendiente, incrementando su capacidad erosiva. Por otro lado, la presencia de viales perpendiculares a los cursos superficiales provocaron la aparición de bloqueos de la red de drenaje, implicando la modificación de sus dinámicas sedimentarias e incrementando también los procesos erosivos que especialmente se traducían en importantes inestabilidades en los márgenes de los accesos rodados. Los bloqueos condujeron a que algunos torrentes aumentaran su área de influencia, originando unos procesos de captura fluvial que incrementaban la superficie de unas cuencas y a su vez anulaban completamente a otras. Unos procesos que se daban de manera incontrolada, provocando la aparición de numerosos flujos de agua en función de la disposición de los viales. Además, la alteración de la escorrentía superficial por la presencia de viales transversales implicó también la existencia de áreas donde disminuyó la llegada del sedimento terrígeno que contribuía al mantenimiento de pequeñas playas de arena como el caló de s'Enderrossall. La reducción del área de las cuencas fluviales, motivada preferentemente por varias capturas de los cursos fluviales en su cabecera, provocaron que una parte de la cuenca fuera desviada hacia otra, transformando su dinámica sedimentaria (Fig. 4).

### ***Inestabilidades de origen natural y antrópico***

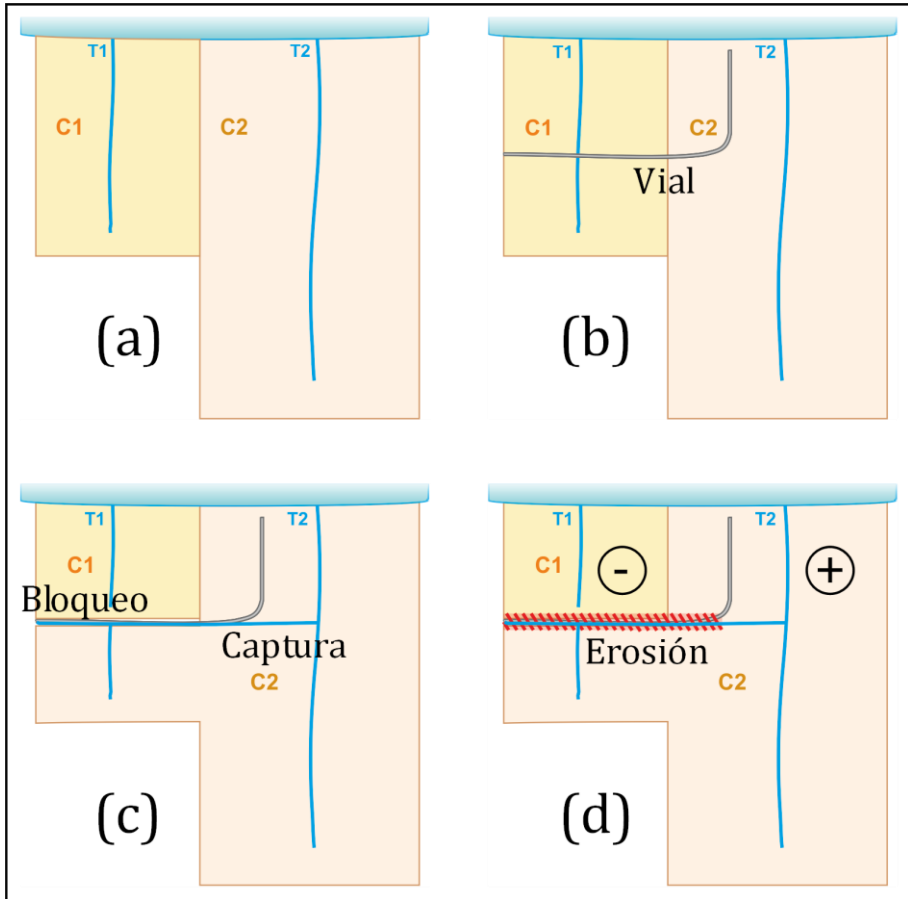
La cartografía geomorfológica utilizada para identificar el peligro asociado a los escarpes naturales y antrópicos se centró en determinar todos aquellos elementos que permiten prever la susceptibilidad de generación de movimientos gravitacionales. Así, teniendo en cuenta el origen de estos movimientos se diferencian como generadores naturales de inestabilidades: los acantilados, los escarpes y las crestas, muchas veces seccionadas por la construcción de viales. Los taludes antrópicos, abiertos durante la construcción de los viales, se caracterizaron a partir de estaciones geomecánicas para poder determinar el factor de seguridad de los mismos.

La determinación de la susceptibilidad o potencial situación de riesgo del conjunto de fenómenos asociados a la existencia de escarpes naturales se llevó a cabo mediante una caracterización geológica de campo y un análisis de interpretación fotogeológica exhaustiva que permitieron, además de la elaboración de una cartografía geomorfológica de detalle, la detección y caracterización del conjunto de fenómenos asociados a los escarpes naturales, los indicios de actividad geomorfológica y, posteriormente, a la caracterización de la magnitud y frecuencia de los fenómenos e indicios identificados.

La magnitud de los fenómenos e indicios se determinó en base a los volúmenes de salida y a la altura del escarpe. Los volúmenes de salida se estimaron a partir de la litología de los materiales que conforman los escarpes, así como la estratificación y el grado de alteración asociado. En este sentido, se consideró la dimensión mínima (1.000 cm<sup>3</sup>) susceptible de desprenderse en función de las diversas litologías identificadas y su grado de alteración. Por otra parte, la frecuencia de un fenómeno viene definida en relación a su periodo de retorno. No obstante, a la escala de trabajo muy rara vez se dispone de datos suficientes para determinar los periodos de retorno por una ladera, por lo que se llevó a cabo una estimación de la frecuencia de salida en

función de la abundancia de indicios y, por tanto de su actividad aparente. Finalmente, la peligrosidad se obtuvo del cruce de los datos de magnitud y frecuencia (Tabla 1).

La representación geométrica del plano de cada talud antrópico y las discontinuidades (diaclasado y estratificación), en una proyección semiesférica equiareal de Schmidt, permite obtener las inestabilidades susceptibles a producirse: roturas planares (inestabilidades producidas a través de una única superficie plana) y roturas en forma de cuña (inestabilidades producidas a través de dos planos de discontinuidad dispuestos oblicuamente a la superficie del talud). Una rotura planar podrá darse cuando exista un plano de discontinuidad de dirección similar a la del



**Figura 4.** Procesos geodinámicos resultantes de la construcción de los viales de la fallida urbanización de Binimel·là; (a) Equilibrio natural de las redes de drenaje T1 y T2 en dos cuencas supuestas C1 y C2, (b) Construcción de viales, (c) Bloqueo de T1 y desvío (captura fluvial) de su escorrentía hacia C2 por efecto del vial e incremento del área de influencia de C2, (d) Aparición de intensos fenómenos erosivos a lo largo de la nueva red y variaciones en la llegada de sedimento, disminuyendo en C1 y aumentando en C2.

**Figure 4.** Road and path impacts on geodynamic processes related to the Binimel·la urbanization development. (a) Natural equilibrium profile T1 and T2 at neighbouring basins C1 and C2; (b) road and path construction; (c) Disruption of T1 and fluvial capture towards C2; (d) Erosive phenomena related to the new network and changes on sediment supply at C1 and C2.

Magnitud	Altura escarpe			Actividad de salida (Frecuencia)	
	<10 m	10-20 m	>20 m	Baja	Sin indicios
Volumen de salida estimado					
<1000 cm <sup>3</sup>	Baja	Mediana	Alta	Mediana	Presencia de bloques caídos aislados y dispersos al pie del escarpe o ladera abajo
>1000 cm <sup>3</sup>	Mediana	Alta	Alta	Alta	Presencia de áreas de bloques caídos al pie del escarpe o ladera abajo
Matriz de peligrosidad		Actividad de salida (Frecuencia)			
		Baja	Mediana	Alta	
Magnitud	Baja	Peligrosidad baja	Peligrosidad baja	Peligrosidad baja	
	Mediana	Peligrosidad baja	Peligros. mediana	Peligros. mediana	
	Alta	Peligros. mediana	Peligrosidad alta	Peligrosidad alta	

**Tabla 1.** Magnitud de desprendimientos en roca dura en base a los volúmenes de salida y a la altura del escarpe y frecuencia de los fenómenos en función de la abundancia de indicios y matriz de peligrosidad resultante.

**Table 1.** Slope processes risk and magnitude according to the volume of waste materials, Cliff height and triggering mechanism.

talud y buzamiento menor, mientras que una rotura en forma de cuña se identificará cuando existan dos familias de discontinuidad de direcciones oblicuas respecto al plano representativo del talud. El cálculo del factor de seguridad para cada inestabilidad identificada geoméricamente, permite obtener las roturas inestables y, por tanto, aquellos que pueden llegar a producirse. Este análisis numérico se obtiene con el método de ábacos de Hoek & Bray, 1977 y permitió la elaboración de un mapa de estabilidad asociado a los escarpes antrópicos donde se diferenciaron los taludes estables e inestables.

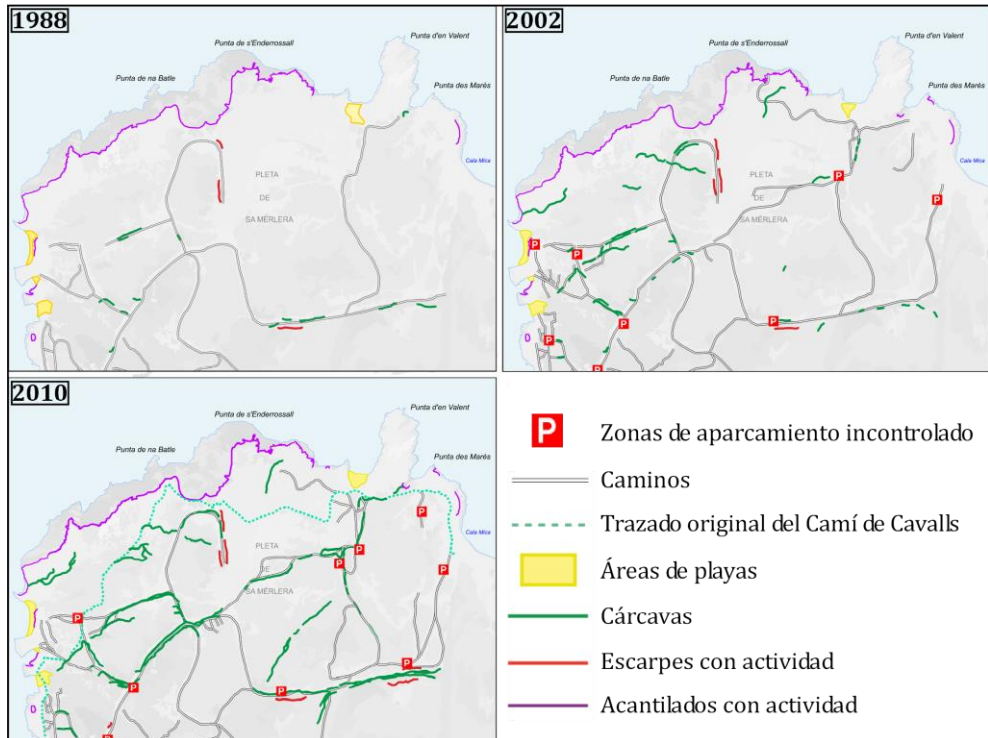
### **Evolución histórica**

Los principales procesos erosivos y sedimentarios en el ámbito de estudio se vieron influenciados por la alteración de la red de drenaje original mediante la construcción de los viales. Sin embargo, a partir de una evolución temporal de frecuentación humana creciente, principalmente motorizada en viales existentes y fuera pista, se propiciaron y/o incrementaron los procesos erosivos del suelo en áreas de torrente y en laderas. Esta evolución de la alteración del medio físico vinculada a un incremento de la frecuentación, pudo ser estudiada mediante el análisis detallado de las series de fotografía aérea disponibles. En la Fig. 5 se han representado los cambios más significativos sobre el mapa topográfico de la zona para facilitar su visualización. La ortofotoimagen del vuelo de 1988 permite detectar variaciones respecto al medio físico original (establecido a partir de la ortofotoimagen de 1956)

asociadas especialmente a la construcción de los accesos rodados. Se detectan escarpes con indicios de actividad, la aparición de cárcavas, reducciones areales de arena en algunas playas y especialmente procesos de captura fluvial, de los cuales el más significativo provocó el desvío de la escorrentía que originariamente se dirigía a la playa del caló de s'Enderrossall hacia cala Mica.

Las fotografías aéreas siguientes, no muestran cambios remarcables en la formación de nuevas cárcavas o en la aparición de nuevas inestabilidades en los escarpes. En cambio, en el año 2002 se detecta un cambio sustancial respecto a las anteriores. La intensa presión de viales, abiertos para desarrollar prácticas con vehículos motorizados, para alcanzar zonas incontroladas de aparcamiento más cercanas a las playas o acortar su camino de acceso junto a la aparición de senderos producto del paso descontrolado de peatones, se traducen especialmente en un considerable incremento de cárcavas. En 2010 se produce un espectacular incremento de la erosión, tanto por parte del drenaje, como para el asociado al tráfico rodado incontrolado.

La erosión asociada a la red de drenaje en el macizo de Binimel·là supuso la alteración y especialmente la denudación de los materiales de la zona. Es decir, fundamentalmente se produjo un proceso de barrido en los materiales producto de la meteorización (suelos y recubrimientos superficiales), pero también y fundamentalmente, de aquellos antrópicos utilizados como relleno en la construcción de los



**Figura 5.** Evolución histórica representativa de los principales efectos de degradación en la zona de estudio motivados fundamentalmente por la actividad antrópica.

**Figure 5.** Land degradation history associated to the human impact at the study site. .

de los viales. Cabe considerar que estos procesos erosivos no se daban de la misma forma en todo el ámbito de estudio. En la mitad de poniente, la erosión se producía especialmente a lo largo de los viales, formando numerosas cárcavas con incisiones inferiores a los 50 cm que puntualmente alcanzan órdenes métricos en los lugares de fuerte desnivel. Al norte de esta zona, se daban procesos de erosión remontante en varios puntos con poca o nula cuenca de recepción aguas arriba. En estos lugares, se asoció el incremento de frecuentación a lo largo del Camí de Cavalls, que a su vez coincidía con el trazado del curso de un torrente, a un proceso de erosión, donde el curso fluvial se veía sometido a una mayor pendiente respecto a la parte superior de la cuenca de captación, favoreciendo la propagación de la incisión ladera arriba. En la mitad de levante los procesos de captura del torrente se traducían en términos de erosión, en un completo barrido de suelos y relleno antrópico a lo largo del vial principal de la zona, llegando a generar profundas incisiones que superaban los 3 metros de profundidad. Esta intensa erosión incidía en las inestabilidades de los taludes detectadas a lo largo de los accesos rodados.

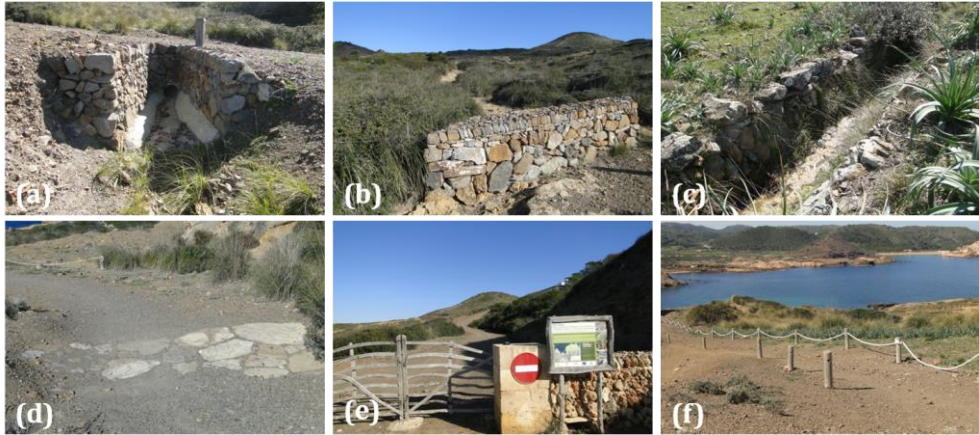
#### **4 | Actuaciones desarrolladas**

La superposición de preexistencias y de efectos naturales y antrópicos sobre la geodinámica en el sector permiten proponer acciones basadas en criterios geológicos y geomorfológicos, siempre siguiendo una secuencia lógica o de prioridad que las hace efectivas desde el primer momento, es decir, no se llevará a cabo un relleno de cárcavas si antes no se han resuelto ordenadamente las causas que han motivado su generación.

##### ***Recuperación de la red de drenaje***

El control de la red de drenaje es fundamental para lograr el éxito del proyecto, por lo que se ejecutaron numerosas acciones para frenar procesos erosivos y recobrar la aportación sedimentaria continental de playas que la hubieran perdido, siempre con el fin de intentar recuperar la red de drenaje original. La principal actuación del LIFE+RENEIX en Binimel·là consistió en la construcción de un puente que permitió recuperar el curso natural de un torrente en la parte de poniente del sector, que había sido bloqueado por la construcción de un vial de la urbanización. A su vez, este bloqueo provocó que en este punto se concentrara un grave peligro por deslizamiento del propio vial, que fue corregido mediante la construcción de esta infraestructura. Otros bloqueos y procesos de captura fluvial, relativamente abundantes en todo el Macizo por la existencia de la extensa red de viales, fueron corregidos mediante excavaciones que permitieran el paso libre de la red de drenaje según su trazado original y reconducir así el proceso de presa.

Además, el restablecimiento de la red de drenaje requirió la excavación de cunetas junto a caminos para la reconducción de la escorrentía, incluyendo puntos de descarga hacia los principales torrentes (Figura 6a), para favorecer la incisión de la red de drenaje y evitar el curso descontrolado de agua a lo largo de viales u otros puntos donde no quedaba definida. Puntualmente se optó por estriar el terreno para facilitar la adaptación de la red de drenaje en la recuperación de su curso. También se instalaron canales de drenaje bajo muros de piedra, se construyeron nuevos muros que



**Figura 6.** Ejemplos de actuaciones desarrolladas en el Macizo de Binimel·là; (a) puntos de desguace de la escorrentía, (b) muros de reconducción de la red de drenaje, (c) recuperación de canales tradicionales, (d) losas para el mantenimiento de caminos, (e) carcerería y bloqueo de caminos, (f) vallados blandos.

**Figure 6.** Actions implemented at Binimel·là: (a) runoff caption; (b) walls as runoff interceptors; (c) channel recovery; (d) path maintenance; (e) barriers and access limitations; (f) soft barriers.

actúan como barrera para reconducir la escorrentía (Fig. 6b) y limpieza de vegetación y sedimentos canalizaciones de muros de piedra en seco utilizadas tradicionalmente para el control de la red (Fig. 6c). En aquellos puntos donde no se pudo evitar el paso del agua superficial por algún vial a mantener, se instalaron losas para evitar la erosión del camino (Fig. 6d).

Las cárcavas generadas por los efectos de una red de drenaje descontrolada, fueron rellenadas con el material excavado en las acciones citadas anteriormente, pero únicamente en aquellos caminos que se decidió mantener y restaurar. Estas actuaciones se desarrollaron con maquinaria ligera o manualmente en aquellas zonas de elevado valor botánico. Para frenar la erosión producida en algunos viales y favorecer el desarrollo de comunidades vegetales, también se construyeron muros con piedra en seco con el fin de retención de tierras en laderas, tal y como se hacía tradicionalmente en la zona.

### ***Peligro geológico***

También se trabajó en la corrección de los taludes antrópicos con el triple objetivo de minimizar el riesgo geológico, disponer de material adecuado para la mejora ambiental de caminos y reducir el impacto visual y paisajístico de los bloques caídos o inestables que ofrecían una sensación caótica al entorno. Así, por un lado se procedió a sanear y reperfilear algunos taludes para dotarlos de un ángulo estable y por el otro, la retirada del material caído en taludes inestables fue utilizada para reducir la anchura de amplios caminos de acceso que se debían mantener. Estos materiales con los que se redujo la anchura de los viales fueron únicamente depositados en tramos de camino donde afloran las mismas litologías con el fin de minimizar el impacto paisajístico. En aquellas zonas, alejadas de los caminos debidamente señalizados y con riesgo de desprendimientos, no se procedió a reperfilear los taludes inestables pero se advierte a los usuarios, mediante un cartel informativo general del proyecto

LIFE+RENEIX, del peligro geológico asociado a inestabilidades en escarpes y acantilados (Fig. 6e). Por su parte, la utilidad de disponer de un mapa de peligro es directa al valorar los usos y frecuentación antrópica y permitió proponer la modificación de senderos (como ocurrió, por ejemplo, en un tramo del Camí de Cavalls), y también para valorar futuras acciones

### ***Ordenación del uso público***

La elevada y desordenada frecuentación a través de caminos, senderos y especialmente viales abiertos, es otro de los aspectos que se tuvieron en cuenta al proponer modificaciones y medidas de actuación. Por una parte, se instalaron vallados blandos y temporales para evitar el paso de peatones (Fig. 6f), con el objetivo principal de favorecer la desaparición de caminos mediante la revegetación con especies autóctonas de rápido crecimiento y por otra, se construyeron muros de piedra en seco, con pasos de fauna asociados, para minimizar el paso de peatones en áreas más sensibles, pero especialmente para evitar el acceso de vehículos motorizados (Fig. 6e). Las tareas de revegetación fueron acompañadas previamente de la descompactación del terreno.

Estos vallados temporales y muros han permitido encauzar a los visitantes en un nuevo trazado del Camí de Cavalls, que fue modificado para lograr una frecuentación más ordenada del mismo. El trazado original del histórico camino fue valorado desde el punto de vista de riesgos geológicos, pero también desde el punto de vista de efectos de erosión del suelo, al haberse convertido en los últimos años en un trazado con un mayor potencial erosivo o un trazado propiciador de fenómenos desencadenantes de erosión remontante en áreas relativamente alejadas de su eje. Además, el valor de los hábitats y la vegetación, criterio prioritario a la hora de ejecutar actuaciones, también recomendaban el abandono de algunos tramos de este trazado original del Camí de Cavalls.

Tal y como ya se ha indicado, el uso de estructuras tradicionales de piedra en seco fue muy recurrente en la zona, donde además de ir destinadas a la conducción de agua, fueron utilizadas como divisorias de parcelas, para regular el ganado o para la retención de tierras en laderas. Como consecuencia de la construcción de los viales de la urbanización, muchas de estas estructuras desaparecieron, por lo que una actuación habitual en la ejecución de todo el proyecto se centró en su recuperación en sus diferentes usos tradicionales, pero también actuales como la regulación del uso público. Estas actuaciones permiten, además de la conservación del paisaje, a contribuir al mantenimiento del patrimonio etnológico, así como el fomento de los oficios artesanales.

### ***Patrimonio geológico, divulgación y sensibilización social***

El elevado valor patrimonial de la geología del macizo de Binimel·là se conoce desde tiempo atrás. No obstante, el trabajo geológico detallado que se efectuó con motivo del proyecto terminó permitiendo disponer de una selección de puntos/áreas de especial interés, sobre todo por la excepcionalidad de unos afloramientos caracterizados por la espectacularidad de las formas y la calidad y limpieza de muchos de ellos, que ponen de manifiesto la composición geológica insólita del área y su necesidad de protección (Fig. 7). La caracterización de estos afloramientos en el marco del LIFE+RENEIX ha sido uno de los factores clave que ha llevado al Consell In-





**Figura 7.** Ejemplos del valor patrimonial geológico del área de estudio.  
*Figure 7. Examples of the geological heritage at the study site.*

sular de Menorca a crear un proyecto en torno al aprovechamiento y conservación de la geodiversidad, con el fin de compatibilizar el desarrollo local con la puesta en valor y conservación del patrimonio geológico menorquín mediante la figura de Reserva de la Biosfera (Rodríguez, *et al.*, 2015).

Por otro lado, cabe destacar el esfuerzo del proyecto LIFE+RENEIX para divulgar los resultados obtenidos y sensibilizar a la población sobre los valores naturales de las zonas objeto de actuación, especialmente teniendo en cuenta que el origen de la degradación de estas zonas es en gran parte antrópico y que es imprescindible un cierto grado de concienciación social si se quiere que los logros conseguidos perduren en el tiempo. Las actividades de divulgación y sensibilización social fueron muchas y diversas. Entre ellas destaca la publicación de una guía de flora de Menorca (Fraga i Arguimbau, *et al.*, 2014), con itinerarios interpretativos también disponibles en un visualizador cartográfico web y móvil (IDE MENORCA, [cartografia.cime.es](http://cartografia.cime.es)) o la celebración de un simposio sobre experiencias de restauración de hábitats y conservación de la biodiversidad (Ciutadella, del 28 al 30 de mayo de 2014). También se debe incidir en la activación de una web (<http://lifereneix.cime.es>), la edición de un DVD del proyecto, numerosas publicaciones de carácter científico y divulgativo, la organización de jornadas de voluntariado para implicar a los ciudadanos en las tareas de recuperación, la instalación de paneles informativos o la sensibilización dirigida a colectivos como practicantes de deportes en el medio natural o empresas de turismo activo.

## 5 | Conclusiones

La geomorfología es un reflejo de cómo el medio físico ha soportado el paso del tiempo geológico y los efectos modeladores del clima alcanzando un equilibrio dinámico concreto en la forma como se produce la escorrentía superficial. En el

Macizo de Binimel·là, la apertura de viales rompió este equilibrio, provocando la alteración de algunos cursos superficiales con efectos contrapuestos que se han manifestado a lo largo de décadas.

A partir de una cuidadosa cartografía de diagnosis de puntos críticos del drenaje, de peligro geológico en taludes naturales y de estabilidad en taludes antrópicos y de la evolución temporal en relación a fenómenos erosivos, se propusieron y ejecutaron una serie de actuaciones basadas en criterios geológicos y geomorfológicos, que permitieron llevar a cabo acciones de conservación *in situ* de especies de interés prioritario. Estas actuaciones se encaminaron especialmente a controlar los procesos erosivos y sedimentarios atendiendo a los orígenes que motivaron su alteración, a la regulación de la frecuentación humana y paso incontrolado de vehículos, a la corrección de taludes antrópicos y a la resiembra con especies producidas en viveros locales a partir de semillas recogidas en la misma zona.

De este modo, el proyecto LIFE+RENEIX trabajó en la restauración de la geomorfología original del Macizo de Binimel·là siguiendo el fin principal de recuperar hábitats de interés comunitario y especies endémicas y singulares del área. Hasta el momento, cuatro años más tarde de la ejecución de las intervenciones, se ha conseguido una ordenación del uso público, se puede confirmar que los procesos erosivos han sido controlados, así como la red de drenaje original. Se han recuperado morfologías y restaurado zonas de desmonte y lentamente han ido desapareciendo los primeros viales que se pretendía eliminar. Todo ello ha permitido avanzar hacia la mejora paisajística de la zona. Aún así, deberán pasar años para valorar definitivamente la conveniencia de las actuaciones efectuadas.

## **Bibliografía**

- Bourrouilh, R. y Termier, G. (1972): *Balearocrinus breimeri*. Crinoïde nouveau de Viséen Supérieur de Minorque (Baléares). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 93: 225-232.
- Bourrouilh, R. (1973): *Stratigraphie, sédimentologie et tectonique de l'île de Minorque et du Nord-Est de Majorque (Baléares). La terminasion Nord-orientale des Cordillères Bétiques en Méditerranée occidentale*. Trav. Lab. Géol. Méd. CNRS et Dep. Géol. Struct. Université de Paris. 822 p.
- Hermite, H. (1879): *Études géologiques sur les îles Baléares. Première Partie: Majorque et Minorque*. Pichon et Savy, Paris. 362 p.
- Fraga, P, Arguimbau, P., Estaún, I., Comas, M. y Cardona, E. (2014): *Plantes de Menorca*. Consell Insular de Menorca y Institut Menorquí d'Estudis, Menorca. 336 p.
- Hoek, E. y Bray J.W., (1977): *Rock slope engineering*. Institute of Mining and Metallurgical engineering, London. 402 p.
- Rodríguez, A., de Pablo, F., Marí, S., Solà, J., Joaneda J. y Orfila, J.L. (2015): Valorización de la geodiversidad en el marco de la Reserva de la Biosfera de Menorca. En: Hilarío, A., Mendia, M., Monge-Ganuzas, M., Fernández, E., Vegas J. y Belmonte A. (eds.), *Patrimonio geológico y geoparques, avances de un camino para todos*. Cuadernos del Museo Geominero. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 18: 293-298.
- Rosell, J. y Elízaga, E. (1989): Evolución tectosedimentaria del Paleozoico de la isla de Menorca. *Boletín Geológico y Minero*, 100(2): 193-204.

# Bloques en plataformas rocosas y acantilados del SE de Menorca: tipología y procesos

Francesc X. Roig-Munar<sup>1</sup>, José Á. Martín-Prieto<sup>1,2</sup>, Antonio Rodríguez-Perea<sup>2</sup>, Bernadí Gelabert Ferrer<sup>3</sup> y Joan Manuel Vilaplana Fernández<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Q4atre Consultoria Ambiental, Es Migjorn Gran.

<sup>2</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>3</sup> Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>4</sup> Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. Grup RISKMAT, Universitat de Barcelona, Barcelona.

## RESUMEN

Una de las contribuciones recientes en el estudio de las costas rocosas en Baleares es la caracterización y análisis de las acumulaciones de bloques en crestas de acantilados y costas rocosas bajas. En su conjunto, el itinerario permite, la observación de diferentes sedimentos asociados a eventos de gran intensidad, como son los tsunamis acaecidos a lo largo de los últimos siglos, así como diversas tipologías de acumulaciones de bloques (i.e. bloques aislados, cordones individuales o imbricados). Se trata de bloques de orden métrico que fueron arrancados del borde del acantilado o bien de terrazas y/o de plataformas litorales, siendo transportados por las olas de tsunami o de tormenta tierra adentro.

**Palabras clave:** bloques, acantilados, tsunamis

## ABSTRACT

One of the recent contributions on rocky coast research at the Balearic Islands is the study of cliff top Boulder deposits. This fieldtrip deals with the visit and characterization of different boulder deposits that are related with tsunamis that accounted during the last centuries. Along different coastal stations it is possible to observe boulders larger than 1 m in maximum length (i.e. isolated boulders, imbricated, chain aligned, etc.) that could be deposited by tsunami waves and/or storm waves.

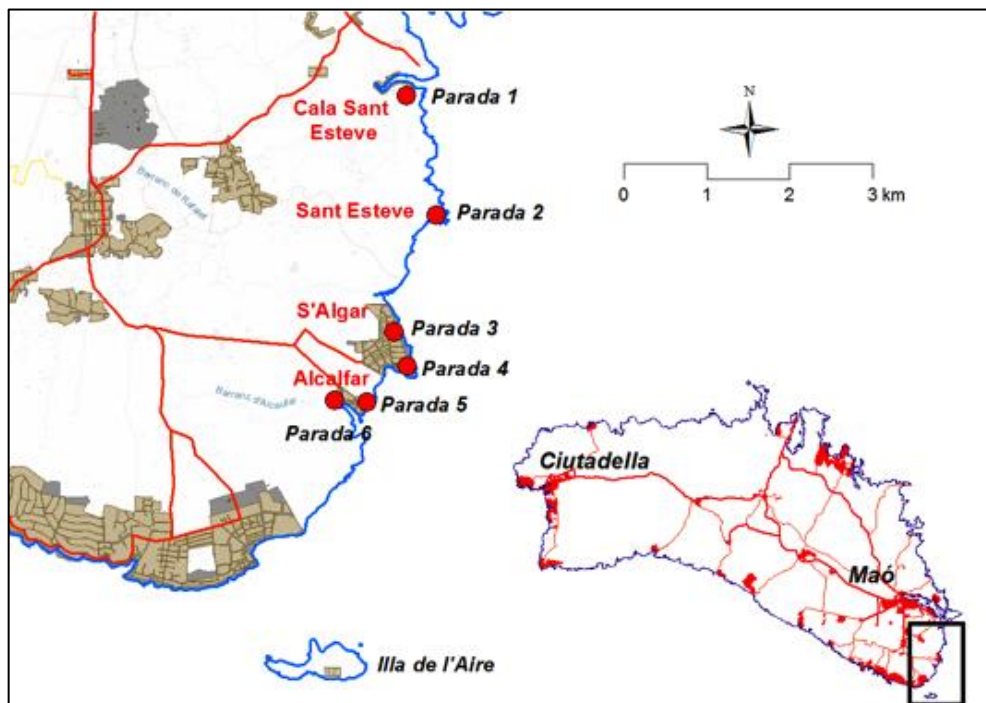
**Keywords:** boulders, rock coasts, tsunamis.

## 1 | Introducción

Una de las contribuciones recientes en el estudio de las costas rocosas en Baleares es la caracterización y análisis de las acumulaciones de bloques en crestas de acantilados y costas rocosas bajas (*cf.* Roig-Munar, 2016). Menorca constituye uno de los emplazamientos donde dicho estudio ha sido más intensivo y en el que se han obtenido algunos de los resultados más concluyentes. En la presente monografía puede consultarse un detallado estado de la cuestión (Roig-Munar *et al.*, 2017).

Por ello, el itinerario que se presenta a continuación, a lo largo de la costa SE de la Menorca, tiene un doble objetivo: (a) por un lado la visita a dos calas, Sant Esteve y Alcalfar, en las que se ha podido observar la incidencia del tsunami del 21 de mayo de 2003 y, por otro lado, (b) explorar dos emplazamientos en los que abundan acumulaciones de bloques, estudiados por Roig-Munar *et al.* (2014) y Roig-Munar (2016), y entre los cuales abundan los ejemplos a los que se atribuye la acción de un tsunami como mecanismo genético. Entre estos dos últimos emplazamientos se encuentra la costa rocosa de s'Algar que en noviembre de 2001 sufrió intensamente los efectos de una de los temporales marinos más severos de la historia recientes de Menorca y en donde abundan los ejemplos de bloques de acantilados ligados a temporales. Finalmente, desde esta localidad, se podrán visualizar acumulaciones de bloques sobre la illa de l'Aire.

En su conjunto, el itinerario (Fig. 1) permite, la observación de diferentes sedimen-



**Fig. 1.** Recorrido y paradas de la salida de campo. 1.- Cala Sant Esteve, afectación del tsunami de 2003. 2.- Bloques y cordones imbricados de tsunami. 3.- Efectos del temporal de 2001. 4.- Bloques sobre el perfil de l'illa de l'Aire. 5.- Bloques de tsunami de Alcafar, y 6.- Cala Alcafar, afectación del tsunami de 2003.

**Fig. 1.** Fieldtrip route and stops. 1.- Cala Sant Esteve, 2003 tsunami evidences. 2.- Tsunami boulders and imbricated boulders. 3.- 2001 Sea storm impacts. 4.- Boulders deposited on top of the illa de l'Aire. 5.- Tsunami boulders at Alcafar, y 6.- Cala Alcafar, evidences of the 2003 tsunami.

tos asociados a eventos de gran intensidad, como son los tsunamis acaecidos a lo largo de los últimos siglos, así como diversas tipologías de acumulaciones de bloques (i.e. bloques aislados, cordones individuales o bloques imbricados). Se trata de bloques de orden métrico que fueron arrancados del borde del acantilado o bien de terrazas y/o de plataformas litorales, siendo transportados tierra adentro.

## 2 | Marco geológico y geomórfico

La zona a visitar se encuentra en el extremo SE de la isla de Menorca, entre la cala de Sant Esteve y Alcafar (Fig. 1), y dentro de la unidad morfo-estructural conocida como Migjorn. Ésta comprende los afloramientos de los materiales postorogénicos del Mioceno superior (calcarenitas y calcilitas) que representan la mitad meridional de la isla y en la que pueden diferenciarse, grosso modo, tres unidades: una zona central, más elevada que presenta alturas medias de 35 m y flanqueada por otras dos áreas de menor altura. Tal disposición responde a un anticlinal laxo que define la estructura de la mitad meridional de la isla (Gelabert *et al.*, 2005). El itinerario discurre por una

costa acantilada y rectilínea, con articulaciones asociadas a ejemplos canónicos de calas (*vid.* Fornós *et al.*, 2017). Los acantilados están formados por materiales del Mioceno superior, correspondientes a dos secuencias estratigráficas (Pomar *et al.*, 2004). La secuencia inferior corresponde al Tortoniense, con depósitos de rampa carbonatada distal, mientras que la secuencia superior corresponde al complejo arrecifal carbonatado.

La zona por la que discurre el itinerario se caracteriza por la presencia de acantilados medios a bajos recortados sobre los materiales miocenos, que cuando afectan a materiales calcilutíticos dan perfiles escalonados, mientras que cuando se desarrollan sobre roquedo calcarenítico resultan en acantilados más verticales, pudiendo superar los 10 m de altura y en las que condicionada por líneas de fracturación, descansa una continua rasa de abrasión (Rosselló, 2004). Todo el conjunto está afectado por una intensa red de diaclasas y pequeñas fracturas que favorecen un litoral articulado y con el desarrollo de algunas calas en las que queda patente la combinación del modelado kárstico, el fluvial y el control estructural (Fornós, 2004; Rosselló, 2004). Un karren litoral bien desarrollado así como la presencia de campos de bloques son los dos atributos que llaman la atención en la zona (Gómez-Pujol y Fornós, 2004a).

Los depósitos de bloques ubicados sobre acantilados de la costa SE de Menorca han sido descritos por Roig-Munar *et al.* (2014) y Roig-Munar *et al.* (2016a), que caracterizaron 1762 bloques situados sobre las terrazas litorales en 8 localidades de estudio. En concreto en las zonas de cala Sant Esteve y Alcafar se han analizado la morfometría de 591 bloques: 218 en Sant Esteve, 368 en Alcafar, y 7 bloques en s'Algar.

Las acumulaciones de bloques e incluso los bloques individualizados presentan unas características (i.e orientación, imbricación) que permiten diferenciarlos como productos de otro tipo de modelado o dinámica distinto de la gravitatoria o la erosión de vertientes (Scheffers y Kinis, 2014). No obstante, se pueden observar procesos de retrabajamiento asociados a temporales extraordinarios que afectan las primeras líneas de bloques imbricados. Los escasos procesos erosivos y/o sedimentarios que se dan en estas costas rocosas han permitido la conservación de tales acumulaciones de grandes bloques (Roig-Munar *et al.*, 2015).

A cada uno de los bloques caracterizados, se les han aplicado diferentes ecuaciones para establecer las columnas de agua necesarias para su transporte a partir de las condiciones previas a su desplazamiento (i.e, bloques sumergidos, delimitados por juntas o subaéreos) así como las condiciones de flujo (i.e. tsunamis o flujos de tormentas) que generan la deposición del bloque (*cf.* Nott, 2003; Pignatelli *et al.*, 2009; Barbano *et al.*, 2010; Engel y May, 2012; Roig-Munar *et al.*, 2015). Al resultado de estas ecuaciones se le añade la altura del acantilado en su cornisa (Roig-Munar *et al.*, 2015) obteniendo las columnas de sobre elevación por remonte (run-up) necesarias para el desplazamiento de cada bloque bajo dichos supuestos.

Menorca presenta un clima marino caracterizado por una altura de ola significativa entre 0,5 y 1,5 m, con períodos de ola máximos asociados de 5 a 7 s y con una dirección dominante del N, seguida de una componente del SE. El régimen extremo pauta probabilidades del 90% para eventos anuales de 5 m de altura de ola significativa, y para periodos de retorno de 20 y 50 años arroja alturas de 7,8 y 8,3 m respectivamente. Los valores extremos de los últimos 50 años alcanzan alturas de ola

de alrededor de 11 m en el sector N de Baleares y en torno a 8,5 m en el SE de Menorca (Cañellas *et al.*, 2007).

Estudios recientes han identificado varios focos de tsunami en la costa norte de Argelia (Álvarez-Gomez *et al.*, 2011), así como también han modelado la propagación de la onda de tsunami y como ésta afectaría a la isla de Menorca, siendo el SE de la Isla el área más afectada, especialmente el sector entre Maó y Punta Prima y muy significativamente las localidades de Cala Sant Esteve y en Alcafar (Fig. 1). En cuanto al tiempo de viaje del tsunami la llegada del frente de onda a Menorca es 40' y 45', tardando aproximadamente de 20' a 25' más para llegar a la costa N de la Isla, aunque ya con menor intensidad.

Las áreas con bloques de orden métrico a una distancia y/o altura superiores a la influencia del oleaje de temporal han sido interpretadas como el producto de flujos de tsunamis. En concreto, se reconocen tanto bloques aislados como agrupaciones de bloques imbricados con morfología de cordones. Estos cordones están asociados a diferentes terrazas de denudación, conformándose estas como áreas fuente por el progresivo desmonte de sus cornisas tierra adentro (Roig-Munar *et al.*, 2016b). Las áreas han sido caracterizadas morfológicamente y presentan un doble perfil. Un perfil asociado a terrazas litorales con alturas inferiores a 1,5 m s.n.m. que incluyen cordones de bloques imbricados con procesos de retrabajamiento esporádicos por el oleaje y otro perfil a cotas superiores a 5 m s.n.m con bloques de grandes dimensiones y elevados grados de inclinación e imbricación.

Desde un punto de vista patrimonial y etnográfico, el área de Sant Esteve presenta numerosas explotaciones de calcarenitas usadas como material de construcción. Muchas de estas pequeñas canteras se abandonaban a medida que iban apareciendo "impurezas" en dichos materiales (Roig-Munar *et al.*, 2016a). Se trata de concreciones de calcita en el Mioceno superior y una dolomitización asociada a infiltraciones subterráneas (Pomar *et al.*, 2004). Estas canteras fueron usadas entre 1720 y 1726 para la construcción del Fuerte Marlborough, situado en la cala Sant Esteve y en 1798 para la reconstrucción del mismo (Fornals, 1993).

### 3 | Efectos del tsunami de 21 de mayo de 2003

El 21 de mayo de 2003 a raíz de un movimiento sísmico de fuerza 6 en la costa de Argelia, las Baleares experimentaron los efectos de onda de tsunami que se dejó sentir especialmente en puertos y pequeñas ensenadas. El testimonio de las incidencias y el registro del último tsunami que afectó a las Baleares y en particular a Menorca, quedó recogido en las crónicas del Diario de Menorca, de los días 22 y 23 de mayo de 2003. En 2003, los autores de este trabajo aún no habían iniciado el estudio de la acumulación de bloques en acantilados, por lo que no se dispone de datos ni observaciones asociadas a procesos morfológicos sobre estas costas asociadas al evento en cuestión. No obstante las crónicas periodísticas son lo suficientemente explícitas como para intentar trazar las principales líneas maestras e impactos del tsunami de 2003:

*"Menorca sufre los efectos del terremoto-seísmo registrado en Argelia. El puerto de Maó, Cales Fonts, Cala Sant Esteve, Cala Alcafar y Cala Galdana fueron las zonas más afectadas por las "rissagues" que causaron daños en un buen número de embarcaciones, dañadas por la oscilación*

de las aguas. La isla sintió ayer los efectos de un terremoto registrado en Argelia que afectó sobre todo al mar. El seísmo, de magnitud 6,0 en la escala Richter, y cuyo epicentro se registró a 83 km de Argel, se sintió en toda la costa Mediterránea, en la Península Ibérica y en Baleares, según informó el Instituto Geográfico Nacional (IGN). En el caso de Maó, el movimiento de las aguas resultaba espectacular: tan pronto desaparecía de la orilla dejando al descubierto el fondo como volvía, inundando el paseo marítimo e incluso la calzada. La misma situación se vivía simultáneamente en Cales Fonts, Cala Alcalfar y Cala Sant Esteve, donde las «rissagues» eran igual de fuertes. Aproximadamente a las 23:00 h. llegaban noticias de Eivissa y Mallorca, los dos primeros puntos del archipiélago donde se notaron los efectos del terremoto, que informaban de que las oscilaciones habían cesado y que se esperaba que pasara lo mismo en la costa menorquina. En el conjunto del litoral muchas tumbonas desaparecieron de las playas por el efecto del oleaje, el maremoto, terremoto o tsunami, llámesele como se quiera, que sorprendió Menorca en la noche del miércoles, deja tras de sí una imagen lastimosa y unos desperfectos centralizados en las embarcaciones. La zona de levante de la isla fue la más afectada, y con la luz del día, los efectos del maremoto eran evidentes en la Colàrsega del puerto de Maó. Los daños también eran visibles en Cala Sant Esteve y Cala Llonga, y en Cala Alcaufar, donde algunas hamacas se hallaban a 300 m de la playa, junto a peces muertos. También en Biniancolla, Cales Fonts, Macaret o Cala Galdana los efectos eran visibles.” Diario Menorca (22/05/2003)

Las rissagues son movimientos bruscos del nivel del mar que se producen por súbitas variaciones de presión debido a bruscas oscilaciones de presión atmosférica y presencia de vientos del S, así como, la forma y orientación de la cala o el puerto:

“El servicio de emergencia 112 alarma por la posibilidad de que se produzca un nuevo “tsunami” debido al terremoto (seísmo, maremoto) acaecido en Argelia. Un nuevo terremoto en Argel ocurrido en la tarde de ayer motivó que el servicio de emergencia diera aviso. La alarma ante la posibilidad de que se produjera un nuevo «tsunami» en la isla. La causa se asociaría a otro terremoto ocurrido en Argelia a las 19:11 h, que el IGN fijó en una intensidad de 6.1 grados en la escala Richter. Según este departamento, el seísmo se sintió ligeramente en Menorca y Eivissa.” Diario Menorca (23/05/2003)

Las descripciones del Diario Menorca no ahondan en procesos de tipo geomorfológico, bien sea el transporte o la acumulación de bloques, o los desperfectos físicos que estos puedan ocasionar, no obstante sí que mencionan los emplazamientos afectados por daños sobre bienes o instalaciones antrópicas en la costa de Menorca y también en algunos aspectos anecdóticos como la presencia de numerosos peces arrojados tierra adentro por el frente de tsunami (Fig. 2). De hecho, las localidades citadas en la prensa coinciden con los focos de mayor intensidad del impacto en la costa según las simulaciones de propagación de tsunamis realizadas por Roger y Hébert (2008) y por Álvarez-Gómez *et al.* (2011). Dichas localizaciones también coinciden con zonas en las que hay importantes campos de bloques, que estudiados por Roig-Munar (2016) no pertenecen a este mismo evento. Las noticias de prensa también permiten considerar el tiempo que tardó el tsunami en llegar a Menorca tras producirse el seísmo, que también viene a coincidir con las isócronas de avance del tsunami establecidas por Alaset *et al.* (2006) y por Álvarez *et al.* (2011). Vale la pena sacar a colación que la acumulación de peces tierra adentro en los lechos torrenciales, como en el caso de Alcalfar, coinciden con los efectos de los tsunamis descritos en noticiarios históricos de la vecina isla de Mallorca. Así, Fontseré (1918) recoge una de las noticias del *Cronicon Majoriscense*, relativa a un evento fechado en 1756 en la isla de Mallorca y a raíz del cual se constató la presencia de peces a 2,4 km tierra adentro.





**Fig. 2.** Acumulación de embarcaciones en la colársela de cala Sant Esteve (izquierda). Presencia de peces a 200 m tierra adentro en el cauce del barranco de cala Alcafzar (derecha)

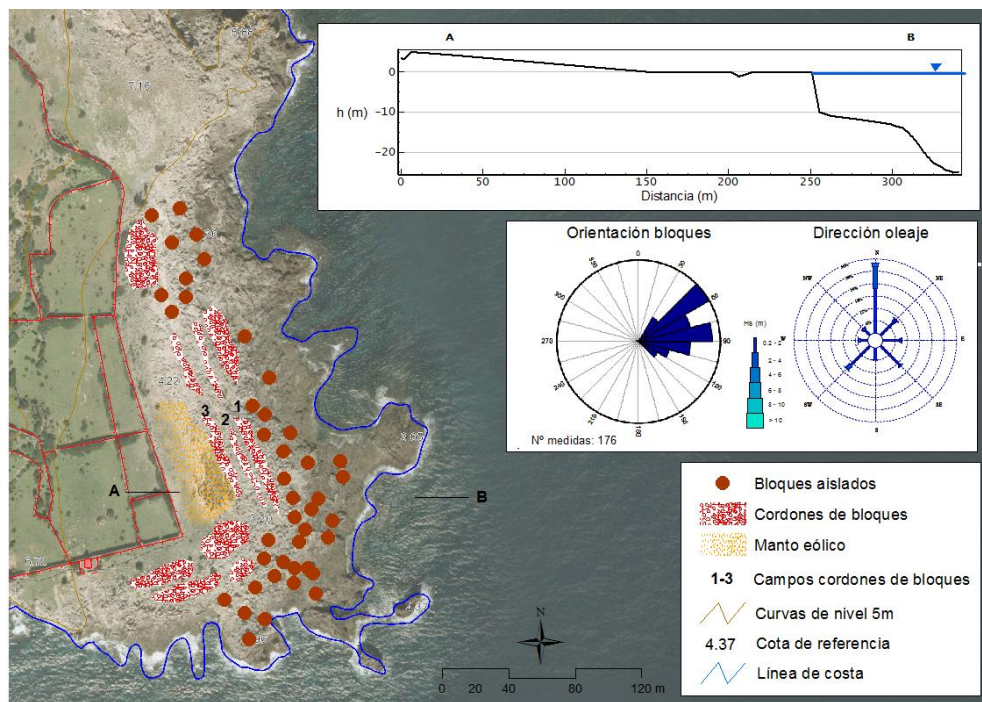
**Fig. 2.** Boats accumulated at the bottom of cala Sant Esteve embayment (right). Fishes and marine rest that were deposited 200 m inland at the Cala Alcafzar stream valley (left).

#### 4 | Campo de bloques de Sant Esteve (Parada 2)

En la cartografía geomorfológica de Sant Esteve (Fig. 3) se aprecia la presencia de hasta 3 cordones de bloques imbricados, que representan tres episodios de deposición de gran energía. La altura de esta sector de costa es baja –inferior a los 1,5 m– y en la superficie rocosa donde descansan los de bloques pueden observarse marcas puntuales de impactos recientes de orden centimétrico en su frente delantero, indicando cierto retrabajamiento de los cordones. Mientras que la dirección dominante del oleaje es N, así como la de los temporales más energéticos. Los bloques están preferentemente imbricados y con una marcada componente ENE, lo que junto a su clara disposición en cordones imbricados, sugiere como mecanismo genético un flujo del tsunami.

En Sant Esteve, un bloque de grandes dimensiones y con incrustaciones de fauna litoral, por tanto de origen sumergido, fue datado mediante  $C^{14}$  obteniendo una edad de 1720 AD.

En paralelo, se ha evaluado la posibilidad de estimar la edad de los bloques a partir de formas secundarias superpuestas (i.e. pozas, cubetas) y aplicando las tasas de erosión-disolución de carbonatos asociadas (Roig-Munar *et al.*, 2015). Para ello se han medido la profundidad de las pozas o cubetas (*basin pools, kamenitzas*) que se han formado posteriormente al evento de deposición. Al aplicarles una tasa de 0,3 mm/a (Gómez-Pujol y Fornós, 2004b y Gomez-Pujol, 2006) arroja edades estimadas de *ca.* 220 años, lo que ubicaría el inicio de las cubetas de disolución en torno a 1794. Además, algunos de los bloques se encuentran depositados sobre una antigua cantera que fue utilizada para la construcción del Fuerte Marlborough entre 1720 y 1726 (Fornals, 1993). Estas inferencias cronológicas junto con la datación mediante  $C^{14}$ , arrojan un marco temporal que son al fin y al cabo, coetáneos o próximos al episodio de 1756 descrito por Fontseré (1918) en el municipio de Santanyí (SE de Mallorca) que también estaría afectado por el mismo frente de ola que alcanzó la costa SE de Menorca.



**Fig. 3.** Cartografía geomorfológica del área de Sant Esteve, con el perfil topográfico del área en el transepto A-B, rosas de oleaje dominante (derecha) y orientación dominante de bloques (izquierda).

**Fig. 3.** Sant Esteve zone geomorphological map and topographic profile. Wave direction (left) and Boulder orientation (right).

## 5 | Efectos del temporal de noviembre de 2001

El debate sobre el transporte de bloques para discernir su origen, tsunami vs tormentas, obliga a considerar con más detalle el papel de las olas de tormenta en las costas rocosas de las áreas de estudio. Roig-Munar (2016) ha caracterizado diferentes bloques asociados a tormentas que afectaron costas rocosas del SE, SW y N de Menorca, en aquellos punto en los que permanecen in-situ o donde han sido acumulados por el hombre tras la limpieza de los efectos de la tormenta (Figura 4).

Las series temporales de Puertos del Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)) del Punto SIMAR más cercano a la costa SE de Menorca, arrojan para el día 11 de noviembre de 2001 una altura significativa de ola de 8,2 m con un periodo de pico de 12,3 s y una dirección de procedencia del N ( $11^\circ$ ). El área de s'Algar, presenta un acantilado vertical de 8 m s.n.m. y sólo había sido sometida a oleajes más energéticos durante los últimos 50 años en una ocasión, en las que se alcanzaron los 8,5 m asociados a un temporal procedente del SE (Cañellas *et al.*, 2007). La tormenta del 11 de noviembre de 2001 arrancó numerosos bloques de orden decimétrico en una zona concreta de la fachada del acantilado, favorecida por una forma canalizada, tipo *flowout*. Los bloques



**Fig. 4.** Efectos del temporal de 2001 en la costa rocosa de s'Algar.

**Fig. 4.** 2001 Sea Storm effects at s'Algar rocky coast.

que se desprendieron no superan el metro y las dimensiones medias de los ejes A, B y C son de 0,08, 0,67 y 0,5 m respectivamente, con un peso medio de 0,35 T. La penetración media de los bloques desde la cornisa del acantilado fue de 31,7 m, quedando emplazados a una altura media de 12 m snm. Todo ello arroja un índice de TF (*Transport Figure* definido por Scheffers y Kelletat, 2003) medio de 146. Además se produjo una distribución dispersa de bloques sin ningún tipo de imbricación y donde sus valores de peso no alcanzan los 0,4 T. Las consecuencias geomórficas fueron muy débiles, ya que el acantilado no sufrió cambios en su morfología y los bloques no presentan evidencias de haber estado sumergidos previamente. Todo ello permite tener una estimación de los efectos de estas tormentas sobre esta tipología de acantilados.



**Fig. 5.** Bloques asociados a acantilados de 11 m en la Illa de l'Aire.

**Fig. 5.** Boulders places on cliff top at 11 m above mean sea level at Illa de l'Aire.

## 5 | Campos de bloques sobre el perfil de l'illa de l'Aire

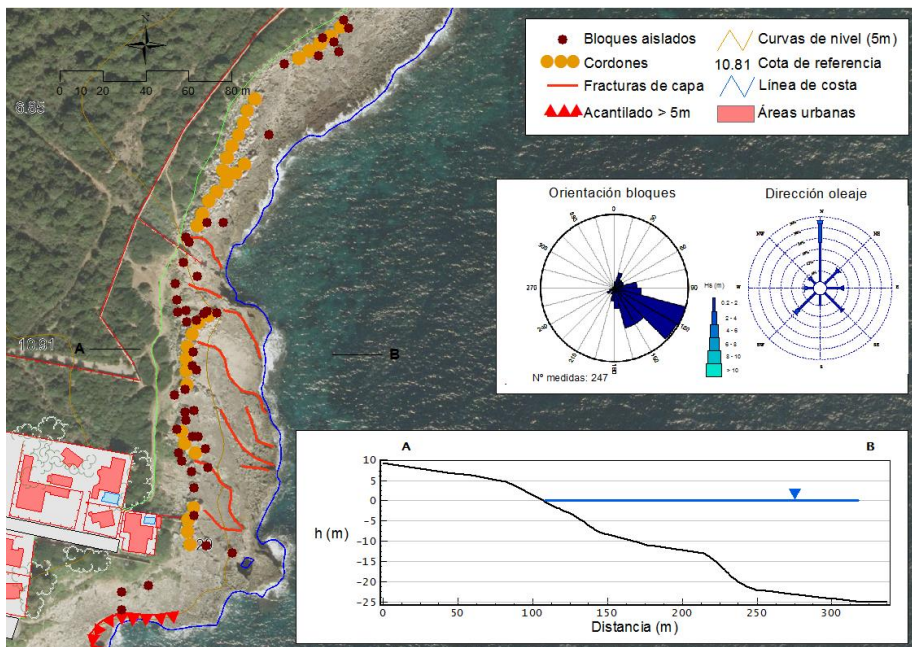
En un día claro se pueden divisar sobre el perfil de la illa de l'Aire (SE de Menorca, Figura 1) acumulaciones de bloques de grandes dimensiones asociados a perfiles verticales de acantilados con alturas entorno a los 11 m y con áreas fuente bien



definidas en las cornisas de dichos acantilados. Encontramos bloques situados a alturas medias de 8,9 m (Fig. 5), inferiores a la cota de la cornisa debido a la morfología de la isla con buzamiento y pendiente topográfica hacia el N. Los bloques que se divisan se encuentran a 77,9 m de distancia de la cornisa y con un peso medio de 4,39 T. Las columnas de sobrelevación por remonte (*runup*) necesarias para el arranque de estos bloques delimitados por juntas según la ecuación de Engel y May (2012) ofrecen un  $R_t=15,65$  m y  $R_s=23,60$  m. Por tanto, los datos obtenidos manifiestan un flujo de *runup* asociado a un tsunami.

## 7 | Campos de bloques d'Alcázar (Parada 5)

En Alcázar, la cartografía geomorfológica refleja la presencia de hasta 2 cordones de bloques imbricados, ubicados en cotas superiores y que representan dos episodios de deposición de gran energía (Fig. 4). En el perfil no se observan marcas de impactos recientes que indiquen retrabajamiento de cordones ni de bloques aislados. El oleaje dominante es de componente N, mientras que la orientación dominante de los bloques es de  $117^\circ$ , reflejo del flujo de un tsunami no relacionado con el oleaje dominante. En las terrazas litorales observamos una sucesión de escalones producto de sucesivas denudaciones que se reflejan en una concordancia entre los ejes cortos (C) de los bloques imbricados y la potencia de los diversos estratos. Los cordones de bloques im-



**Fig. 6.** Cartografía geomorfológica del área de Alcázar, con el perfil topográfico del área en el transepto A-B, rosas de oleaje dominante (derecha) y orientación dominante de bloques (izquierda).

**Fig. 6.** Alcázar geomorphological map and topographical profile. Wave direction (left) and Boulder orientation (right).

bricados se encuentran a distancias superiores a 60 m de la línea de costa y alturas de 7,5 m s.n.m. Las dataciones obtenidas mediante la tasa de disolución nos ofrece una edad estimada de 1796 AD, datación similar a la obtenida en Sant Esteve y próxima, dentro de un margen de error razonable, con el evento registrado en 1756 en Santanyí.

## 8 | Estimacions hidrodinámicas y conclusiones

En la Tabla I se pueden apreciar los valores estimados de la columna de sobreelevación por remonte (run-up) necesaria para el arranque y el transporte de los bloques analizados (asumiendo que se trata de rocas calcáreas con una densidad de 2,40 gr/cm<sup>3</sup>) en caso de tormentas ( $R_s$ ) y de tsunamis ( $R_t$ ). Se obtiene sumando a los resultados de la ecuación de Engel y May (2012) la altura de la cornisa del acantilado (Roig-Munar *et al.*, 2015 y 2017). Los valores obtenidos para el arranque y transporte de los bloques son  $R_s$ : 13,92 y  $R_t$ : 6,86 en el caso de Alcalfar, y de  $R_s$ : 9,70 y  $R_t$ : 2,8 en el caso de Sant Esteve. Los valores estimados para el desplazamiento de bloques subaéreos en caso de tormentas ( $R_s$ ) y en caso de tsunamis ( $R_t$ ) dan valores de alturas de ola de  $R_s$ : 7,85 y  $R_t$ : 5,34 en el caso de Alcalfar, y de  $R_s$ : 5,04 y  $R_t$ : 1,63 en el caso de Sant Esteve.

Estos resultados evidencian la dificultad para explicar solo mediante el oleaje de temporal (especialmente en Alcalfar) el arranque, el transporte y la imbricación de los cordones de bloques, así como los posibles retrabajamientos de los bloques de menor tamaño (especialmente en Sant Esteve) por dichos oleajes.

Los depósitos analizados muestran bloques bien imbricados, con sus ejes orientados hacia el mar, de modo que el sentido del flujo sería hacia tierra, coincidiendo con la dirección de flujos de tsunami definidos por Álvarez-Gómez *et al.* (2011) y ajustándose a los criterios de Williams y Hall (2004), que argumentan que este tipo de organización de bloques se atribuye a eventos tipo tsunamis. Ha de considerarse, además, la divergencia entre la orientación del oleaje máximo, del Norte, y la orientación de los bloques ortogonal a la costa.

Así pues, los depósitos de bloques muestran evidencias que apuntan a la acción de eventos de grandes flujos asociados a tsunamis, bien individuales o múltiples sobre la misma área que dan lugar a un retroceso continuado en forma de sucesivas terrazas y cordones de bloques (Roig-Munar *et al.*, 2016b). Las localidades de Sant Esteve y Alcalfar presentan numerosos ejemplos en los que se aprecia una evidente coincidencia con los modelos de propagación de tsunamis.

Localidad	Bloques arrancados		Desplazamiento de bloques	
	$R_s$	$R_t$	$R_s$	$R_t$
Alcalfar	13,92	6,86	7,85	5,34
Sant Esteve	9,70	2,8	5,04	1,63

**Tabla 1.** Altura de la columna de agua necesaria para el arranque y desplazamiento de bloques en caso de olas de tormentas ( $R_s$ ) y de tsunamis ( $R_t$ ) en cada una de las áreas analizadas.

**Table 1.** Water column for boulder detachment and removal by sea storm waves ( $R_s$ ) and tsunami waves ( $R_t$ ).

Estos dos emplazamientos de bloques de tsunamis han sido propuestos por Roig-Munar *et al.* (2017) como Lugares de Interés Geológico (LIG) por sus valores científicos y didácticos, siendo la primera propuesta, a nivel mundial, de un área individualizada con bloques de tsunami como LIG.

### Agradecimientos

A Laura Bañón, por facilitarnos los textos y fotografías del Diario Menorca. A la Policía Local de Sant Lluís por facilitarnos el acceso a los informes sobre los eventos de tsunamis en Alcafar de mayo de 2003. Los autores agradecen al Dr. L. Gómez-Pujol sus comentarios críticos y sugerencias a propósito de la versión preliminar del presente trabajo.

### Referencias

- Alasset, J. P., Hebert, H., Maouche, S., Calbini, V. y Meghraoui, M. (2006): The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw p 6.9 Algeria): modelling and results. *Geophysical Journal International*, 166: 213-226.
- Álvarez-Gómez, J.A., Aniel-Quiroga, I., González, M. y Otero, L. (2011): Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 227-240.
- Barbano, M. S., Pirrotta, C. y Gerardi, F. (2010): Large boulders along the south-eastern Ionian coast of Sicily: Storm or tsunami deposits? *Marine Geology*, 275, 140-154.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F. J., Menéndez, M., Gómez-Pujol, L. y Tintoré, J. (2007). Application of a POT model to estimate the extreme significant wave height levels around the Balearic Sea (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research* SI, 50: 329-333.
- Diario Menorca, edición impresa de 23 de mayo de 2003
- Diario Menorca, edición impresa de 28 de mayo de 2003
- Engel, M. y May, S. M. (2012): Bonaire's boulder fields revisited: Evidence for Holocene tsunami impact on the Lee-ward Antilles. *Quaternary Science Reviews*, 54: 126-141.
- Fontseré, E. (1918): Notas sueltas de sismología Balear. *Publicaciones de la Sección de Ciencias Naturales*, Facultad de Ciencias de la Universidad de Barcelona, 5-12.
- Fornals, F. (1993): *Fortificaciones de Menorca: Fuerte Marlborough y Torre del Penjat*. Ed. Museo Militar de Menorca, Maó pp. 245.
- Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo, J.E., Rosselló, V.M. y Segura, F.S. (2005): Structural controlled drainage basin development in the South of Menorca island (Spain). *Geomorphology* 65: 139-155.
- Gómez-Pujol, L. (2006): *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 200 pp.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004a): Les microformes litorals del Migjorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004b): Tasas de meteorización química en la costa carbonatada de Mallorca. Evaluación preliminar mediante tests de exposición (weight-loss rock tablets). En: Blanco, R., Bedoya, J., Pérez-Alberti, A. (Eds.). *Procesos geomorfológicos y evolución costera*: 401-410. SPUSC, Santiago de Compostela.
- Nott, J. (2003): Tsunami or storm waves? Determining the origin of a spectacular field of wave emplaced boulders using numerical storm surge and wave models and hydrodynamic transport equations. *Journal of Coastal Research*, 19: 348-356.

- Pignatelli, C., Ferilli, S., Capolongo, D., Marsico, A., Milella, M., Pennetta, L., Piscitelli, A. y Mastronuzzi, G. (2010): Morphological evidences and computer science techniques in order to evaluate tsunami inundation limit. *Rivista Italiana di Telerilevamento* 42: 129-142.
- Policía Local de Sant Lluís (2013): Informes 00342 y 00343 relativos a tsunami en Alcalar (2013). Ajuntament de Sant Lluís, Menorca.
- Pomar, Ll., Westphal, H. y Obrador, A. (2004): Oriented calcite concretions in Upper Miocene carbonate rocks of Menorca, Spain: evidence for fluid flow through a heterogeneous porous system. *Geologica Acta*, 2 (4): 271-284.
- Roger, J. y Hébert, H. (2008): The 1856 Djielli (Algeria) earthquake and tsunami source parameters and implications for tsunami hazard in the Balearic Islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 721-731.
- Roig-Munar, F. X. (2016): *Blocs de tempesta i tsunamis a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfològica*. Tesis doctoral. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. 410 p.
- Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M. y Gelabert, B. (2015): Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del Este de Mallorca (Islas Baleares). *Geotemas*, 15: 229-232.
- Roig-Munar, F.X., Mata, R., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M. y Gelabert, B. (2017). Propuesta de Lugares de Interés Geológico asociados a bloques y cordones de origen tsunamítico en la costa SE de Menorca (Baleares) *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(1): en prensa
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M., Gelabert, B., Pons, G. X. y Mir-Gual, M. (2014). *Presencia de bloques de tsunamis en las costas rocosas del SE de Menorca (I. Baleares)*. En: Álvarez-Gómez, J. A. y Martín-González, F. (Eds.). *Una aproximación multidisciplinar al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico* : 125-128. Murcia, Universidad de Murcia.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M., Gelabert, B., Pons, G.X. y Mir-Gual, M. (2014): Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del sur de Mallorca (I. Baleares). En: Álvarez-Gómez, J.A. y Martín-González, F. (eds.), *Una aproximación multidisciplinar al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico*: 109-102. Murcia, Universidad de Murcia.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M. y Gelabert, B. (2016a): El uso de bloques de tormenta y de tsunami como materia prima en las islas Baleares. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29(2): 79-88.
- Roig-Munar, F.X., Vilaplana, J.M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A. y Gelabert B. (2016b): Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Geotemas*, 16 (1): 641-644
- Scheffers, A. M. y Kinis, S. (2014). Stable imbrication and delicate/unstable settings in coastal boulder deposits: Indicators for tsunami dislocation?. *Quaternary International*. 332: 73-84
- Scheffers, A.M. y Kelletat, D. (2003). Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.
- Williams, D.M. y Hall, A.M. (2004). Cliff-top megaclast deposit of Ireland, a record of extreme waves in the North Atlantic-storms or tsunamis? *Marine Geology*, 206: 101-117.



# Dinámica eólica y sedimentaria en el sistema dunar de Cala Tirant (costa N de Menorca)

Miquel Mir-Gual<sup>1</sup>, Guillem X. Pons<sup>1,2</sup>, José Á. Martín-Prieto<sup>1</sup>, Bernadí Gelabert<sup>3</sup> y Antonio Rodríguez-Perea<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma

<sup>2</sup> Institut Menorquí d'Estudis, IME, Maó

<sup>3</sup> Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma

## RESUMEN

El sistema dunar de Cala Tirant presenta hoy un estado de conservación en recuperación. Su alto dinamismo hace que del análisis fotométrico sea difícil la precisa identificación de morfologías *blowout*. No obstante, a lo largo de 350 m de frente se pueden apreciar un total de 7 morfologías erosivas. En este artículo, correspondiente a la salida de campo, se comentarán las tipologías de las distintas morfologías erosivas, así como el funcionamiento de un *blowout*: su dinámica eólica y el transporte sedimentario en condiciones de fuerte viento de Tramuntana.

**Palabras clave:** Cala Tirant, Menorca, *blowout*, dinámica eólica, transporte sedimento

## ABSTRACT

The dune system of Cala Tirant today presents a state of conservation in recovery. Its high dynamism makes accurate photometric identification of blowout morphologies difficult. However, along 350 m of dune front, a total of 7 erosive morphologies can be detected. In this article, corresponding to the field output, the typologies of the different erosive morphologies will be discussed, as well as the operation of a blowout: its aeolian dynamics and sedimentary transport in conditions of strong Tramuntana wind.

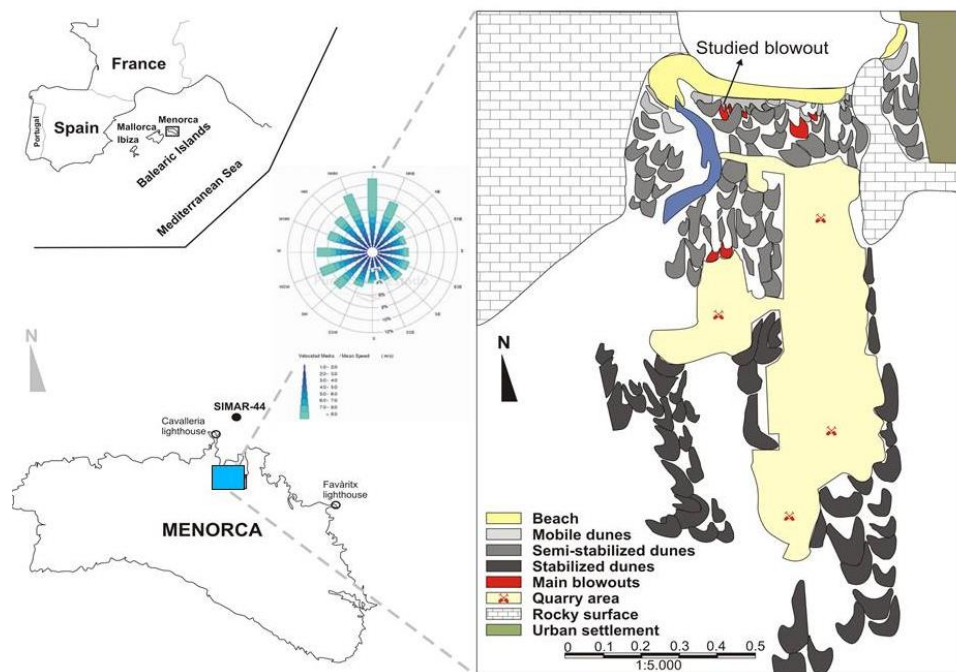
**Keywords:** Cala Tirant, Menorca, *blowout*, aeolian dynamics, sediment transport.

## 1 | Marco fisiográfico de Cala Tirant

El sistema playa-duna de Cala Tirant se sitúa en la zona central de la costa norte de la isla de Menorca, la más septentrional y oriental de las Islas Baleares (Figura 1). Forma parte de los límites del municipio de Es Mercadal y, desde el punto de vista físico, se localiza en la bahía de Tirant, situada entre la península occidental de Fornells y la costa oriental de cabo de Caballería. Sus características hacen de él un sistema muy activo, caracterizado por importantes vientos terrestres y por la canalización de los vientos de Tramontana –componente norte– los cuales condicionan el dinamismo apreciado en el sistema dunar aún activo, y su desarrollo tierra adentro.

A grandes rasgos el sistema dunar de Cala Tirant se desarrolla a partir de una playa arenosa de unos 350 m de longitud y entre 20-40 m de ancho, ocupando una superficie aproximada de 16.256 m<sup>2</sup>. La integridad del sistema cubre hoy una superficie ligeramente superior a las 13 ha, siendo muy inferior a su cobertura originaria como consecuencia de la industria extractiva existente en la zona en la segunda mitad del siglo XX.

Las características intrínsecas al sistema, ayudadas también por las condiciones eólicas que caracterizan la costa norte de Menorca, hacen que éste sea notablemente activo, principalmente en su parta delantera. La presión turística asociada a la playa y la falta de medidas de gestión s ostensibles a lo largo de muchos años supuso una total

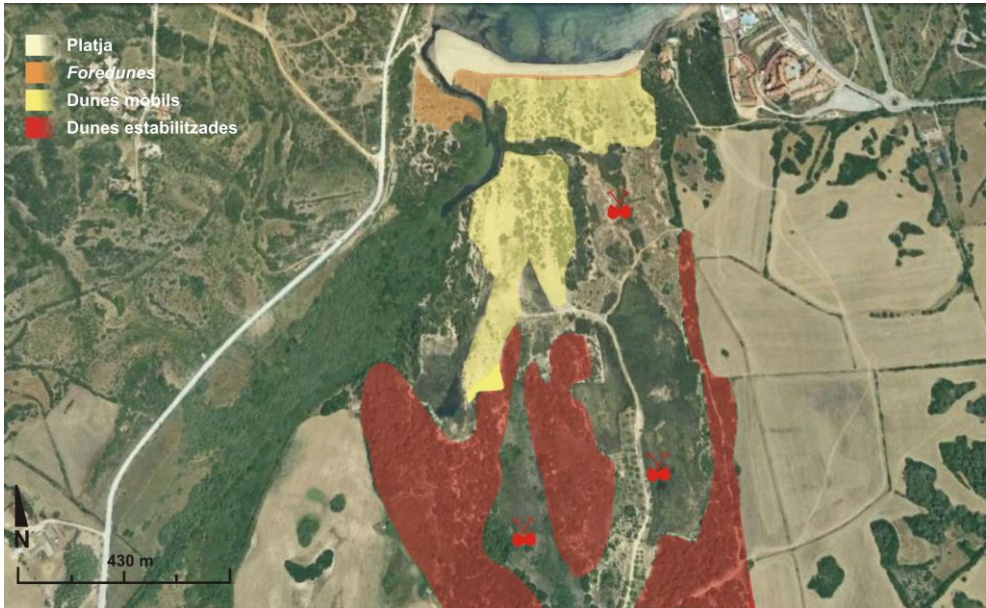


**Figura 1.** Localización geográfica del sistema playa-duna de Cala Tirant, y representación de las características geomorfológicas del sistema dunar (Mir-Gual, 2014).

**Figure 1.** Geographical location of the beach-dune system of Cala Tirant, and representation of the geomorphological characteristics of the dune system (Mir-Gual, 2014).

desaparición de la línea de *foredune*. No obstante, a lo largo de las últimas décadas los esfuerzos destinados a su recuperación parecen tener éxito, siendo hoy posible volver a diferenciar la existencia de un cordón embrionario de primera de una o *foredune* colonizado principalmente por *Ammophila arenaria* (Fig.2). Hoy todavía se percibe un cordón bien definido de dunas móviles las que participan muy activamente del balance sedimentario, y que se extienden, en la parte occidental del sistema, hasta unos 600 m tierra adentro. Finalmente, es posible diferenciar también la existencia de dunas estabilizadas. No obstante, del análisis fotométrico se percibe el alto grado de fragmentación en esta zona, derivando de ello con zonas degradadas las que han quedado desconectadas del funcionamiento natural del sistema playa-duna.

Cala Tirant presenta un clima semi-árido, con una precipitación media anual en torno a los 630 mm. Los vientos principales son los de componente norte - Tramuntana -, aunque según Servera (1997), sólo el 33% de las dunas responde con una orientación sur. Los registros de los faros de Favàritx y Cavalleria (Figura 1) muestran cómo los vientos del norte son los más recurrentes y los que presentan un mayor número de días con velocidades superiores a los 12 km/h. Por otro lado la boya SIMAR-44 ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)) indica que para el período desde 1960 hasta 2001 estos vientos se convierten en los más significantes en la zona, siendo los más incidentes en más del 15% de los días contemplados. En términos generales estos soplan a velocidades que oscilan entre los 1-8ms<sup>-1</sup>, llegando incluso a superar los 8ms<sup>-1</sup> en más



**Figura 2.** Sectorización del sistema playa-duna de Cala Tirant (Menorca). En la imagen se ilustra la actual desconexión física existente, sobre todo, entre el sector de dunas móviles y el sector de dunas estabilizadas consecuencia de las actividades extractivas llevadas a cabo en la zona a lo largo de muchos años.

**Figure 2.** Sectorization of the beach-dune system of Cala Tirant (Menorca). The picture illustrates the current physical disconnection, especially between the mobile dune sector and the stabilized dune sector resulting from the extractive activities carried out in the area over many years.

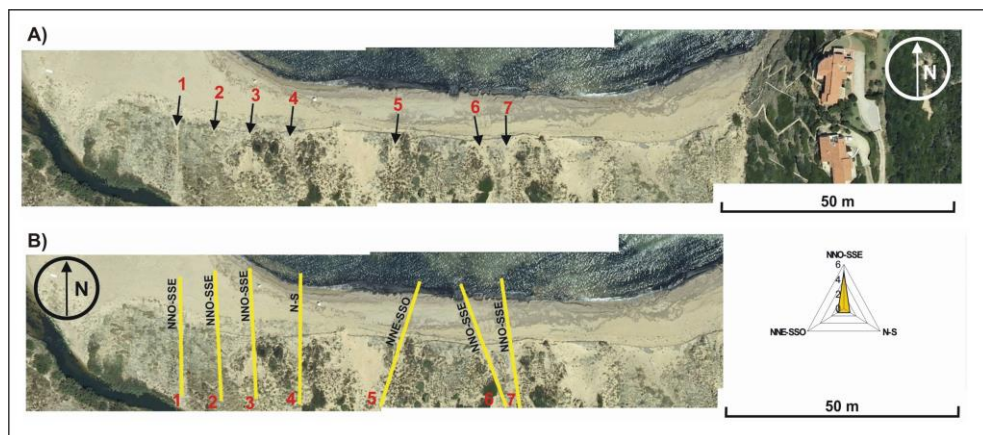
de un 10% de los días. No obstante, y de acuerdo a la irregular morfología presentada por la costa norte de Menorca, hay otras direcciones que no se pueden obviar tales como la NNE o NNO.

### **Morfologías blowout en el sistema de Cala Tirant**

El sistema dunar de Cala Tirant presenta hoy un estado de conservación en recuperación. Su alto dinamismo hace que del análisis fotométrico sea difícil la precisa identificación de morfologías *blowout*. No obstante, a lo largo de 350 m de frente se pueden apreciar un total de 7 morfologías erosivas (Fig. 3). Como queda reflejado en la Figura 3a las mayores densidades se localizan en la parte occidental del frente dunar, coincidiendo con la entrada principal a la playa por parte de los usuarios.

La zona central y oriental son más ajenas a la presencia de morfologías erosivas. Además, en la zona Este hay un área que, con menor potencia de duna, se vuelve mucho más dinámica desde el punto de vista sedimentario, suponiendo una zona topográficamente más deprimida la que ayuda a la dinámica sedimentaria desde la playa hacia el interior del sistema. En este caso la densidad expresada por la presencia de *blowouts* en el frente de dunas de Cala Tirant es notablemente baja, fijándose 0.02 *blowouts* / m.

La disposición estructural de Cala Tirant, así como también la de la propia bahía en la que está inmersa, tiene un papel clave tanto el desarrollo de todo el sistema dunar



**Figura 3.** Fotografía aérea de la playa y el frente de una de Cala Tirant (Menorca). En la parte superior (A) se grafica la localización de las 7 morfologías *blowout* existentes en primera línea, mientras que en la parte inferior (B) se hace lo mismo en tanto a la orientación seguida en cada caso. En cuanto a la localización y cartografía de *blowouts* en este caso la fotografía aérea no acontece como el mejor método ya que, a consecuencia de la baja cobertura vegetal, los contrastes pueden inducir errores en la hora de diferenciar entre *blowouts* o zonas de arena libre.

**Figure 3.** Aerial photography of the beach and the front of one of Cala Tirant (Menorca). In the upper part (A) the location of the 7 blowout morphologies in the first line is plotted, while in the lower part (B) the same is done in both the orientation followed in each case. As for the location and mapping of blowouts in this case aerial photography does not happen as the best method since, as a result of the low vegetation cover, the contrasts can induce errors in the time to differentiate between blowouts or areas of free sand.

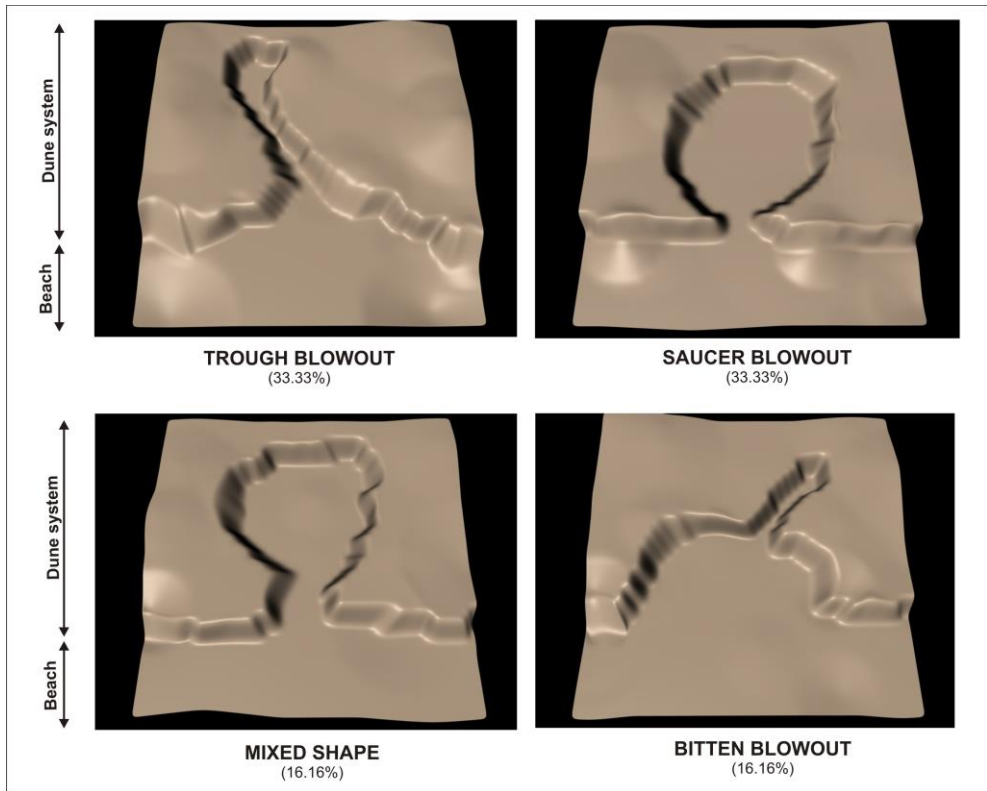
como en el de las morfologías *blowout* existentes. En cuanto a las direcciones de los 7 *blowouts* analizados (Fig. 3b) se ve un imperante predominio del trazo NNO-SSE, contemplado por 5 de las morfologías y suponiendo el 71.4% sobre el total de la muestra.

### Clasificación morfológica

Un total de cuatro tipologías de *blowout* se pueden diferenciar en el caso de Cala Tirant si se considera su forma en planta (Fig. 4). Destacan los *trough blowout* y los *saucer blowout* como las morfologías que más presencia tienen, ambas representando el 33.33%, mientras que por otro lado encontramos un *blowout* mixto - *Mixed shape* - y un *Bitten blowout*, ambas tipologías representando un 16.16% respectivamente. En cuanto a la estructura, todos la presentan simple.

## 2 | Dinámica eólica y sedimentaria

Los resultados que se presentan a continuación provienen de un experimento que se hizo en Cala Tirant durante los días 17 y 18 de enero de 2013, bajo unas fuertes condiciones energéticas. En cuanto al estudio de la dinámica eólica éste se llevó a cabo a partir de 7 anemómetros Davis 2D distribuidos de forma transversal a lo largo de la



**Figura 4.** Clasificación morfológica de las morfologías *blowout* en el sistema de Cala Tirant.  
**Figure 4.** Morphological classification of blowout morphologies in the Cala Tirant system.

morfología *blowout* seleccionada (Fig. 1 y 5), desde la playa alta hasta el lóbulo interior de deposición sedimentaria. Cada uno de los anemómetros está compuesto por dos sensores diferentes; a) un sensor de 3 cubetas -3 cups- el cual mide la velocidad del viento, y b) una pluma -veleta-, la cual mide la dirección del flujo. Los sensores de viento fueron dispuestos en superficie, con la ayuda de un mástil de hierro galvanizado de 60 cm de longitud, de los que 20 cm fueron enterrados y los 40 cm restantes dispuestos por encima de la superficie. Se tomaron medidas de forma continuada a lo largo de 24 horas con una frecuencia de muestreo de 1 min y en la que se obtenían datos máximos y medianos de dirección y velocidad en cada uno de los puntos.

En cuanto a la dinámica sedimentaria fueron utilizadas un total de 12 trampas verticales basadas en el modelo y diseño postulado por Leatherman (1978). Al tratarse de morfologías tan complejas desde el punto de vista geomorfológico las trampas se colocaron en grupos de 4 trampas individuales, cada una de ellas orientadas -su apertura de sotavento- a los 4 principales puntos cardinales (N, S, E, O) para conseguir trampas multidireccionales. Un primer grupo (TA) se localiza en la parte superior de la playa emergida, un segundo (TB) en la zona posterior a la *foredune* y un tercero (TC) en el lóbulo de deposición sedimentaria. Cada grupo de

trampas muestreaba el transporte durante 20 min cada hora. La metodología se desarrolla en Mir-Gual (2014).

### **Localización y caracterización física del *blowout***

La morfología estudiada se ampara en la primera línea del sistema, en su parte más móvil y dinámica (Fig. 5). En cuanto a su caracterización física nos encontramos con un *bowl blowout*, siguiendo la clasificación llevada a cabo por Hesp y Walker (2012) y Smyth et al. (2012). Éste presenta una forma circular o semicircular, profunda sobre todo en su parte central la que coincide con la plataforma de erosión. Ésta se desarrolla tierra adentro desde la primera línea, la *foredune*. La parte central del *blowout* presenta una profundidad aproximada a 5.5 m respecto al lóbulo de deposición, el cual se convierte en la parte topográficamente más elevada. Su anchura es variante, oscilando desde el mínimo localizado en la boca *-throat-* con 10.6 m hasta el máximo, situado en la parte central, con 15.5 m. Partiendo de su boca la longitud total del *blowout* se sitúa en los 56 m, de los que 34 m formarían la zona de erosión, mientras que los 22 m restantes conforman el lóbulo de deposición situado en la parte más interior (Figura 5). Siguiendo la tendencia direccional de la cala en general, y también del desarrollo integral del sistema dunar, presenta una orientación NNO-SSE (355º) condicionada por la incidencia de los vientos predominantes incidentes sobre la primera línea de duna. Un último apunte desde el punto de vista geomorfológico es que, tal y como apuntan Smyth et al. (2012), a pesar de ser considerado un *bowl blowout* se debe tener en cuenta la presencia de una brecha en su boca *-throat-* la que determinará el comportamiento del flujo eólico incidente en su interior.

La línea de *foredune* existente se encuentra todavía con signos de degradación y fragmentación. Sin embargo, las políticas de gestión y recuperación aplicadas en la zona a lo largo de los últimos años permiten ver una incremento de morfologías arenosas incipientes *-shadow dunes* y *echo dunes-* fijadas por vegetación herbácea, principalmente *Ammophila arenaria* (Fig. 5a), y con potencias máximas entorno a los 1.5 m de altura. En cuanto a la vegetación, ésta no tiene una presencia notable. El alto dinamismo energético el cual caracteriza la Tramontana menorquina hace que sean sistemas muy dinámicos desde el punto de vista sedimentario, lo que dificulta un establecimiento firme de vegetación. Ésta se limita pues, tal y como se ha comentado, en la parte delantera, principalmente dominada por individuos con características herbáceas. La zona interior del *blowout* - plataforma de deflación - y el lóbulo deposicional, tal y como refleja la Fig. 5c y d, se muestran casi sin presencia de una cobertura vegetal apreciable.

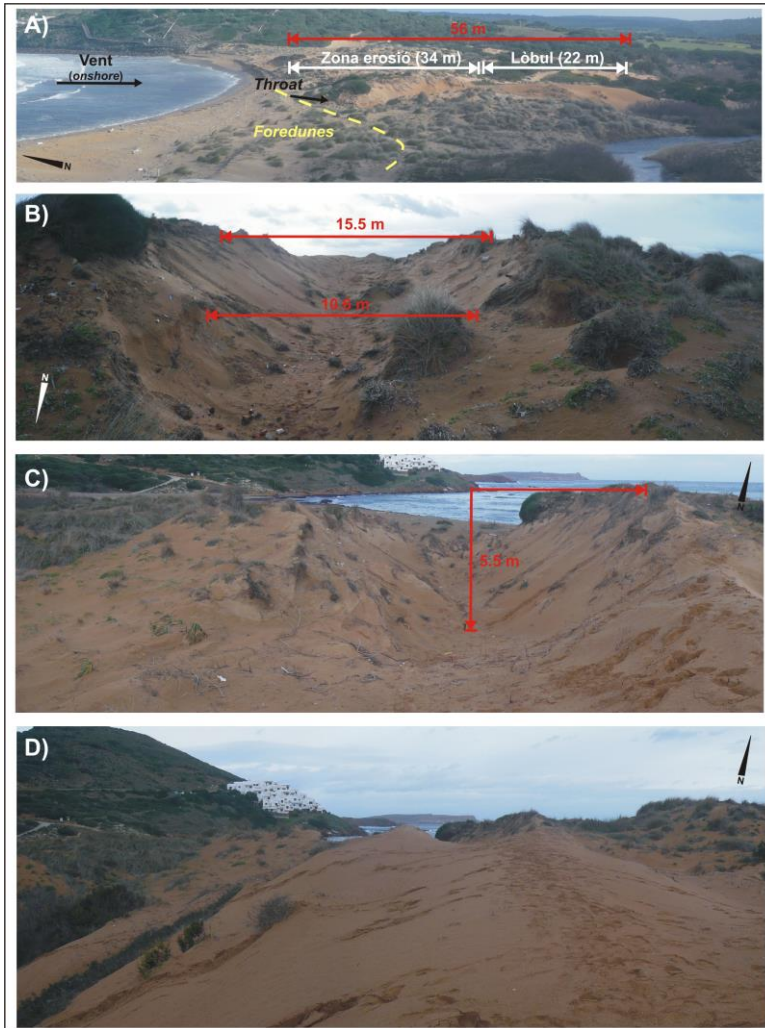
### **Dinámica eólica. Situación bajo altas condiciones energéticas**

Para reflejar la dinámica eólica y sedimentaria del sistema dunar de Cala Tirant se presentan los datos obtenidos de un experimento llevado a cabo a lo largo de 24 horas con muestreos sobre las condiciones eólicas con frecuencias de muestreo de 1 min y su relación con el transporte sedimentario.

- **Velocidad del viento. Datos máximos y medianos**

Las velocidades del viento registradas a lo largo del experimento se muestran variables tanto en tiempo como en espacio (Tabla 1 y Fig. 6). Las máximas velocidades -tanto si analizamos las velocidades medias como las máximas- se registraron a lo largo de la mañana de día 17, coincidiendo al mismo tiempo con el periodo en que la





**Figura 5.** Panorámicas del *blowout* en el sistema de Cala Tirant (Menorca). El primer panel (A) ofrece una visión integral de la morfología, integrada dentro de la primera línea del sistema dunar. Se indican también sus dimensiones longitudinales, así como la presencia de *foredunes* en su parte delantera. En el segundo (B), el cual ofrece una vista de hacia el interior, se remarcan las anchuras, primero de su boca - *throat* -, y después de su parte central. El tercer panel (C) indica la profundidad máxima, alcanzada en la parte central de la zona de erosión. Finalmente, en último (D) muestra una imagen parcial de las dimensiones alcanzadas por el lóbulo de deposición asociado a su parte más interior.

**Figure 5.** View of *blowout* in the Cala Tirant system (Menorca). The first panel (A) offers an integral view of the morphology, integrated into the first line of the dune system. Their longitudinal dimensions are also indicated, as well as the presence of *foredunes* in their front part. In the second (B), which offers a view towards the interior, the widths, first of its mouth - *throat* -, and after its central part, are marked. The third panel (C) indicates the maximum depth, reached in the central part of the erosion zone. Finally, (D) shows a partial image of the dimensions reached by the deposition lobe associated with its innermost part.



	Velocidad media (ms <sup>-1</sup> )	Velocidad máxima (ms <sup>-1</sup> )
Anemómetro 1	4,6	5,7
Anemómetro 2	3,9	4,9
Anemómetro 3	4,7	5,5
Anemómetro 4	<b>5,0</b>	<b>6,1</b>
Anemómetro 5	3,8	5,0
Anemómetro 6	4,8	5,8
Anemómetro 7	5,4	6,4

**Tabla 1.** Valores medios de las velocidades de viento medias y máximas para cada anemómetro a lo largo de las 24 horas de muestreo. En negrita aparecen los valores máximos, y en cursiva los mínimos.

**Table 1.** Mean values of mean and maximum wind speeds for each anemometer over the 24-hour sampling period. In bold they appear the maximum values, and in italics the minimums.

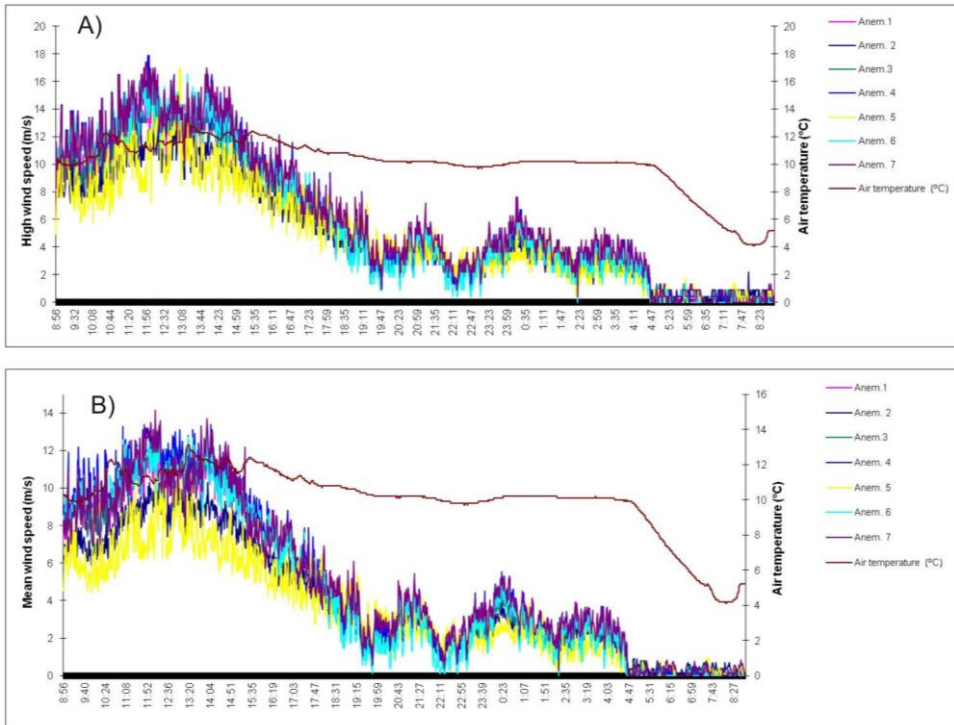
riodo en que la temperatura ambiente fue más elevada. En este sentido además se percibe una clara correlación entre la disminución de la velocidad del viento y la disminución de la temperatura ambiental, principalmente a partir de las 05:00 - ya de día 18 -.

Desde el punto de vista espacial los vientos más fuertes - tanto en valores medios como máximos - se dieron en la rampa interior del *blowout* (Anem. 4) y en las paredes laterales (Anem. 6 y 7). Contrariamente las velocidades más bajas sucedieron justo en la parte posterior de la *foredune* (Anem. 2) y en el principio del lóbulo de deposición, topográficamente la zona más elevada de la morfología (Anem. 5). En términos generales los anemómetros que experimentaron los valores medios más elevados fueron el Anem. 7 (medias = 5.4 ms<sup>-1</sup>; máximas = 6.4 ms<sup>-1</sup>) y el Anem. 4 (medias = 5.0 ms<sup>-1</sup>; máximas = 6.1 ms<sup>-1</sup>). Por otra parte los valores mínimos fueron registrados por el Anem. 5 (medias = 3.8 ms<sup>-1</sup>; máximas = 5.0 ms<sup>-1</sup>) y por el Anem. 2 (medias = 3.9 ms<sup>-1</sup>; máximas = 4.9 ms<sup>-1</sup>). Finalmente los Anem. 1, 3 y 6 muestran valores medio que se sitúan en 4.6 ms<sup>-1</sup>, 4.7 ms<sup>-1</sup>, y 4.8 ms<sup>-1</sup> respecto a las velocidades medias, y 5.7 ms<sup>-1</sup>, 5.5 ms<sup>-1</sup>, y 5.8 ms<sup>-1</sup> respecto a las máximas (Tabla 1).

Desde el punto de vista temporal la máxima velocidad registrada se fijó con 17.9 ms<sup>-1</sup>, concretamente a las 12:02 h por el Anem. 4 - situado en la rampa interior del *blowout* -. En términos generales, tal y como muestra la Figura 6, las velocidades del viento comenzaron a menguar progresivamente a partir de las 14:00 h, llegando a los valores mínimos (cerca de 0 ms<sup>-1</sup>) entre las 04:30 y las 08: 56 h del día 18. Cabe apuntar que el comportamiento y la tendencia seguida a lo largo de la campaña fue muy similar entre los distintos anemómetros dispuestos, todos indicando de manera unánime una bajada de velocidades generalizadas a partir de las 14:00 h de día 17 , y hasta llegar a vientos casi inexistentes desde las 05:00 h del día 18.

Las condiciones topográficas tienen incidencia en cuando a la direccionalidad del viento, sobre todo, dentro de la morfología *blowout* estudiada. La Figura 7 ilustra gráficamente las direcciones obtenidas en cada uno de los sensores desplegados.

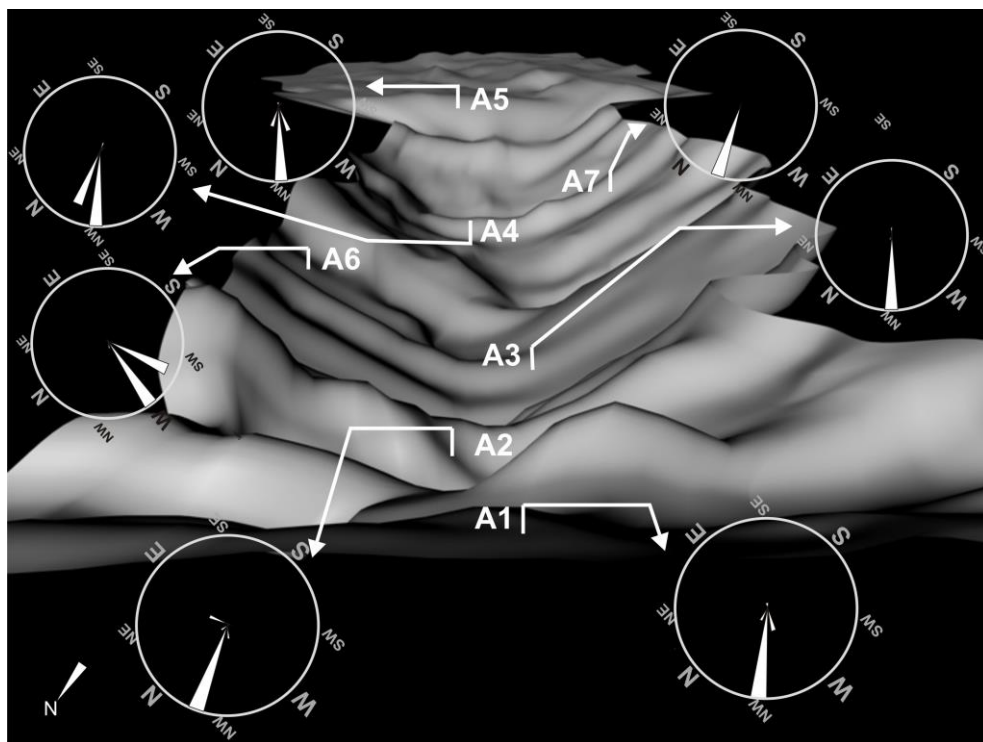
En este caso la dirección predominante en el Anem. 1 - tomándolo como sensor de referencia hacia a el input de viento dentro del *blowout* - es claramente de NO, aunque mostrando también algunas ligeras desviaciones hacia el ONO y NNO. A continuación, el Anem. 2, situado en la parte posterior de la *foredune* y con presencia de vegetación herbácea en sus inmediaciones (principalmente *Ammophila arenaria*), registra una dirección del flujo predominante de NNO, con flujos secundarios de N y NE.



**Figura 6.** Velocidad del viento a lo largo de las 24 horas de muestreo. (A) hace referencia a la distribución temporal de las velocidades máximas registradas por cada anemómetro, mientras que el inferior (B) hace lo propio con las velocidades medias.

**Figure 6.** Wind speed over the 24-hour sampling. (A) refers to the temporal distribution of the maximum speeds recorded by each anemometer, while the lower one (B) does the same with the average speeds.

En términos de divergencia, si lo comparamos con los otros sensores, este es el punto que mayor grado muestra, no tanto en grado de importancia de las distintas direcciones registradas, sino en tanto en su diversidad. Una de las situaciones con las que ningún fijarse ocurre dentro de la morfología en sí, concretamente a lo largo del canal de deflación y la rampa interior. Fijémonos pues con la tendencia marcada por los Anem. 3 y 4. En cuanto al primer caso se ve un predominio absoluto del flujo con componente NO, indicando una clara canalización de éste condicionada por la presión estática de la topografía existente - en este caso las paredes laterales del *blowout* -. Esta tendencia se extiende claramente hasta la rampa interior, donde se localiza el Anem. 4, el cual muestra también un claro predominio del flujo bajo la misma componente, NO. No obstante, en este caso también se registra una cierta importancia de la componente NNO, respondiendo a la reagrupación del flujo proveniente de la fricción con la pared lateral Este del *blowout*. Este último comportamiento se incrementa ya al inicio del lóbulo de deposición, registrado por el Anem. 5. En este caso el flujo predominante, siguiendo la tendencia iniciada en la cubeta de deflación, es también de componente NO, dando si cabe más apoyo al proceso de canalización existente. No obstante se perciben evidencias de flujos secundarios de NNO y ONO,



**Figura 7.** Rosas de direcciones del viento a lo largo de las 24 horas de muestreo para cada uno de los 7 sensores desplegados.

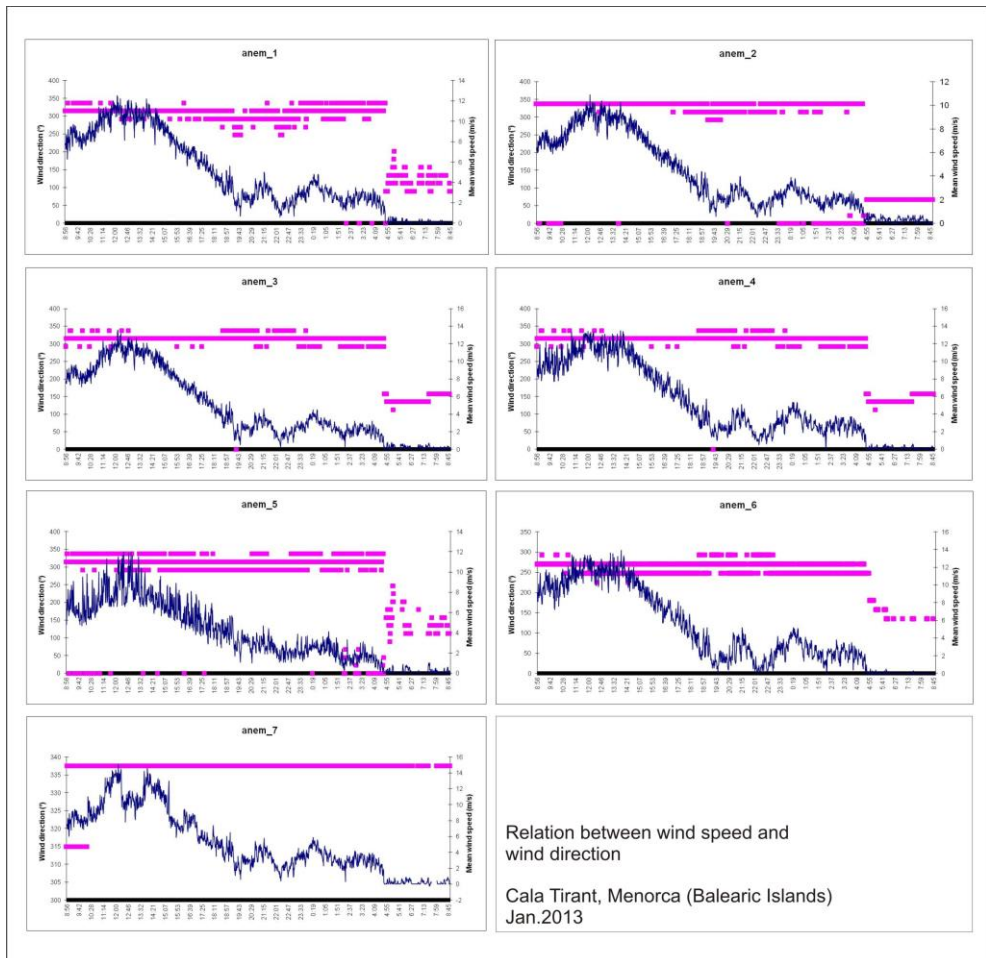
**Figure 7.** Wind direction roses along the 24-hour sampling for each of the 7 sensors deployed.

ambos indicando el reagrupamiento del flujo ahora proveniente de ambas paredes laterales. El comportamiento indicado por la direccionalidad registrada en los anemómetros 3, 4 y 5 invita claramente a verificar la influencia de la topografía hacia el comportamiento del flujo dentro de la morfología *blowout*. En este caso, con una topografía escarpada hacia la pendiente de las dos paredes laterales, el flujo queda controlado por lo que explica el principio de Bernoulli o el efecto Venturi. Lo que nos indican ambas teorías es la canalización - e incremento de velocidad - del flujo cuando éste se ve controlado por la presión estática de algún elemento sólido, en este caso la topografía.

Finalmente cabe hacer mención especial a lo que sucede en las paredes laterales. En primer lugar, la pared lateral Oeste es la que registra el flujo más homogéneo (Anem. 7), dominado notablemente por la componente NNO, y el que se muestra casi paralelo a la orientación seguida por la propia pared. Una situación distinta se da en el caso de la pared Este (Anem. 6) - ambas separadas por menos de 5 m -. En este caso el flujo incidente predominante es de componente O, y en menor medida OSO. Sea como sea ambas direcciones se muestran casi perpendiculares a la orientación de la pared. Este hecho tendrá consecuencias notables en tanto a los patrones de transporte sedimentario seguidos al interior del *blowout*. Como primera aproximación la incidencia recurrente del flujo perpendicular a la pared Este, sobre todo a lo largo de las horas de mayor intensidad eólica (09:00 - 14:00 h), supondrá gran número de

deslizamientos de arena que por gravedad depositarán sobre el canal de deflación, al tiempo que modificarán la topografía interna del *blowout*. Al contrario, en el caso de la pared oeste, la incidencia paralela del flujo derivará en una erosión laminar.

En tanto la dirección registrada individualmente por cada uno de los anemómetros en este caso la tendencia se muestra ligeramente homogénea. No obstante cabe apuntar algunas consideraciones, reflejadas gráficamente por la Figura 8. En términos generales la tendencia seguida es notablemente homogénea desde el inicio del experimento (08:56 h del día 17) hasta aproximadamente las 04:00 h (día 18), con direcciones de viento *onshore* que se mueven entre los 300°-350° (aproximadas al cuadrante NNO-ONO). Dentro de esta línea, el que más alteraciones direccionales presenta es el Anem. 1, sobre todo entre las 19:00 y las 23:30 h, con direcciones que se



**Figura 8.** Relación existente, en escala temporal, entre la velocidad y la dirección registrada por cada uno de los anemómetros utilizados.

**Figure 8.** Existing relationship, on a time scale, between speed and direction recorded by each of the anemometers used.

mueven en torno a los 250° (próximas a la componente 0), y que se corresponden a una bajada en la fuerza del viento incidente. Una tendencia de variación similar se puede apreciar de igual manera en el Anem. 5. De esta manera pues, si se hace una visión general, los puntos de input (Anem. 1) y output (Anem. 5) de viento son los que mayor variabilidad direccional muestran. Si bien la tendencia registrada se muestra homogénea a lo largo de buena parte del experimento, la situación cambia notablemente, y también de forma generalizada, desde las 04:00 h hasta el final. Tal y como refleja la Fig. 6a y b, y también para cada caso la Fig. 8, es a partir de esta hora cuando la velocidad del viento cae en picado, casi sin ejercer influencia energética. Así pues, y ligándose a dicha bajada, las direcciones de viento cambian sustancialmente, variando entre los 135°- 225°, sobre todo en los Anem. 1 y 5. Así, la bajada de la velocidad del viento en este caso supone un cambio en la dirección, ahora de componente S, y que nos indica vientos *offshore* (terral). Al binomio bajada de velocidad - cambio de dirección le podemos añadir la variable atmosférica, ya que como se muestra en la Figura 6a y b, la bajada de la velocidad del viento se corresponde con una disminución significativa de la temperatura atmosférica registrada.

- **Flujo eólico interno**

La relación manifiesta entre la dirección del viento registrada por cada anemómetro y la topografía existente queda simulada en la Fig. 9, la cual establece una aproximación del comportamiento eólico dentro de la morfología *blowout* analizada bajo condiciones medias - altas de viento (situación de invierno). Bajo este escenario las condiciones del flujo eólico experimentado a lo largo de las 24 horas de experimento se muestran homogéneas dentro de la propia morfología. Si bien la dirección inicial predominante fue de componente NO (ver Anem. 1 en la Fig. 7), el flujo eólico en primera línea se presenta un tanto irregular, atribuible a una mayor rugosidad superficial asociada a la presencia de vegetación, principalmente herbácea, y de formaciones arenosas embrionarias; echo dunas y *shadow dunes*. Una vez el flujo llega a la boca del *blowout - throat-*, entre los Anem. 2 y 3, éste se canaliza notablemente, lo que por extensión se da a lo largo de todo el canal de deflación y la rampa interior. Esta tendencia es homogénea hasta el margen superior del *blowout*, justo donde se da inicio el lóbulo deposicional en el cual, una vez se pierde la presión de la topografía, el flujo diverge de nuevo.

Finalmente destacar la situación registrada en ambas paredes laterales. En tanto en la pared lateral Este la presión ejercida por el viento generó una desestabilización importante del sedimento provocando continuos deslizamientos de arena que por gravedad fueron depositadas a lo largo de la cubeta de deflación. (Figura 10a). En el caso de la pared lateral Oeste la incidencia del viento se dio paralela a la orientación de la misma pared (Fig. 7), suponiéndose una erosión laminar la que, de acuerdo con la orientación del *blowout*, transportaba el sedimento directamente hacia el lóbulo de deposición (Fig. 10b).

- **Variación longitudinal; Fractional Speed-up ratio**

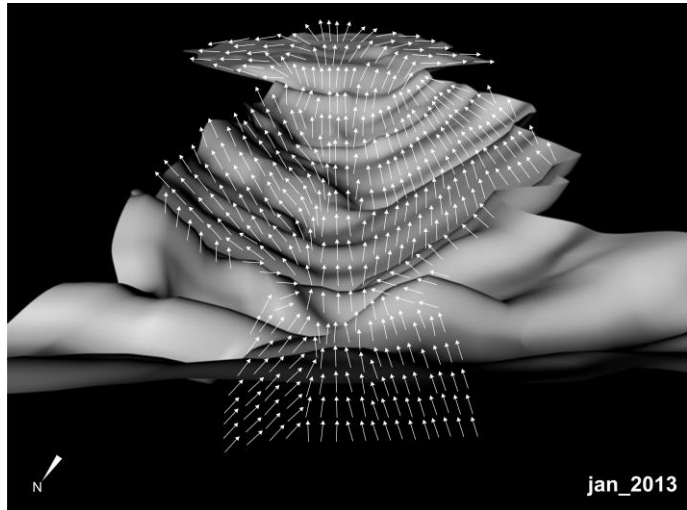
La aplicación del *fractional speed-up ratio* ( $\delta_s$ ) se muestra a partir de 13 momentos de muestreo - *runs* - de 20 min de duración cada uno. Los perfiles longitudinales del viento son resultados de los datos de los Anem. 1, 2, 3, 4 y 5, tomando como referencia el Anem. 1 (Tabla 2 y Figura 11).

**Figura 9.**

Modelización extrapolada del flujo interno dentro de la morfología *blowout*.

**Figure 9.**

Extrapolated internal flow modeling within the *blowout* morphology.



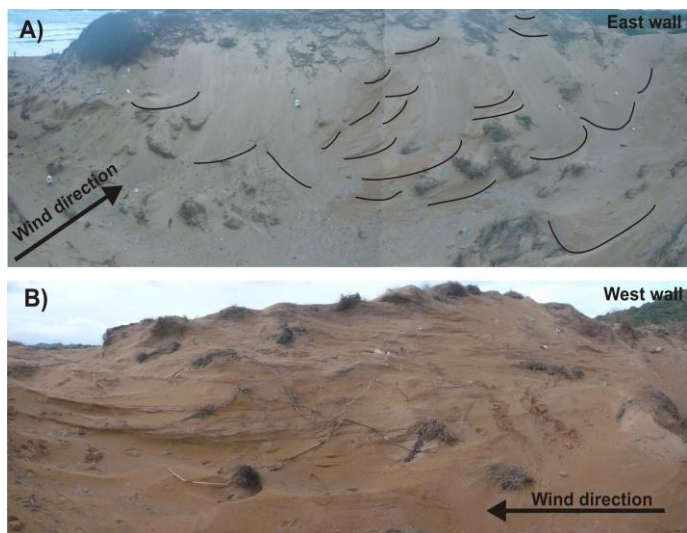
La Figura 11 muestra las notables variaciones que el flujo sufre a lo largo de su recorrido dentro del *blowout*. Justo en la parte posterior a la línea de *foredune* por un lado (Anem. 2), y en el lóbulo de deposición por la otra (Anem. 5) la velocidad del viento es generalmente más suave que no aquella registrada en la parte superior de la playa alta (Anem. 1) y en la cubeta de deflación (Anem. 3 y 4). La mayor variabilidad del *speed-up ratio* ( $\delta s = 12:17 / -0.28$ ) se da en el margen superior del *blowout* (Anem. 5), mientras que la más baja se manifiesta en la línea de *foredune*, registrada por el Anem. 2 ( $\delta s = -0.15 / -0.22$ ). Además cabe destacar la variación que se contempla en la rampa interior del *blowout*, registrada por el Anem. 4 ( $\delta s = 12:14 / -0.11$ ) y en la cubeta de deflación, Anem. 3 ( $\delta s = 12:07 / -0.12$ ) (Tabla 2 y Figura 11). Considerando la desviación estándar ( $\sigma$ ) resultante, el valor más elevado coincide con el punto donde se da la máxima reducción del *speed-up ratio*, justo en el margen superior del *blowout* (Anem. 5) con un valor de  $\sigma = 12.15$ , mientras que en este caso, el

**Figura 10.**

Imágenes panorámicas de las paredes laterales del *blowout* y la dirección de los vientos principales incidentes.

**Figure 10.**

Panoramic views of the side walls of the *blowout* and the direction of the incident main winds

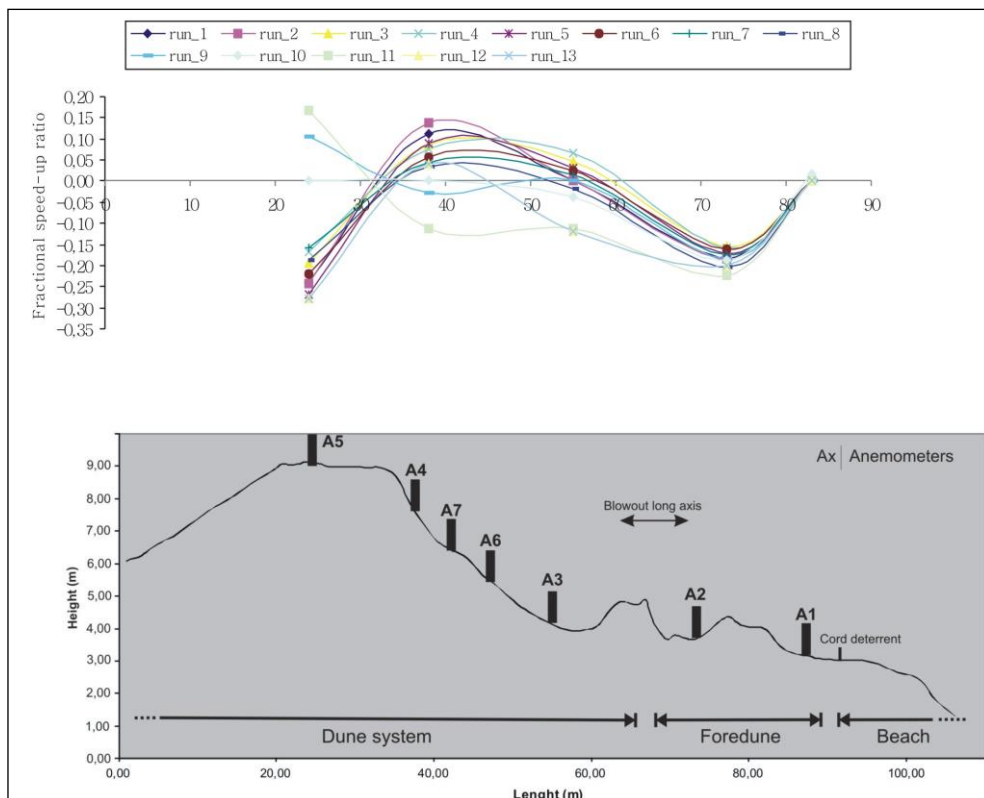




valor mínimo coincide de nuevo con la línea de *foredune* (Anem. 2) con  $\sigma = 12.02$  (Tabla 2). Desde el punto de vista temporal los valores máximos alcanzados se dan a lo largo del *run* 3 ( $\delta s \chi = 0.01$ ) y *run* 2 ( $\delta s \chi = 0.00$ ), mientras que las mínimas se contemplan en los *run* 11 ( $\delta s \chi = -0.08$ ), y *runs* 1, 12 y 13 ( $\delta s \chi = -0.06$ ) (Tabla 2). Si los datos obtenidos se comparan con la distribución de las velocidades absolutas del viento a lo largo de las 24 horas de muestreo (Fig. 6), los valores máximos del *fractional speed-up ratio* coinciden temporalmente con las máximas velocidades, registradas.

### Transporte de sedimento

A grandes rasgos, cantidades muy pequeñas de sedimento fueron captadas con velocidades de viento inferiores a  $2.5 \text{ ms}^{-1}$ . La cantidad más alta de transporte fue



**Figura 11.** *Fractional speed-up ratio* dentro de la morfología *blowout* de Cala Tirant. Los perfiles longitudinales están hechos a partir de los Anem. 1, 2, 3, 4 y 5, tomando como referencia el Anem. 1. Los Anem. 6 y 7 no se incluyen en la gráfica ya que no estaban dispuestos en el mismo transepto longitudinal.

**Figure 11.** *Fractional speed-up ratio* within the *blowout* morphology of Cala Tirant. The longitudinal profiles are made from the Anem. 1, 2, 3, 4 and 5, taking as reference the Anem. 1. The Anem. 6 and 7 are not included in the graph since they were not arranged in the same longitudinal transect.



Run	Long. (m)	An. 1 83	An.2 73	An. 3 55	An. 4 38	An. 5 24	An. 6 47	An. 7 42	$\delta s \chi$	$\delta s \sigma$	An. 1 (ref)
RUN1 (09:14- 09:34)	$u_z$	8,8	7,2	8,8	9,8	6,7	10	9,5			8,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	0,11	-0,24	0,14	0,08	-0,06	0,15	
RUN2 (10:13- 10:33)	$u_z$	8,7	7,1	8,7	9,9	6,6	10,1	9,7			8,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	0,14	-0,24	0,16	0,11	0,00	0,16	
RUN3 (11:12- 11:32)	$u_z$	10,4	8,8	10,9	11,3	8,4	11,3	12,1			10,4
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,15	0,05	0,09	-0,19	0,09	0,16	0,01	0,13	
RUN4 (12:28- 12:48)	$u_z$	10,7	9	11,4	11,5	8,9	11,5	11,2			10,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,16	0,07	0,07	-0,17	0,07	0,05	-0,01	0,11	
RUN5 (14:20- 14:40)	$u_z$	10	8,3	10,3	10,9	7,3	10,8	12			10,0
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,17	0,03	0,09	-0,27	0,08	0,20	-0,01	0,16	
RUN6 (15:16- 15:36)	$u_z$	8,6	7,2	8,8	9,1	6,7	9,1	8,9			8,6
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,16	0,02	0,06	-0,22	0,06	0,03	-0,03	0,11	
RUN7 (16:19- 16:39)	$u_z$	6,9	5,7	7	7,2	5,8	7,2	8,1			6,9
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,17	0,01	0,04	-0,16	0,04	0,17	-0,01	0,12	
RUN8 (17:23- 17:43)	$u_z$	5,9	4,7	5,8	6,1	4,8	6	5,9			5,9
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,02	0,03	-0,19	0,02	0,00	-0,05	0,10	
RUN9 (18:25- 18:45)	$u_z$	3,8	3,1	3,8	3,7	4,2	3,2	4,4			3,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	-0,03	0,11	-0,16	0,16	-0,02	0,13	
RUN10 (20:27- 20:47)	$u_z$	2,74	2,19	2,6	2,7	2,7	2,2	3,2			2,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,02	-0,19	-0,04	0,00	0,00	-0,19	0,19	-0,03	0,13	
RUN11 (22:25- 22:45)	$u_z$	1,8	1,4	1,6	1,6	2,1	1	2,1			1,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,22	-0,11	-0,11	0,17	-0,44	0,17	-0,08	0,22	
RUN12 (00:26- 00:46)	$u_z$	2,5	2	2,2	2,6	1,8	2,3	3			2,5
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,12	0,04	-0,28	-0,08	0,20	-0,06	0,16	
RUN13 (03:26- 03:46)	$u_z$	2,5	2	2,2	2,6	1,8	2,3	3			2,5
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,12	0,04	-0,28	-0,08	0,20	-0,06	0,16	
	$\delta s \chi$	0,00	-0,18	-0,02	0,04	-0,15	-0,02	0,13			
	$\delta s \sigma$	0,00	0,02	0,06	0,06	0,15	0,17	0,07			

**Tabla 2.** Velocidad media del viento para cada uno de los anemómetros desplegados ( $u_z$ ) y sus respectivos valores estandarizados de la aplicación del fractional speed-up ratio ( $\delta s$ ) calculados a partir de 13 momentos de muestreo - runs - de 20 min de duración. Adicionalmente se presenta la media ( $\delta s \chi$ ) y la desviación estándar ( $\delta s \sigma$ ) por cada sensor y para cada momento de muestreo.

**Table 2.** Average wind speed for each of the deployed anemometers ( $u_z$ ) and their respective standard values of the application of the fractional speed-up ratio ( $\delta s$ ) calculated from 13 sampling moments - runs - of 20 min duration. Additionally, the mean ( $\delta s \chi$ ) and the standard deviation ( $\delta s \sigma$ ) are presented for each sensor and for each sampling moment.

registrada bajo una velocidad media de  $12 \text{ ms}^{-1}$  (Anem. 5), concretamente por TC5 con  $Q_{\text{trap}} = 46.95 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . Temporalmente existe una relación positiva entre los runs de mayor captación sedimentaria y aquellos con las velocidades de viento más altas. El transporte fue más importante a lo largo de la mañana, concretamente entre los runs

Run	TA (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	TB (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	TC (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )
1	5,14	0,99	41,41
2	6,13	0,92	42,64
3	16,62	11,13	46,46
4	15,71	16,02	42,17
5	6,40	3,43	46,95
6	0,71	0,88	28,21
7	0,16	0,15	5,61
8	0,05	0,07	3,00
9	0,04	0,05	2,49
10	0,03	0,03	1,81
11	0,01	0,01	0,54
12	0,01	0,035	1,494
13	0,006	0,009	0,268

**Tabla 3.** Cantidad de arena captada por cada grupo de trampas a lo largo de los 13 runs (momentos de muestreo).

**Table 3.** Amount of sand captured by each set of traps throughout the 13 runs (sampling times).

1 y 6 (09:14-14:45 h), y menor entre los runs 7 y 13 (Figura 12 y Tabla 3). Esta tendencia se relaciona directamente con la disminución de la fuerza del viento a partir de las 14:00 h aproximadamente (Fig. 6).

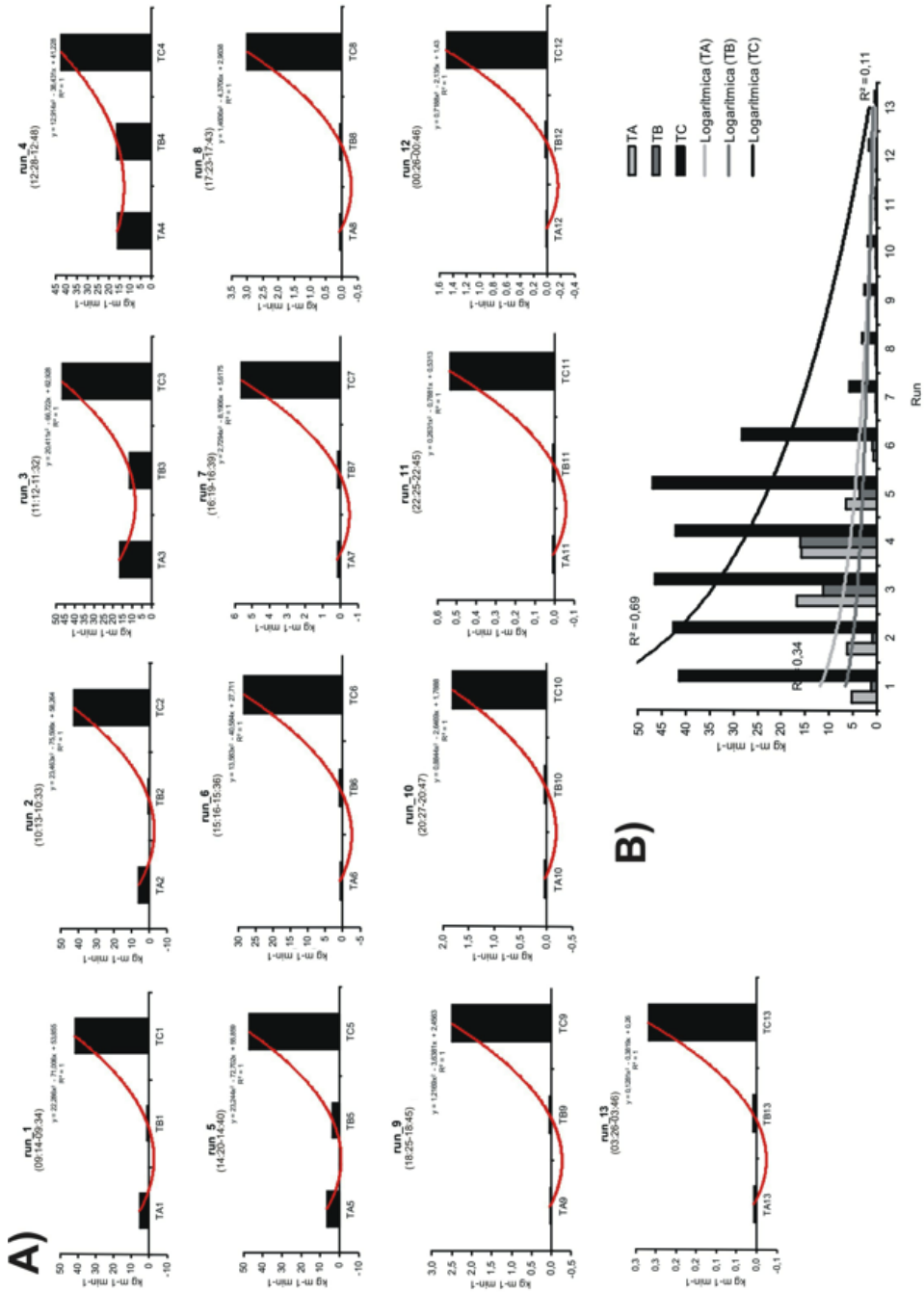
La cantidad media de transporte a lo largo de la mañana fue  $TA_{Qtrap} = 10 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ,  $TB_{Qtrap} = 6.5 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  y  $TC_{Qtrap} = 43.9 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , con las máximas localizadas en los runs 3, 4 y 5 (Tabla 3). Aunque el máximo valor de sedimento transportado a lo largo de la tarde se fijó en  $Qtrap = 28.21 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  a TC6, en términos generales los valores fueron sustancialmente más bajos que los registrados a lo largo de la mañana (Tabla 3);  $TA_{Qtrap} = 12.24 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ,  $TB_{Qtrap} = 12.28 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  y  $TC_{Qtrap} = 39.3 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . Finalmente apuntar que el transporte registrado a lo largo de la noche fue prácticamente inexistente (runs 10-13) debido a que las velocidades medias en este período fueron inferiores a los  $3 \text{ ms}^{-1}$ . Las cantidades medias para este periodo fueron de  $TA_{Qtrap} = 0.014 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ,  $TB_{Qtrap} = 0.021 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  y  $TC_{Qtrap} = 0.102 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

Si se analizan los datos de manera concreta el transporte más alto fue registrado por TC5 con un total de  $Qtrap = 46.95 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , mientras que los mínimos se localizan en TA11, TB11 y TA12 con  $Qtrap = 0.01 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  respectivamente (Tabla 3). Espacialmente no se percibe ninguna relación entre las velocidades más altas de viento y los puntos con mayor captación sedimentaria. El transporte capturado fue muy significativo en TC, justo al inicio del lóbulo deposicional, coincidiendo con la zona de expansión del flujo eólico. No obstante los ratios de transporte fueron notablemente inferiores en TA y TB (Figura 3 y Tabla 3).

(página siguiente)

**Figura 12.** Distribución espacial del transporte de sedimento experimentado en cada uno de los runs para cada grupo de trampas. En el panel A) se muestra la situación específica para cada run, mientras que en B) se da la visión general.

**Figure 12.** Spatial distribution of sediment transport experienced in each of the runs for each group of traps. Panel A) shows the specific situation for each run, while in B) the overview is given.



La configuración espacial de los patrones de transporte sedimentario fue sostenida y homogénea a lo largo de todo el experimento, tal como nos muestra la Figura 12. La tendencia polinómica (Fig. 12a) se presenta bastante similar para cada uno de los *runs*, con un transporte moderado a TA, el cual decrece ligeramente a TB, para finalmente crecer exponencialmente a TC.

La Figura 12b nos resume la tendencia de transporte sedimentaria seguida a lo largo del experimento. De nuevo, puede ser de manera más clara, quedan de nuevo patentes las grandes diferencias entre el transporte captado por TC por un lado, y TA-TB por la otra, sobre todo a lo largo de la mañana (*runs* 1-6). Sintetiza de nuevo como las mayores cantidades de transporte se dieron en los *runs* 3, 4 y 5, con valores superiores a los  $45 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . El transporte comenzó a disminuir notablemente entre el *run* 6 (15:16-15:36 h;  $29.79 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ) y *run* 7 ( $5.92 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ) (Tabla 3), coincidiendo con el momento en el que el viento empezó también a perder intensidad (Figura 6). Concluyendo, el transporte total muestreado a lo largo del experimento se fija con TA =  $51 \text{ kg m}^{-1}$ , TB =  $33.71 \text{ kg m}^{-1}$  and TC =  $263 \text{ kg m}^{-1}$ .

Finalmente, para concluir con la caracterización del transporte a lo largo de la campaña de enero de 2013 hacia volver a la Fig. 9. La recurrente incidencia de un flujo perpendicular a la orientación de la pared lateral este, principalmente a lo largo del periodo de mayor intensidad eólica (entre las 9:00-14:00 h) supuso continuas deslizamientos de arena que, por gravedad se depositaban sobre el canal de deflación. En cuanto a la situación de la pared oeste, la incidencia del flujo en este caso era paralela a la orientación de la misma, suponiendo una erosión sedimentaria de carácter laminar. Ambos casos derivaron con palpables modificaciones morfológicas dentro de la morfología *blowout*, al tiempo que condicionaron los patrones de transporte. En el primer caso, la arena era depositada en el canal de deflación que, bajo la canalización del flujo y su intensificación energética, era consecuentemente transportado hacia el lóbulo de deposición. En el segundo caso este transporte era directo. En este caso la relación entre la direccionalidad del viento y la captura de sedimento hacia la misma orientación es notablemente positiva en cada uno de los casos, tal y como queda reflejado en la Tabla 3. En el caso de TA, con una dirección media fijada en  $312^\circ$ ; NO, las máximas cantidades retenidas se dieron a las trampas N, con  $13.623 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  y O, con  $0.704 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . No obstante, destacar también la cantidad registrada por la trampa S, incluso ligeramente superior al caso anterior, con  $0.785 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

### **Agradecimientos**

La elaboración de este artículo ha sido posible gracias a la ayuda del proyecto "Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español" (CS02015-64468-P) del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

### **Bibliografía**

- Hesp, P. A. y Walker, I.J. (2012): Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Aeolian Research*, 3: 389-399.
- Leatherman, S.P. (1978): A new aeolian sand trap design. *Sedimentology*, 25: 303-306.

- Mir-Gual, M. (2014): *Anàlisi, caracterització i dinàmica de les formes erosives blowout en sistemes dunars de Mallorca i Menorca (Illes Balears)*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears: 425 pp.
- Servera, J. (1997): *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. Palma: 904.
- Smyth, T.A.G., Jackson, D.W.T. y Cooper, J.A.G. (2012): High resolution measured and modelled three-dimensional airflow over a coastal bowl blowout. *Geomorphology*, 177- 178: 62-73.



# Karst, acantilados y calas en el *Migjorn* de Menorca

Joan J. Fornós<sup>1</sup>, Lluís Gómez-Pujol<sup>1,2</sup>, Vicenç M. Rosselló<sup>3</sup>, Bernadí Gelabert<sup>4</sup>,  
Francesca Segura<sup>3</sup>, Josep E. Pardo-Pascual<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Grup de Ciències de la Terra (Geologia i Paleontologia “Guillem Colom”). Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>2</sup> ICTS SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (MINECO-CAIB), Palma.

<sup>3</sup> Departament de Geografia, Universitat de València, València.

<sup>4</sup> Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>5</sup> Departament d'Enginyeria Cartogràfica i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València, València.

## RESUMEN

La costa sur de la isla de Menorca se caracteriza por la presencia, de forma más o menos continua, de acantilados verticales cortados en los depósitos carbonatados que constituyen una plataforma atribuida al Mioceno superior. Los acantilados se encuentran interrumpidos en la zona litoral por una marcada incisión producida por los barrancos que drenan toda la plataforma miocena del sur de la isla y que, en su desembocadura al mar, dan lugar a las denominadas calas. La forma de éstas viene controlada no tan sólo por la fracturación, que a su vez controla la red de drenaje, sino que también por la contribución de los procesos kársticos que están directamente relacionados con la zona de mezcla de aguas en los acuíferos litorales. La acción de la dinámica marina y en especial la oscilación del nivel marino durante el Cuaternario también participan en la configuración de la morfología de la calas. Las paredes verticales y un fondo plano debido al relleno sedimentario de las zonas inundadas por el nivel del mar durante el Holoceno son otras de sus características básicas.

**Palabras clave:** *acantilados, Mioceno superior, fracturación distensiva, barrancos, karst, cala*

## ABSTRACT

A continuous cliffy coast built up by a carbonate platform developed in a reef environment during the Upper Miocene characterizes the southern region –Migjorn– of Menorca. This structural platform is dissected by a set of canyon-like creeks that when reach the coast result in narrow and cliffy bays known as “cala”. The cala morphology, as well as the fluvial network with a preferential N-S orientation–, is controlled mainly by fractures but also by the karstic processes that are dominant in the area. These processes are related with the mixing zone water interference in coastal aquifers. The marine action is also quite important, since sea-level oscillation during Quaternary, the shape and attributes of calas were modified, and the sedimentary infilling related with the Holocene inundation, resulted in a flat floor that contrasts with the cliffy sides of the calas.

**Keywords:** *cliffs, Upper Miocene, fractures, streams, karst, cala*

## 1 | Introducción

La costa del *Migjorn* de Menorca, especialmente en su sector central, se caracteriza por una costa de trazado rectilíneo de acantilados altos y verticales, recortada en los depósitos tabulares carbonatados del Mioceno superior. Esta costa agreste queda tan sólo interrumpida cuando la estructura tectónica permite el desarrollo de una costa baja a la que se asocia una albufera –como es el caso de Son Bou– y una zona de marismas (Fig. 1). En los márgenes oriental y occidental de la costa meridional el relieve se va suavizando de forma progresiva, aunque la costa sigue siendo rocosa y dominan los acantilados de medios a bajos y de paredes verticales o escalonadas.

El objetivo del presente trabajo se centra en la descripción del litoral rocoso y de los procesos que han dado lugar a su modelado, especialmente aquellos relacionados con el karst (García Senz, 1985; Fornós, 2003; Ginés, 2003; Ginés y Fornós, 2004) y la fracturación. En este sentido tiene una especial relevancia el mecanismo que se expone para la formación de las calas (Rosselló, 1995 y 2005), así como otros aspectos





**Figura 1.** La costa central del sur de Menorca se caracteriza por una costa alta acantilada que solo queda interrumpida en la depresión que da lugar a la albufera de Son Bou (izquierda de la imagen).

*Figura 1. The south of Menorca is characterizes by a continuous high cliffy coast that is occasionally disrupted by the Son Bou lagoon (leftwards at the image) .*

relacionados con la dinámica litoral costera, en especial aquellos relativos a la formación de los depósitos de eolianitas cuaternarias que se observan frecuentemente adosadas a los acantilados miocenos (Servera, 1997). Las calas, definidas ya en el siglo XIX por Penck (1894) como un valle erosivo corto y sumergido en una costa rocosa (Fig. 2), constituyen el aspecto más relevante de la presente salida de campo. Mediante el ejemplo de Cala Galdana y del barranc d'Algendar se pretende ahondar en el papel de los procesos kársticos que, ayudados y/o inducidos por los condicionantes estructura-



**Figura 2.** En la costa sur menorquina son frecuentes las indentaciones marinas que sumergen los valles originando las características calas.

*Figura 2. In the southern coast of Menorca very often can be found marine indentations that allow the inundation of flat floor valleys resulting in the archetypical calas.*

les –tanto la fracturación como el diaclasamiento– como por la variabilidad sedimentológica de los depósitos miocenos, han modelado esta parte del litoral menorquín. El modelo evolutivo de las calas no tan sólo tiene en consideración el karst, los procesos fluviales, o las variables de base (litología y tectónica), sino que precisa de un elemento clave: la oscilación glacioeustática del nivel marino durante el Cuaternario.

## 2 | El ejemplo de Cala Galdana

El barranc d'Algendar es uno de los torrentes paradigmáticos que atraviesan el Migjorn de Menorca desembocando en la zona de Cala Galdana. Allí, incisa sobre los materiales calcareníticos del Mioceno superior, se desarrolla la desembocadura del barranco, una ensenada cuya planta –a modo de anfiteatro– queda delimitada por impresionantes acantilados verticales (Fig. 3).

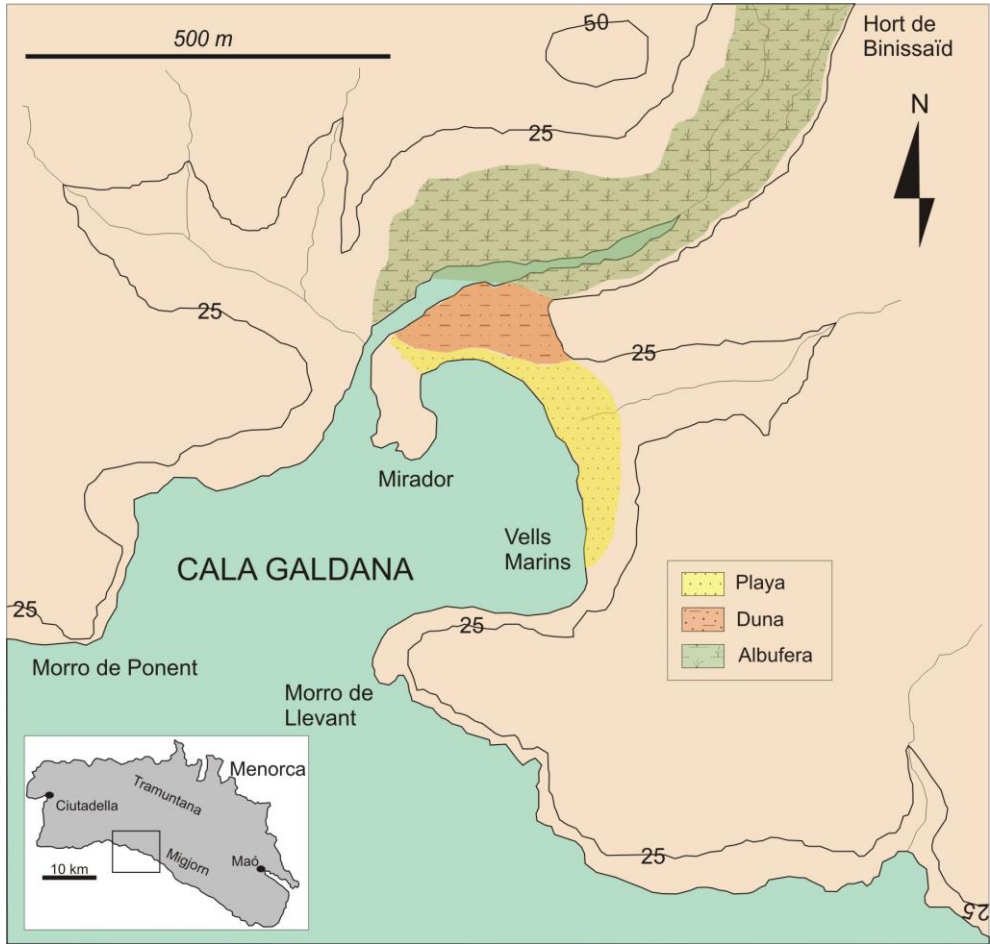
Cala Galdana es un caso típico de cala, bien desarrollada, en la formación de la cual intervienen una conjunción de toda una serie de procesos (i.e. fluvial, kárstico, marino) que actúan bajo el control de la fracturación y la litología y que tienen su espoleta en la variación del nivel marino durante el Pleistoceno–Cuaternario. Cala Galdana tiene, *lato sensu*, el aspecto de una desembocadura fluvial, aunque actualmente muy artificial debido a la fuerte presión turística que ha sufrido la zona en los últimos años. En ella se observa un lecho de fondo plano como consecuencia del relleno sedimentario depositado durante la última transgresión holocena (Fornós *et al.*, 1998) en unas condiciones de ambiente de albufera muy similares a las actuales.

### **Fracturación y karst**

Desde lo alto del acantilado en el margen oriental de la cala, en una vista impresionante, se puede observar la forma circular, ligeramente elíptica que presenta la cala, delimitada por paredes completamente verticales en las cuales es posible observar, con cierta continuidad, una repetición de curvaturas cóncavas que muestran cierta regularidad. Estas formas cóncavas localizadas en las paredes verticales están relacionadas con las zonas de fracturación y diaclasamiento vertical, que presentan una dirección NNE-SSW y que facilitan la formación y la alineación de hundimientos de tipo kárstico (Fig. 4). Estas concavidades, no sólo son visibles en la cala, sino que también están presentes a lo largo de barranco, especialmente en su tramo inferior y se traducen en un curso o trayectoria del barranco meandriforme.

El desarrollo de estos hundimientos o colapsos kársticos está controlado por la evolución de las depresiones kársticas –dolinas– cuya evolución vertical se ve favorecida por la presencia de fracturas verticales, que actúan como conductos preferentes para las aguas de infiltración meteóricas (Fig. 5). Las fracturas también son clave para el desarrollo de los conductos freáticos de tendencia horizontal que se forman y evolucionan en la zona de mezcla de aguas del endokarst litoral, muy cercanos al nivel del mar. Este proceso evolutivo es especialmente visible en la línea de costa actual de los alrededores de Cala Galdana, donde el trazado de la línea de costa y la distribución de los hundimientos hacen muy evidente el control y el papel que juega la fracturación (Rosselló *et al.*, 2002).

Cala Galdana representa, en el modelo evolutivo de las calas, un estadio que podría considerarse como maduro y bien desarrollado, puesto que la interacción entre proce-



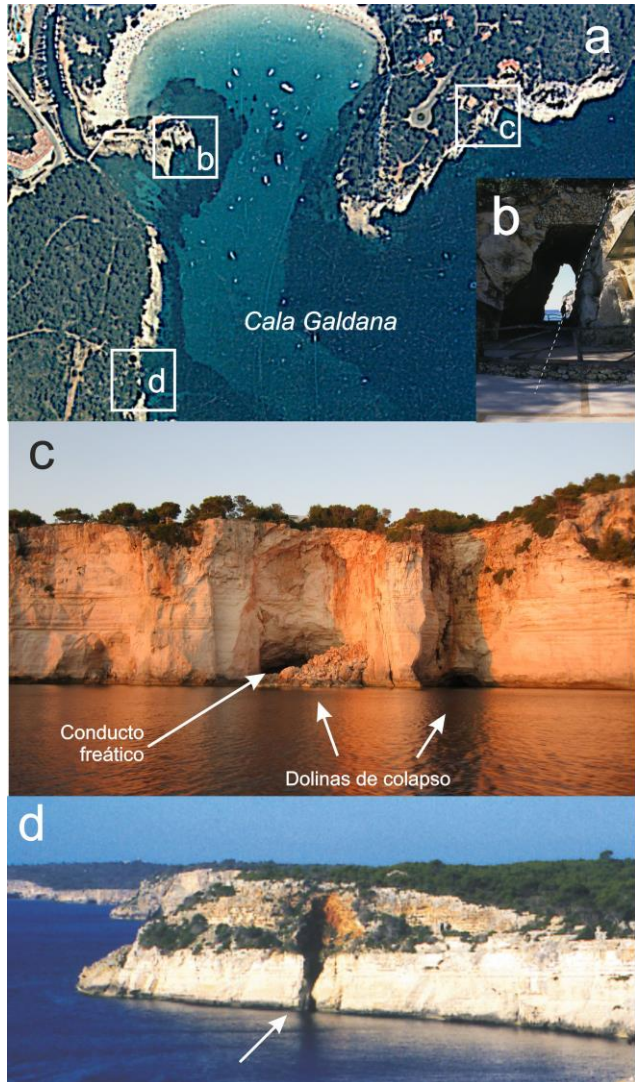
**Figura 3.** Localización y ambientes deposicionales actuales en Cala Galdana.  
**Figura 3.** Cala Galdana location and present depositional environments.

Los kársticos, modelado fluvial, estructura tectónica, así como la dinámica marina, se dan en un marco de interacción total. El modelo de evolución que comentaremos a continuación se puede observar en la mayoría de las calas del *Migjorn* de Menorca, aunque en estadios evolutivos muy diferentes. El ejemplo antagónico a la cala que nos ocupa sería el caso de Cala Sant Vicenç que representaría un estadio inicial, todavía poco desarrollado, aunque con la intervención de todas las variables mencionadas (Fornós, 2004).

Menorca y las Baleares en general presentan unos afloramientos rocosos cuya litología es mayoritariamente carbonatada y donde los procesos kársticos son omnipresentes. Evidentemente, también en la zona litoral. En consecuencia, el interés científico para estudiar la relación de los fenómenos kársticos con la morfogénesis litoral, así como otros aspectos, principalmente en lo tocante al registro y los efectos de las oscilaciones del nivel marino durante el Cuaternario, ha ocupado las líneas de investigación recientes así como ha propiciado el desarrollo de las correspondientes

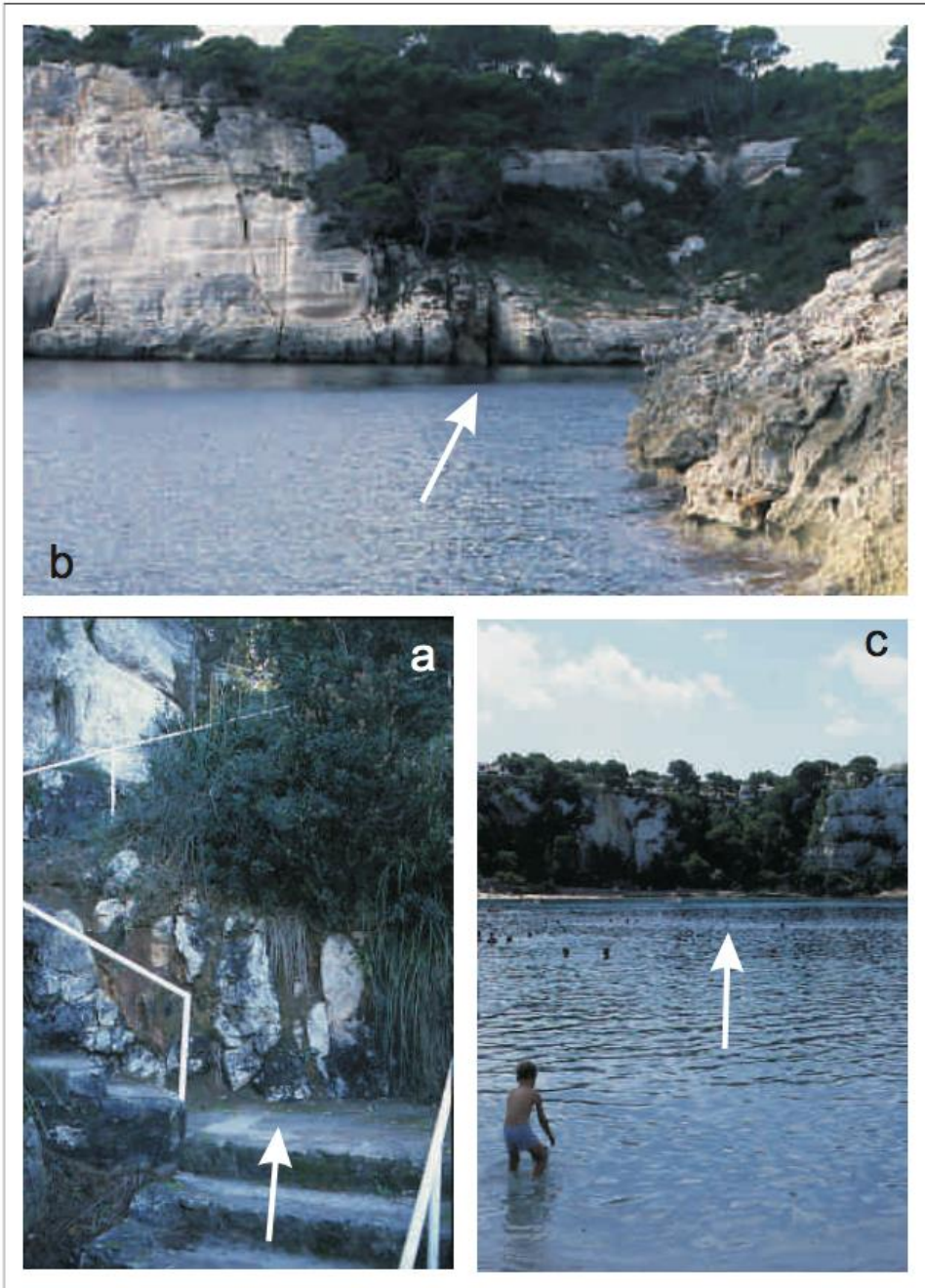
**Figura 4.** Cala Galdana (a) es el resultado de la interacción entre la fracturación (b), los procesos kársticos y marinos (c) y las variaciones texturales de los materiales carbonatados miocenos (d).

**Figura 4.** Cala Galdana (a) results from the interaction of fractures (b), karstic and marine processes (c) and the textural differences among the Miocene carbonate rocks.



técnicas de exploración (Ginés, 2000). En este sentido, la exploración subacuática de diversas cavidades localizadas en la zona litoral, iniciadas a principios de este siglo de una forma sistemática (Gràcia et al., 2000), ha puesto de manifiesto la existencia de toda una serie de grandes cavidades que, por norma general, presentan una distribución paralela a la costa y disminuyen su presencia hacia el interior, del mismo modo que se organizan una serie de conductos en un trazado que prosigue en profundidad los lechos de los principales barrancos. Un fenómeno similar al descrito en zonas tropicales (Whitaker y Smart, 1990; Mylroie y Carew, 1990) y que se relaciona con los procesos de disolución preferente que tienen lugar en los acuíferos carbonatados marinos litorales en la zona de mezcla de aguas (Smart y Whitaker, 1991). Así las cosas, las cavidades del endokarst litoral se relacionan con la cuña de in-





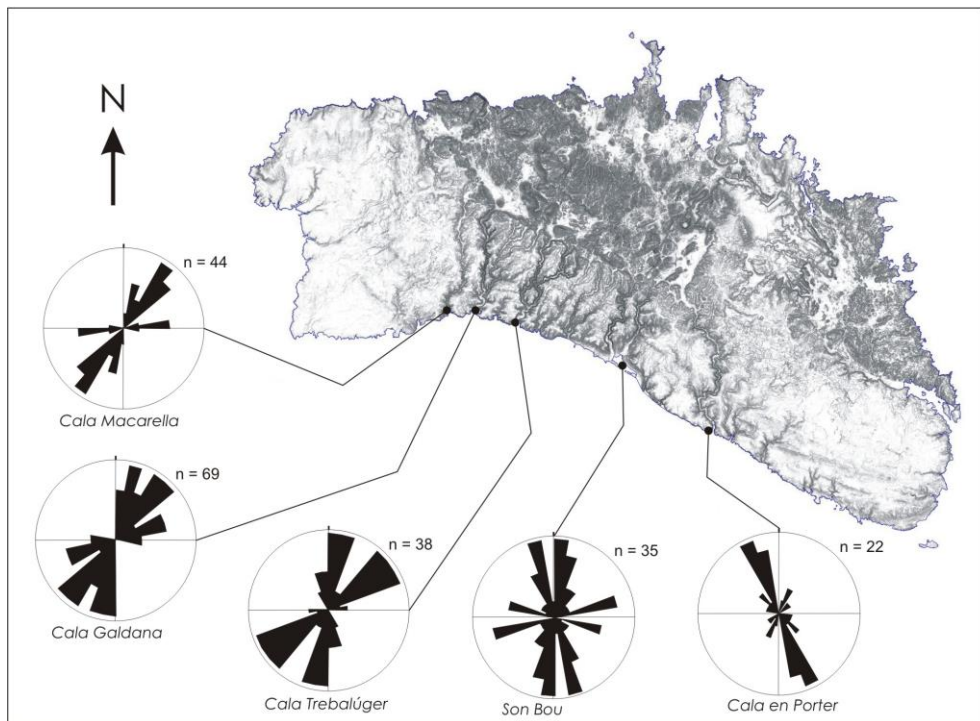
**Figura 5.** La interacción entre fracturación y karst se hace evidente en el modelado de Cala Galdana.

**Figura 5.** The interaction between fractures and karst is quite evident at the Cala Galdana morphorlogy.

trusión marina, aunque mostrando diferentes digitaciones en función de la dinámica fluvial y las variaciones texturales de la litología carbonatada.

El modelado kárstico se caracteriza por la utilización de conductos preferentes, en nuestro caso la fracturación y el diaclasamiento. En el *Migjorn* de Menorca, especialmente en la zona central (Fig. 6), la fracturación distensiva presenta una orientación preferente en la que dominan las direcciones N-S. Es decir, alineaciones perpendiculares a la línea de costa (Gelabert, 2003). Esta orientación ha facilitado la infiltración de la cuña marina en los acuíferos y, por tanto, la efectividad de la disolución en dirección a tierra debido a la canalización preferencial de flujo a través de las líneas de discontinuidad que representan estas fracturas (Back *et al.*, 1984). El trazado en planta de las cavidades kársticas muestra, en consecuencia, una fuerte digitación que acaba por debilitar la estructura de la roca y facilita la acción erosiva del mar. Una acción de zapa que acabará con la captura de dichas cavidades y conductos. De este modo se inicia el desarrollo de entradas marinas, que con su evolución podrán participar en la génesis de las calas. Fenómeno habitual y bastante evidente en el caso del sector de costa que nos ocupa.

Otro aspecto a considerar es la sedimentología de los roquedos miocenos. En concreto, su estratificación y su pendiente deposicional (Fig. 7). En los distintos afloramientos y secciones, tanto costeras como interiores, se observa, claramente, que buena parte de los conductos freáticos siguen la pendiente deposicional y que la alter-



**Figura 6.** El trazado de los barrancos en la zona central del Menorca viene condicionado por las principales direcciones de fracturación.

**Figura 6.** The fluvial drainage network in the center of Menorca is controlled by the main fractures direction.

nancia entre materiales más lutíticos e impermeables con depósitos calcareníticos, haría que estos últimos actuaran como conductos preferentes. En cualquier caso, siempre favorecidos por la facturación vertical y desarrollados durante etapas o periodos de estabilidad del nivel del mar durante el Pliocuaternario.

No puede hablarse de un único sistema o nivel de conductos y cavidades, ya que se observa la superposición de diferentes niveles de disolución a cotas distintas, en parte, debidos a la variabilidad glacioeustática cuaternaria. Esta disposición en vertical del conjunto de cavidades contribuye, sin duda, a la formación de cañones kársticos, depresiones y dolinas. A la larga, la pérdida de soporte hidráulico en periodos glaciales favorecerá su colapso, especialmente en aquellas zonas en las que la formación carbonatada miocena presenta una mayor potencia (mayor altura de los acantilados). Este mecanismo morfogenético no actúa de forma individualizada, por lo que la forma final de la cala vendría condicionada por la interacción de otros procesos, entre ellos el fluvial.

A modo de síntesis, podemos afirmar que los episodios regresivos implicarían la aceleración de los procesos de desmantelamiento e incisión de los barrancos, especialmente por el colapso de cavidades; mientras que en periodos cálidos y transgresivos, esas zonas deprimidas serían invadidas por el mar. Durante la estabilización del nivel marino los procesos sedimentarios provocarían el relleno de los barrancos (Fornós *et al.*, 1998).

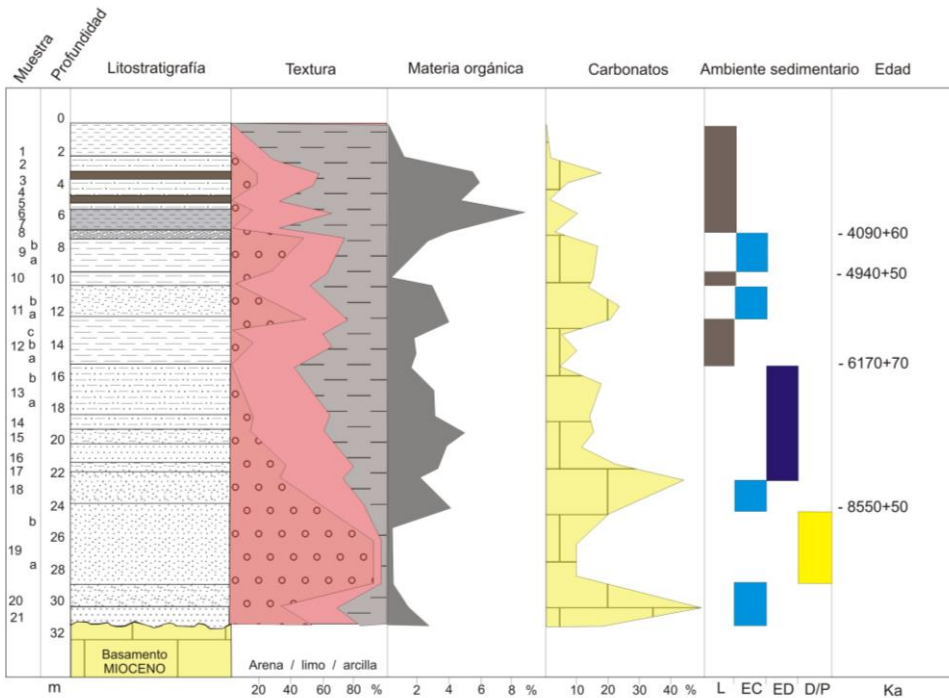
La característica forma de planta elíptica o casi circular que presentan las calas, la verticalidad de las paredes que las delimitan de forma envolvente, así como la forma meandriforme de los barrancos –especialmente en los tramos finales– en los cuales se observa, en la actualidad, un patrón de acumulación inverso al proceso sedimentario



**Figura 7.** Las dos principales unidades sedimentarias del Mioceno del Migjorn de Menorca. En la parte inferior, la Unidad Inferior de Barras y, en la superior, la Unidad Arrecifal. Apréciase la pendiente deposicional.

**Figure 7.** The two main sedimentary units at the Menorca Migjorn Miocene. In the base the Bars Lower Unit, and on top the Reefal Uni. Notice the depositional slope.





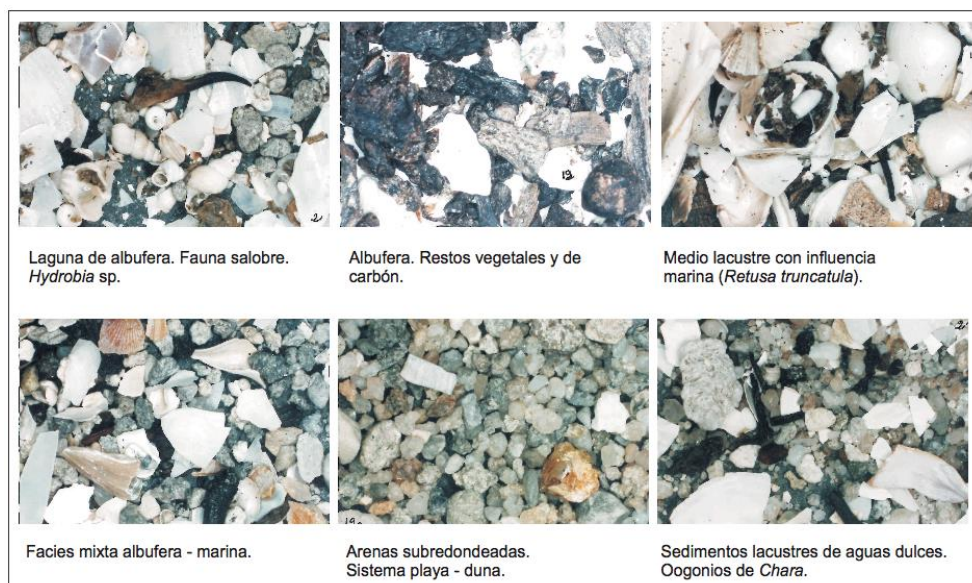
**Figura 8.** Sedimentología de los rellenos de fondo de barrancos en Cala Galdana.  
**Figura 8.** Sedimentology of the bottom valley infilling at Cala Galdana.

que se supone debería presentar un modelado fluvial meandriforme, abogan claramente por una interpretación genética en la que el karst, con su formación de vacíos y su posterior hundimiento, controlaría el desarrollo de esta forma. En cualquier caso, la forma resultante de cala no debe considerarse exclusiva o propia del modelado kárstico, sino que en realidad presenta una elevada variabilidad morfológica fruto de la combinación del karst con los otros procesos y agentes: fluviales, dinámica marina, estructura tectónica y la variación textural y sedimentaria de los depósitos carbonatados. Todo ello dentro del marco y el rol catalizador con el que contribuye la oscilación del nivel marino durante el Cuaternario.

### ***El relleno sedimentario holoceno y su evolución***

Uno de los atributos morfológicos más destacables en los tramos finales de los barrancos y de los fondos de la cala es el característico fondo plano, evidencia inequívoca de un relleno sedimentario importante. Este relleno está diseccionado en la actualidad por un canal de desagüe artificial que da al barranco una salida al mar, superando así la barra arenosa. Antes el cauce del barranco, en función del caudal, rompía la restinga del sistema playa-duna que cierra, cerraba, una pequeña zona interna de albufera.

Los sondeos efectuados en dichos materiales de relleno permiten observar la evolución de la sedimentación en esta área con connotaciones estuarinas (Fig. 8). El registro sedimentario corresponde, como el resto de los rellenos de los barrancos del *Migjorn*, a depósitos lutíticos intercalados con secuencias arenosas propias de ambien-



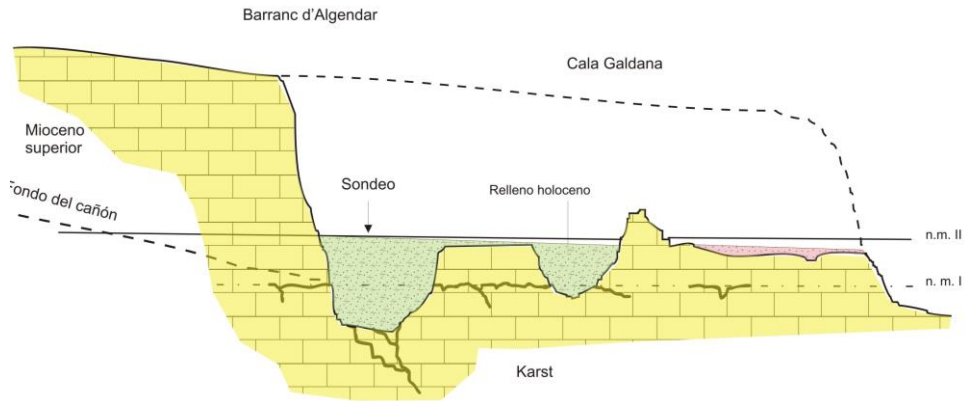
**Figura 9.** Principales facies sedimentarias presentes en la evolución sedimentaria del relleno de los barrancos.

**Figura 9.** Main recognizable sedimentary facies at the bottom valley infilling logs.

tes de transición playa-duna y albufera. La superposición de las facies marca una clara tendencia evolutiva hacia niveles más restringidos y con menor influencia marina (Fig. 9). El conjunto presenta una participación muy débil de la sedimentación detrítica de origen fluvial, fruto –sin duda– de la litología carbonatada que aflora casi exclusivamente la cuenca de drenaje.

La regresión que afecta al área balear en los estadios glaciales del Pleistoceno (Cuerda, 1989) y especialmente el último, así como la posibilidad de interferencia con procesos de tipo tectónico como basculamientos (Fornós et al. 2002), han dado lugar a la incisión de los barrancos por debajo del presente nivel marino en las zonas costeras del Migjorn de Menorca. La fuerte erosión mecánica favorecida por el descenso brusco del nivel de base, y sin duda también por los procesos de karstificación asociado, dio como resultado encajamientos profundos que actualmente se pueden observar. Este encajamiento no es uniforme a lo largo de todo el Migjorn, sino que se ve favorecido por las condiciones hidrológicas de la isla. La máxima incisión de los barrancos puede apreciarse precisamente en los barrancos que llegan a capturar los niveles impermeables de la Tramuntana. Circunstancia que no se da en otros barrancos a pesar del contacto entre los materiales carbonatados y la región septentrional. Es en este último caso el drenaje se ve favorecido por los procesos subterráneos kársticos eliminando de este modo el volumen de agua que puede circular en superficie y disminuyendo, por tanto, la incisión mecánica de los cauces. Este proceso además conlleva la poca uniformidad en la potencia de los rellenos sedimentarios (Fig. 10).

El ascenso del nivel de base originado en el presente interglaciar por la subida del nivel del mar durante el Holoceno (el máximo flandriense se produciría en la cercana isla de Mallorca alrededor de los 7.000 años BP según Goy et al., 1997), implicaría la



**Figura 10.** En relleno holoceno del fondo de los barrancos presenta variaciones importantes de potencia debido a la presencia de depresiones kársticas.

**Figura 10.** *The Holocene bottom valley infilling shows significant thickness variations because the presence of karstic depressions.*

paralización del proceso de incisión en las partes más bajas de los torrentes, y se iniciaría con ello el relleno en las partes más cercanas a la actual línea de la costa. Hoy por hoy, sistemas playa-duna con albuferas y marismas asociadas y que, en la misma línea de costa, originan la característica forma de cala (Rosselló et al., 1997). Este proceso sedimentario ligado a la morfogénesis kárstica provocaría un cierre rápido de los barrancos por una restinga, que limitaría una zona interna de albufera cercada por las paredes de la incisión anterior. La sedimentación lacustre/palustre asociada refleja las variaciones de salinidad y la presencia de facies típicas de estos ambientes de transición con influencias continentales o marinas alternantes, como consecuencia de las pequeñas oscilaciones del nivel del mar y las variaciones de tipo climático.

### 3 | Las eolianitas pleistocenas adosadas a los acantilados miocenos

Uno de los fenómenos sedimentarios más característicos del litoral de la isla de Menorca es la presencia de depósitos de eolianitas peistocenas adosadas a los acantilados verticales (Fig. 11) recortados en las unidades pleistocenas en el *Migjorn*, aunque también las eolianitas están presentes en el litoral de la zona de *Tramuntan*., En este último caso suelen estar más relacionados con ensenadas y costas bajas.

Un bonito ejemplo de eolianitas adosadas al acantilado lo tenemos en los acantilados del este de Cala en Porter, donde de forma adosada a los acantilados verticales que llegan a superar los 25 m de altura se observa una importante acumulación eólica (Fig. 12). Formada por una calcarenita de composición casi en su totalidad bioclástica –que se conoce localmente con el nombre de *marès*– está dispuesta de forma adosada al pie del acantilado. Morfológicamente el depósito dunar está compuesto de por dos unidades deposicionales distintas. En la base se trata de una duna adosada al acantilado (*cliff-front dune*) con características de duna *eco* que presenta una marcada laminación milimétrica y en la que son visibles tanto las láminas de barlovento, con buzamientos que superan los 25°, como las láminas de so-



**Figura 11.** Acantilados del sector occidental de Cala en Porter, con acumulaciones de eolianitas de forma adosada a los acantilados, especialmente presentes en recovecos protegidos de la erosión marina.

*Figura 11. Cliffs westwards from Cala en Porter. Notice the presence of eolianites attached to the cliff face in the sheltered coast undulations.*



**Figura 12.** Acantilados del sector oriental de Cala en Porter, donde se pueden apreciar las espectaculares acumulaciones de dunas adosadas pleistocenas.

*Figura 12. Cliffs eastwards from Cala en Porter. Notice the presence of large Pleistocene cliff attached eolianites.*

tavento, con buzamientos que llegan a superar puntualmente los  $30^\circ$ . En la cresta de la duna, que se dispone de forma paralela al acantilado, son claramente visibles estructuras en zig-zag. Cuando las láminas presentan un buzamiento menor son también visibles estructuras de deformación producidas por la presión ejercida en el deambular de vertebrados caprinos (concretamente de *Myotragus balearicus*, Fornós *et al*, 2002).

La segunda unidad eólica está separada de la anterior por una ligera superficie de erosión con el desarrollo incipiente de un paleosuelo producto de una acumulación coluvial de escasa importancia. Se trata de una duna remontante (*climbing dune*) caracterizada por una fina laminación milimétrica que supera los  $20^\circ$  de buzamiento en dirección al acantilado. En este caso no son visibles las láminas de barlovento. Esta duna remontante no llega a superar el acantilado. Cabe considerar, también, la presencia importante de bloques de diversas dimensiones (desde clastos de orden centimétrico a bloques de orden métrico) en la zona de contacto de la duna con el acantilado debido a la dinámica erosiva del propio talud.

Las dataciones por OSL, preliminares, aportan a estos depósitos una edad correspondiente al Pleistoceno superior. En concreto la duna inferior tendría una edad aproximada de 115 ka que se correspondería con el estadio isotópico marino del

5d; mientras que la duna superior, con una edad aproximada de 62 ka, se atribuiría al MIS 4. En ambos casos parece clara la relación de los depósitos eólicos con las etapas regresivas desde el último estadio interglaciario (MIS 5e). Dada la elevada producción de arenas bioclásticas depositadas en la plataforma marina en momentos de mar alto (periodos cálidos) grandes bancos de arena quedarían expuestos durante el inicio de las etapas regresivas, permitiendo la removilización de dichos depósitos marinos arenosos por la acción del viento que acabarían acumulándose al pie de los acantilados, los cuales, a su vez, actuarían en forma de barrera y/o trampa sedimentaria. En cualquier caso, sí que parece evidente que la acumulación de dichos depósitos se corresponde con el momento de descenso del nivel marino durante los episodios regresivos acaecidos desde el último interglaciario (Fornós *et al.*, 2012).

### Agradecimientos

El presente trabajo es una contribución a los proyectos de investigación MINECO CGL2013-48441-P y CGL2016-79246-P (AEI/FEDER, UE).

### Bibliografía

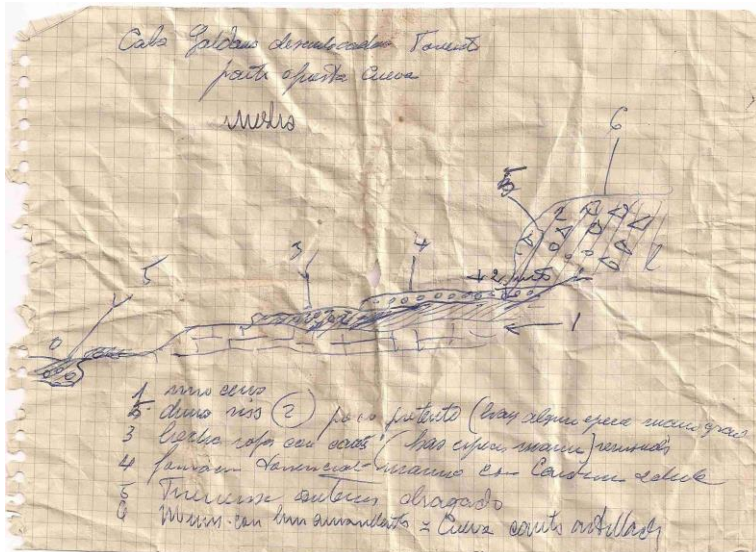
- Back, W., Hanshaw, B.B. y Van Driel, J.N. (1984): Role of groundwater in shaping the Eastern Coastline of the Yucatan Peninsula, Mexico. En: LaFleur, R.G. (ed.) *Groundwater as a Geomorphic Agent*. Allen and Unwin, Inc. London. The Binghamton Symposia in Geomorphology: International Series, 13(12): 281-293.
- Cuerda, J. (1989): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Institut d'Estudis Baleàrics. Palma de Mallorca, 304 pp.
- Fornós, J.J. (2003): El karst y la evolución del litoral del Migjorn de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 101-110. Palma, AGE, Universitat de València, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fornós, J.J., Bromley, R.G.; Clemmensen, L.B. y Rodríguez-Perea, A. (2002): Traces and trackways of *Myotragus balearicus* Bate (Artyodactyla, Caprinae) in Pleistocene aeolianites from Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 180: 277-313.
- Fornós, J.J. (2004): Morfología costanera i processos litorals. El paper de la fracturació i el karst. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y 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. Palma, Societat d'Història Natural de Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Fornós, J.J., Clemmensen, L.B., Gómez-Pujol, L., Ginés, A. y Ginés, J. (2012): Pleistocene eolianites and low sea levels. En: Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Onac, B.P. y Fornós, J.J. (eds.), *Mallorca: a Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 85-110. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fornós, J.J., Fumanal, M.P., Pons, G.X., Barón, A., Fornés, A., Pardo, J.E., Rodríguez-Perea, A., Rosselló, V.M., Segura, F. y Servera, J. (1998): Rebliment holocènic a la vall incisa del barranc d'Algendar (Cala Galdana, sud de Menorca, Mediterrània Occidental). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 41: 173-189.
- García-Senz, J.M. (1985): *Estudio geomorfológico del karst del Migjorn menorquí*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Geodinámica Externa e Hidrogeología. Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona. 51 pp.
- Gelabert, B. (2003): La estructura geológica de Menorca. Las zonas de Tramuntana y Migjorn. A: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de*



- Menorca. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 39-48. Palma, AGE, Universitat de València, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Ginés, J. 2000. *El karst litoral en el levante de Mallorca; una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra. Palma, Universitat de les Illes Balears.
- Ginés, J. 2003. El modelado kárstico. In: Rosselló, V.M.; Fornós, J.J. & Gómez-Pujol, L. (Eds.) *Introducción a la Geografía Física de Menorca. Guía de Campo de las XVIII Jornadas de Geografía Física*. AGE - Universitat de València - Mon. Soc. Hist Nat. Balears, 10: 65-70. Palma de Mallorca.
- Ginés, J. y Fornós, J.J. (2004): Caracterització del karst del Migjorn. La seva contribució al modelat del territori. Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 259-274. Palma, Societat d'Història Natural de Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Goy, J.L., Zazo, C. y Cuerda, J. (1997): Evolución de las cuencas margino-litorales de la costa de Mallorca (I. Baleares) durante el último y presente interglacial: nivel del mar Holoceno y clima. *Boletín Geológico y Minero*, 108: 455-463.
- Gràcia, F., Clamor, B. y Lavergne, J.J. (2000): Les coves de Cala Varques (Manacor, Mallorca). *Endins*, 23: 41-57.
- Myroie, J.E. y Carew, J.L. (1990): The flank margin model for dissolution cave development in carbonate platforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 413-424.
- Penck, A. (1894): *Morphologie der Erdoberfläched*. Engelhorn. Stuttgart.
- Rosselló, V.M. (2005): Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica. *Cuadernos de Geografía*, 77, 1-18.
- Rosselló, V.M. (1995): Les cales, un fet geomòrfic epònim de Mallorca. *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 38, 167-180.
- Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Fumanal, M.P., Pardo, J.E. y Rodríguez-Perea, A. (1997): Elementos morfogenéticos de calas y barrancos del sur de Menorca. *Dinámica Litoral Interior. Actas XV Congreso de Geógrafos Españoles*, 1: 245-256.
- Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Gelabert, B., Giménez, J., Ginés, J., Pardo, J. y Segura, F. (2002): El papel del karst en el macromodelado litoral: el ejemplo de las calas de las Islas Baleares. En: Carrasco, F., Durám J.J. y Andreo, B. (eds), *Karst and Environment*: 329-335. Madrid, ITGME.
- Servera, J. (1997): *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesis Doctoral, Departament de Ciències de la Terra. Palma, Universitat de les Illes Balears.
- Smart, P.L. y Whitaker, F.F. (1991): Karst processes, hydrology and porosity evolution. En: *Palaeokarsts and Palaeokarstic Reservoirs*. (ed. V.P. Wright, M. Esteban y P.L. Smart), P.R.I.S. Occ. Publ. Series, 2: 1- 54. Reading, University of Reading.
- Whitaker, F.F. y Smart P.L. (1990): Active circulation of saline ground waters in carbonate platforms: Evidence from the Great Bahama Bank. *Geology*, 18: 200-203.



## Societat d'Història Natural de les Balears



Cala Galdana (Menorca), croquis inédito de J. Cuerda. Colección J. Cuerda, SHNB



G CONSELLERIA  
O MEDI AMBIENT,  
I AGRICULTURA  
B I PESCA  
/ DIRECCIÓ GENERAL  
ESPAIS NATURALS  
I BIODIVERSITAT



G VICEPRESIDÈNCIA  
O I CONSELLERIA  
I INNOVACIÓ,  
B RECERCA I TURISME  
/ DIRECCIÓ GENERAL  
INNOVACIÓ I RECERCA



Balearic Islands  
Coastal Observing  
and Forecasting  
System



CONSELL INSULAR  
DE MENORCA



IME  
INSTITUT MENORQUÍ D'ESTUDIS  
CONSELL INSULAR DE MENORCA



UNIÓ EUROPEA  
Fons Europeu de  
Desenvolupament Regional  
  
una manera de fer  
europa



Universitat  
de les Illes Balears



MENORCA  
TALAYÓTICA  
Candidata Patrimoni Mundial



MENORCA  
RESERVA DE BIOSFERA

Con la colaboración de:



Sociedad Española  
de Geomorfología



AJUNTAMENT DE MAÓ



Sociedad  
Geológica  
España



BIOGEOMED  
Research group, UIB



MUSEU DE  
MENORCA